



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

Análisis mecánico y numérico del terreno de  
cimentación en plataformas eólicas offshore

Jorge Soriano Vicedo



Tesis **Doctorales**

UNIVERSIDAD de ALICANTE

Unitat de Digitalització UA  
Unidad de Digitalización UA

## Índice General:

<b>ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS .....</b>	<b>II</b>
<b>ESTRUCTURA Y DESARROLLO DEL DOCUMENTO .....</b>	<b>1</b>
<b>PRIMERA SECCIÓN. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y DESARROLLO DE LA MEMORIA ..</b>	<b>3</b>
1.1. Resumen. ....	3
1.2. Abstract.....	4
1.3. Introducción y bases de partida .....	4
1.4. Objetivos de la Tesis Doctoral.....	15
1.5. Metodología de la investigación .....	17
1.6. Discusión .....	32
<b>SEGUNDA SECCIÓN. TRABAJOS PUBLICADOS. COMPENDIO DE ARTÍCULOS. ....</b>	<b>45</b>
2.1. Primer artículo .....	45
2.2. Segundo artículo .....	47
2.3. Tercer artículo .....	48
<b>TERCERA SECCIÓN. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>49</b>
3.1. Conclusiones .....	49
3.2. Futuras líneas de investigación.....	53
<b>PRIMER APÉNDICE. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>55</b>
<b>SEGUNDO APÉNDICE. OTROS TRABAJOS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>59</b>

Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante



## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURA	CONTENIDO	PÁGINA
1	Vindeby, Dinamarca. Considerado el primer parque eólico marino del mundo gracias a sus 11 aerogeneradores	6
2	Potencia instalada de eólica marina por país a principios de 2021	6
3	Tipología de cimentación y su profundidad alcanzada	9
4	Número de cimentaciones por tipología en el año 2019	9
5	Ensayos llevados a cabo en el proyecto PISA	15
6	Diagrama del proyecto PISA	16
7	Arena de sílice	19
8	Gráfica del porcentaje que pasa por cada uno de los tamices	20
9	Colocación de la arena en el ensayo de corte directo	21
10	Gráfico de los esfuerzos normales y cortantes para el Ensayo de corte directo	22
11	Probeta sumergida en el ensayo triaxial	22
12	Boceto de la balsa en metros	24
13	Balsa de acero para los ensayos	24
14	Disposición de las galgas	25
15	Origen de referencia del sistema de coordenadas	25
16	Impermeabilizante para protección de las galgas	26
17	Parámetros de los ensayos del proyecto PISA	27
18	Prensa hidráulica utilizado en los ensayos	28
19	Ensayo en condiciones sumergidas	29
20	Platabanda circular metálica para una mejor distribución de la carga aplicada	29
21	Descompactando la arena mediante un vibrador	30
22	Modelado del ensayo mediante elementos finitos	31
23	Colocación de carga superficial equivalente al agua para la situación sumergida	31
24	Fuerza para cada tubo en posición hueca y plana para la velocidad de 5 mm/min	34
25	Fuerza para cada tubo en posición hueca y plana para la velocidad de 10 mm/min	34
26	Fuerza para cada tubo en posición hueca y plana para la velocidad de 20 mm/min	34
27	Fuerza para cada velocidad en posición hueca y plana para el tubo de Ø80 mm	35
28	Fuerza para cada velocidad en posición hueca y plana para el tubo de Ø115 mm	36
29	Fuerza para cada velocidad en posición hueca y plana para el tubo de Ø194 mm	36
30	Fuerza para cada tubo en posición hueca y plana para la velocidad de 5 mm/min	38
31	Fuerza para cada tubo en posición hueca y plana para la velocidad de 10 mm/min	38
32	Fuerza para cada tubo en posición hueca y plana para la velocidad de 20 mm/min	38
33	Fuerza para cada tubo en posición hueca y plana para el tubo de Ø80 mm	39
34	Fuerza para cada tubo en posición hueca y plana para el tubo de Ø115 mm	40
35	Fuerza para cada tubo en posición hueca y plana para el tubo de Ø194 mm	40
36	Fuerza de hincado para todos los ensayos	41
37	Relación entre los valores obtenidos de los ensayos con los FEM	43

TABLA	CONTENIDO	PÁGINA
1	Granulometría Arena de Sílice	18
2	Granulometría Mezcla de Arena	18
3	Valores de densidad	20
4	Valores obtenidos en el Ensayo de corte directo	21
5	Valores obtenidos en el ensayo de tracción del acero	23
6	Situación de cada una de las galgas	26
7	Dimensiones tubos y restricciones del proyecto PISA	27
8	Posición de las galgas (ensayo a escala) y Posición de los nodos (FEM)	32
9	Ensayos en seco. Fuerza de hincado. Variación entre velocidades	35
10	Ensayos en seco. Fuerza de hincado. Variación entre diámetros	37
11	Ensayos sumergidos. Fuerza de hincado. Variación entre velocidades	39
12	Ensayos sumergidos. Fuerza de hincado. Variación entre diámetros	41
13	Desplazamientos de los ensayos en escala y los FEM para 194 mm en Condiciones Sumergidas	42
14	Desplazamientos de los ensayos en escala y los FEM para 194 mm en Condiciones Secas	42
15	Desplazamientos de los ensayos en escala y los FEM para 115 mm en Condiciones Sumergidas	42
16	Desplazamientos de los ensayos en escala y los FEM para 115 mm en Condiciones Secas	42
17	Principales Características del Primer Artículo en la Colección de Publicaciones	45
18	Principales Características del Segundo Artículo en la Colección de Publicaciones	55
19	Principales Características del Tercer Artículo en la Colección de Publicaciones	75
20	Principales Características del Cuarto Artículo	103

Universidad de Alicante





Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

## **ESTRUCTURA Y DESARROLLO DEL DOCUMENTO**

La estructura y desarrollo de esta Tesis Doctoral se han realizado de acuerdo con las pautas y requisitos establecidos por la Universidad de Alicante para la presentación de tesis en formato de compendio de publicaciones. Estos criterios se encuentran detallados en el Reglamento de la Escuela de Doctorado de la Universidad de Alicante. (Consejo de Gobierno de la Universidad de Alicante de 17 de diciembre de 2013, modificado por Consejo de Gobierno de 26 de abril de 2018, BOUA del 26 de abril de 2018, y Consejo de Gobierno de la Universidad de Alicante de 30 de julio de 2019, BOUA de 30 de julio de 2019).

De acuerdo con lo mencionado, la presente Tesis Doctoral se ha estructurado en tres secciones y dos apéndices, cada uno de los cuales contiene diversos epígrafes que abordan diferentes aspectos de la investigación.

### **• PRIMERA SECCIÓN. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y DESARROLLO DE LA MEMORIA.**

La primera sección constituye la parte más extensa de esta Tesis Doctoral, ya que establece los fundamentos y el punto de partida de la investigación, y, por lo tanto, incluye la mayor cantidad de epígrafes.

Se presenta un resumen en castellano e inglés que proporciona una síntesis breve del contenido del documento y de la investigación llevada a cabo en la Tesis Doctoral.

A continuación, se encuentra la Introducción, que describe los diferentes aspectos de investigación y realiza una breve revisión del estado del arte de la materia y la evolución de los parques eólicos offshore y sus cimentaciones.

Posteriormente, se detallan los objetivos y se explica la motivación detrás del trabajo realizado.

Luego, se describe la metodología empleada en la investigación, exponiendo el enfoque seguido y justificando la elección de publicaciones en forma de artículos que conforman la Tesis. En esta búsqueda, se examina la normativa vigente, la tipología de cimentación actual y la interacción suelo-estructura a la hora de realizar el hincado.

Por último, la discusión, donde se proporciona una descripción detallada de los resultados de la investigación y se realiza un análisis crítico de los mismos. Este apartado es esencial, ya que se analizan datos recopilados de los ensayos a escala realizados en el laboratorio para condiciones secas y sumergidas.

## • SEGUNDA SECCIÓN. TRABAJOS PUBLICADOS.

En la segunda sección, se presenta la colección de publicaciones indexadas que han resultado de la investigación realizada y que han dado origen a esta Tesis Doctoral. Con el fin de facilitar su análisis, se incluye una tabla que resume los detalles relevantes de cada artículo, como los autores, la revista en la que fueron publicados y los indicadores de calidad asociados a cada uno.

Además, se acompaña un breve texto justificativo para cada publicación, que resalta la relevancia y contribución de cada artículo a la investigación general. También se incluye la versión completa y original de cada artículo tal y como fue publicado en su respectiva revista.

## • TERCERA SECCIÓN. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En la tercera sección, se presentan los principales argumentos, reflexiones y logros alcanzados a lo largo de la investigación, resaltando las conclusiones obtenidas como resultado de esta labor. Sin embargo, la importancia de la investigación en el campo de los elementos offshore no se detiene aquí. Se propone continuar con los trabajos en esta área para seguir explorando nuevos desafíos y oportunidades en el desarrollo científico y tecnológico relacionado con el dimensionamiento de las cimentaciones en la eólica offshore.

Se abre el camino para alcanzar nuevas metas en este campo, impulsando aún más el avance de estas tecnologías sostenibles y su aplicación en el contexto de la generación de energía marina. Se enfatiza la relevancia de seguir explorando y abordando los desafíos que surgen en esta área, con el objetivo de contribuir al crecimiento y mejora continua de la energía renovable en el medio marino.

## • PRIMER APÉNDICE. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

El primer apéndice de esta Tesis Doctoral presenta una recopilación exhaustiva de todas las referencias bibliográficas utilizadas durante la formación del doctorando y en la elaboración de las diversas contribuciones científicas que conforman este trabajo de investigación. Se incluyen las citas y fuentes que han sido fundamentales para el desarrollo y fundamentación de los conceptos, teorías y resultados presentados en la tesis, asegurando así la integridad y rigor académico del trabajo.

## • SEGUNDO APÉNDICE. OTROS TRABAJOS DE LA INVESTIGACIÓN

Finalmente, se agrega un cuarto artículo presentado a congreso que está estrechamente vinculado con el contenido de la Tesis Doctoral.



## **PRIMERA SECCIÓN. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y DESARROLLO DE LA MEMORIA**

### 1.1. Resumen.

Durante las últimas décadas, la sociedad y la economía han mostrado un fuerte compromiso con las energías renovables en general, y con las energías marinas en particular. Este enfoque se refleja claramente en la Agenda 2030 y en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente en el ODS 7, que se centra en asegurar el acceso a una energía moderna y sostenible. Además, los ODS 13 y 14 resaltan la importancia de combatir el cambio climático, sus efectos y utilizar de manera sostenible los recursos marinos.

Dentro de las energías renovables marinas, la energía eólica marina ha sido la que ha experimentado mayores avances tecnológicos y una mayor implantación. Por este motivo, gran parte de las investigaciones científicas realizadas recientemente en el campo de las energías marinas han estado enfocadas en revisar, debatir y cuestionar los diseños de los elementos estructurales y las cimentaciones de los parques eólicos offshore.

Las incertidumbres presentes en este campo de la ingeniería se deben en gran medida a la limitada experiencia del sector, el cual solo cuenta con unas pocas décadas de implementación, así como a las constantes modificaciones y discrepancias en las normativas existentes. Estas investigaciones y reflexiones se han vuelto esenciales para garantizar el desarrollo sostenible y efectivo de la energía eólica marina, impulsando su potencial como una fuente valiosa y respetuosa con el medio ambiente en el panorama energético global.

Basándose en los fundamentos anteriores, esta investigación ha llevado a cabo un análisis exhaustivo del proceso de hincado de las cimentaciones de los monopilotes tanto en condiciones secas como en condiciones sumergidas. Este estudio del proceso de hincado se ha llevado a cabo mediante un ensayo a escala reducida en el laboratorio de estructuras de la Universidad de Alicante. Para ello, se han tenido en cuenta diversas variables involucradas en los parques eólicos marinos como el material empleado del monopilote, la arena del lecho marino o la velocidad y fuerza de hincado.

Por último, los valores obtenidos en los ensayos que se describen en los siguientes apartados han sido comparados con modelos de elementos finitos con la finalidad de obtener una relación entre el ensayo a escala en el laboratorio y los ensayos que se podrían realizar a escala real.

## 1.2. Abstract.

Over the past decades, society and the economy have demonstrated a strong commitment to renewable energy in general, and marine energy in particular. This focus is clearly reflected in the 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals (SDGs), especially SDG 7, which emphasizes ensuring access to modern and sustainable energy. Additionally, SDGs 13 and 14 highlight the importance of combating climate change, its effects, and the sustainable use of marine resources.

Within marine renewable energies, offshore wind energy has seen the most significant technological advancements and greater implementation. For this reason, much of the recent scientific research in the field of marine energy has been focused on reviewing, debating, and questioning the designs of structural elements and foundations of offshore wind farms.

The uncertainties in this field of engineering are largely due to the limited experience in the sector, which has only a few decades of implementation, as well as the constant modifications and discrepancies in existing regulations. These research efforts and reflections have become essential to ensure the sustainable and effective development of offshore wind energy, harnessing its potential as a valuable and environmentally friendly energy source in the global energy landscape.

Building on the above foundations, this research has conducted a comprehensive analysis of the piling process of monopile foundations, both in dry and submerged conditions. This study of the piling process was carried out through a scaled laboratory test in the structures laboratory at the University of Alicante. Various variables involved in offshore wind farms, such as the material used for the monopile, the seabed sand, and the piling speed and force, were taken into account.

Finally, the values obtained in the tests described in the following sections have been compared with finite element models to establish a relationship between the laboratory-scale test and full-scale tests that could be conducted in real-world conditions.

## 1.3. Introducción y bases de partida

El núcleo fundamental de esta Tesis Doctoral radica en el punto de encuentro entre los proyectos de energía eólica marina y la producción de energía limpia derivada del mar, un área de estudio comúnmente referida como la economía azul. Al iniciar esta investigación, se abordaron una serie de cuestiones que exploraban si la economía y la población podrían sostener un crecimiento indefinido, si la humanidad podría adoptar un ritmo más lento de progreso para garantizar la preservación del planeta, entre otros. La crisis ecológica actual puede estar planteando amenazas considerables para la existencia misma de la humanidad, lo que podría cambiar la naturaleza de estas preguntas.

En este contexto, esta Tesis Doctoral se enfoca en las energías renovables, en particular aquellas que son limpias y casi inagotables, que la naturaleza proporciona. Estas energías poseen un alcance local o regional que puede extenderse a nivel global. Además de reducir la dependencia de los combustibles fósiles, estas fuentes energéticas diversifican los suministros, fomentan la innovación tecnológica y la investigación, y generan oportunidades de empleo.

Con esta perspectiva en mente, se procederá en las páginas siguientes de esta introducción a establecer los fundamentos esenciales en el ámbito de la energía eólica marina, que sirvieron de punto de partida para llevar a cabo la presente investigación.

En Suecia, en 1990, se realizó la instalación del primer aerogenerador en el mar. Este proyecto fue de naturaleza experimental y se ubicó a 350 metros de la costa en una zona con una profundidad de agua de 6 metros. La estructura consistió en un trípode apoyado y anclado al lecho marino arenoso, con una capacidad eléctrica de 220 kW por unidad. Sin embargo, la verdadera pionera en fama fue la construcción del parque eólico Vindeby en Dinamarca en 1991.

Dicho parque duró desde 1991 hasta 2016 y sirvió como campo de ensayo para probar, aprender y aplicar las experiencias aprendidas en los siguientes parques. En 2016 los costes de mantenimiento superaban a los beneficios económicos, así que se tomó la decisión de desmantelar el parque.

De esta forma, Vindeby se erigió como un hito no solo por ser el pionero de parques eólicos marinos instalados, sino también por ser el primero en ser desmantelado. Sus elementos, cuidadosamente desmontados y trasladados a la costa mediante una embarcación jack-up, encontraron una segunda vida como piezas de repuesto para otros generadores en alta mar. Para septiembre de 2017, ya no quedaba rastro del que fue el punto de inicio de la energía eólica offshore.

Vindeby estaba compuesto por un grupo de 11 turbinas, cada una con una capacidad individual de 450 kW, dispuestas en aguas someras a unos 2 kilómetros de la línea costera y sostenidas por estructuras monopilote.

Después de este primer parque, muchas más instalaciones similares siguieron su ejemplo. En treinta años, para finales de 2021, en el mundo se había alcanzado una capacidad instalada de 57.176 MW en parques eólicos marinos. Además, la entrada de países como China, Vietnam, Japón, Corea del Sur, Estados Unidos y Taiwán en la industria, con una capacidad combinada de 29.000 MW, impulsó un rápido avance del sector. Como resultado, la balanza geográfica se inclinó gradualmente hacia Asia.





Figura 1. Vindeby, Dinamarca. Considerado el primer parque eólico marino del mundo gracias a sus 11 aerogeneradores. Fuente: Project Manager Institute (PMI)

Como se ha mencionado, en la actualidad, la capacidad mundial de parques eólicos marinos supera los 57.000 MW, lo que destaca claramente las ventajas tradicionalmente asociadas a estas instalaciones: confiabilidad, eficiencia, sostenibilidad y respeto por el medio ambiente. Además, generan beneficios económicos para las compañías que los construyen y operan, lo que los convierte en una opción atractiva en comparación con otras formas de generación eléctrica.

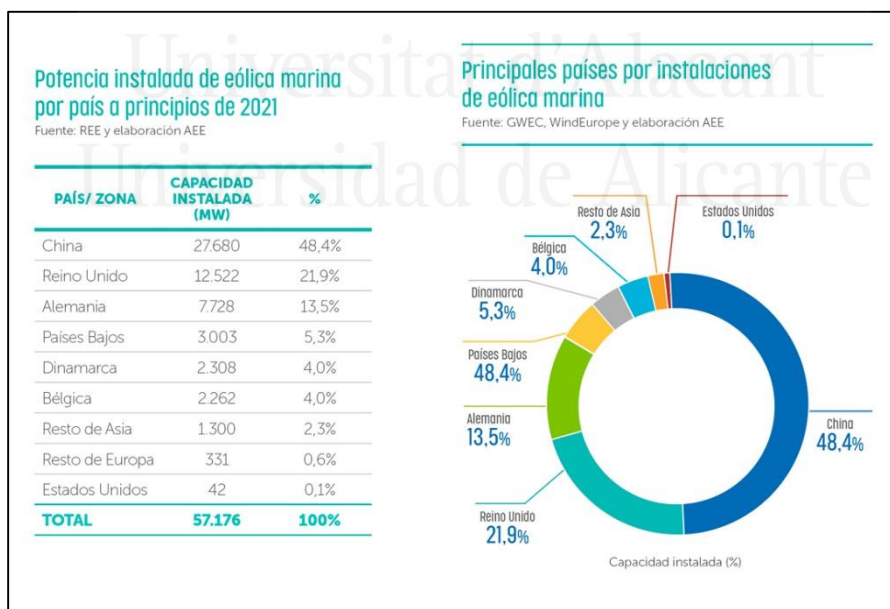


Figura 2. Potencia instalada de eólica marina por país a principios de 2021. Fuente: Asociación Empresarial Eólica (AEE)

A pesar de su éxito, el camino tecnológico para desarrollar estos parques no ha sido fácil. El sector ha enfrentado una serie de desafíos principales, entre los cuales se incluyen los siguientes:

1. Localización de sitios óptimos: Encontrar ubicaciones que aprovechen eficientemente los recursos eólicos, al mismo tiempo que cumplan con requisitos medioambientales, sociales, territoriales y geopolíticos.
2. Desafíos medioambientales extremos: Afrontar condiciones climáticas adversas que dificultan la operación, el mantenimiento y la accesibilidad de los parques eólicos marinos.
3. Impacto del cambio climático: Abordar el aumento del nivel del mar debido al cambio climático, que plantea incertidumbres normativas y retos adicionales en el comportamiento de las estructuras.
4. Interacción con el terreno marino: Asegurar la estabilidad de las estructuras frente a fenómenos como la socavación o el descalce debido a las condiciones del fondo marino.
5. Tipología de cimentaciones: Lidar con el creciente uso de elementos flotantes, sin descuidar el predominio de las cimentaciones monopilotadas.
6. Tamaño de los parques y vida útil: Encontrar el equilibrio para que los parques sean económicamente viables y explorar la posibilidad de prolongar su vida útil para maximizar la rentabilidad.
7. Procesos constructivos y ventanas temporales: Gestionar los tiempos y las limitaciones para llevar a cabo la construcción de manera eficiente.
8. Heterogeneidad de fabricantes y normativas: Afrontar las diferencias entre los fabricantes de aerogeneradores, equipos industriales y eléctricos, así como las distintas normativas y recomendaciones existentes.

Enfrentarse a estos retos ha sido fundamental para el desarrollo y la evolución exitosa de la industria de parques eólicos marinos.

Entre 1990 y 2023, se han llevado a cabo dos etapas principales de experimentación e investigación en el desarrollo de parques eólicos marinos. La primera fase abarcó los años 1991 a 1998 y se centró en probar diferentes tipos de cimentaciones, principalmente las de tipo gravedad (GBS), pilotes y trípodas. Estos ensayos se realizaron en aguas poco profundas (<6 m) con fondos marinos de pendiente suave o casi planos, alcanzando distancias de hasta 4 km de la costa. Durante esta primera etapa, se obtuvieron resultados muy positivos para las cimentaciones con potencias unitarias entre 450 y 600 kW. La fiabilidad, eficiencia y rentabilidad demostradas en estas pruebas impulsaron significativamente a la industria.

La llegada del nuevo siglo marcó la segunda fase, caracterizada por la implementación de dispositivos "multimegavatio". El primer parque de este tipo fue Utgrunden, construido a principios de los años 2000 en Suecia. A pesar de los desafíos que presenta el gélido y adverso Mar Báltico, Utgrunden se consideró un éxito y un referente en la materia. Su ubicación protegida junto a la isla de Öland facilitó en cierta medida tanto la construcción como la posterior operación y mantenimiento del parque.

Utgrunden sirvió como modelo y ejemplo para otros parques planificados con fines comerciales que se abrieron paso gradualmente en el panorama eléctrico internacional. Algunos destacados fueron Blytg y Yttre Stengrund.

Dinamarca, que ya había adquirido experiencia con el parque Vindeby y contaba con compañías importantes como DONG ENERGY, apostó por adaptar la tecnología eólica al entorno marino y lo demostró con las instalaciones de Horns Rev y Nysted. Esto representó un gran avance en el desarrollo de parques eólicos marinos.

Desde entonces, la industria de parques eólicos marinos ha experimentado un crecimiento asombroso, superando todas las expectativas de hace solo una década. A día de hoy, en Europa, cinco países lideran el sector, acaparando el 99% de los aerogeneradores conectados a la red eléctrica. Encabezando el ranking se encuentra el Reino Unido con una cuota del 44%, seguido de Alemania con el 27%. A continuación, se sitúan Países Bajos con un 11, Dinamarca con un 8% y Bélgica con un 8%. Todos ellos lideran un mercado en constante expansión.

Los actuales emplazamientos europeos presentan características propicias para el desarrollo de parques eólicos marinos:

1. Condiciones favorables del recurso eólico: Los vientos predominantes y dominantes están muy bien definidos, lo que favorece la generación de energía eólica de manera consistente.
2. Clima estacional: El clima presenta marcadas estaciones, lo que conlleva un menor uso turístico de las playas durante el invierno y facilita el mantenimiento de las instalaciones durante el período estival.
3. Sostenibilidad energética y respeto al medio ambiente marino: Los parques eólicos marinos logran un equilibrio entre la generación de energía sostenible y la minimización del impacto ambiental en el medio marino.
4. Plataforma litoral idónea: La plataforma litoral tiene pendientes suaves y uniformes desde la costa hasta las profundidades donde se instalan los parques, lo que facilita la colocación de las cimentaciones de los aerogeneradores.
5. Naturaleza de la cimentación: Los terrenos cuaternarios, procedentes de aportes fluviales, permiten la instalación de las estructuras de soporte mediante cimentaciones directas o elementos indirectos.
6. Baja intrusión visual: La distancia entre los parques y la costa, gracias a la suave pendiente de la plataforma litoral, resulta en una baja afectación visual al entorno.

Una vez recapitulada la evolución de los parques eólicos marinos, la investigación se centrará en la cimentación de los aerogeneradores. Se debe hacer mención a la distinta tipología de dichas cimentaciones (Figura 3).



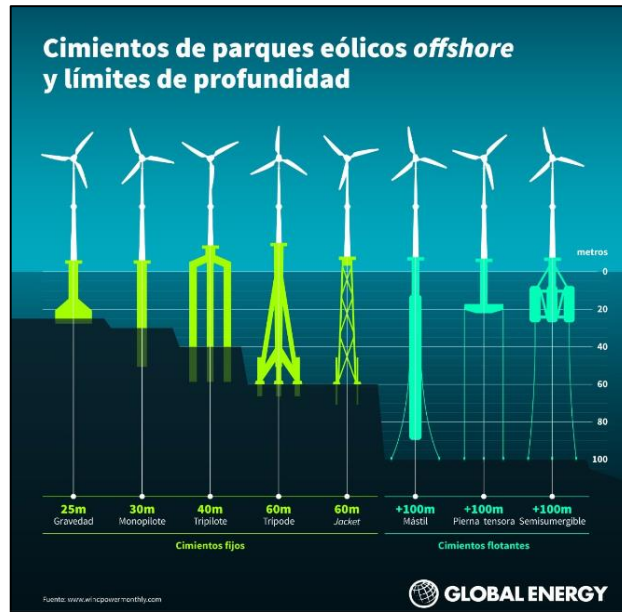


Figura 3. Tipología de cimentación y su profundidad alcanzada. Fuente: Global Energy.

En la actualidad, la cimentación monopilote abarca el 81% de todos los parques eólicos instalados en el mundo (Figura 4). Debido a este dato, interesa estudiarla en la presente Tesis Doctoral. En el mar se desconoce sobre que sustrato se encuentra la cimentación y las características geomecánicas de este. Este es uno de los factores condicionantes, junto con varios fenómenos (como las corrientes marinas, las altas presiones debido a la gran profundidad, la corrosión, etc.) que hacen que las cimentaciones de monopilotes estén actualmente sobredimensionadas para garantizar la estabilidad de la estructura. Estas estructuras alcanzan pesos de aproximadamente 600 toneladas, diámetros de 8 metros y espesores de hasta 15 centímetros. En muchos casos, estas estructuras se introducen hasta 30 metros en el lecho marino.

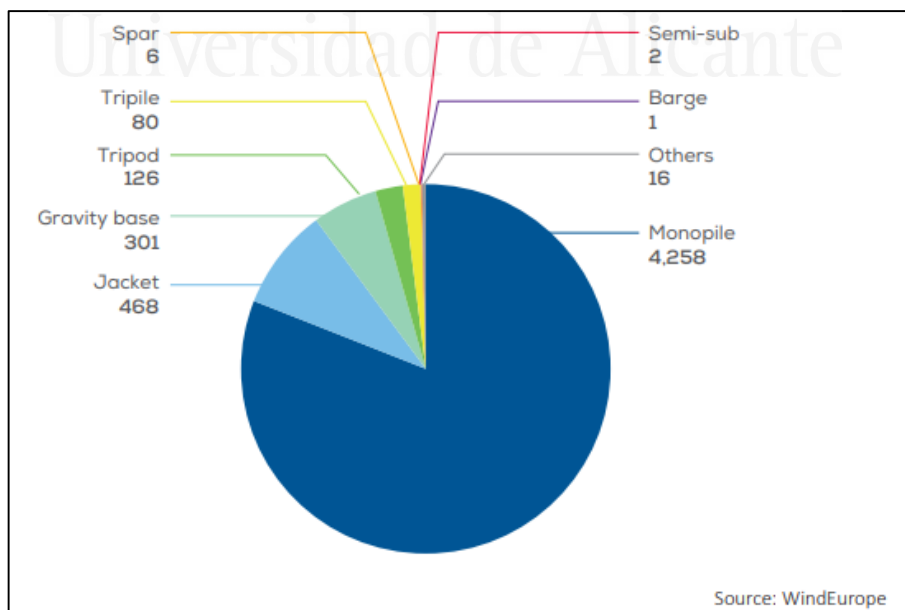


Figura 4. Número de cimentaciones por tipología en el año 2019. Fuente: WindEurope.

Esta investigación trata un tema sensible y actual, como es la energía eólica marina. Las energías renovables marinas son una oportunidad que transforma la vida, la economía y el planeta, pero conllevan la existencia de lagunas a nivel de diseño y dimensionamiento de elementos soporte con su terreno de cimentación. Estas lagunas han dado y siguen dando problemas, con reclamaciones multimillonarias por las averías y notables dificultades en las reparaciones.

Para detectar, analizar y evaluar estas incertidumbres basadas probablemente en la reducida experiencia del sector, se han revisado las normas y reglas existentes de la DNV- GL destacando la norma DNVGL-ST-0126: Support structures for wind turbines (Estructuras de soporte para aerogeneradores).

Esta norma se centra en las cimentaciones de los aerogeneradores, el lecho marino donde se instalan, los materiales empleados en la construcción de los distintos tipos de cimentaciones y la protección contra la socavación. A continuación, se mencionan las ideas principales de estos temas:

En cuanto a ensayos del suelo y datos geotécnicos, los puntos clave son los siguientes:

#### 1. Ensayos del Suelo:

- Se requieren ensayos geotécnicos para proporcionar datos necesarios para el diseño.
- Estos ensayos incluyen ensayos in situ y muestreo para ensayos de laboratorio del suelo y la roca.
- La elección de los métodos y la extensión de los ensayos dependen de la fase del proyecto, el tipo de estructura de la turbina eólica, el tipo de suelo y la complejidad del terreno.
- Para parques eólicos con múltiples cimentaciones, se debe evaluar la estratigrafía del suelo y las propiedades de resistencia del suelo por ubicación de la cimentación.

#### 2. Datos Geotécnicos:

- Las investigaciones geotécnicas deben proporcionar datos sobre la clasificación y descripción de suelos y rocas, resistencia al corte, deformación, propiedades dinámicas y condiciones de esfuerzo in situ para todas las capas importantes del suelo.
- Los parámetros de suelos y rocas deben ser lo suficientemente completos para un diseño de cimentación detallado, considerando la extensión lateral de las capas significativas y la variación lateral de las propiedades del suelo en estas capas.

#### 3. Pruebas de Laboratorio:

- Se requiere un programa de pruebas de laboratorio que abarque diferentes tipos de pruebas y una cantidad suficiente de pruebas de cada tipo para permitir un diseño de

cimentación detallado. Se mencionan pruebas específicas para suelos y rocas, como pruebas de corte directo, triaxiales y resistencia a la compresión.

#### 4. Secuencia de Investigaciones:

- Los ensayos del suelo deben realizarse antes del diseño, pero si no están disponibles en la etapa de diseño, se deben hacer suposiciones conservadoras sobre las propiedades del suelo, que deben confirmarse antes de la construcción.
- Dichos ensayos deben proporcionar información relevante sobre el terreno hasta una profundidad que no influya en la seguridad o el rendimiento de la estructura de soporte de la turbina eólica.

#### 5. Tipos de Investigaciones:

- Se deben realizar varios tipos de investigaciones, que incluyen un estudio geológico de la localización, levantamiento topográfico, pruebas in situ (como ensayos de penetración cono o ensayos SPT), muestreo de suelo y roca, y pruebas de laboratorio posteriores.

#### 6. Variedad en Investigaciones:

- Cuando se encuentren suelos no homogéneos o terrenos difíciles, se pueden necesitar más perforaciones y pruebas de penetración cono de lo recomendado como mínimo. Se sugiere al menos una perforación para estructuras individuales de turbinas eólicas.

#### 7. Diseño de Cimentaciones de Pilotes:

- Para el diseño de cimentaciones de pilotes, se recomiendan una combinación de ensayos in situ y perforaciones con muestreo a una profundidad suficiente.
- Se especifican profundidades mínimas de muestreo, que varían según el tipo de carga (lateral o axial).
- Se sugiere realizar ensayos de penetración cono en el lecho marino en cada monopilote a colocar.

#### 8. Áreas Sísmicamente Activas:

- En áreas sísmicamente activas, es necesario obtener información sobre las propiedades dinámicas del suelo a profundidades que puedan influir en el diseño en relación con la propagación de ondas sísmicas debido a terremotos.

## 9. Mejora del Suelo:

- Si las investigaciones del suelo revelan que las capas de suelo relevantes tienen propiedades insuficientes, se pueden considerar diferentes técnicas de mejora del suelo.

En cuanto al diseño de cimentaciones de la tipología de cimentación más empleada, el monopilote, se consideran los siguientes factores:

### 1. Generalidades:

- El diseño de pilotes se basa en la resistencia del material del pilote y la capacidad del suelo para resistir las cargas del pilote.
- Se deben considerar factores como las características del suelo, las propiedades de deformación, el método de instalación, la geometría del pilote y el tipo de carga.
- Para condiciones no cubiertas por bases de datos de métodos existentes, se deben hacer extrapolaciones con una evaluación completa de parámetros relevantes.
- La solución de cimentación debe ser factible en términos de instalación de pilotes.

### 2. Capacidad de Carga de Pilotes:

- Se deben evaluar las cargas axiales y laterales del pilote para condiciones de operación y diseño.
- Se aplican factores de material para determinar la capacidad de diseño de la cimentación en función de análisis estructurales.
- Los factores de material varían según el enfoque de análisis y el tipo de carga.

### 3. Redistribución de Cargas:

- Se debe mostrar cómo se redistribuyen las cargas en los pilotes en condiciones límite últimas y de servicio, considerando asentamientos diferenciales.

### 4. Pilotes Perforados:

- Se deben verificar las suposiciones sobre la fricción entre el pilote y el suelo si el método de instalación puede alterarla.
- Se menciona la influencia del lodo de perforación en la adherencia entre el pilote y el suelo.

#### 5. Pilotes Cargados Lateralmente:

- Se pueden analizar utilizando curvas de reacción del suelo y se consideran deformaciones inducidas por la carga.
- La resistencia lateral se modela según la teoría de la plasticidad en condiciones límite últimas.
- Para el análisis de tensiones y desplazamientos, se utilizan valores característicos para la resistencia del suelo.

#### 6. Diseño en Condiciones Límite de Servicio:

- Se usan valores característicos para la resistencia del suelo y las cargas.
- Se consideran deformaciones permanentes en el suelo y la cimentación del pilote debido a cargas cíclicas.

#### 7. Diseño de Pilotes Marinos Sujetos a Erosión:

- Se deben tener en cuenta los efectos de la erosión, que pueden afectar la resistencia lateral y axial de los pilotes hasta la profundidad de la erosión por debajo del lecho marino original.
- La erosión puede ser tanto general (afectando una gran área) como local (afectando solo alrededor de cada pilote).
- Se deben construir curvas p-y y t-z considerando los efectos de la erosión.
- En caso de erosión general, se generan curvas p-y y t-z sobre la base de un nivel de lecho marino modificado, reducido en altura igual a la profundidad de la erosión general. Esto afecta la sobrecarga efectiva y las resistencias laterales y axiales de los pilotes.
- En caso de erosión local, las curvas p-y y t-z se generan considerando la profundidad y la extensión lateral del agujero de erosión alrededor de cada pilote. No se aplica resistencia del suelo por debajo del agujero de erosión.
- Se debe ser conservador al calcular el riesgo de erosión al determinar la frecuencia propia en el diseño.

En cuanto a la socavación y prevención de la socavación para estructuras marinas la norma proporciona pautas y consideraciones relacionadas con este problema. Un resumen de los puntos clave es el siguiente:

#### 1.Socavación en el Lecho Marino:

- Cuando se colocan estructuras en el lecho marino, los cambios locales en el flujo de agua pueden causar erosión y depósitos locales en sustratos erosionables, lo que puede afectar la estabilidad de la estructura. Se debe considerar en el diseño tanto la socavación local como los cambios generales en el nivel del lecho marino.



## 2. Estructuras sin Protección:

- Los pilotes en sedimentos cohesivos o rocas blandas pueden no requerir protección contra la socavación.
- Para otras estructuras y aquellas colocadas en sedimentos cohesivos o en áreas dominadas por olas, se debe determinar el riesgo de socavación mediante pruebas a escala real o modelos. Se deben incluir márgenes de seguridad para considerar incertidumbres.
- Se deben tener en cuenta posibles cambios a largo plazo en el lecho marino al diseñar la estructura.

## 3. Protección contra la Socavación:

- La protección contra la socavación debe diseñarse para prevenir la socavación local del lecho marino. Debe ser hidráulicamente estable y resistente a la erosión.
- Se deben considerar la socavación en los bordes, la socavación global y la disminución del lecho marino.
- Si se instala protección contra la socavación, su peso debe considerarse en el diseño de la estructura de la base si es completamente estable durante toda la vida útil.
- En casos donde no se pueda garantizar una protección al 100% estable, se debe monitorear regularmente el lecho marino y la protección contra la socavación. Si los niveles medidos están dentro de los niveles de diseño y no hay daños en la protección, no se requieren acciones adicionales.

En resumen, la norma destaca lo siguiente:

- La importancia de las investigaciones geotécnicas para el diseño y la construcción de las cimentaciones. Además, proporciona pautas específicas sobre la extensión y la secuencia de estas investigaciones. También destaca la consideración de condiciones sísmicas y la posibilidad de mejorar el suelo cuando sea necesario.
- Detalla los aspectos clave a considerar al diseñar cimentaciones de monopilotes, incluyendo factores de suelo, carga, redistribución de cargas y estados límite de servicio y últimas.
- La importancia de evaluar y considerar la socavación en el diseño y construcción de estructuras en el lecho marino, así como la necesidad de protección adecuada en áreas propensas a la socavación.

Esta Tesis Doctoral adopta un enfoque de compendio de publicaciones, donde todas ellas abordan una unidad temática común. Este formato garantiza un alto rigor científico, ya que los artículos indexados han sido evaluados previamente por expertos internacionales reconocidos antes de su publicación. De esta manera, el presente documento cumple con los requisitos de cantidad, calidad y autoría necesarios para obtener un alto nivel de confiabilidad.

#### 1.4. Objetivos de la Tesis Doctoral

Como se ha comentado en la Introducción de la presente Tesis Doctoral, el objetivo fundamental de la misma es la realización de un análisis exhaustivo del proceso de hinca de las cimentaciones de los monopilotes tanto en condiciones secas como en condiciones sumergidas. Este estudio del proceso de hinca se ha llevado a cabo mediante un ensayo a escala reducida en el laboratorio de estructuras de la Universidad de Alicante. Para ello, se han tenido en cuenta diversas variables involucradas en los parques eólicos marinos como el material empleado del monopilote, la arena del lecho marino o la velocidad y fuerza de hincado.

Los monopilotes son la tipología de cimentación más empleada para la eólica marina. Por ello, merecen hacer hincapié en su diseño, fabricación y dimensionamiento con el objetivo de evitar sobrecostes en el proceso de la creación de la cimentación monopilotadas.

Para alcanzar este objetivo, se mencionan, primeramente, los ensayos realizados en laboratorio. Estos ensayos, son explicados en el artículo *New Design Methods for Offshore Wind Turbines* que aparece en la bibliografía de la presente Tesis Doctoral. Este artículo fue redactado por Byrne et al. y explica ensayos realizados con el nombre de Proyecto Pisa.

El proyecto PISA (Pile Soil Analysis) involucra a entidades como the Royal Geographical Society, British Petroleum, or the Norwegian Institute. Dicho proyecto PISA consiste en varias pruebas de pilotaje a escala para determinar el comportamiento del suelo. El objetivo de estas pruebas era estudiar el comportamiento de las cimentaciones de los aerogeneradores marinos. Lo principal de estos ensayos es que se realizaron en tierra firme. Este es el aspecto más importante de la Tesis Doctoral ya que se pretende comprobar que el no tener en cuenta el agua (ensayos en condiciones sumergidas) es una condición imprescindible a la hora de valorar los resultados.



Figura 5. Ensayos llevados a cabo en el proyecto PISA. Fuente: Proyecto Pisa.

En el proyecto Pisa se llevó a cabo una campaña de pruebas de campo a escala media en la que se probaron un total de 28 pilotes con diámetros, longitudes y espesores de pared variables, tanto con cargas monótonas como cíclicas y con hasta 130 mediciones simultáneas de instrumentación de la respuesta del pilote y el suelo (Figura 5). Estas pruebas de campo, junto con la caracterización del material donde se ensayan los elementos, proporcionan una nueva base de datos estándar de la industria con la que se pueden comparar, desarrollar y validar modelos de diseño en arcilla y arena.

En el estudio de la Tesis Doctoral, como se explica detalladamente en el siguiente apartado Metodología, se realizaron 36 ensayos de hincada de pilotes (18 en condiciones secas y 18 en condiciones sumergidas). Como se especifica en el proyecto Pisa, previamente a los ensayos se debe estudiar los parámetros del material donde se va a realizar la hincada y analizar el comportamiento geomecánico y deformacional del lecho marino. Para ello, se realizaron en el laboratorio ensayos normalizados UNE para el material escogido.

El proyecto Pisa, en su esquema de la Figura 6, desarrolla lo que sería un proyecto desde el comienzo con un estudio de localizaciones potenciales, hasta la calibración de los modelos de elementos finitos pasando por los ensayos a escala en tierra firme.

En este sentido, un objetivo potencial en la presente Tesis Doctoral es el poder modelar mediante software de Elementos finitos las condiciones de un ensayo de hincada de monopilote. Para ello, como se describirá posteriormente, se realizaron modelaciones con el software Plaxis con las mismas condiciones que los ensayos en laboratorio con la finalidad de lograr una correlación entre ensayos reales con ensayos informatizados.

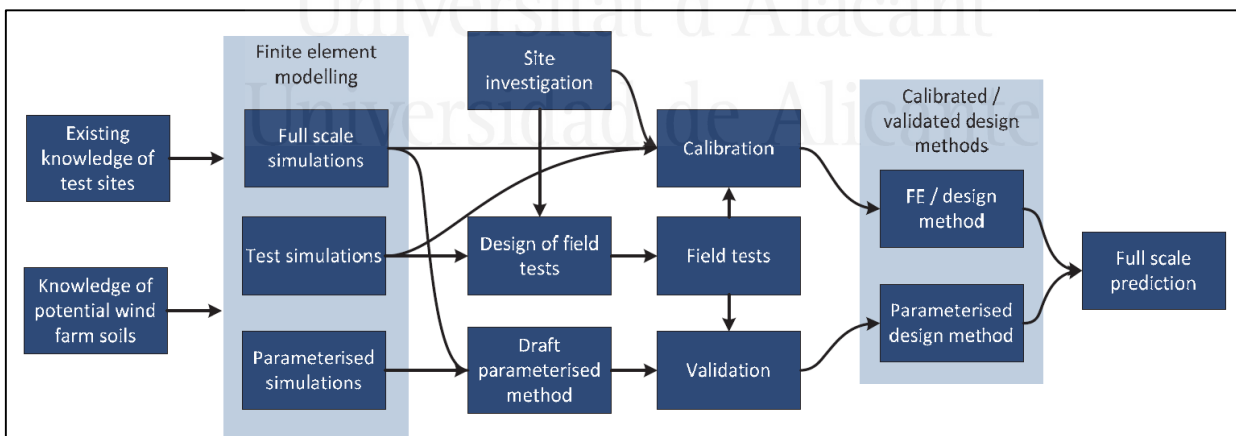


Figura 6. Diagrama del proyecto PISA.

## 1.5. Metodología de la investigación

Tras la introducción histórica y el estado del arte de la energía eólica, la metodología llevada a cabo se utilizó para confirmar que el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y el desarrollo de la tecnología eólica marina van de la mano, pero también para analizar las debilidades que pueden surgir en esta forma de producción de energía, haciendo propuestas con el fin de asegurar que la tecnología eólica marina contribuya de manera efectiva a alcanzar estos objetivos y que no actúe en detrimento de los mismos.

Para ello, se han propuesto varios aspectos diferentes y se ha realizado un análisis crítico de ellos, estudiando la viabilidad de esta tecnología desde el enfoque de cada uno de ellos. Dichas propuestas serán explicadas en el apartado Discusión.

Como se ha comentado en la Introducción, esta investigación ha llevado a cabo un análisis exhaustivo del proceso de hinca de las cimentaciones de los monopilotes tanto en condiciones secas como en condiciones sumergidas. Este estudio del proceso de hinca se ha llevado a cabo mediante un ensayo a escala reducida en el laboratorio de estructuras de la Universidad de Alicante. En este apartado, se desarrollará la metodología empleada en la realización de estos ensayos.

En primer lugar, tanto la norma DNV-GL como los ensayos realizados en el proyecto PISA, empiezan por estudiar el material donde se van a realizar tanto los ensayos de hinca, como los futuros monopilotes de la cimentación de los aerogeneradores marinos. Dicho material es un material granular de tipo arenoso.

Estas arenas son transportadas desde la costa hasta el lecho marino, donde son depositadas con el tiempo. Como bien explican Guillen y Hoekstra en el artículo *“The Equilibrium Distribution of Grain Size Fractions and its Implications for Cross-Shore Sediment Transport: A conceptual model”*, el sedimento está compuesto por diferentes fracciones de tamaños de grano, y cada fracción tiene una distribución particular a lo largo del perfil litoral. El máximo en la distribución relativa se encuentra alrededor de la línea de costa (a 0 metros de profundidad), lo que disminuye hacia la duna y mar adentro, hasta una profundidad de 6 metros, donde su porcentaje aumenta nuevamente en dirección al mar. La fracción más gruesa ( $>350\ \mu\text{m}$ ) muestra una discontinuidad en su distribución porque apenas está representada en el sedimento entre 6 y 10 metros de profundidad. La fracción más fina ( $100\text{--}150\ \mu\text{m}$ ) muestra una distribución que aumenta continuamente desde la línea de costa en dirección al mar, y el gradiente se vuelve más pronunciado a 600 metros de la costa.

Tabla 1. Granulometría Arena de Sílice.

<b>Granulometría SÍLICE</b>					
Abertura tamiz (mm)	Peso acumulado (g)	Peso parcial (g)	%Retenido parcial	%Retenido acumulado	%Pasa
4	0	0	0,00%	0,00%	0,00%
2	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
1	29,46	29,46	11,04%	11,04%	88,96%
0,5	223,13	193,67	72,55%	83,58%	16,42%
0,315	229,83	36,16	13,55%	86,09%	13,91%
0,25	263,51	4,22	1,58%	98,71%	1,29%
0,2	265,37	1,86	0,70%	99,40%	0,60%
0,16	266,31	0,94	0,35%	99,76%	0,24%
0,125	266,68	0,37	0,14%	99,90%	0,10%
0,09	266,89	0,21	0,08%	99,97%	0,03%
0,063	266,91	0,02	0,01%	99,98%	0,02%
Fondo	266,96	0,05	0,02%	100,00%	0,00%
TOTAL	266,96	266,96	100,00%	100,00%	
<b>D50 (mm)</b>	<b>0,830</b>				

Tabla 2. Granulometría Mezcla de Arena.

<b>Granulometría MEZCLA</b>					
Abertura tamiz (mm)	Peso acumulado (g)	Peso parcial (g)	%Retenido parcial	%Retenido acumulado	%Pasa
4	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
2	1,94	1,94	0,76%	0,76%	99,24%
1	33,12	31,18	12,27%	13,03%	86,97%
0,5	187,49	154,37	60,74%	73,77%	26,23%
0,315	220,43	32,94	12,96%	86,73%	13,27%
0,25	231,26	10,83	4,26%	90,99%	9,01%
0,2	239,22	7,96	3,13%	94,12%	5,88%
0,16	246,78	7,56	2,97%	97,10%	2,90%
0,125	250,26	3,48	1,37%	98,47%	1,53%
0,09	252,57	2,31	0,91%	99,37%	0,63%
0,063	253,82	1,25	0,49%	99,87%	0,13%
Fondo	254,16	0,34	0,13%	100,00%	0,00%
TOTAL	254,16	254,16	100,00%	100,00%	
<b>D50 (mm)</b>	<b>0,769</b>				



Sabiendo la fracción de material que se debía emplear, se hizo una búsqueda intensiva para obtener un material similar en el mercado. El problema fue que materiales menores a  $500\ \mu\text{m}$  no eran suministrados por las canteras, por lo que se optó por un material granular de arena de sílice, muy parecida a la arena de playa común. En concreto, se compraron 4 toneladas de Arena de sílice. Sin embargo, este material tenía una granulometría de finos inexistente como se puede ver en la tabla 1. Para evitar esta carencia, se adquirió una tonelada de Arena caliza, de material mucho más fino. Gracias a esta caliza, la granulometría de la arena de sílice mejoró y se alcanzó un valor de finos más realista equiparable al lecho marino como se puede ver en la tabla 2.



Figura 7. Arena de sílice.

Una vez obtenido el material del lecho marino, se realizó un estudio para determinar las principales características geomecánicas de la arena. Para ello, se llevaron a cabo diversos ensayos según las normas UNE- EN. Cada prueba incluyó tres muestras para mejorar la precisión de los resultados. El contenido de humedad de las muestras no se definió porque no se puede elegir durante las pruebas realizadas en el mar. Todos estos ensayos son descritos a continuación:

- Análisis Granulométrico

El estudio se llevó a cabo de acuerdo con la norma UNE-EN 933-1 “Ensayos para Determinar las Propiedades Geométricas de los Áridos”. El objetivo era determinar las características granulométricas básicas que caracterizan la arena, como las curvas granulométricas (Figura 8). El eje vertical muestra el porcentaje de material que pasan a través de una malla según UNE 103101:1995 y ASTM D6913. Los parámetros más importantes obtenidos fueron los siguientes:

- Diámetro promedio de grano (D50): 0.769 mm.
- Coeficiente de uniformidad (Cu): 2.935.
- Coeficiente de curvatura (Cc): 1.367.

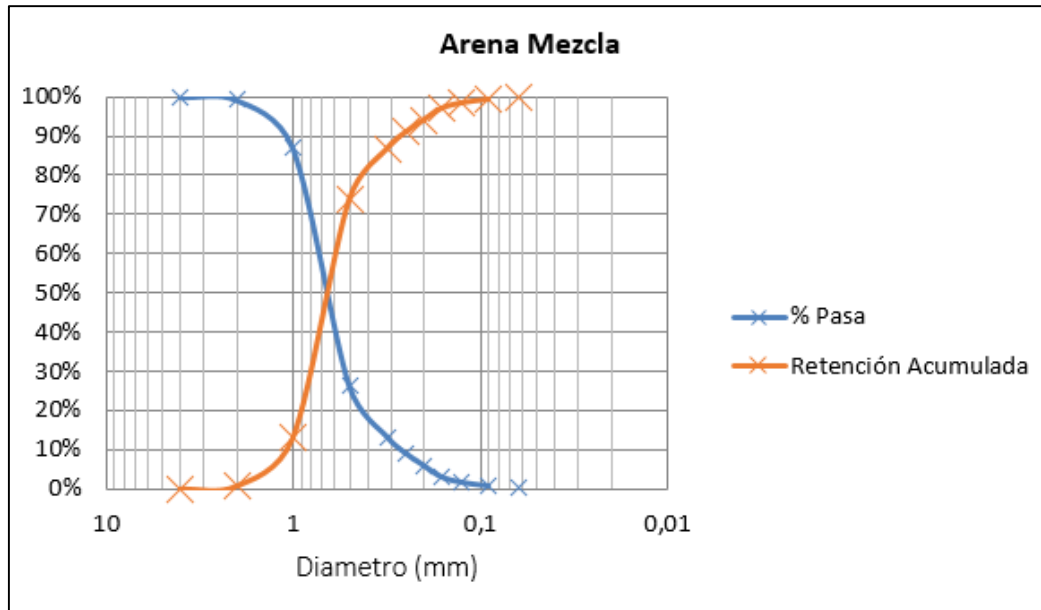


Figura 8. Gráfica del porcentaje que pasa por cada uno de los tamices.

D<sub>50</sub> es un parámetro importante para la caracterización de la arena y la definición del movimiento costero. Además, este parámetro permite comparar la arena con otros ensayos realizados en el mar. Los suelos bien graduados tienen valores de coeficiente de curvatura entre 1 y 3, y una arena con un coeficiente de uniformidad menor de 3 se considera muy uniforme. En este caso, la arena está en el rango previsto.

- Ensayo de Densidad

La prueba de densidad se realizó de acuerdo con la norma UNE-EN 1097-6 “Ensayos para Determinar las Propiedades Mecánicas y Físicas de los Áridos. Parte 6: Determinación de la Densidad de Partículas y la Absorción de Agua” para muestras de arena. La Tabla 3 muestra los valores de densidad de la arena para cada una de las muestras.

Tabla 3. Valores de densidad.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
$\rho_{\text{arena}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	2.615	2.628	2.639
$\rho_{\text{arena,media}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	<b>2.626</b>		

Como se puede consultar en distintas bibliografías, una arena de sílice tiene una densidad alrededor de 2.65 g/cm<sup>3</sup> por lo que los resultados son coherentes para el tipo de material que se estudió.

- Ensayo de Corte Directo

La prueba de corte directo se llevó a cabo de acuerdo con la norma UNE 103 401 “Determinación de los Parámetros Resistentes al Esfuerzo Cortante de una Muestra de Suelo en la Caja de Corte Directo. Se utilizó el método consolidado drenado (CD), recomendado para suelos granulares. Para la preparación de la muestra, la arena se vertió en una caja, asegurando una altura de caída suficiente para evitar la compactación (Figura 5). Esta opción se eligió para probar el material en condiciones que se encontrarían en el lecho marino, donde el material se deposita por su propio peso. Según la norma, la consolidación ocurre casi instantáneamente en suelos arenosos; por lo tanto, se eligió una velocidad de 1 mm/min con una duración entre 5 y 10 minutos.



Figura 9. Colocación de la arena en el ensayo de corte directo.

Una vez realizado los ensayos, se determinan la resistencia al corte y su ángulo de rozamiento asociado. Como es normal en suelos granulares, la cohesión era prácticamente nula. Tras la determinación de los resultados, estos se representan en la tabla 4, de donde se extraen los parámetros del material granular buscados.

Como se puede comprobar en la tabla 4, el ángulo de rozamiento interno es de 34.08° y la cohesión prácticamente 0 kg/cm<sup>2</sup>.

Tabla 4. Valores obtenidos en el Ensayo de corte directo.

Angulo de Fricción ( $\phi$ )	34.08°
Cohesion (c)	≈ 0 Kg/cm <sup>2</sup>

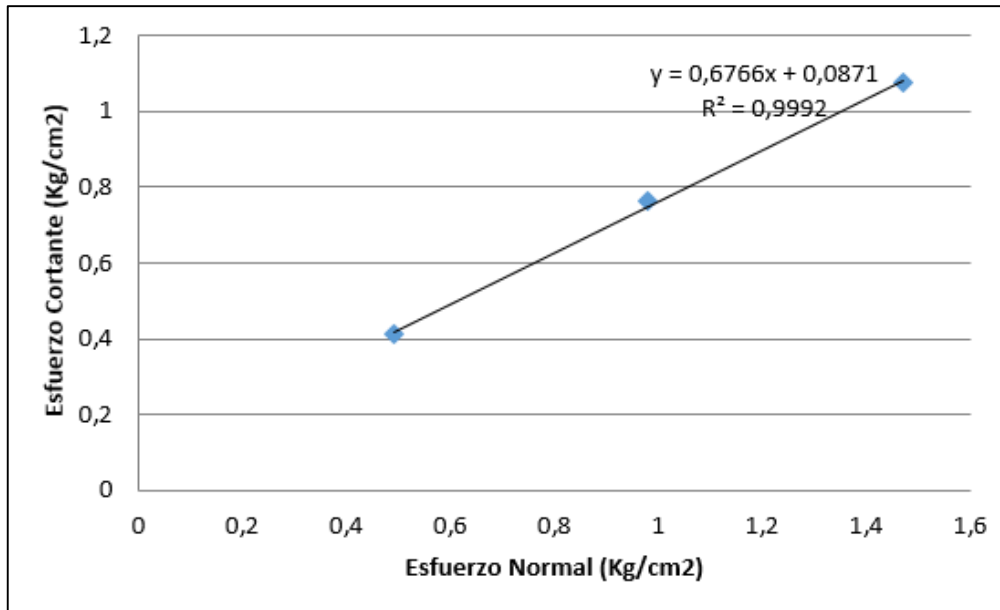


Figura 10. Gráfico de los esfuerzos normales y cortantes para el Ensayo de corte directo.

- Ensayo Triaxial

La prueba de corte triaxial se llevó a cabo de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 17892-9:2019 “Ensayos de Laboratorio de Suelos. Parte 9: Ensayos de Compresión Triaxial Consolidados en Suelos Saturados de Agua” para muestras de arena de sílice. Según esta norma, la consolidación ocurre casi instantáneamente en suelos arenosos; por lo tanto, el tiempo de consolidación fue de 1 a 3 horas.



Figura 11. Probeta sumergida en el ensayo triaxial.

El módulo de Young (E) de la arena se calculó aproximadamente en 21,570 kN/m<sup>2</sup>. Esto se puede obtener como una función de los valores de la prueba triaxial, ya sea al comienzo de la curva de esfuerzo-deformación o al 50% del esfuerzo máximo. En este caso, se estimó al 50% del esfuerzo máximo, como suele hacerse en este tipo de prueba. Este valor obtenido encaja con el valor según la bibliografía encontrada.

- Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción del acero se llevó a cabo de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 6892-1:2020 “Ensayo de tracción. Parte 1: Método de Ensayo a Temperatura Ambiente” para el material de los tubos ensayados.

Tabla 5. Valores obtenidos en el ensayo de tracción del acero.

	Carga Rotura (KN)	Tensión Rotura (Mpa)
Muestra 1	16.50	458.35
Muestra 2	16.61	461.34
Muestra 3	16.56	459.98
Media	16.56	459.89

Gracias a este ensayo se obtuvo la carga de rotura del material, estimada en 16.56KN (equivalente a 1.65 Toneladas). Además, la tensión de rotura obtenida fue de 459.89 MPa (459890 KN/m<sup>2</sup>).

Una vez caracterizado el terreno donde se realizaron las pruebas de hincado y el material de los tubos, se procede al dimensionamiento de la balsa donde se van a realizar los ensayos en el laboratorio. La balsa se mandó construir y montar en una fábrica cercana a la ubicación de la Universidad de Alicante. Esta balsa, se fabricó con acero, con las dimensiones necesarias para realizar un hincado del monopilote sin que hubiera grandes efectos de contorno. Las dimensiones se pueden ver en la figura 12.

- Ancho y largo de 2m de longitud y una altura de 1m. Las planchas que determinan los laterales de la balsa tienen un espesor de 5 mm.
- La Plancha de la base de la balsa tiene unas dimensiones de 2.3x2.3 m de longitud con un espesor de 3mm.
- Para mejorar la rigidez de la estructura, se dispusieron cartelas en las dos direcciones de 50 cm de altura.



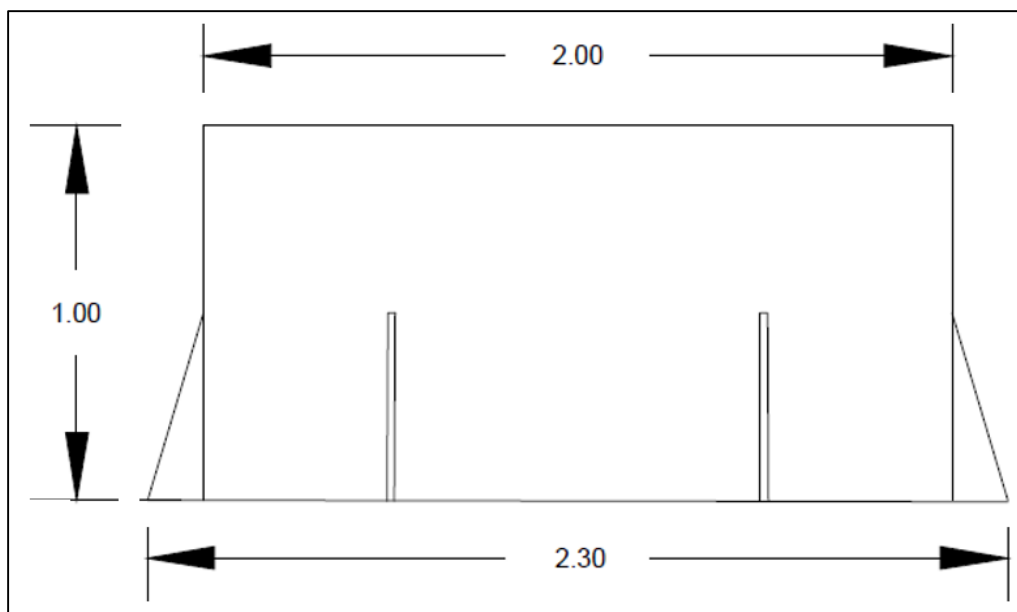


Figura 12. Boceto de la balsa en metros.



Figura 13. Balsa de acero para los ensayos.

En la figura 12 se muestra el interior de la balsa. Como se quería obtener el comportamiento del terreno cuando se realizaba la hincas, se dispusieron perfiles planos de acero donde se colocaron 6 galgas que medirían las deformaciones del terreno. Estas galgas se dispusieron tanto en las direcciones X e Y, como a diferente profundidad como se observa en la figura 14.

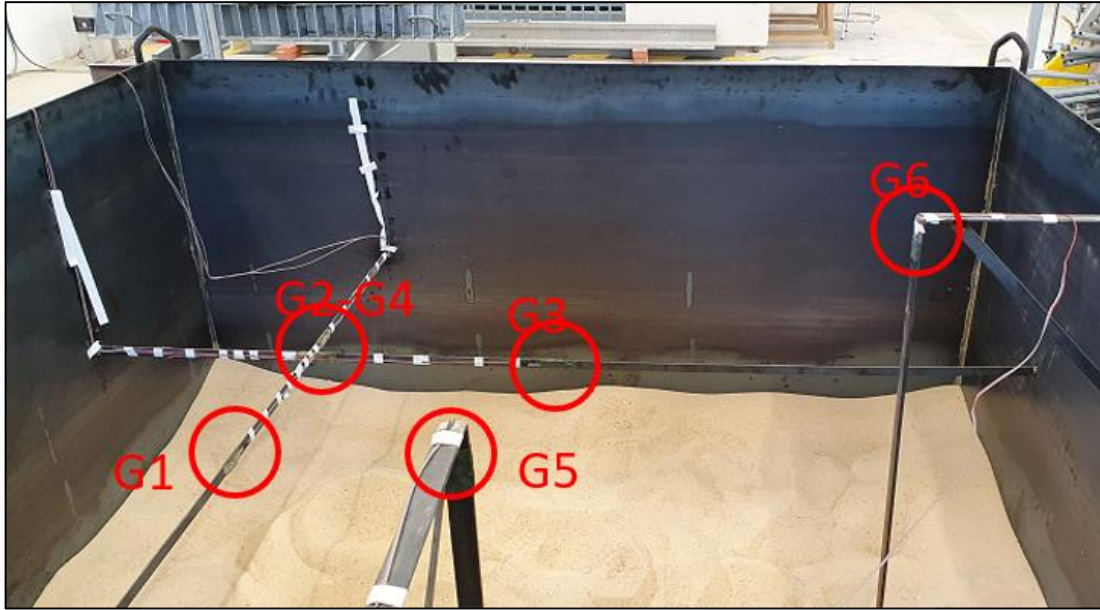


Figura 14. Disposición de las galgas.

Las galgas introducidas en la balsa tienen las siguientes coordenadas (tabla 6), donde el origen es el punto central de la balsa a una altura de 1m (justo en el punto más alto del sistema) como se puede ver en la figura 15.

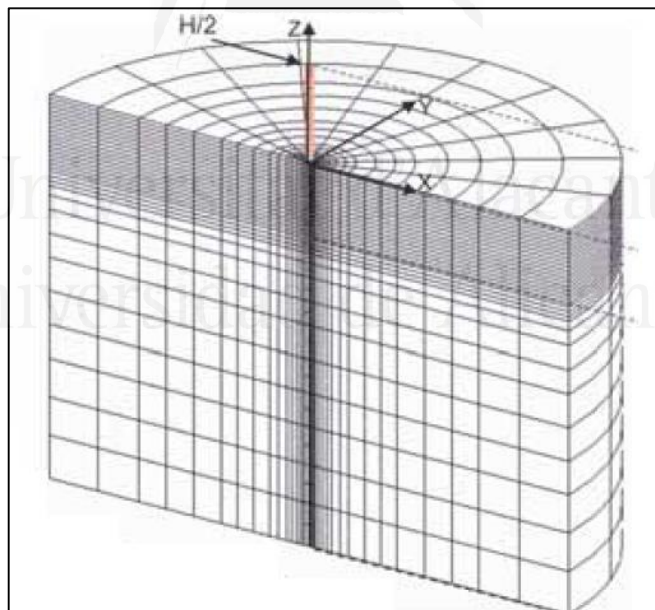


Figura 15. Origen de referencia del sistema de coordenadas. Fuente: Proyecto PISA.

Tabla 6. Situación de cada una de las galgas.

	X (m)	Y (m)	Z (m)
GALGA1	-0.5	0	-0.55
GALGA2	-0.5	0.5	-0.55
GALGA3	0	0.5	-0.5
GALGA4	-0.5	0.5	-0.5
GALGA5	0	-1	-0.05
GALGA6	1	0	-0.05

Como se ha comentado anteriormente, los ensayos que se realizaron fueron tanto en condiciones secas como en condiciones sumergidas. Debido a estas condiciones sumergidas, se tuvo que proteger las galgas frente a la exposición al agua. Para ello, se utilizó un material impermeabilizante que contribuyó a la protección de las galgas. El material cumplió perfectamente su función y no hubo ningún problema a la hora de realizar las mediciones oportunas.



Figura 16. Impermeabilizante para protección de las galgas. Tabla 6. Situación de cada una de las galgas.

Con el terreno estudiado y las galgas colocadas, el siguiente proceso fue el de elegir los parámetros necesarios para realizar los ensayos de hinca. Para ello, se utilizaron los criterios fijados por el proyecto PISA, adaptados a las condiciones de la presenta investigación. Estos criterios fueron los siguientes:

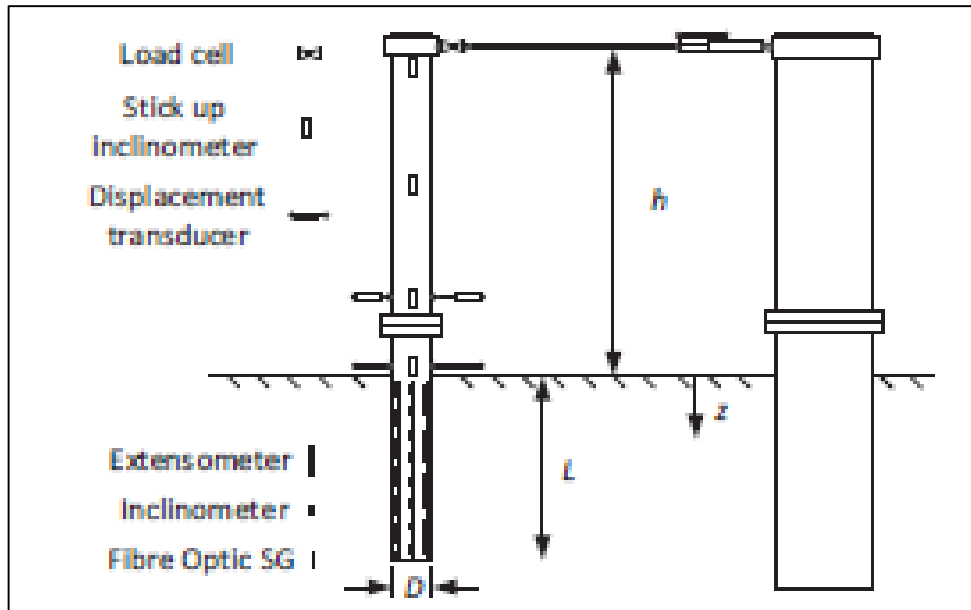


Figura 17. Parámetros de los ensayos del proyecto PISA. Fuente: Proyecto Pisa.

Donde:

$L_e$  = Longitud hincada

$D$  = Diámetro

$t$  = espesor

$h$  = Longitud No hincada

$z$  = Referencia de la profundidad

Tabla 7. Dimensiones de los tubos y restricciones PISA.

Dim. in mm	Tube 1	Tube 2	Tube 3
$L_{total}$ ( $L_t$ )	910	700	600
$L_{hincada}$ ( $L_e$ )	450	375	350
Diámetro ( $D$ )	194	115	80
Espesor ( $t$ )	4	3	3
$3 < L_e/D < 10$	2.3	3.26	4.06
$30 < D/t < 80$	48.5	38.3	26.7

Los tubos elegidos no eran excesivamente grandes y se pudieron encontrar fácilmente en las industrias especializadas en acero. Sin embargo, no se pudieron adaptar los espesores para que se cumpliesen las restricciones de PISA. Además, para la realización de los ensayos, se taparon los tubos por un extremo. El objetivo era simular el procedimiento de hincado con pilotes abiertos o cerrados (tapón de gravas de gravas o azúcheros en punta), donde ahora en adelante se mencionarán tubo hueco y tubo plano.

Otro parámetro importante a tener en cuenta es la velocidad de Penetración a la que se va a producir la hincada del pilote. Para simular la penetración, se utilizó una prensa hidráulica de gran capacidad (figura 18) del laboratorio de Estructuras. Debido a que la prensa no permitía cargas de impacto para el proceso de hincada, el ensayo fue del tipo cuasi-estático.



Figura 18. Prensa hidráulica utilizado en los ensayos.

Analizando los criterios empleados en PISA, las velocidades de penetración eran de  $D/300$  por minuto y  $D/500$  por minuto ( $D =$  diámetro). En el presente estudio, estas velocidades reproducirían pruebas muy largas (para un diámetro menor de 80mm, alcanzando la profundidad necesaria de 325mm los ensayos tendrían una duración de 33 horas). Por lo tanto, se hizo una estimación en función de los tres diámetros, y se obtuvieron velocidades de 5, 10 y 20 mm/min con duraciones de prueba de 1 hora, 30 minutos y 15 minutos, respectivamente.

Como últimos parámetros a tener en cuenta previos a los ensayos fueron las alturas y profundidades de los elementos principales, como la arena y el agua. Para la penetración, se tomó una profundidad de 325mm. Esta longitud fue suficiente para determinar el comportamiento mecánico del tubo de acero con la arena y, así, evitar efectos de contorno. Para los ensayos sumergidos, se llenó el tanque de agua hasta alcanzar una altura por encima de la superficie de la arena de unos 10cm.





Figura 19. Ensayo en condiciones sumergidas.

Tras todo el estudio previo, se realizaron 36 test en total. 18 para cada tipo de ensayo (seco y sumergido). Dentro de cada tipo de ensayo se dividió en posición hueca y plana (9 ensayos de cada tipo). A su vez estos ensayos se dividieron entre los 3 tipos de diámetro mencionados para las 3 velocidades indicadas.

La preparación de los ensayos no fue sencilla. Previo a la hincada por parte de la prensa, se debía colocar el tubo con precisión en el centro de la balsa. Para mejorar los resultados, se colocó una platabanda que distribuyese uniformemente la presión ejercida por el tubo (figura 19).



Figura 20. Platabanda circular metálica para una mejor distribución de la carga aplicada.

Una vez realizado uno de los ensayos, el terreno se compactaba más de lo esperado al hincarse y los siguientes valores de deformación no eran acordes a los estudios previos. Por lo que se empleó un vibrador de hormigón para descompactar el terreno y dejarlo en óptimas condiciones para la realización de los siguientes ensayos.



Figura 21. Descompactando la arena mediante un vibrador.

Los ensayos llevados a cabo en el laboratorio se han modelizado mediante el programa Plaxis de elementos finitos, con el objeto de comprobar si los resultados obtenidos en los ensayos a escala con medidas mediante galgas introducidas en bastidores en el terreno pueden estimarse, de forma aproximada, mediante los correspondientes a los modelos de elementos finitos. Las dimensiones del modelo son las mismas que las empleadas en los ensayos realizados (2x2x1m), y de la misma manera que lo realizado a escala, se han empleado dos modelos de tipo de pilote: hueco y cerrado en su parte inferior (figura 22). Como material del pilote se han considerado las características mecánicas y geométricas del empleado en los ensayos (mezcla de arena de sílice y arena caliza).

El procedimiento de cálculo ha sido el correspondiente a “prescribed displacements”, aplicando valores de desplazamientos de entre 0 y 30cm con pasos de carga de 5cm. El número medio de nodos en cada caso es de 11650, con un tamaño medio de cada elemento de 0.2022m y mínimo de 0.0402m.

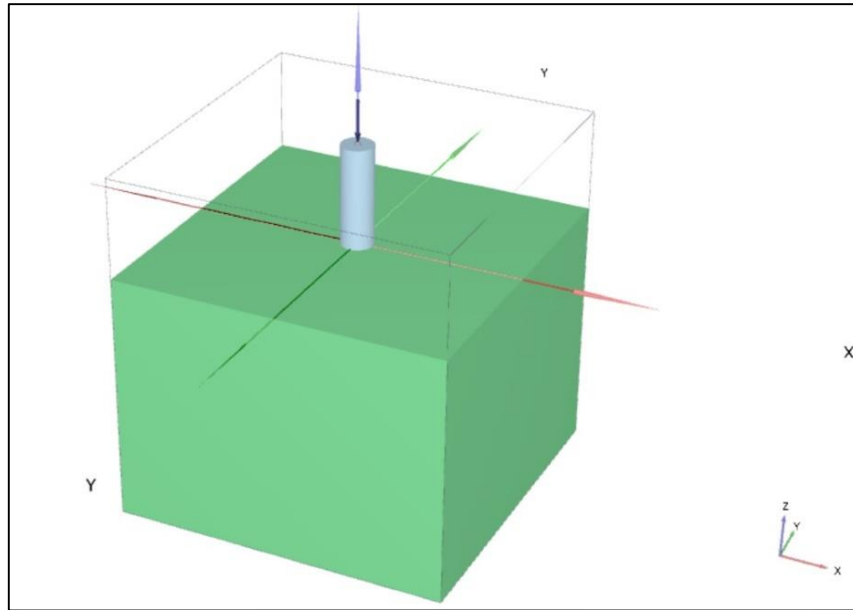


Figura 22. Modelado del ensayo mediante elementos finitos. Fuente: Plaxis.

Se han empleado básicamente dos tipos de modelos: totalmente hueco y cerrado en su parte inferior, simulando los dos procedimientos fundamentales de hincado de pilotes realizados en laboratorios. Se ha considerado la existencia de agua, tal y como aparece en la figura 23, siendo los parámetros mecánicos y geométricos de los elementos modelizados los empleados en los ensayos a escala.

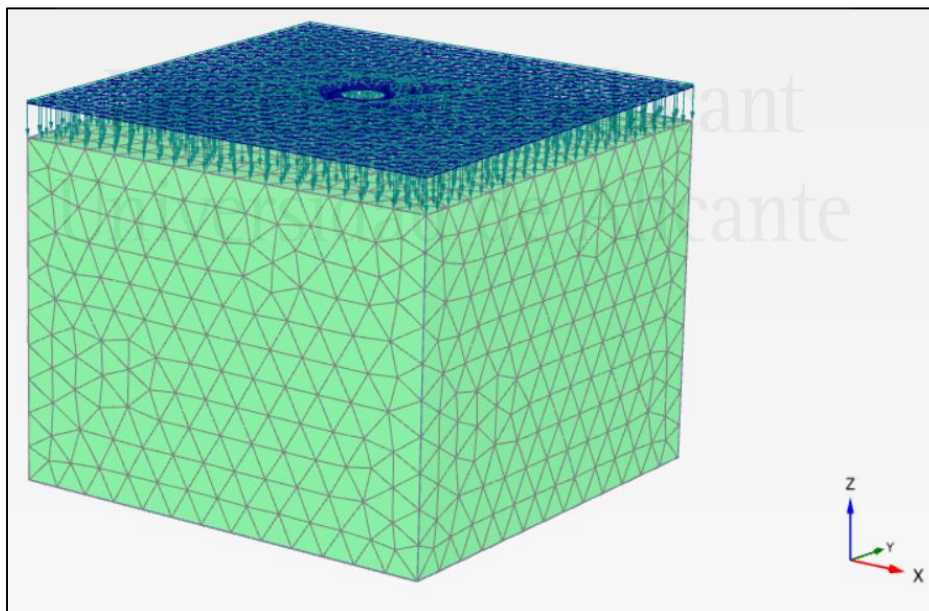


Figura 23. Colocación de carga superficial equivalente al agua para la situación sumergida. Fuente: Plaxis.

Para poder comparar los resultados obtenidos en los ensayos “in situ” con los correspondientes a los modelos de elementos finitos, se han seleccionado los nodos más cercanos a las coordenadas de las galgas en cada uno de los modelos, tal y como puede observarse en la siguiente figura para el caso del modelo de tubo plano de 115 y 194mm de diámetro, en los ensayos secos y sumergidos. No se incluyen las posiciones de las galgas 5 y 6 al haberse producido errores de lectura durante la realización de los ensayos.

Tabla 8. Posición de las galgas (ensayo a escala) y Posición de los nodos (FEM).

POSICIÓN DE LAS GALGAS					POSICIÓN DE LOS NODOS			
EJES	GALGA	X (m)	Y (m)	Z (m)	194-Sumergido	194-Seco	115-Sumergido	115-Seco
X	1	-0.5	0	-0.55	4121	4121	7103	7103
X	2	-0.5	0.5	-0.55	6956	6956	7225	7225
Y	3	0	0.5	-0.5	7064	7064	4030	4030
Y	4	-0.5	0.5	-0.5	6956	6956	9951	9951

Con esta Metodología, en conjunto con los apartados previos de la Introducción y los Objetivos de la investigación, se da por completada la primera sección de esta Tesis Doctoral. Estos tres apartados tenían como propósito presentar una visión inicial de la investigación realizada. A continuación, se detallará la Discusión del trabajo realizado, donde se respaldarán los resultados obtenidos y se analizarán en profundidad sus características particulares y aplicaciones específicas.

## 1.6. Discusión

La discusión de esta Tesis Doctoral comienza en determinar si la energía eólica marina será compatible con el logro de los ODS. Es evidente que los Objetivos 7 y 12 van de la mano con la energía eólica marina, ya que es una fuente de energía "accesible, confiable, sostenible y moderna". Sin embargo, en lo que respecta al aumento del nivel del mar, la sociedad aún tiene que luchar contra él y existe una gran manera de lograr el Objetivo 9 ("construir infraestructuras resilientes"). El tráfico marítimo podría verse interrumpido por la presencia de los parques offshore, un hecho que no parece muy perjudicial si se ubican fuera de las rutas principales. La interacción entre las infraestructuras eólicas y los organismos vivos en relación con la acuicultura cumple con los ODS 12 ("asegurar patrones de consumo y producción sostenibles") y 14 ("conservar y utilizar de manera sostenible los océanos, mares y recursos marinos para el desarrollo sostenible"), pero existe el desafío de cumplir con el ODS 15 ("...detener la pérdida de biodiversidad"), debido a la posible inmigración de especies foráneas e invasoras.

También surgen otros desafíos, como reducir la huella de carbono de la tecnología eólica marina, reducir los costos de construcción de las granjas sin aumentar la probabilidad de fallo de sus elementos resistentes o reducir el costo del kWh producido.

Estos son desafíos que, una vez superados, contribuirán aún más al logro de los ODS. Lo mismo se aplica a las nuevas tipologías estructurales y a los nuevos materiales en los elementos de soporte, que pueden contribuir al logro del ODS 9 ("fomentar la innovación"). Todo esto debería trabajar en conjunto para lograr el ODS 10 ("reducir las desigualdades en y entre los países")

En resumen, la energía eólica va de la mano junto a la AGENDA 2030. Actualmente, la energía eólica offshore ha alcanzado una consolidación real, con casi 55 GW instalados en la actualidad. En 2022, se superó la barrera de los 29,000 TWh de electricidad producida, lo que indica una demanda elevada y en constante aumento. El uso de combustibles fósiles está en declive, y dentro del ámbito de la producción de energía eléctrica, las energías renovables son las que más están creciendo y se espera que sigan creciendo en las próximas décadas.

En cambio, este rápido crecimiento ha puesto el enfoque en los aspectos técnicos de carácter industrial y eléctrico, dejando en segundo plano los comportamientos estructurales. Se ha priorizado la superestructura de los aerogeneradores, su infraestructura y elementos de cimentación, descuidando aspectos relevantes como la interacción de dichas cimentaciones con el lecho marino, las acciones climáticas (como oleaje, viento, mareas, corrientes o hielo) sobre las estructuras de soporte, y la durabilidad de los elementos estructurales, que es mucho mayor que la de los elementos eléctricos, pero a menudo es ignorada.

Este enfoque centrado en la productividad y el beneficio económico, aunque es comprensible, ha llevado paradójicamente a disminuciones significativas en el rendimiento y la vida útil de los parques, así como a costosas reparaciones para abordar incertidumbres que no se tuvieron en cuenta durante el diseño inicial. Esto demuestra que es esencial considerar los aspectos estructurales, climáticos e ingenieriles en todas las etapas del diseño de los parques eólicos marinos para evitar sobredimensionamiento de las estructuras.

De este pensamiento, como se ha comentado a lo largo de esta Tesis Doctoral, nace el estudio geomecánico y deformacional del terreno donde se produce la hincada de la cimentación de los aerogeneradores marinos, los monopilotes.

Tras los exhaustivos ensayos realizados en el laboratorio, descritos con todo detalle en el anterior apartado, toca realizar una discusión de los resultados obtenidos, mostrándolos y valorando todos ellos.

En primer lugar, se muestran los resultados de los ensayos en seco. Para ello, se han unificado los ensayos en función de la velocidad (figuras 24, 25 y 26) para cada diámetro y para cada posición de hincada. Como se observa en las imágenes, a mayor diámetro mayor fuerza de hincado necesaria para alcanzar la misma penetración. También se corroboró que la hincada por la zona plana del tubo necesitaba mayor fuerza que la parte hueca. Esto es debido a que la parte hueca permite el paso de material a través del tubo.



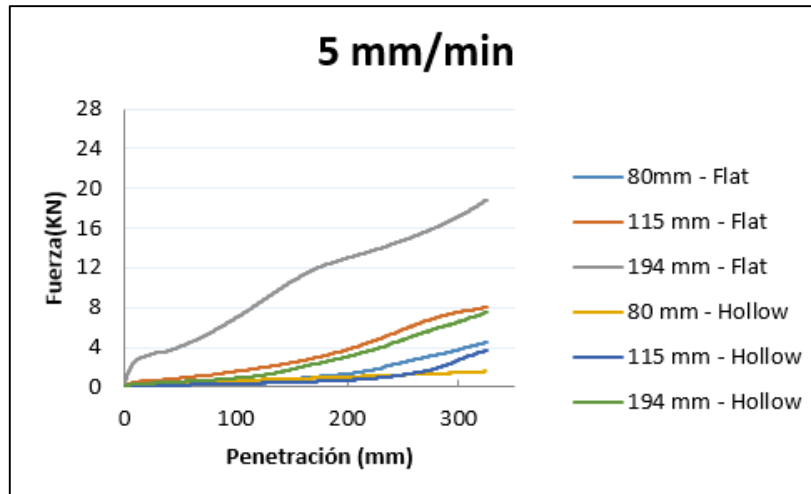


Figura 24. Fuerza para cada tubo en posición hueca y plana para la velocidad de 5 mm/min.

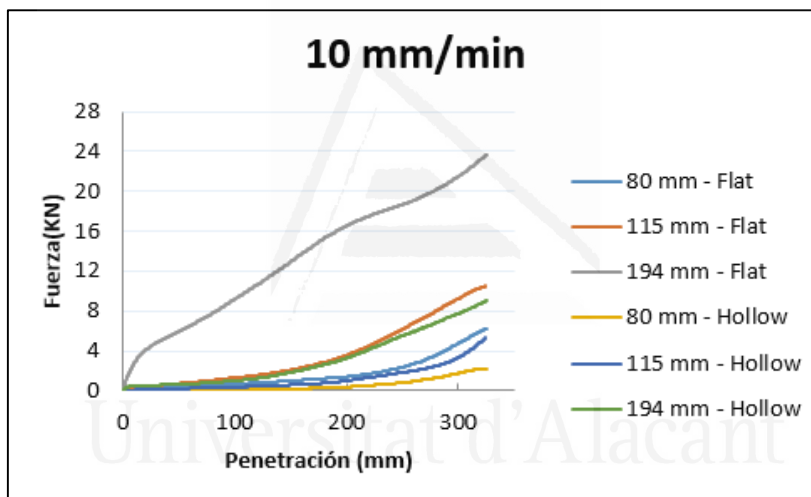


Figura 25. Fuerza para cada tubo en posición hueca y plana para la velocidad de 10 mm/min.

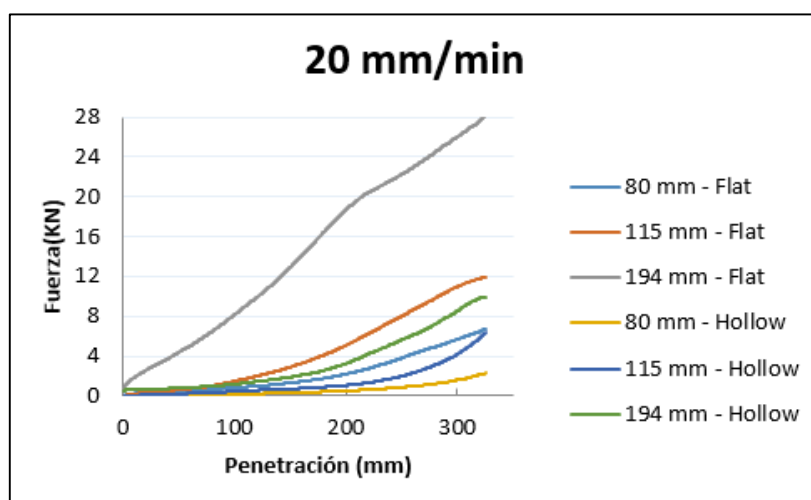


Figura 26. Fuerza para cada tubo en posición hueca y plana para la velocidad de 20 mm/min.



Todos estos datos mostrados en las gráficas vienen especificados en la tabla 9. Además, se añade la relación existente entre el valor inferior de velocidad y el resto de velocidades.

Tabla 9. Ensayos en seco. Fuerza de hincado. Variación entre velocidades.

		Tubo 1 ( $\varphi 80$ mm) - Hueco		Tubo 2( $\varphi 115$ mm) - Hueco		Tubo 3( $\varphi 194$ mm) - Hueco	
Velocidad (mm/min)		Fuerza (KN)	Relación	Fuerza (KN)	Relación	Fuerza (KN)	Relación
5		1.59	1.00	3.71	1.00	7.53	1.00
10		2.23	1.40	5.42	1.46	8.99	1.19
20		2.41	1.52	6.29	1.70	9.91	1.32

		Tubo 1 ( $\varphi 80$ mm) - Plano		Tubo 2( $\varphi 115$ mm) - Plano		Tubo 3( $\varphi 194$ mm) - Plano	
Velocidad (mm/min)		Fuerza (KN)	Relación	Fuerza (KN)	Relación	Fuerza (KN)	Relación
5		4.48	1.00	8.00	1.00	18.81	1.00
10		6.27	1.40	10.50	1.31	23.64	1.26
20		6.71	1.50	11.94	1.49	28.15	1.50

Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos para cada uno de los diámetros. Como se puede comprobar, a mayor velocidad de hincado, mayor fuerza es necesaria para conseguir la misma profundidad de hincado.

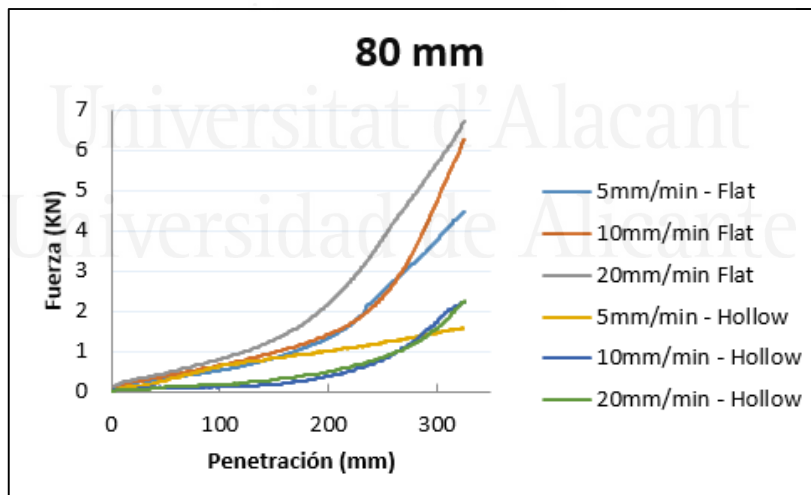


Figura 27. Fuerza para cada velocidad en posición hueca y plana para el tubo de  $\varnothing 80$  mm.

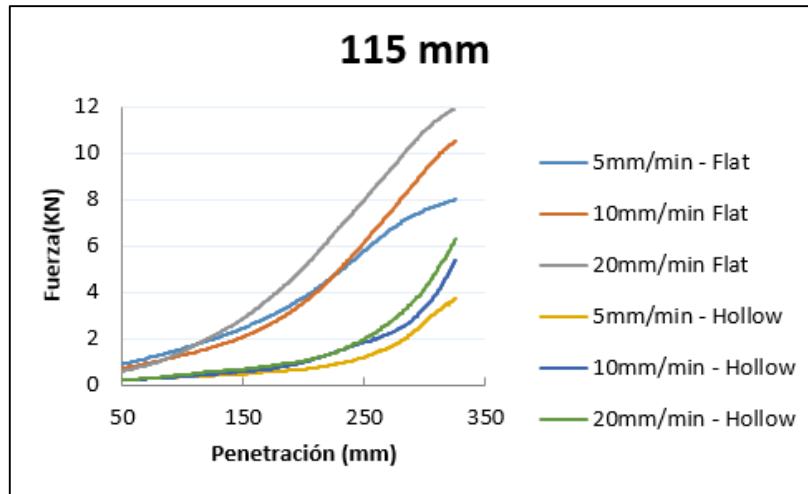


Figura 28. Fuerza para cada velocidad en posición hueca y plana para el tubo de Ø115 mm.

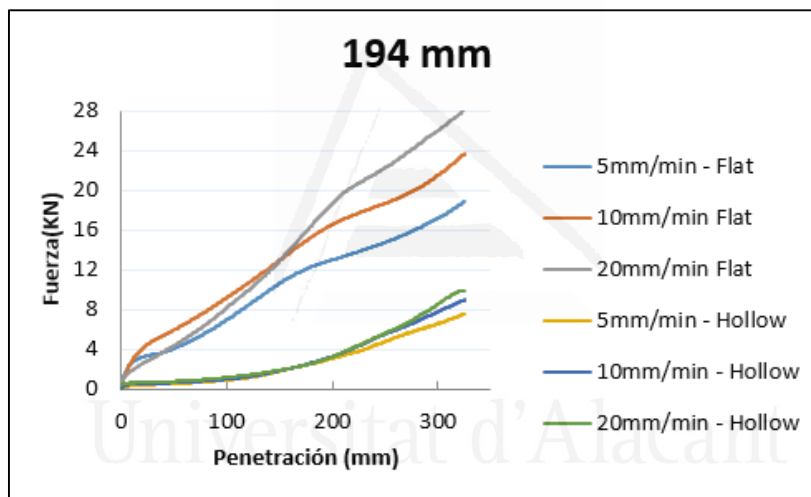


Figura 29. Fuerza para cada velocidad en posición hueca y plana para el tubo de Ø194 mm.

Todos estos datos mostrados en las gráficas vienen especificados en la tabla 10. Además, se añade la relación existente entre el valor inferior de diámetro y el resto de diámetros.

Tabla 10. Ensayos en seco. Fuerza de hincado. Variación entre diámetros.

Diámetro (mm)	Vel. 5 mm/min - Hueco		Vel. 10 mm/min - Hueco		Vel. 20 mm/min - Hueco	
	Fuerza (KN)	Relación	Fuerza (KN)	Relación	Fuerza (KN)	Relación
80	1.59	1.00	2.23	1.00	2.41	1.00
115	3.71	2.33	5.42	2.43	6.29	2.61
194	7.53	4.74	8.99	4.04	9.91	4.11

Diámetro (mm)	Vel. 5 mm/min - Plano		Vel. 10 mm/min - Plano		Vel. 20 mm/min - Plano	
	Fuerza (KN)	Relación	Fuerza (KN)	Relación	Fuerza (KN)	Relación
80	4.48	1.00	6.27	1.00	6.71	1.00
115	8.00	1.79	10.50	1.67	11.94	1.78
194	18.81	4.19	23.64	3.77	28.15	4.20

A pesar de que más adelante se extraerán las conclusiones de estos ensayos, se plantea una primera reflexión acerca de los resultados obtenidos. Empezando por la relación de velocidades, a mayor velocidad aplicada de hincado, mayor fuerza de penetración necesaria para alcanzar la profundidad de 325mm (sobre 1.5 veces mayor). La ventaja de aumentar la velocidad es la gran reducción del tiempo en el proceso de hincado, siendo para la velocidad de 20 mm/h de hasta 4 veces inferior que la hincado a velocidad de 5mm/h.

En cuanto a la relación entre diámetros de tubos, cuanto mayor diámetro del tubo empleado, mayor fuerza de hincado era necesaria aplicar, con aumentos de 4 veces mayor.

También se corroboró que la hincado por la zona plana del tubo necesitaba mayor fuerza que la parte hueca. Esto es debido a que la parte hueca permite el paso de material a través del tubo y no ofrece una resistencia mayor a la hincado. Esto también ocurre con los resultados sumergidos como se verá más adelante.

Una vez valorados todos los resultados en seco, toca analizar los ensayos en condiciones sumergidas.

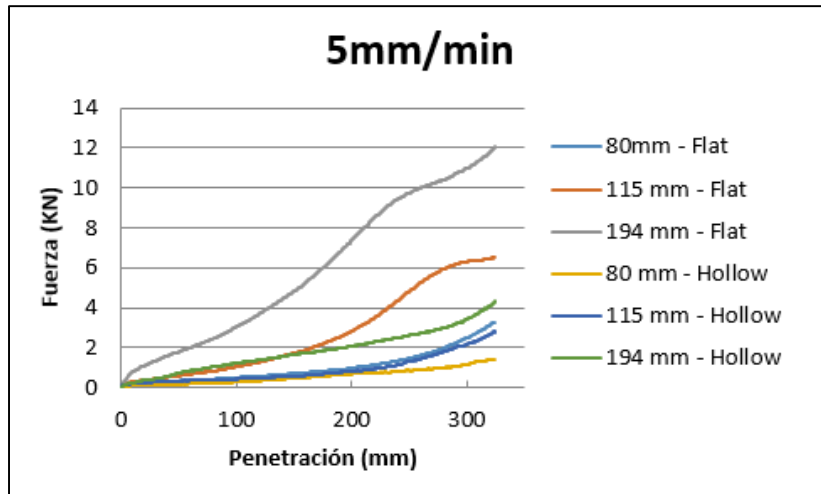


Figura 30. Fuerza para cada tubo en posición hueca y plana para la velocidad de 5 mm/min.

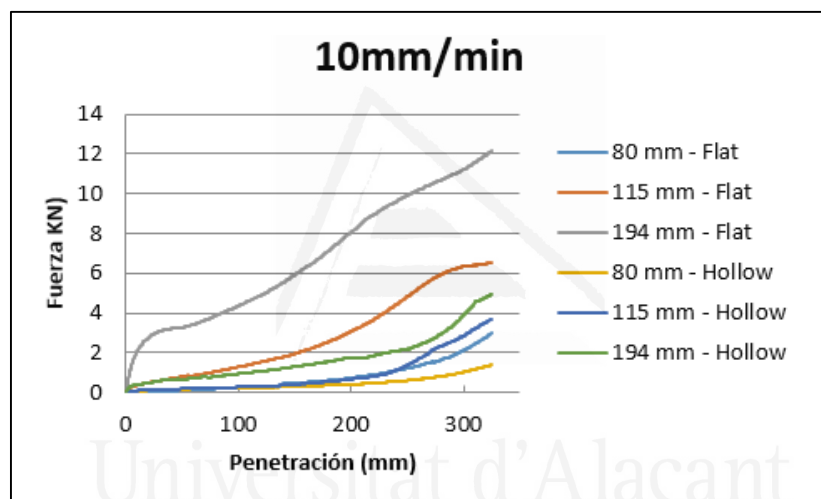


Figura 31. Fuerza para cada tubo en posición hueca y plana para la velocidad de 10 mm/min.

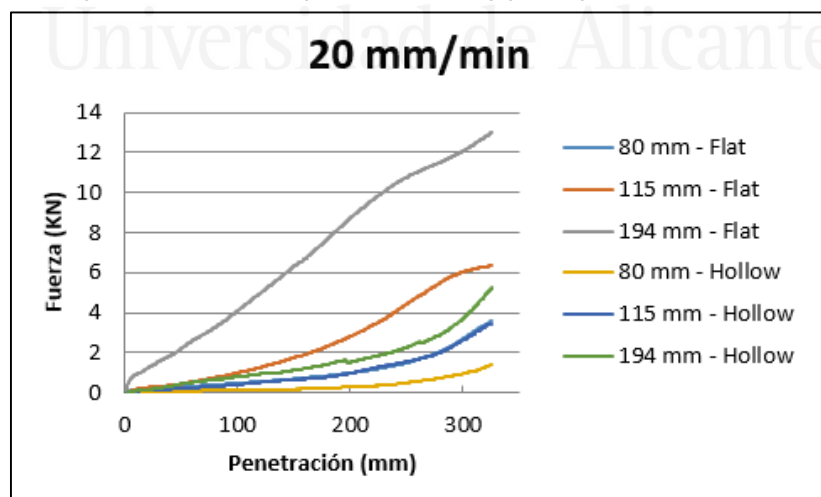


Figura 32. Fuerza para cada tubo en posición hueca y plana para la velocidad de 20 mm/min.

Todos estos datos mostrados en las gráficas vienen especificados en la tabla 11. Además, se añade la relación existente entre el valor inferior de velocidad y el resto de velocidades.

Tabla 11. Ensayos sumergidos. Fuerza de hincado. Variación entre velocidades.

Velocidad (mm/min)	Tubo 1 ( $\varphi 80$ mm) - Hueco		Tubo 2( $\varphi 115$ mm) - Hueco		Tubo 3( $\varphi 194$ mm) - Hueco	
	Fuerza (KN)	Variación	Fuerza (KN)	Variación	Fuerza (KN)	Variación
5	1,40	1,00	2,83	1,00	4,32	1,00
10	1,37	0,98	3,71	1,31	4,97	1,15
20	1,38	0,98	3,46	1,23	5,17	1,20

Velocidad (mm/min)	Tubo 1 ( $\varphi 80$ mm) - Plano		Tubo 2( $\varphi 115$ mm) - Plano		Tubo 3( $\varphi 194$ mm) - Plano	
	Fuerza (KN)	Variación	Fuerza (KN)	Variación	Fuerza (KN)	Variación
5	3,30	1,00	6,54	1,00	12,10	1,00
10	2,96	0,90	6,54	1,00	12,15	1,00
20	3,60	1,09	6,33	0,97	12,98	1,07

Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos para cada uno de los diámetros. Como se puede comprobar, a mayor velocidad de hinca, mayor fuerza es necesaria para conseguir la misma profundidad de hincado.

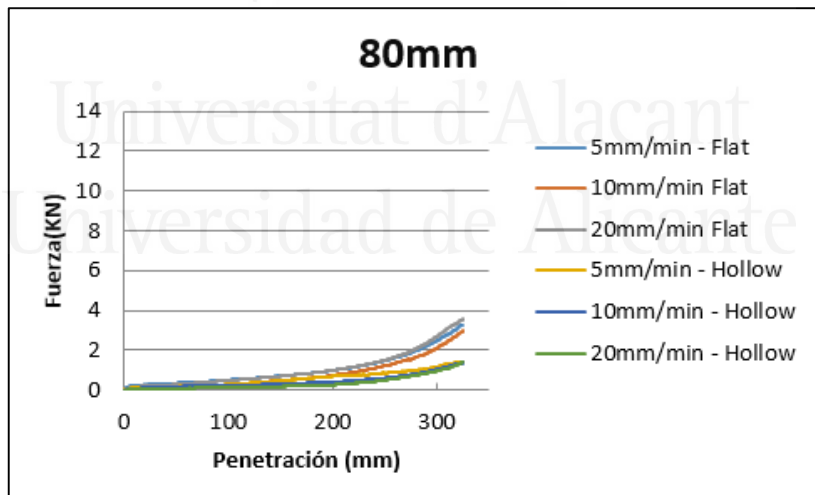


Figura 33. Fuerza para cada tubo en posición hueca y plana para el tubo de  $\varnothing 80$  mm.

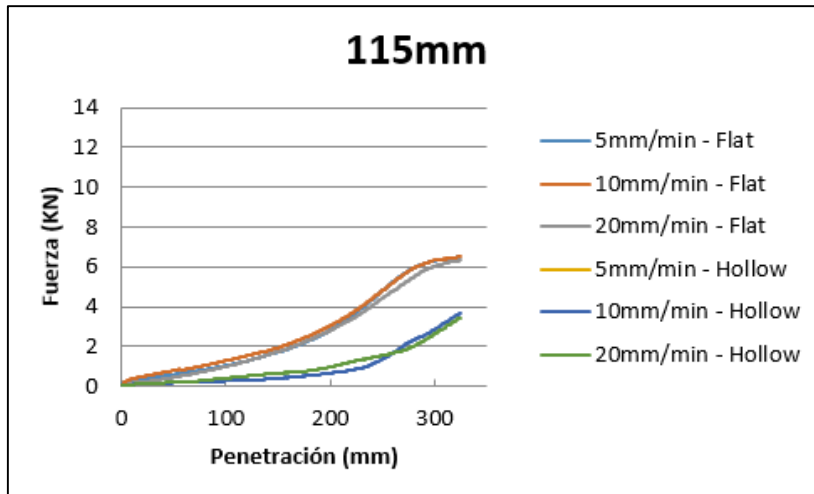


Figura 34. Fuerza para cada tubo en posición hueca y plana para el tubo de  $\varnothing 115$  mm.

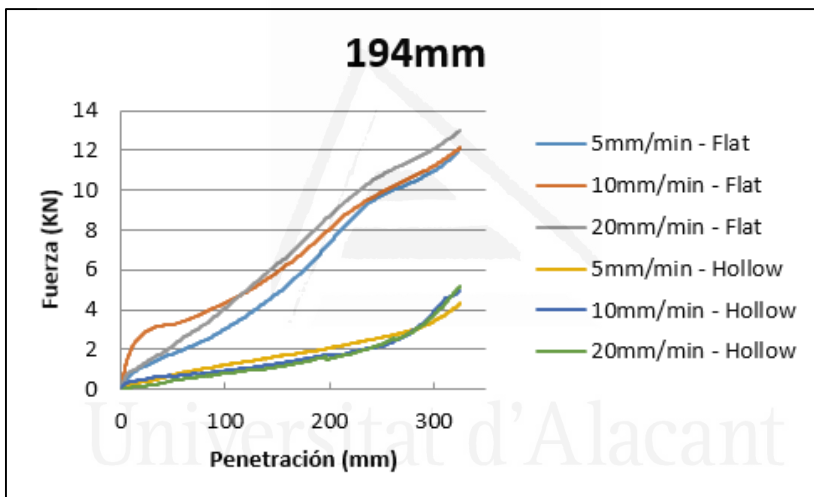


Figura 35. Fuerza para cada tubo en posición hueca y plana para el tubo de  $\varnothing 194$  mm.

Todos estos datos mostrados en las gráficas vienen especificados en la tabla 12. Además, se añade la relación existente entre el valor inferior de diámetro y el resto de diámetros.



Tabla 12. Ensayos sumergidos. Fuerza de hincado. Variación entre diámetros.

Diámetro (mm)	Vel. 5mm/min - Hueco		Vel. 10mm/min - Hueco		Vel. 20mm/min - Hueco	
	Fuerza (KN)	Variación	Fuerza (KN)	Variación	Fuerza (KN)	Variación
80	1.40	1.00	1.37	1.00	1.38	1.00
115	2.83	2.01	3.71	2.71	3.46	2.52
194	4.32	3.08	4.97	3.63	5.17	3.76

Diámetro (mm)	Vel. 5mm/min - Plano		Vel. 10mm/min - Plano		Vel. 20mm/min - Plano	
	Fuerza (KN)	Variación	Fuerza (KN)	Variación	Fuerza (KN)	Variación
80	3.30	1.00	2.96	1.00	3.60	1.00
115	6.54	1.99	6.54	2.21	6.33	1.76
194	12.10	3.67	12.15	4.10	12.98	3.60

Tras los resultados de los ensayos en condiciones sumergidas, se hizo una primera reflexión acerca de los resultados obtenidos. Empezando por la relación de velocidades, a mayor velocidad aplicada de hincado, no era necesaria una mayor fuerza de penetración para alcanzar la profundidad de 325mm. Esta conclusión es muy importante ya que se podría reducir tiempos de hincado usando los mismos elementos pesados de hincado, como los martillos.

En cuanto a la relación entre diámetros de tubos, ocurre al igual que en las condiciones secas, cuanto mayor diámetro del tubo empleado, mayor fuerza de hincado era necesaria aplicar, con aumentos de 3.5-4 veces mayor.

Los resultados obtenidos para ambos ensayos a lo largo de 325 mm de deformación se resumen en la figura 36. Estas figuras muestran el logaritmo de la fuerza de hincado para cada tubo y cada velocidad en condiciones secas y condiciones sumergidas. Se emplea el logaritmo para ajustar mejor la gráfica y poder comparar con mayor precisión los resultados de cada ensayo.

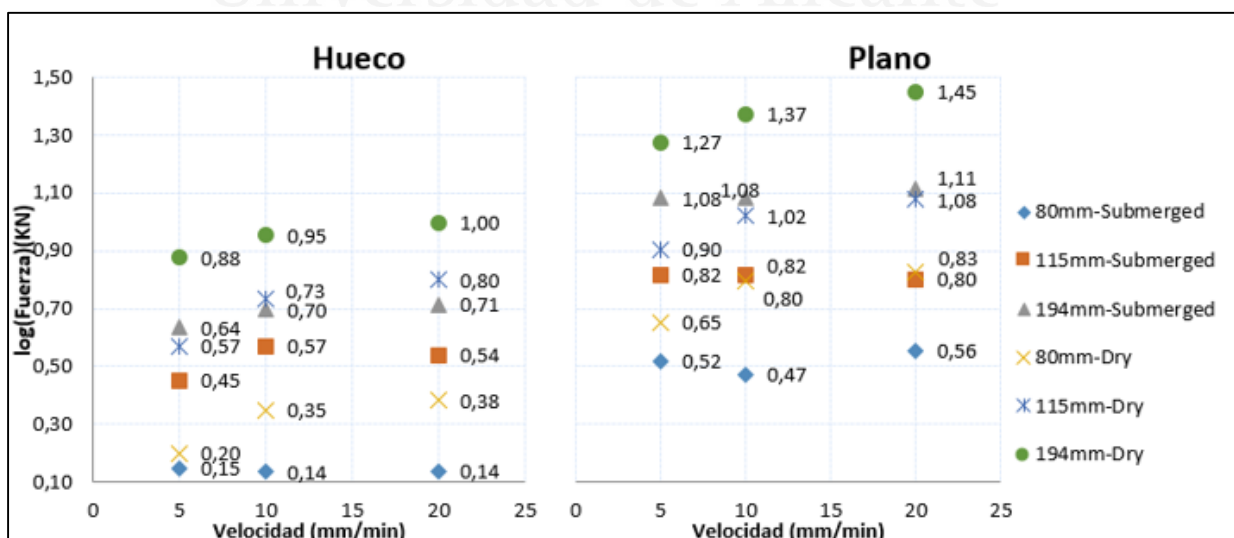


Figura 36. Fuerza de hincado para todos los ensayos.

Tras la discusión de los resultados obtenidos en los ensayos a escala en el laboratorio, toca evaluar los resultados mostrados en los modelos de elementos finitos y compararlos con los del laboratorio.

Los valores obtenidos en los modelos muestran disparidad de resultados respecto de los conseguidos en los ensayos de laboratorio. En las tablas siguientes se muestra un resumen en el caso de tubo cerrado en su parte inferior para los diámetros de 115 y 194mm en situación seca y sumergida.

Tabla 13. Desplazamientos de los ensayos en escala y los FEM para 194 mm en Condiciones Sumergidas.

<b>194-Sumergido</b>	<b>GALGA 1</b>	<b>GALGA 2</b>	<b>GALGA 3</b>	<b>GALGA 4</b>
NODO	4121	6956	7064	6956
Fuerza (kN)	0.696	0.696	0.696	0.696
Desplazamiento Nodo	9.1090E-05	2.2710E-05	7.2610E-05	2.7160E-05
Desplazamiento Real	7.4124E-05	5.1947E-06	7.4124E-05	5.1947E-06

Tabla 14. Desplazamientos de los ensayos en escala y los FEM para 194 mm en Condiciones Secas.

<b>194-Seco</b>	<b>GALGA 1</b>	<b>GALGA 2</b>	<b>GALGA 3</b>	<b>GALGA 4</b>
NODO	4121	6956	7064	6956
Fuerza (kN)	5.824	5.824	5.824	5.824
Desplazamiento Nodo	2.5250E-04	7.2110E-05	2.7760E-04	6.5070E-05
Desplazamiento Real	6.2026E-04	4.3469E-05	6.2026E-04	4.3469E-05

Tabla 15. Desplazamientos de los ensayos en escala y los FEM para 115 mm en Condiciones Sumergidas.

<b>115-Sumergido</b>	<b>GALGA 1</b>	<b>GALGA 2</b>	<b>GALGA 3</b>	<b>GALGA 4</b>
NODO	7103	7225	4030	9951
Fuerza (kN)	0.297	0.297	0.297	0.297
Desplazamiento Nodo	1.2800E-05	6.8590E-06	3.2340E-05	9.9330E-06
Desplazamiento Real	1.3312E-05	2.2167E-06	3.1631E-05	2.2167E-06

Tabla 16. Desplazamientos de los ensayos en escala y los FEM para 115 mm en Condiciones Secas.

<b>115-Seco</b>	<b>GALGA 1</b>	<b>GALGA 2</b>	<b>GALGA 3</b>	<b>GALGA 4</b>
NODO	7103	7225	4030	9951
Fuerza (kN)	2.170	2.170	2.170	2.170
Desplazamiento Nodo	8.3450E-05	3.2190E-05	8.0750E-05	3.8550E-05
Desplazamiento Real	2.3110E-04	1.6196E-05	2.3110E-04	1.6196E-05

El orden de magnitud es similar en los resultados, aunque en algunos casos, como sucede en las galgas 1 y 3 en el ensayo sumergido para ambos diámetros, éstos son muy aproximados, con valores prácticamente iguales entre los obtenidos en los ensayos y los de los modelos de elementos finitos (ratio≈100%, línea roja). En la figura 37 puede observarse la relación entre los valores obtenidos en los ensayos respecto de los modelos para la misma posición física de las galgas y de los nodos.

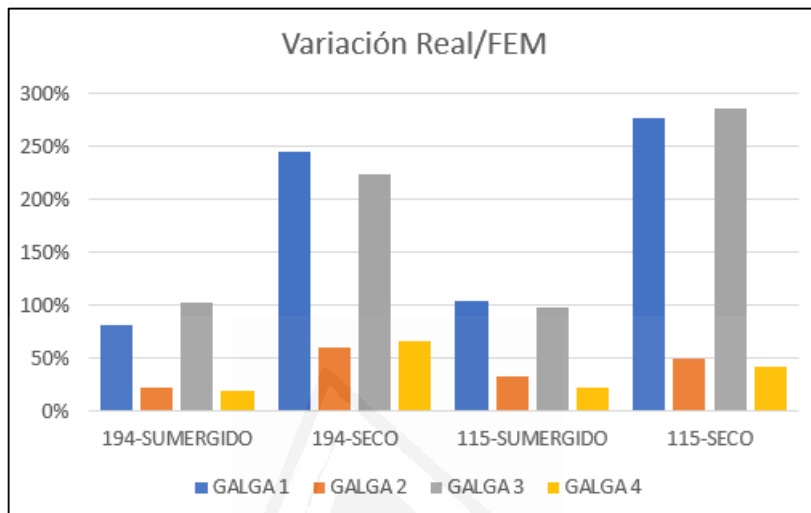


Figura 37. Relación entre los valores obtenidos de los ensayos con los FEM.

Sin embargo, los resultados que se obtienen en el caso de tubo abierto (no cerrado en su parte inferior) en los modelos de elementos finitos no se pueden comparar con los obtenidos en los ensayos a escala, con diferencias en las medidas muy superiores al 500% (esto es 5 veces mayor) en todas las galgas, al igual que sucede en los correspondientes al tubo cerrado con diámetro de 80mm.

Tras esta exhaustiva recopilación y análisis de los resultados de todos los ensayos realizados, finaliza así la sección primera de la presente Tesis Doctoral. Todos estos análisis se concluirán en la tercera sección, Conclusiones.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

## SEGUNDA SECCIÓN. TRABAJOS PUBLICADOS. COMPENDIO DE ARTÍCULOS.

Tal y como se establece en las directrices de la Escuela de Doctorado de la Universidad de Alicante, la segunda sección correspondiente a la presentación de una Tesis Doctoral por medio de un compendio de publicaciones debe albergar los artículos con el título "Trabajos publicados". Siguiendo estas pautas, en pleno cumplimiento de las normativas mencionadas, se incluye a continuación la versión completa y aceptada de los artículos que encapsulan los resultados derivados de la investigación emprendida en esta Tesis Doctoral.

Estos artículos convergen en torno al tema central de la energía eólica marina y las plataformas offshore. En este ámbito, abordan diversos aspectos, incluyendo las influencias y los impactos del clima marino en las estructuras de soporte, las pautas de diseño recomendadas y la comparación entre los modelos analíticos propuestos y los experimentos de modelo físico.

### 2.1. Primer artículo

La Tabla 17 presenta los datos clave del artículo en cuestión:

Tabla 17. Principales Características del Primer Artículo en la Colección de Publicaciones.

TÍTULO	Blue Economy: Compatibility between the Increasing Offshore Wind Technology and the Achievement of the SDG
AUTORES	Jorge Luengo Frades, Javier García Barba, Vicente Negro Valdecantos, Mario Martín-Antón and Jorge Soriano
REVISTA	Journal of Coastal Research
EDITORIAL	Coastal Education and Research Foundation, CERF
ISSN	0749-0208
DOI	10.2112/SI95-287.1
AÑO	2020
NÚMERO DE PÁGINAS	5
INDICIOS DE CALIDAD	Cuartil Q4 según JCR
FACTOR DE IMPACTO	0.854
FACTOR DE IMPACTO EN LOS ÚLTIMOS 5 AÑOS	0.884

### Resumen:

En 2015, las Naciones Unidas impulsaron una ambiciosa iniciativa llamada Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que incluye 17 metas y 169 objetivos a cumplir en el período 2015-2030. Al mismo tiempo, la industria de la energía eólica marina ha dado un gran salto hacia el océano. Estos parques eólicos marinos albergan cada vez más aerogeneradores (más de 100), las profundidades aumentan dejando atrás las aguas poco profundas (casi 100 metros de profundidad) y la capacidad instalada está aumentando a un ritmo dramático que hace apenas

una década parecía imposible (actualmente alcanzando los 400 MW). Estos hechos son uno de los grandes avances del siglo XXI, pero hasta ahora no se ha reflexionado profundamente sobre el impacto de la energía eólica marina en los mencionados ODS y en cómo la energía eólica marina va a enfrentar todos los desafíos que surgen al tratar de alcanzar dichos ODS. El logro de algunos de los ODS y el progreso de la tecnología eólica marina van, sin lugar a dudas, de la mano. Este es el caso del Objetivo 12 (Consumo y producción responsables), el Objetivo 13 (Acción por el clima) o el Objetivo 14 (Vida submarina). Pero también hay otros ODS que merecen una atención especial, con el fin de garantizar que la tecnología de energía eólica marina contribuirá efectivamente a alcanzarlos y no actuará en detrimento de ellos. Este es el caso del Objetivo 7 (Energía asequible y no contaminante), el Objetivo 8 (Trabajo decente y crecimiento económico) o el Objetivo 10 (Reducción de las desigualdades). En este artículo, se comenta la gran contribución de la tecnología de energía eólica marina para lograr los ODS, haciendo especial hincapié en las posibles debilidades que podrían surgir y en cómo resolverlas.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante



## 2.2. Segundo artículo

La Tabla 18 presenta los datos clave del artículo en cuestión:

Tabla 18. Principales Características del Segundo Artículo en la Colección de Publicaciones.

TÍTULO	Scale Tests to Estimate Penetration Force and Stress State of the Silica Sand in Windfarm Foundations
AUTORES	Jorge Soriano Vicedo, Javier García Barba, Jorge Luengo Frades and Vicente Negro Valdecantos
REVISTA	Energies
EDITORIAL	MPDI
ISSN	1996-1073
DOI	10.3390/en14185904
AÑO	2021
NÚMERO DE PÁGINAS	15
INDICIOS DE CALIDAD	Cuartil Q3 según JCR
FACTOR DE IMPACTO	3.252
FACTOR DE IMPACTO EN LOS ÚLTIMOS 5 AÑOS	3.333

### Resumen:

El análisis del comportamiento del suelo cuando se introduce la pila en el lecho marino en plataformas eólicas marinas es uno de los principales problemas asociados a esta nueva forma de generación de energía limpia.

En la actualidad, no existen estudios a escala que analicen el comportamiento mecánico y de deformación tanto del material de la pila que soporta el motor (grandes pilotes huecos de acero con un diámetro de 8 metros y un grosor de 15-20 cm) como del suelo donde se introduce la pila. Por lo general, estos elementos se instalan en arenas con un tamaño de grano muy pequeño desplazadas desde los límites de la playa seca-húmeda (límite de agua) hacia los límites mar adentro, lo que evita que vuelvan a su ubicación anterior de forma natural.

Este artículo presenta resultados obtenidos a partir de pruebas a escala en una piscina de acero para analizar el comportamiento de la arena donde se instalaron las pilas. En primer lugar, se realizó la prueba de California Bearing Ratio (CBR) para estimar el comportamiento del suelo en condiciones similares a las de la piscina de acero. Las pruebas a escala consistieron en la penetración del tubo de acero en la arena utilizando una prensa hidráulica. El objetivo era comparar los resultados para tres tubos con diferentes diámetros, tres velocidades diferentes y dos tipos de extremos en el elemento probado.

### 2.3. Tercer artículo

La Tabla 19 presenta los datos clave del artículo en cuestión:

Tabla 19. Principales Características del Tercer Artículo en la Colección de Publicaciones.

TÍTULO	Modeling and Pile-Driven Scaled Tests for Windfarm Foundations
AUTORES	Jorge Soriano Vicedo, Javier García Barba, William Daniel Cobelo and Aldo Fernández
REVISTA	Energies
EDITORIAL	MPDI
ISSN	1996-1073
DOI	10.3390/en16124612
AÑO	2023
NÚMERO DE PÁGINAS	13
INDICIOS DE CALIDAD	Cuartil Q3 según JCR
FACTOR DE IMPACTO	3.2
FACTOR DE IMPACTO EN LOS ÚLTIMOS 5 AÑOS	3

#### Resumen:

Uno de los principales problemas asociados a la generación de energía eólica en plataformas eólicas marinas es el análisis del comportamiento del suelo cuando se introduce la pila en el lecho marino. En la actualidad, debido a las grandes dimensiones de las cimentaciones (pilotes huecos de acero de hasta 8 metros de diámetro y 15-20 cm de grosor), no se realizan estudios a escala que analicen el comportamiento mecánico y de deformación del suelo en el que se introducen las pilas, así como del material de la pila que soporta el motor.

Este artículo presenta los resultados obtenidos a partir de pruebas sumergidas a escala en una piscina de acero para analizar el comportamiento de la arena en presencia de agua donde se instalaron las pilas. Estas pruebas utilizan una prensa hidráulica para llevar a cabo la penetración del tubo de acero en la arena. Se compararon los resultados con tres velocidades diferentes para tres tubos de diferentes diámetros y dos tipos de terminación en el extremo del elemento probado. Los resultados de las pruebas sumergidas se compararon con las pruebas en condiciones secas y con los resultados obtenidos a través del programa de elementos finitos Plaxis.

## **TERCERA SECCIÓN. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

En esta tercera sección, de acuerdo con las pautas establecidas por la Escuela de Doctorado de la Universidad de Alicante (EDUA), se incorporará la sección final que contiene las conclusiones de la tesis doctoral presentada en formato de compendio de publicaciones.

Por lo tanto, en esta sección se presentarán las conclusiones derivadas de la investigación plasmada en este documento, así como las posibles direcciones de investigación futura que se proponen para continuar en el ámbito científico de la ingeniería.

### **3.1. Conclusiones**

Después de varios años de investigación que han conducido a esta tesis y tras analizar los resultados, se han obtenido numerosas conclusiones. Algunas de ellas son simplemente extensiones lógicas del conocimiento actual. Sin embargo, la mayoría son ideas novedosas que tienen el potencial de enriquecer el campo de la ingeniería eólica offshore.

A continuación, se presentan de manera concisa las conclusiones más destacadas que se han derivado de estos años de trabajo:

- La energía eólica marina ha sido considerada desde su surgimiento como una fuente de energía limpia con un gran potencial para el futuro. Su abundancia, la falta de limitación geográfica y su funcionamiento sin emisiones de gases de efecto invernadero la convierten en una opción destacada entre el resto de energía renovables. En este contexto, la energía eólica marina está intrínsecamente relacionada con la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible (ODS). Algunos de los ODS se pueden alcanzar mediante esta fuente de energía sin dificultades, en particular el ODS 7 (garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos) y el ODS 14 (conservar y utilizar de manera sostenible los océanos, mares y recursos marinos para el desarrollo sostenible). Gracias a esta energía limpia, se logrará un mundo más sostenible para el año 2030.
- Actualmente, las cimentaciones de monopilotes constituyen el 81% de la tipología de cimentación empleada en todos los parques eólicos instalados en el mundo. Sin embargo, no se han realizado pruebas a escala real en entornos marinos para analizar el comportamiento del lecho marino. Las pruebas llevadas a cabo en tierra firme no han considerado las características geotécnicas del suelo, las cuales difieren considerablemente de las que se encuentran en el lecho marino. Este es uno de los factores críticos que, junto con varios fenómenos como las corrientes marinas, las altas presiones debidas a la gran profundidad y la corrosión, ha llevado a un

sobredimensionamiento de las cimentaciones de monopilotes para garantizar la estabilidad de las estructuras. Estas cimentaciones pueden alcanzar pesos de alrededor de 600 toneladas, diámetros de 8 metros y espesores de hasta 15 centímetros. En muchos casos, estas estructuras se hunden hasta 30 metros en el lecho marino.

- En este contexto, se ha analizado y estudiado el proyecto PISA (Pile Soil Analysis) como referencia metodológica en esta Tesis Doctoral. El proyecto PISA implica una serie de pruebas de hincado de pilotes a escala para comprender el comportamiento del suelo. Estas pruebas se llevaron a cabo en tierra firme y, como se ha demostrado en los artículos presentes, no se consideró un factor crítico: la presencia de agua en el proceso de hincado.

A continuación, se exponen las conclusiones más relevantes de los ensayos realizados en seco:

- Los resultados obtenidos indican una clara correlación entre la velocidad de penetración, la carga obtenida y el diámetro del tubo. Al comparar los resultados de distintas velocidades de hincado, se observa que se obtienen valores 1.19 o 1.46 veces mayores a una velocidad de 10 mm/min y 1.32 o 1.7 veces mayores a una velocidad de 20 mm/min en comparación con la velocidad más baja de 5 mm/min.
- Para cada uno de los pilotes seleccionados (80 mm, 115 mm y 194 mm de diámetro), se aprecia una variación significativa en función del diámetro del tubo, con valores 1.67 y 2.61 veces mayores obtenidos a un diámetro de 115 mm y 3.77 y 4.74 veces mayores obtenidos a un diámetro de 194 mm en comparación con el diámetro más pequeño de 80 mm.
- Los resultados demuestran que, para un mismo tubo, una velocidad de penetración más alta requería una fuerza mayor para alcanzar la misma profundidad de penetración (325 mm). A modo de ejemplo, para un tubo en posición plana con un diámetro de 80 mm y una velocidad de 5 mm/min, se obtuvo una fuerza de 4.48 kN; en contraste, a una velocidad de 20 mm/min, se obtuvo una fuerza de 6.71 kN.
- La variación en la aplicación de la carga también influyó significativamente en el comportamiento de la fuerza de penetración para una misma deformación. Para un tubo de 80 mm en posición plana, por ejemplo, se observó una relación de 1.5 entre las velocidades de 20 mm/min y 5 mm/min. Esta relación se mantuvo constante para todos los tubos.
- Además, un condicionante clave fue la posición del pilote a la hora del hincado sobre el lecho de arena. Se demostró que había una variación sustancial en dichos resultados ya que, para la penetración plana, se requería una mayor fuerza para lograr la misma profundidad, lo cual es un factor vital a tener en cuenta al diseñar estructuras marinas.

- Por último, se determinó una relación significativa entre la fuerza de hincado y el diámetro de los monopilotes, lo que permite extrapolar estos resultados a diferentes tamaños y diámetros de monopilotes. La relación promedio obtenida para los tubos de 80 mm y 194 mm fue de  $4/2.4 = 1.67$ . Esta relación resulta fundamental para estimar los valores de fuerza de penetración en monopilotes de diámetros mayores, como los utilizados en cimentaciones marinas.

En cuanto a los ensayos en condiciones sumergidas, las conclusiones más importantes extraídas son:

- Los resultados revelan una variación mínima en función de la velocidad, con valores que son 0.9 o 1.31 veces mayores a una velocidad de 10 mm/min y 0.97 o 1.23 veces mayores a una velocidad de 20 mm/min en comparación con 5 mm/min en condiciones sumergidas. En cambio, se registra una variación sustancial en función del diámetro, con valores que son 1.76 y 2.71 veces mayores a un diámetro de 115 mm y 3.08 y 4.10 veces mayores a un diámetro de 194 mm en comparación con 80 mm en condiciones sumergidas.
- Una de las conclusiones de gran relevancia es que la fuerza de hincado resultó prácticamente constante para las diferentes velocidades, alcanzando una penetración de 325 mm. Por ejemplo, para un tubo en posición hueca con un diámetro de 80 mm y una velocidad de 5 mm/min, se obtuvo una fuerza de 1.40 kN; en contraste, a una velocidad de 20 mm/min, se obtuvo una fuerza de 1.38 kN. Esta observación puede arrojar luz sobre el proceso de hincado y proporcionar mejoras en el dimensionamiento tanto del monopilote como de los equipos de hincado, como los martillos.
- Al igual que en los ensayos en condiciones secas, se identificaron diferencias en los resultados obtenidos para las situaciones huecas y planas. Para la penetración plana, se requirió una mayor fuerza para alcanzar la misma profundidad de hincado, un factor de vital importancia en el diseño de estructuras marinas. La relación entre la fuerza necesaria en una posición plana y la fuerza necesaria en una posición hueca fue de aproximadamente 2 veces.
- En lo que respecta al diámetro de los monopilotes y sus relaciones proporcionales, se observó que, para un diámetro de 194 mm, la fuerza requerida aumentó aproximadamente 3.7 veces en comparación con el diámetro más pequeño. Para el tubo de 115 mm, la relación fue de 2 a 2.2 veces. Esta relación resulta de gran importancia para la estimación de las fuerzas de penetración en monopilotes de mayor diámetro, como los empleados en cimentaciones marinas.

- Estos resultados ponen de manifiesto que los valores de fuerzas obtenidas mediante modelos de elementos finitos en condiciones de material seco son significativamente superiores a los valores en condiciones sumergidas. Por ejemplo, para un diámetro de 194, una velocidad de 20 mm/min y la posición hueca, se requiere un valor de fuerza de 9.91 kN para las pruebas en seco y una fuerza de 5.17 kN para las pruebas sumergidas.
- La conclusión de máxima relevancia que se extrae de la comparación entre los ensayos en condiciones secas y sumergidas es la imperante necesidad de la presencia de agua en los ensayos relacionados con las cimentaciones de plataformas marinas. La introducción de agua mejora significativamente el proceso de hincado de la pila, lo que, a su vez, conduce a una reducción en las dimensiones tanto de la subestructura como de la estructura marina. Asimismo, disminuye los requerimientos en cuanto a los elementos y martillos necesarios para llevar a cabo el hincado en el lecho marino.

Referente a las pruebas a escala con Modelos de Elementos Finitos, las conclusiones más importantes extraídas son:

- Los resultados muestran la viabilidad de aplicar modelos de elementos finitos en el análisis de pruebas a escala de hincado de pilotes, aunque se deben hacer algunas indicaciones sobre los resultados obtenidos.
- Los valores de desplazamiento en los casos de pruebas sin agua fueron claramente más altos que los obtenidos en las pruebas sumergidas en todas las galgas. Esta circunstancia se debe al hecho de que la estructura granular del suelo de prueba, compactada por el peso del material, es capaz de transmitir la fuerza debida al desplazamiento del material durante todo el proceso de hincado del tubo de prueba. Además, parte de la fuerza es asumida por el agua, que transmite una fuerza horizontal inferior a la fuerza vertical transmitida por el tubo en el proceso de hincado de la prueba. En el caso de las pruebas sumergidas, los mejores resultados se obtuvieron en las galgas 1 y 3, situadas perpendiculares al tubo con valores muy similares a los obtenidos en las pruebas de laboratorio (81 y 102%; 104 y 98%, respectivamente).
- En los casos de las galgas 2 y 4 estaban en un ángulo de 45 grados con respecto al tubo cerrado utilizado (con valores que difieren mucho respecto a los de laboratorio 23 y 19%; 32 y 22%, respectivamente). Esta situación provocó que las galgas 2 y 4 estuvieran ubicados a distancias mayores que las de los calibres 1 y 3 con respecto al tubo cerrado, específicamente  $\sqrt{2}$ , lo que resultó en deformaciones mucho menores y, por lo tanto, en desplazamientos menores.
- Además, los resultados en el tubo de 80 mm de diámetro, en posiciones planas y huecas, se vieron claramente afectados por el factor de escala entre el diámetro del tubo (con el grosor correspondiente) y la granulometría del suelo en el que se encontraba. Las pruebas



se llevaron a cabo. Por esta razón, en estudios posteriores, solo se utilizarán los tamaños de tubo más grandes, en posiciones planas y huecas.

- Por último, se ha comprobado la utilidad de emplear modelos de elementos finitos pese a que no es sencillo obtener datos de deformación y desplazamiento del terreno, facilitando actuaciones previas de cargas y velocidades de hincas en los monopilotes.

### 3.2. Futuras líneas de investigación

Una vez realizado los 3 artículos de investigación, haber estado analizando, contrastando y buscando información sobre cimentaciones offshore, habiendo profundizado en el estado del arte en el tema principal de la tesis, la presente Tesis Doctoral puede suponer un avance en la eólica marina. Para ello, se marcan una serie de retos y metas que nacen de las ideas, dudas y reflexiones presentes en los artículos científicos redactados. A continuación, se indican unas posibles líneas de investigación con el objetivo de desarrollarlas en los años venideros:

- Se demostró la viabilidad de utilizar modelos de elementos finitos para simular el comportamiento mecánico y de deformación del suelo en una situación simulada de hincado de pilotes. El próximo paso será la optimización dicho proceso para reducir la fuerza (carga) utilizada, mediante el uso de diferentes procedimientos de ejecución. Esto permitirá comparar los resultados obtenidos a través de pruebas a escala con la estimación de resultados en los modelos de elementos finitos.
- A pesar de haber mencionado el problema de la socavación en la presente Tesis Doctoral, esta cuestión en parques eólicos marinos requiere más investigación a lo largo de los años. Es importante seguir debatiendo si tiene sentido proteger las bases de las turbinas contra la erosión o si resulta más rentable permitir que la erosión ocurra naturalmente durante la vida útil de los parques eólicos, lo que podría ahorrar costos asociados con la instalación de medidas contra la erosión, como la extracción de materiales de canteras, el uso de equipos pesados y los impactos ambientales. Además, la no instalación de medidas contra la erosión podría simplificar considerablemente las fases posteriores del proyecto, como el proceso de desmantelamiento.
- Abordando este tema de la socavación, se han iniciado estudios para probar la instalación de posidonia sintética que retenga el material en la base de la cimentación. Se han realizado ensayos en el laboratorio de Color del departamento de Óptica de la Universidad de Alicante de 3 polímeros (poliamida, polipropileno y poliéster) en filamentos para ver el desgaste frente a la exposición al sol en condiciones sumergidas. Todos estos resultados serán analizados minuciosamente en investigaciones posteriores.
- También se abre camino a la realización de ensayos en el Canal de Agua de la Universidad Politécnica de Madrid con el fin de probar la eficacia de las mencionadas posidonias sintéticas a la hora de retener el material. Para ello, se probaría a lanzar agua con arena

aguas arriba del canal para transportarla hasta aguas abajo donde esperaría la posidonia sintética. El objetivo sería comprobar que porcentaje de material sería capaz de retener los distintos polímeros.

- En cuanto a ensayos a escala, como es lógico, debido a la nula financiación tuvimos que realizar los ensayos a escala reducida en el laboratorio. Sin embargo, si se pudiera obtener una financiación lo suficientemente grande para realizar ensayos en el mar in situ empleando esta metodología, sería un gran avance en la eólica offshore.
- Por último, se abre una línea de investigación junto a la Universidad CUJAE, en la Habana (Colombia) referente a encontrar nuevas técnicas para disminuir el coste de instalación del monopilote. Para ello se analiza la técnica llamada “perforaciones de sacrificio” reforzadas, con el objetivo de evaluar su influencia sobre la fuerza de penetración, espesor de pared y desplazamientos horizontales del monopilote instalado en lecho marino arenoso y sometido a cargas de oleaje, viento y sismo simultáneamente. Para ello, se realiza un barrenado previo del suelo alrededor del monopilote, se logra un menor gasto energético y es posible disminuir el espesor de pared del tubo que conforma el fuste del monopilote.

## PRIMER APÉNDICE. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

En este primer apéndice, se agrupan las fuentes bibliográficas fundamentales que han sido empleadas para la realización de la investigación que constituye el núcleo de esta Tesis Doctoral. Posteriormente, se presenta el listado exhaustivo y detallado de todas estas referencias utilizadas.

- [1] Alexa Calderon Goyeneche, L.; Mayerly Argüello Romero, D. Estado del Arte del Uso del Ensayo spt Con Fines de Correlación de Parametros Mohr-coulomb; Universidad Católica de Colombia: Bogota, Colombia, 2014.
- [2] Almazán Gárate, J.L.; Palomino Monzón, M.C.; García Montes, J.R. Introducción a la Dinámica de las Formas Costeras; Universidad Politécnica de Madrid: Madrid, Spain, 2000.
- [3] API. RP 2A-WSD—Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms; American Petroleum Institute: Washington, DC, USA, 2010.
- [4] Arroyo, M.; Abadías, D.; Alcoverro, J.; Gens, A. Shallow Foundations for Offshore Wind Towers. In Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, France, 2–6 May 2013. Arroyo,
- [5] ASTM D6913/D6913M-17. Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. 2017
- [6] Bruun, P., 1962. Sea-Level Rise as a Cause of Shore Erosion. American Society of Civil Engineers. Journal of the Waterways and Harbours Division. 88, 117–130.
- [7] Bülow, L.; Jorgensen, L.; Gravessen, H. Kriegers Flak Offshore Wind Farm. Basic Data for Conceptual Design of Foundations; Vattenfall Vindkraft AB: Solna, Sweden, 2009.
- [8] Butlanska, J.; Arroyo, M.; Gens, A.; O'Sullivan, C. Multi-scale analysis of cone penetration test (CPT) in a virtual calibration hamber. Can. Geotech. J. 2014, 51, 51–66.
- [9] Butlanska, J.; Arroyo, M.; Gens, A. Steady State of Solid-Grain Interfaces During Simulated CPT. Studia Geotech. Mech. 2013, 35, 13–22.
- [10] Byrne, B.W.; McAdam, R.; Burd, H.J.; Houlsby, G.T. PISA- New Design Methods for Offshore Wind Turbines. In Proceedings of the 8th International Conference, Royal Geographical Society, London, UK, 12–14 September 2017.
- [11] Chow, F.C. Investigations into the Behaviour of Displacement Piles for Offshore Foundations. Ph.D. Thesis, Imperial College, London, UK, 1997.
- [12] De Vos, L.; Frigaard, P., and De Rouck, J., 2007. Wave run-up on cylindrical and cone shaped foundations for offshore wind turbines. Coastal Engineering, 54(1), 17–29.
- [13] Dean, R.G. and Maurmeyer, E.M., 1983. Models for beach profile response. In: Komar, P.D. (edition). Handbook of Coastal Processes and Erosion. Boca Ratón. CRC Press, 151–166
- [14] DNVGL. International Guidelines DNV-os-j101, on Design of Offshore Wind Turbine. 2013.
- [15] DNVGL-ST-0126. Support Structure for Wind Turbines; DNV: Bærum, Norway, 2021.
- [16] Esteban, M.D.; Diez, J.; López, J.S.; Negro, V. Why offshore wind energy? Renew. Energy 2011, 36, 444–450.
- [17] EWEA-Wind Europe (European Wind Energy Association). Key Trends and Statistics H1. EWEA Tech. Rep.; EWEA: Brussels, Belgium, 2018.
- [18] Goda, Y., 2010. Random seas and design of maritime structures. Adv. Series Ocean Eng. 33, third ed.
- [19] Guillen, J.; Hoekstra, P. The Equilibrium Distribution of Grain Size Fractions and its Implications for Cross-Shore Sediment Transport: A conceptual model. Mar. Geol. 1996, 135, 15–33.
- [20] Gurevitz Esposito, R.; Quadros Velloso, R.; Amaral Vargas, E.; Ragoni Danziger, B. Multi-scale sensitivity analysis of pile installation using DEM materials in penetration analyses. Comput. Part. Mech. 2018, 5, 375–386.

- [21] GWEC Global Wind Report 2018, Global Wind Energy Council, 2019.
- [22] Jardine, R.J.; Standing, J.R.; Chow, F.C. Some Observations of the Effects of Time on the Capacity of Piles Driven in Sand. *Géotechnique* 2006, 554, 227–244.
- [23] Jiang, M.J.; Harris, D.; Zhu, H.H. Future continuum models for granular materials in penetration analyses. *Granul. Matter* 2007, 9, 97–108.
- [24] Kelly, R.B., Houlsby, G.T. and Byrne, B.W., *A comparison of field and laboratory caisson tests in sand and clay*. *Géotechnique* 56 9: 617-626, 2006.
- [25] Keulegan, G.H. and Carpenter, L.H., 1958. Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid. *Journal Research of the National Bureau of Standards*, 60(5), 423-440.
- [26] Klyuev, R.V.; Bosikov, I.I.; Gavrina, O.A. Use of wind power stations for energy supply to consumers in mountain territories. In *Proceedings of the 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Chelyabinsk, Russia, 1–3 October 2019.
- [27] Lam, I.P.O., Martin, G.R., *Seismic Design of High-Way Bridge Foundations*. *US Department of Transportation Report No. FHWA/RD-86/102*, 1986.
- [28] Lam, I.P.O. Diameter Effects on p-y Curves. *Deep Marine Foundations—A Perspective on the Design and Construction of Deep Marine Foundations*. In *Proceedings of the Third International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG 2015)*, Oslo, Norway, 10–12 June 2015.
- [29] Latini, C.; Zania, V. *Triaxial Tests in Fontainebleau Sand*; Technical University of Denmark: Kgs. Lyngby, Denmark, 2016.
- [30] Lesny, K. *Foundations for Offshore Wind Turbines: Tools for Planning and Design*; VGE: Essen, Germany, 2010.
- [31] Lesny, K. Design approaches of Eurocode 7 and their effect on the safety of shallow foundations, ICASP10. In *Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*; Taylor & Francis: Abingdon-on-Thames, UK, 2007.
- [32] Lopez, I.; Lopez, M.; Aragonés, L.; García-Barba, J.; Lopez, M.P.; Sánchez, I. The Erosion of the Beaches on the Coast of Alicante: Study of the Mechanisms of Weathering by Accelerated Laboratory Tests. *Sci. Total Environ.* 2016, 567, 191–204.
- [33] Lopez, I. *Clasificación Morfológica de las Playas y Modelado del Perfil Transversal en Valencia, Alicante y Murcia*. Ph.D. Thesis, Universidad Alicante, San Vicente del Raspeig, Spain, 2016.
- [34] Luengo Frades, J.; García Barba, J.; Negro, V.; López Gutiérrez, J.S., and Esteban, M.D., 2018. Barcos para la construcción de parques eólicos offshore: ventanas temporales y clasificación COVEMA. *Libro de ponencias de las XIV Jornadas españolas de ingeniería de Costas y Puertos*. Ed. Universitat Politècnica de València, 189-198
- [35] Luengo Frades, J.; Negro Valdecantos, V.; García Barba, J.; Lopez Guitierrez. J.S.; Esteban, M.D. New Detected Uncertainties in the Design of Foundations for Offshore Wind Turbines. *Renew. Energy* 2019, 131, 667–677
- [36] Luengo Frades, J.; Negro, V.; García-Barba, J.; Martín-Antón, M.; López-Gutiérrez, J.S.; Esteban, M.D., and Moreno Blasco, L.J., 2019. Preliminary design for wave run-up in offshore wind farms: Comparison between theoretical models and physical model tests. *Energies*, 12 (3), 492.
- [37] Luengo Frades, J.; Negro V.V.; García Barba, J.; Soriano Vicedo, J.; Martín-Antón, M. Blue Economy: Compatibility between the Increasing Offshore Wind Technology and the Achievement of the SDG. *J. Coast. Res.* 2020, 95, 1490–1494.
- [38] Martín-Antón, M.; Negro, V.; Del Campo, J.M.; López Gutiérrez, J.S., and Esteban, M.D., 2016. Review of coastal land reclamation situation in the world. *Journal of Coastal Research*, SI75, 667-671. ISSN 0749-0208.
- [39] McCowan, J., 1894. On the highest wave of permanent type. *Phil. Mag.* 38, 351-358.

- [40] Negro, V.; López-Gutiérrez, J.S.; Esteban, M.D.; Del Campo, J.M., and Luengo Frades, J. 2018. Action strategy for studying marine and coastal works with climate change on the horizon. *Journal of Coastal Research*, SI85, 506-510. ISSN 0749-0208.
- [41] Negro, V.; López-Gutiérrez, J.S.; Esteban, M.D., and Matutano, C., 2014, Uncertainties in the design of support structures and foundations for offshore wind turbines. *Renewable Energy*. 63, 125-132.
- [42] Papadimitriou, A. G., Bouckovalas, G. D., *Plasticity model for sand under small and large cyclic strains: a multi-axial formulation. Soil Dyn. and Earthquake Engn* 22 3: 191-204, 2002.
- [43] Passon, P.; Branner, K.; Larsen, S.E.; Hvenekær Rasmussen, J. *Offshore Wind Turbine Foundation Design*; DTU Wind Energy: Roskilde, Denmark, 2015.
- [44] Phuong, N.T.V.; Van Tol, A.F.; Elkadi, A.S.K.; Rohe, A. Numerical investigation of pile installation effects in sand using material point method. *Comput. Geotech.* 2016, 73, 58–71.
- [45] Randolph, M.F. *Science and Empiricism in Pile Foundation Design. Géotechnique* 2003, 53, 847–875.
- [46] Reese, L., Cox, W. R. and Koop, F. D., *Analysis of laterally loaded piles in sand. Proc. Offshore Tech. Conf., Houston*, 1974
- [47] Song Dai, B.H.; Guoxiang, H.; Xiaoqiang, G.; Liu, J.; Shiliang, L. Failure Mode of Monopile Foundation for Offshore Wind Turbine in Soft Clay Under Complex Loads. *Mar. Georesources Geotechnol.* 2020, 1–12, doi:10.1080/1064119X.2020.1855682.
- [48] Soriano Vicedo, J.; Luengo Frades, J.; García Barba, J.; Negro Valdecantos, V. Modified Soil Test for Scour Analysis on Offshore Windfarm Foundations. *Trans. Eng. Sci.* 2019, 125, 185–194.
- [49] Soriano Vicedo, J.; García Barba, J.; Luengo Frades, J.; Negro Valdecantos, V. Scale Tests to Estimate Penetration Force and Stress State of the Silica Sand in Windfarm Foundations. *Energies* 2021, 14, 5904.
- [50] Sumer, B.M. and Fredsoe, J., 2002. *The mechanics of scour in the marine environment.* World Scientific Press, Singapore. Sustainable Development Goals. United Nations, 2015-2030.
- [51] Taborda, D.M.G.; Zdravkovi, L.; Kontoe, S.; Potts, D.M. Computational Study on the Modification of a Bounding Surface Plasticity Model for Sands. *Comput. Geotech.* 2014, 59, 145–160.
- [52] Tatsuoka, F.; Sato, T.; Park, C.; Kim, Y.S.; Mukabi, J.N.; Kohata, Y. Measurements of Elastic Properties of Geomaterials in Laboratory Compression Tests. *Geotech. Test. J.* 1994, 17, 80–84.
- [53] UNE 103101:1995 Standard. Análisis Granulométrico de Suelos por Tamizado. (Article Size Analysis of a Soil by Screening); Spanish Association for Standardisation-UNE: Madrid, Spain, 1995.
- [54] UNE 103 401 Standard. Determinación de los Parámetros Resistentes al Esfuerzo Cortante de una Muestra de Suelo en la Caja de Corte Directo (Determination of the Shear Resistant Parameters of a Soil Sample in the Direct Cutting Box); Spanish Association for Standardisation- UNE: Madrid, Spain, 1998.
- [55] UNE 103 502 Standard. Método de Ensayo para Determinar en Laboratorio el Índice C.B.R de un Suelo (Test Laboratory Method for Determining in a Soil the c.b.r. Index.); Spanish Association for Standardisation-UNE: Madrid, Spain, 1995.
- [56] UNE-EN 933-1 Standard. Ensayos para Determinar las Propiedades Geométricas de los Áridos (Tests to Determine the Geometric Properties of Aggregates); Spanish Association for Standardisation-UNE: Madrid, Spain, 2012.
- [57] UNE-EN 1097-6 Standard. Ensayos para Determinar las Propiedades Mecánicas y Físicas de los Áridos. Parte 6: Determinación de la Densidad de Partículas y la Absorción de Agua (Tests to Determine the Mechanical and Physical Properties of Aggregates); Spanish Association for Standardisation-UNE: Madrid, Spain, 2014.
- [58] UNE-EN ISO 17892-9:2019 Standard. Investigación y Ensayos Geotécnicos. Ensayos de Laboratorio de Suelos. Parte 9: Ensayos de Compresión Triaxial Consolidados en Suelos Saturados de Agua (Geotechnical Investigation and Testing–Laboratory Testing of Soil–Part 9: Consolidated Triaxial Compression Tests on Water Saturated Soils. Part 6: Determination of Particle Density and Water Absorption); Spanish Association for Standardisation-UNE: Madrid, Spain, 2019.

- [59] UNE-EN ISO 6892-1:2020 Standard. Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de Ensayo a Temperatura Ambiente (Metallic Materials—Tensile Testing—Part 1: Method of Test at Room Temperature); Spanish Association for Standardisation-UNE: Madrid, Spain, 2020.
- [60] Whitehouse, R.J.S., Sutherland, J., O'Brien, D., *Seabed scour assessment for offshore windfarm*, 2006.
- [61] Zhang, X.; Liu, C.; Ye, J. Model Test Study of Offshore Wind Turbine Foundation under the Combined Action of Wind Wave and Current. *Appl. Sci.* 2022, 12, 5197.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

## SEGUNDO APÉNDICE. OTROS TRABAJOS DE LA INVESTIGACIÓN

Seguidamente, se adjunta un cuarto artículo enviado a la revista científica WIT Transactions on Engineering Sciences y presentado en el 19th International Conference on Computational Methods and Experimental Measurements del Wessex Institute. Este artículo está vinculado a la temática central de esta Tesis Doctoral, resultado de una serie de ensayos CBR realizados.

La Tabla 20 presenta los datos clave del artículo en cuestión:

Tabla 20. Principales Características del Cuarto Artículo.

TÍTULO	MODIFIED SOIL TESTS FOR SCOUR ANALYSIS ON OFFSHORE WINDFARM FOUNDATIONS
AUTORES	JORGE SORIANO VICEDO, JORGE LUENGO FRADES, JAVIER GARCÍA BARBA y VICENTE NEGRO VALDECANTOS
REVISTA	WIT Transactions on Engineering Sciences
EDITORIAL	WIT Press
ISSN	1743-3533
DOI	doi:10.2495/CMEM190181
AÑO	2019
NÚMERO DE PÁGINAS	10
INDICIOS DE CALIDAD	Cuartil Q4 según SJR
FACTOR DE IMPACTO	0.41
FACTOR DE IMPACTO EN LOS ÚLTIMOS 5 AÑOS	0.438

### Razón de ser del artículo:

La razón de ser del artículo es analizar el comportamiento de las arenas degradadas sobre las cuales se instalan parques eólicos marinos con el fin de evitar procesos de socavación y licuefacción.

En los trabajos previos realizados, no se ha tenido en cuenta el estado real del suelo sumergido donde se construye la cimentación. Se ha evaluado un material con características similares al real, pero en condiciones secas, como sucedió en el proyecto PISA donde se llevaron a cabo pruebas de cimentación para turbinas marinas en tierra firme.

Para esta investigación, se realizaron ensayos CBR (Californian Bearing Ratio), como ensayos de compactación de arenas, similar a ensayos "in situ".



## **Resumen:**

El análisis de los procesos de erosión que siguen a los procedimientos de hincas de pilotes en plataformas eólicas marinas es uno de los principales problemas asociados a esta nueva forma de generación de energía limpia. Actualmente, no existen estudios a escala que analicen el comportamiento mecánico y de deformación tanto del material del que están hechos los pilotes que sostienen las turbinas y las aspas eólicas (grandes pilotes huecos de acero con un diámetro de 8 m y un grosor de 15-20 cm), como del suelo donde se hunde el pilote.

Normalmente, estos elementos se instalan sobre arenas de granulometría muy fina desplazadas desde los límites de la playa seca hacia los límites mar adentro y donde, debido a esto, no pueden regresar a su estado natural en su ubicación anterior. Además, los pocos estudios a escala realizados en suelos secos similares a los que se encuentran en la zona de instalación de las turbinas no han tenido en cuenta un aspecto fundamental, la presencia de agua de mar.

Este artículo presenta los resultados obtenidos de ensayos para analizar el comportamiento del material base sobre el cual se instalan las turbinas (arenas degradadas). Estas pruebas incluyen ensayos de corte directo y una modificación del ensayo de índice de soporte de California (CBR), que se llevan a cabo en muestras completamente sumergidas. El objetivo es comparar los resultados con los obtenidos en pruebas estándar y analizar su idoneidad para estudios de campo en parques eólicos marinos.

## **Conclusión:**

Se llevó a cabo una prueba de CBR modificada que permitió tener una idea aproximada del comportamiento mecánico y resistente del suelo de cimentación sumergido, obteniendo la penetración de un pistón en una muestra de material sumergido. La comparación de los resultados con los obtenidos en la prueba estándar normalizada permitiría establecer una relación entre los materiales secos y sumergidos, y los valores de penetración podrían estimarse sin realizar una prueba "in situ" en el lecho marino. Simplemente con una granulometría del material y la prueba CBR normalizada, se aplicaría un factor de corrección para obtener valores reales sumergidos.

Los valores obtenidos muestran una disminución en la fuerza de penetración del 27% y 44%, de los ensayos sumergidos respecto a los ensayos en seco, para obtener el mismo valor de penetración. Aunque las granulometrías y las pruebas de corte directo son similares, aunque con valores más bajos en la prueba de corte directo en la arena de Algueña, existe una relación entre este valor y el de la prueba de penetración sumergida que se ha realizado.

Por lo tanto, parece que se puede establecer una relación entre los valores reales sumergidos para una cimentación offshore y los obtenidos para un material similar en condiciones estándar de prueba CBR.