



ESCUELA DE DOCTORADO
INTERNACIONAL DE LA USC

Emilio Fernando
García García

Tesis doctoral

Presentación y análisis de
viabilidad de una nueva
tipología de muelle: el Pilote-
Lámina

Lugo, 2022



TESIS DE DOCTORADO

**PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE VIABILIDAD
DE UNA NUEVA TIPOLOGÍA DE MUELLE:
EL PILOTE-LÁMINA**

Emilio Fernando García García

ESCUELA DE DOCTORADO INTERNACIONAL DE LA UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA PARA EL DESARROLLO RURAL Y CIVIL

LUGO

2022

D./Dna. **Emilio Fernando García García**

Título da tese: **Presentación e análise de viabilidade dunha nova tipoloxía de peirao: o Pilote-Lámina**

Presento a miña tese, seguindo o procedemento axeitado ao Regulamento, e declaro que:

- 1) A tese abarca os resultados da elaboración do meu traballo.
- 2) De ser o caso, na tese faise referencia ás colaboracións que tivo este traballo.
- 3) Confirmo que a tese non incorre en ningún tipo de plaxio doutros autores nin de traballos presentados por min para a obtención doutros títulos.
- 4) A tese é a versión definitiva presentada para a súa defensa e coincide a versión impresa coa presentada en formato electrónico

E comprométome a presentar o Compromiso Documental de Supervisión no caso de que o orixinal non estea na Escola.

En **Oleiros, 28 de Setembro de 2022.**

Sinatura electrónica

D./Dna. **José Gregorio Iglesias Rodríguez**

En condición de: **Director/a**

Título da tese: **Presentación e análise de viabilidade dunha nova tipoloxía de peirao: o Pilote-Lámina**

INFORMA:

Que a presente tese, correspóndese co traballo realizado por D/Dna Emilio Fernando García García, baixo a miña dirección/titorización, e autorizo a súa presentación, considerando que reúne os requisitos esixidos no Regulamento de Estudos de Doutoramento da USC, e que como director/titor desta non incorre nas causas de abstención establecidas na Lei 40/2015.

En Cork, 28 de Setembro de 2022

Sinatura electrónica

D./Dna. **Alberte Castro Ponte**

En condición de: **Titor/a e director/a**

Título da tese: **Presentación e análise de viabilidade dunha nova tipoloxía de peirao: o Pilote-Lámina**

INFORMA:

Que a presente tese, correspóndese co traballo realizado por D/Dna Emilio Fernando García García, baixo a miña dirección/titorización, e autorizo a súa presentación, considerando que reúne os requisitos esixidos no Regulamento de Estudos de Doutoramento da USC, e que como director/titor desta non incorre nas causas de abstención establecidas na Lei 40/2015.

En Lugo , 29 de Setembro de 2022

Sinatura electrónica

AGRADECIMIENTOS

Con estas líneas quisiera expresar mi enorme gratitud, de un modo muy especial a mis directores Gregorio Iglesias Rodríguez y Alberte Castro Ponte, ya que su participación y el tiempo dedicado han sido fundamentales para que esta tesis doctoral haya sido posible. Su apoyo a nivel académico y profesional durante estos últimos años me ha permitido evolucionar y continuar mi aprendizaje como ingeniero civil. Asimismo, quiero agradecerles particularmente el apoyo brindado a nivel personal. Gracias por haber aceptado y darme la oportunidad de realizar esta tesis doctoral.

Agradecer el enorme trabajo realizado por los participantes en el proyecto Pilote-Lámina: las empresas: Construcciones López Cao S.L., Temha S.L., Grupo ABN, Enxa Galicia; y las universidades de A Coruña (UDC) y Santiago de Compostela (USC). También a Enrique Urcola, Patricio Aguilar, Rosa Quintana y Diego Calvo por su implicación en el proyecto.

Me gustaría agradecer a los compañeros del grupo de investigación *CI-GEO* de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Lugo (USC) por su colaboración y su inestimable ayuda: Carlos Núñez, Rodrigo Carballo, Iván López, Mario López, Iván Valcarce. También mostrar mi gratitud a los integrantes del grupo de investigación *gCONS* de la Universidad de A Coruña: Manuel Herrador, Fernando Martínez, Belén González, etc.

A los que me han acompañado desde el inicio o se han ido incorporando en este largo camino, no solo en el trabajo de la Tesis, sino también en la promoción y puesta en valor del sistema Pilote Lámina; como Javier Calviño, Laura Cambeiro, Santiago Bellas, David Cota, Guillermo Grandío, Diego Otero, Dimas Purriños. En especial quiero agradecer a Evaristo Landeira, Práctico Mayor del puerto de A Coruña, quien me enseñó mucho del mundo portuario; excelente persona y gran amigo.

El apoyo y ayuda de todos durante este trayecto han sido fundamentales para completarlo con éxito.

Muchas gracias también a mi familia que con su apoyo y cariño me han hecho más llevadero los días, especialmente los más difíciles.

A mi hijo

ÍNDICE

Resumo	1
Resumen	3
Abstract	5
Índice de Figuras	7
Índice de Tablas	17
1. Introducción	19
1.1. Motivación	19
1.2. Objetivos	23
1.3. Estructura de la Tesis Doctoral	24
2. Estado del Arte	27
2.1. Elementos constitutivos de una obra de atraque y amarre	27
2.2. Clasificación según su tipología estructural	29
2.3. Principales tipologías de muelle	34
2.3.1. Muelle de cajones	34
2.3.2. Muelle de bloques	40
2.3.3. Muelle de hormigón sumergido	42
2.3.4. Muelle de pilotes	44
2.3.5. Muelle de pantallas	54
2.3.6. Tecnología OPEN CELL SHEET PILE (OCSP)	60
2.4. Modos de fallo	61
2.4.1. Muelles de gravedad	63
2.4.2. Muelles de pilotes	63
2.4.3. Muelles de pantallas	65
2.5. Criterios de selección de la tipología estructural	66

2.6.	Estructuras antirreflejantes	71
3.	Presentacion del sistema Pilote-Lámina	73
3.1.	Comportamiento estructural del sistema	74
3.2.	Elementos constitutivos del sistema	75
3.2.1.	Pilotes	75
3.2.2.	Láminas	76
3.2.3.	Sistema de conexión entre pilote y lámina	78
3.2.4.	Anclajes y muros de reacción	79
3.2.5.	Viga de coronación	79
4.	Primera experiencia constructiva	83
4.1.	Elección del emplazamiento	83
4.1.1.	Puerto de Ferrol	84
4.1.2.	Puerto de Vilanova de Arousa	87
4.2.	Descripción de la actuación	91
4.3.	Procedimiento constructivo	94
4.3.1.	Fabricación de elementos en taller	96
4.3.2.	Ejecución del relleno provisional	107
4.3.3.	Ejecución de la línea de pilotes	108
4.3.4.	Ejecución de los anclajes	114
4.3.5.	Colocación de las láminas	118
4.3.6.	Ejecución del relleno definitivo	121
4.3.7.	Ejecución de la viga cantil	125
4.3.8.	Muelle terminado	126
4.3.9.	Sistemas de auscultación	130
4.4.	Análisis económico	130
4.4.1.	Coste económico de tipologías clásicas	130
4.4.2.	Coste económico muelle de Vilanova de Arousa	132
4.5.	Conclusiones	134

5. Ensayos hidrodinámicos	137
5.1. Fundamentos	137
5.2. Metodología	139
5.2.1. Canal de ensayos	139
5.2.2. Definición de la escala de trabajo	142
5.2.3. Modelo físico	144
5.2.4. Disposición experimental	145
5.2.5. Programa de ensayos	149
5.2.6. Caracterización del comportamiento	151
5.3. Resultados	154
5.3.1. Análisis onda incidente-reflejada	154
5.3.2. Rebase	155
5.3.3. Amplificación de la altura de ola	157
5.3.4. Presiones en el paramento	158
5.4. Conclusiones	164
6. Adaptación a mayores calados	167
6.1. Propuestas de adaptación	168
6.2. Procedimiento constructivo	169
6.3. Cálculos estructurales	175
6.3.1. Metodología	175
6.3.2. Resultados	180
6.4. Conclusiones	189
7. Conclusiones y futuras líneas de investigación	191
7.1. Conclusiones	191
7.2. Futuras líneas de investigación	193
Bibliografía	195

RESUMO

As infraestruturas portuarias son de primordial importancia para as cadeas de transporte intermodal que sustentan o comercio internacional de mercadorías e para as economías dos países e rexións onde se atopan. A creación de novos terreos portuarios para o intercambio de mercadorías por vía marítima require a construción de obras de atraque e amarre para os buques que supoñen grandes investimentos, podendo ser de diversa tipoloxía en función das condicións existentes no lugar.

Nesta tese preséntase unha nova tipoloxía de obras de atraque e amarre denominada sistema Pilote-Lámina, baseada no funcionamento conxunto de pilotes e elementos de tipo lámina. A nivel estrutural, a resposta do sistema descomponse entre ambos, de forma que os pilotes traballan fundamentalmente a flexión e as láminas a tracción, conseguindo a optimización dos seus materiais constitutivos, xa que permite aproveitar ao máximo as súas propiedades mecánicas. A viabilidade desta nova tipoloxía analízase desde distintos puntos de vista (funcional, procedemento construtivo, custo económico, efectos ambientais, etc.) e compárase con outras tipoloxías existentes.

En primeiro lugar, analízase polo miúdo a primeira experiencia de aplicación práctica desta nova tecnoloxía: a construción dun prototipo a escala real de peirao no porto de Vilanova de Arousa (Galicia). Posteriormente, estúdase o comportamento hidrodinámico do sistema mediante a realización de probas de laboratorio con modelos físicos a escala reducida. Por último, propónse unha forma de adaptar o sistema a outros escenarios máis esixentes, fundamentalmente maiores calados, mediante a introdución de modificacións, tanto no deseño do sistema como no seu procedemento construtivo. O sistema adaptado analízase estruturalmente para comprobar a súa aplicabilidade para alturas de peirao de ata 26 metros.

As conclusións obtidas nesta tese de doutoramento permiten avanzar na comprensión e desenvolvemento do innovador sistema Pilote Lámina como nova tecnoloxía para a construción de peiraos portuarios.

RESUMEN

Las infraestructuras portuarias tienen una importancia capital para las cadenas de transporte intermodal que sustentan el comercio internacional de mercancías y para las economías de los países y de las regiones donde están situadas. La creación de nuevos terrenos portuarios para el intercambio de mercancías por vía marítima requiere de la construcción de obras de atraque y amarre para los buques que implican elevadas inversiones, existiendo diversas tipologías que se pueden emplear en función de las condiciones existentes en el emplazamiento.

En esta tesis, se presenta una nueva tipología de obra de atraque y amarre denominada sistema Pilote-Lámina, basada en el funcionamiento conjunto de pilotes y elementos tipo lámina. A nivel estructural, la respuesta del sistema se descompone entre ambos, de modo que los pilotes trabajen fundamentalmente a flexión y las láminas a tracción, consiguiendo una optimización de sus materiales constitutivos, ya que permite aprovechar al máximo sus propiedades mecánicas. La viabilidad de esta nueva tipología se analiza desde diferentes puntos de vista (funcional, procedimiento constructivo, coste económico, efectos mediambientales, etc.) y se compara con otras tipologías existentes.

En primer lugar, se analiza en detalle la primera experiencia de aplicación práctica de esta nueva tecnología: la construcción de un prototipo a escala real de muelle en el puerto de Vilanova de Arousa (Galicia). Posteriormente, se estudia el comportamiento hidrodinámico del sistema mediante la realización de ensayos de laboratorio con modelos físicos a escala reducida. Finalmente, se propone un modo de adaptar el sistema a otros escenarios más exigentes, fundamentalmente mayores calados, mediante la introducción de modificaciones, tanto en el diseño del sistema como en su procedimiento constructivo. El sistema adaptado se analiza estructuralmente de cara a comprobar su aplicabilidad para alturas de muelle de hasta 26 metros.

Las conclusiones obtenidas en esta tesis doctoral permiten avanzar en la comprensión y el desarrollo del innovador sistema Pilote-Lámina como nueva tecnología de construcción de muelles portuarios.

ABSTRACT

Port infrastructures are of paramount importance for the intermodal transport chains that support international merchandise trade and for the economies of the countries and regions where they are located. The creation of new port land for the exchange of goods by sea requires the construction of docks for ships that involve high investments, existing various typologies that can be considered depending on the existing conditions on the site.

In this thesis, a new typology of dock called the Pilote-Lámina system is presented. It is based on the collaborative work of piles and sheet-type elements. At a structural level, the response of the system breaks down between both elements, so that the piles work fundamentally in bending and the sheets in tension, achieving optimization of their constituent materials, since it allows maximum use of their mechanical properties. The viability of this new typology is analyzed from different points of view (functional, construction procedure, economic cost, environmental effects, etc.) and compared with other existing typologies.

Firstly, the first experience of practical application of this new technology is analyzed in detail: the construction of a full-scale prototype of a dock in the port of Vilanova de Arousa (Galicia). Subsequently, the hydrodynamic behavior of the system is studied by carrying out laboratory tests with reduced-scale physical models. Finally, an adaptation of the system to other more demanding scenarios, fundamentally greater depths, is proposed by introducing modifications, both in its design and in its construction procedure. The adapted system is structurally analyzed in order to check its applicability for dock heights of up to 26 meters.

The conclusions obtained in this doctoral thesis allow to advance in the understanding and development of the innovative Pilote-Lámina system as a new technology for the construction of port docks.

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1.	Tipos de obra de atraque más empleados en función del tipo de tráfico. Adaptado con permiso de ref. [41]. Copyright, 2011, Puertos del Estado.	20
1.2.	Representación esquemática de un muelle de cajones. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.	21
1.3.	Representación esquemática de un muelle de pilotes. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.	21
1.4.	Recreación de muelle portuario construido con el sistema Pilote-Lámina. Adaptado con permiso de ref. [7].	22
1.5.	Comportamiento estructural del sistema. Elaboración propia.	23
2.1.	Ejemplo de obra fija cerrada de gravedad: muelle de cajones. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.	31
2.2.	Ejemplo de obra fija cerrada de pantallas. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.	32
2.3.	Geometrías en planta y sección tipo de una obra fija cerrada de recintos de tablestacas. Adaptado con permiso de ref. [41]. Copyright, 2011, Puertos del Estado.	33
2.4.	Ejemplo de obra fija abierta: muelle de pilotes. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.	34
2.5.	Sección tipo de un muelle de cajones. Adaptado con permiso de ref. [41]. Copyright, 2011, Puertos del Estado.	35
2.6.	Fabricación de cajones en dique flotante. Adaptado con permiso de ref. [37]. Copyright, 2006, Puertos del Estado.	36
2.7.	Remolque de cajón para su fondeo en su emplazamiento. Imagen propia.	37
2.8.	Remolque y fondeo de un cajón en su emplazamiento. Adaptado con permiso de ref. [37]. Copyright, 2006, Puertos del Estado.	38
2.9.	Procedimiento constructivo de un muelle de cajones. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.	40

2.10. Sección tipo de un muelle de bloques. Adaptado con permiso de ref. [41]. Copyright, 2011, Puertos del Estado.	41
2.11. Procedimiento constructivo de un muelle de bloques. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.	43
2.12. Sección tipo de un muelle de hormigón sumergido. Adaptado con permiso de ref. [41]. Copyright, 2011, Puertos del Estado.	44
2.13. Procedimiento constructivo de un muelle de hormigón sumergido. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.	45
2.14. Sección tipo de un muelle de pilotes. Adaptado con permiso de ref. [41]. Copyright, 2011, Puertos del Estado.	46
2.15. Procedimiento constructivo de un muelle de pilotes <i>in situ</i> por medio de plataforma terrestre. Fases 1-6. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.	49
2.16. Procedimiento constructivo de un muelle de pilotes <i>in situ</i> por medio de plataforma terrestre. Fases 7-12. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.	50
2.17. Procedimiento constructivo de un muelle de pilotes <i>in situ</i> por medio de medios flotantes. Fases 1-6. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.	51
2.18. Procedimiento constructivo de un muelle de pilotes <i>in situ</i> por medio de medios flotantes. Fases 7-12. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.	52
2.19. Hincado de pilote metálico mediante martillo vibrador Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.	54
2.20. Sección tipo de un muelle de pantallas sin plataforma. Adaptado con permiso de ref. [41]. Copyright, 2011, Puertos del Estado.	55
2.21. Sección tipo de un muelle de pantallas con plataforma. Adaptado con permiso de ref. [41]. Copyright, 2011, Puertos del Estado.	55

2.22. Hincado de tablestacas desde plataforma terrestre (izda.) o por medios flotantes (dcha.). Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.	57
2.23. Procedimiento constructivo de un muelle de tablestacas desde plataforma terrestre. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.	59
2.24. Procedimiento constructivo de un muelle de tablestacas con medios flotantes. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.	60
2.25. Modos de fallo geotécnicos en muelles de gravedad. Adaptado con permiso de ref. [43]. Copyright, 2005, Puertos del Estado.	64
2.26. Coeficientes de seguridad mínimos para muelles de gravedad. Adaptado con permiso de ref. [43]. Copyright, 2005, Puertos del Estado.	64
2.27. Modos de fallo geotécnicos en muelles de pilotes. Adaptado con permiso de ref. [43]. Copyright, 2005, Puertos del Estado.	65
2.28. Coeficientes de seguridad mínimos para muelles de pilotes. Adaptado con permiso de ref. [43]. Copyright, 2005, Puertos del Estado.	66
2.29. Modos de fallo geotécnicos en muelles de pantallas. Adaptado con permiso de ref. [43]. Copyright, 2005, Puertos del Estado.	67
2.30. Coeficientes de seguridad mínimos para muelles de pantallas. Adaptado con permiso de ref. [43]. Copyright, 2005, Puertos del Estado.	67
3.1. Recreación de muelle construido con el sistema Pilote Lámina. Adaptado con permiso de ref. [7].	73
3.2. Comportamiento estructural del sistema. Elaboración propia.	74
3.3. Esfuerzos sobre el pilote. Elaboración propia.	75
3.4. Recreación de línea de pilotes siendo ejecutada desde pontona. Adaptado con permiso de ref. [7].	76
3.5. Recreación de láminas colocadas entre los pilotes. Adaptado con permiso de ref. [7].	77

3.6.	Recreación de una vista posterior de las láminas con su geotextil correspondiente. Adaptado con permiso de ref. [7].	78
3.7.	Barras de anclaje entre los pilotes y sus correspondientes muros de reacción. Adaptado con permiso de ref. [7].	79
3.8.	Recreación de la fase de hormigonado de la viga de coronación del sistema. Adaptado con permiso de ref. [7].	80
3.9.	Recreación de muelle construido con el sistema Pilote Lámina. Adaptado con permiso de ref. [7].	81
3.10.	Sistema Pilote-Lámina ejecutado en el puerto de Vilanova de Arousa. Imagen propia.	81
4.1.	Vista aérea del puerto interior de Ferrol (recuadro rojo) [24]. PNOA cedido por copyright Instituto Geográfico Nacional - Xunta de Galicia.	84
4.2.	Emplazamiento seleccionado en el puerto de Ferrol [24]. PNOA cedido por copyright Instituto Geográfico Nacional - Xunta de Galicia.	85
4.3.	Operación de carga en el muelle Cerramiento Norte del Fernández Ladreda. Imagen propia.	86
4.4.	Emplazamiento seleccionado en el puerto de Vilanova de Arousa [24]. PNOA cedido por copyright Instituto Geográfico Nacional - Xunta de Galicia.	88
4.5.	Planta de la actuación prevista por Portos de Galicia para el puerto de Vilanova de Arousa. Usado con permiso de ref. [51]. Copyright, 2010 Portos de Galicia.	89
4.6.	Sección tipo de la actuación prevista por Portos de Galicia para el puerto de Vilanova de Arousa. Usado con permiso de ref. [51]. Copyright, 2010 Portos de Galicia.	90
4.7.	Planta y alzado de la actuación del proyecto PILOTE-LÁMINA. Elaboración propia.	93
4.8.	Camisa para pilote central (izda.) y detalle de las guías de conexión con las láminas (dcha.). Imagen propia.	97
4.9.	Guías de posicionamiento. Imagen propia.	98

4.10. Orejeta empleada para la conexión con los anclajes. Imagen propia.	99
4.11. Taladros realizados en la camisa para la posterior colocación de las orejetas. Imagen propia.	99
4.12. Camisa con sección reforzada para los pilotes de cierre (izda.) y detalle del perfil guías de conexión con las láminas (dcha.). Imagen propia.	100
4.13. Proceso de fabricación de las láminas con flejes metálicos embebidos. Imagen propia.	102
4.14. Desmoldado de una de las mitades de una lámina. Imagen propia.	103
4.15. Separación y rotura de las láminas por desplazamientos relativos. Imagen propia.	103
4.16. Diseño final de las laminas (izda.) y acopio de láminas (dcha.). Imagen propia.	104
4.17. Armadura de uno de los muros de reacción (izda.) y pieza de unión con la orejeta de anclaje (dcha.). Imagen propia.	105
4.18. Muros de reacción terminados. Imagen propia.	105
4.19. Montaje en taller de la armadura de la viga de coronación (izda.) y acopio a pie de obra con la losa inferior hormigonada (dcha.). Imagen propia.	106
4.20. Ejecución del relleno provisional. Imagen propia.	107
4.21. Relleno provisonal terminado y balsa de agua. Imagen propia.	108
4.22. Vista aérea del relleno provisonal con la balsa de agua en la zona central [24]. PNOA cedido por copyright Instituto Geográfico Nacional - Xunta de Galicia.	109
4.23. Maquinaria para la ejecución de los pilotes. Imagen propia.	110
4.24. Inicio de la perforación de uno de los pilotes. Imagen propia.	111
4.25. Sección soldada en cabeza de camisa (izda.) y base en el pie de la camisa para facilitar el apoyo (dcha.). Imagen propia.	112
4.26. Izado de una de las camisas perdidas de los pilotes. Imagen propia.	113
4.27. Armadura (izda.) y operación de hormigonado de uno de los pilotes de cierre (dcha.). Imagen propia.	113

4.28. Operarios realizando las perforaciones necesarias en un pilote para colocar la orejeta de anclaje (izda.) y detalle de una orejeta tras su colocación en el pilote (dcha.). Imagen propia.	115
4.29. Línea de pilotes con las orejetas colocadas y retirada parcial del relleno. Imagen propia.	115
4.30. Excavación del dique y posicionamiento de los muros de reacción. Imagen propia.	116
4.31. Unión del anclaje del pilote a la barra de anclaje (izda.) y muro de reacción unido al pilote (dcha.). Imagen propia.	116
4.32. Vista desde la parte frontal (izda.) y vista desde la parte posterior de la línea de pilotes (dcha.). Imagen propia.	117
4.33. Armadura de cosido (izda.) y unión hormigonada entre el pilote de cierre y el muelle existente (dcha.). Imagen propia.	118
4.34. Acopio de láminas (izda.) y preparación de las mismas para su izado (dcha.). Imagen propia.	119
4.35. Camión grúa (izda.) y embarcación de apoyo empleada en la colocación de las láminas (dcha.). Imagen propia.	119
4.36. Vista frontal de los primeros vanos completos. Imagen propia.	120
4.37. Vista posterior de los primeros vanos completos. Imagen propia.	120
4.38. Vista frontal (izda.) y vista posterior (dcha.) de la colocación de las láminas en una fase avanzada de su ejecución. Imagen propia.	121
4.39. Vista posterior del muelle con el geotextil colocado en el trasdós de las láminas. Imagen propia.	122
4.40. Vista posterior de la zona de cierre del último vano. Imagen propia.	123
4.41. Fases iniciales del relleno definitivo. Imagen propia.	123
4.42. Relleno definitivo terminado pendiente de ejecutar su coronación. Imagen propia.	124
4.43. Escollera de cierre ejecutada parcialmente. Imagen propia.	124
4.44. Colocación de la armadura de la viga cantil. Imagen propia.	125
4.45. Encofrado frontal de la viga cantil en los dos primeros vanos. Imagen propia.	126

4.46. Zona de cierre de la viga cantil antes de su hormigonado (izda.) y una vez finalizada su ejecución (dcha.). Imagen propia.	127
4.47. Vista frontal de la viga cantil una vez finalizada su ejecución. Imagen propia.	127
4.48. Vista frontal general del muelle una vez terminado. Imagen propia.	128
4.49. Vista frontal de la escollera de cierre del muelle una vez terminado. Imagen propia.	129
4.50. Vista aérea del Puerto de Vilanova con el muelle terminado [24]. PNOA cedido por copyright Instituto Geográfico Nacional - Xunta de Galicia.	129
4.51. Sección tipo de muelle de pilotes. Adaptado con permiso de ref. [38]. Copyright, 2013, Puertos del Estado.	132
4.52. Sección tipo de muelle de tablestacas. Adaptado con permiso de ref. [38]. Copyright, 2013, Puertos del Estado.	133
5.1. Canal de ola-corriente de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería. Imagen propia.	140
5.2. Pala de generación de oleaje. Imagen propia.	141
5.3. Vista lateral (izda.) y superior (dcha.) de los paneles longitudinales para la disipación de ondas transversales. Imagen propia.	141
5.4. Disposición geométrica de láminas y pilotes prevista inicialmente. Elaboración propia.	143
5.5. Representación 3D del modelo físico. Elaboración propia.	146
5.6. Disposición experimental de los sensores de presión (<i>PS</i>). Elaboración propia.	146
5.7. Modelo instalado en el canal (vista frontal). Imagen propia. . . .	147
5.8. Modelo instalado en el canal (vista lateral). Imagen propia. . . .	147
5.9. Disposición experimental de los sensores de nivel (<i>WG</i>). Elaboración propia.	148
5.10. Sistema de medición de rebase. Elaboración propia.	149
5.11. Coeficiente de reflexión (K_R), en función del periodo y la altura de ola. Oleaje regular. Elaboración propia.	155

5.12. Coeficiente de reflexión (K_R), en función del periodo y la altura de ola. Oleaje irregular. Elaboración propia.	156
5.13. Caudales de rebase (Q) a lo largo del tiempo para los diferentes periodos de pico ensayados bajo oleajes irregulares con $H_s = 1,5$ m. Elaboración propia.	158
5.14. Coeficiente de amplificación del sensor <i>WG6</i> respecto al sensor <i>WG5</i> . Elaboración propia.	159
5.15. Regresión lineal entre los valores de presión en pilote y lámina. Elaboración propia.	160
5.16. Evolución de las presiones máximas en función del período (T) y de la altura de ola (H) para el nivel medio. Elaboración propia.	161
5.17. Evolución de las presiones máximas en función del período (T) y de la altura de ola (H) para pleamar. Elaboración propia.	162
5.18. Diagramas de presiones máximas para el caso más desfavorable de pleamar. Elaboración propia.	163
5.19. Diagramas de presiones máximas para el caso más desfavorable de nivel medio. Elaboración propia.	163
5.20. Diagramas de presiones mínimas para el caso más desfavorable de pleamar. Elaboración propia.	164
5.21. Diagramas de presiones mínimas para el caso más desfavorable de nivel medio. Elaboración propia.	164
6.1. Sistema con doble anclaje. Elaboración propia.	169
6.2. Sistema con doble línea de pilotes. Elaboración propia.	170
6.3. Procedimiento constructivo: fase 1. Elaboración propia.	171
6.4. Procedimiento constructivo: fase 2. Elaboración propia.	172
6.5. Procedimiento constructivo: fase 3. Elaboración propia.	172
6.6. Procedimiento constructivo: fase 4. Elaboración propia.	173
6.7. Procedimiento constructivo: fase 5. Elaboración propia.	174
6.8. Procedimiento constructivo: fase 6. Elaboración propia.	174
6.9. Parámetros geométricos del modelo. Elaboración propia.	176
6.10. Vista 3D del modelo numérico implementado. Elaboración propia.	177

6.11. Desplazamientos en la cara frontal del pilote principal. Elaboración propia.	181
6.12. Desplazamientos en la cara frontal del pilote secundario. Elaboración propia.	181
6.13. Momentos flectores en el pilote principal. Elaboración propia.	182
6.14. Momentos flectores en el pilote secundario. Elaboración propia.	183
6.15. Diagrama de interacción Mu-Nu del pilote principal. Elaboración propia.	186
6.16. Diagrama de interacción Mu-Nu del pilote secundario. Elaboración propia.	186
6.17. Esfuerzo axial al que está sometido el anclaje superior. Elaboración propia.	188
6.18. Esfuerzo axial al que está sometido el anclaje inferior. Elaboración propia.	188

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Clasificación de las obras de atraque y amarre.	30
4.1. Parámetros principales de la actuación.	95
4.2. Coste económico por metro lineal de diversas secciones tipo de muelle [38].	131
4.3. Resumen del presupuesto de ejecución material del <i>Proyecto de muelle adosado al dique de Vilanova de Arousa</i> [51].	134
5.1. Predimensionamiento para el muelle de Vilanova de Arousa.	142
5.2. Dimensiones del modelo en función de la escala seleccionada	143
5.3. Niveles de mar considerados en Vilanova de Arousa	144
5.4. Profundidades de trabajo en el canal	144
5.5. Parámetros geométricos del modelo físico.	145
6.1. Parámetros geotécnicos empleados en los cálculos estructurales (γ_{sat} , peso específico saturado; E , módulo de elasticidad; φ , ángulo de rozamiento interno; c , cohesión).	178
6.2. Valores obtenidos del diagrama de interacción de la sección del pilote principal. Parámetros: x , distancia al eje neutro desde la fibra superior de la sección; Nu , valor de axil último; Mu , valor de momento flector último.	184
6.3. Valores obtenidos del diagrama de interacción de la sección del pilote secundario. Parámetros: x , distancia al eje neutro desde la fibra superior de la sección; Nu , valor de axil último; Mu , valor de momento flector último.	185

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo introductorio se expone la motivación existente detrás de la elaboración de esta Tesis Doctoral y se presentan los objetivos que se pretenden alcanzar con la misma. Adicionalmente, para finalizar, se describe la estructura de capítulos que se ha decidido emplear para organizar de forma coherente los contenidos del documento.

1.1. Motivación

La explotación portuaria tiene como objetivo fundamental conseguir la transferencia de mercancías entre los medios de transporte marítimo y terrestre de la forma más económica y rápida posible, estableciendo una zona de transferencia entre buque y tierra [11]. Esta transferencia de mercancías se realiza por medio de obras de atraque y amarre, que permiten el amarre del buque y garantizan las condiciones necesarias para llevar a cabo las operaciones de carga (descarga) y estiba (desestiba) de las mercancías, de acuerdo con ciertas especificaciones de seguridad.

Existen obras de atraque y amarre de diferentes tipos que se pueden clasificar atendiendo a varios criterios [41]. Entre todas ellas destacan fundamentalmente dos tipos de configuraciones: los muelles y los pantalanes, siendo la principal diferencia entre ellos la existencia de rellenos adosados que den lugar a la creación de una explanada en su parte posterior. En la Figura 1.1 se muestra las configuraciones más extendidas en función del tipo de tráfico.

En el caso particular de los muelles, que será el tipo de obra en el que se centrará esta Tesis Doctoral, se pueden definir [41] como: *estructuras de atraque y amarre fijas que conforman una línea de atraque continua, que en general excede en longitud al buque amarrado, y que están conectadas con tierra total o parcialmente mediante rellenos a lo largo de su parte posterior, dando lugar a la creación de explanadas traseras adosadas.*

Hasta la actualidad, se han empleado diferentes tipologías estructurales de muelle que presentan sus ventajas y sus inconvenientes. La selección de la ti-

1. Introducción

Tipo de mercancía		Sistema de manipulación de mercancías	Configuración física del atraque	
USO COMERCIAL	GRANELES LIQUIDOS	Productos Petrolíferos y químicos	Bombeo por tubería	MONOBOYA
			CAMPO DE BOYAS	
			PANTALÁN DISCONTINUO	
	GRANELES SÓLIDOS	Gases Licuados	Brazos de carga/descarga+tubería	PANTALÁN DISCONTINUO
				PANTALÁN CONTINUO O DISCONTINUO
	MERCANCÍA GENERAL	Con instalación especial	Sistemas continuos	PANTALÁN CONTINUO O DISCONTINUO
		Sin instalación especial	Sistemas discontinuos	MUELLE
		Carga Convencional	Sistemas discontinuos por elevación	MUELLE
			Sistemas discontinuos por elevación	MUELLE
		Ro-ro	Por medios rodantes	PANTALÁN DISCONTINUO
			Parte por medios rodantes y parte por elevación	MUELLE
		Ferris	Por medios rodantes	PANTALÁN CONTINUO
	Parte por medios rodantes y parte por elevación		MUELLE	
	Multipropósito	Medios rodantes+elevación	MUELLE	
	PASAJEROS	Ferris	Por medios rodantes	PANTALÁN CONTINUO
Parte por medios rodantes y parte por elevación			MUELLE	
USO PESQUERO	PESCA	Sistemas discontinuos por elevación	PANTALÁN CONTINUO	
			MUELLE	
USO NÁUTICO-DEPORTIVO			PANTALÁN CONTINUO	
USO INDUSTRIAL			MUELLE	
USO MILITAR			PANTALÁN CONTINUO	

Figura 1.1: Tipos de obra de atraque más empleados en función del tipo de tráfico. Adaptado con permiso de ref. [41]. Copyright, 2011, Puertos del Estado.

pología más conveniente para cada caso particular debe realizarse atendiendo a los requerimientos de uso y explotación establecidos y los condicionantes específicos existentes: geotécnicos, morfológicos, climáticos, medioambientales, constructivos, etc.

Las principales tipologías de muelle serán objeto de análisis detallado a continuación, en el capítulo dedicado a la revisión del Estado del Arte en materia de obras de atraque y amarre (Cap 2). A modo de introducción a las mismas se muestran en las Figuras 1.2 y 1.3 dos de las tipologías más extendidas: los muelles de cajones y los muelles de pilotes respectivamente. Cada una de ellas representa un ejemplo de lo que se entiende por un muelle cerrado (cajones),

1.1. Motivación

que no permite el flujo de agua a través de su paramento frontal, y un muelle abierto (pilotes) que sí lo permite, estando dotado de un talud de escollera en la parte inferior de la plataforma sustentada por los pilotes.

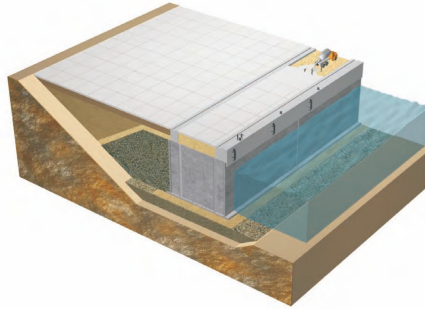


Figura 1.2: Representación esquemática de un muelle de cajones. **Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.**

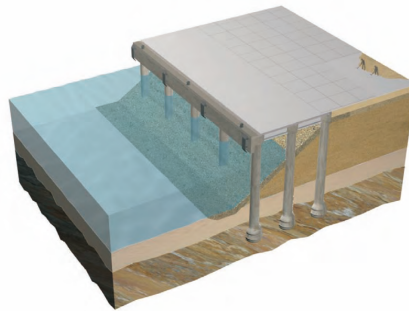


Figura 1.3: Representación esquemática de un muelle de pilotes. **Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.**

Tal y como se establece, tanto en la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante [39], como en la Ley de Puertos de Galicia [29], la investigación y el desarrollo tecnológico en materias vinculadas con la ingeniería portuaria es un ámbito de actuación fundamental que debe ser abordado y promocionado.

1. Introducción

Como humilde respuesta a esta necesidad surge esta Tesis Doctoral, cuya motivación reside en la búsqueda de nuevas tipologías de muelle, innovadoras y sostenibles, que puedan ser empleadas en sustitución de las tipologías tradicionales, en aquellos escenarios en los que representen una solución competitiva en términos de coste económico, plazo de ejecución, procedimiento constructivo o afección mediambiental.

A partir de la experiencia profesional acumulada por el autor de esta Tesis Doctoral en el ámbito de la ingeniería civil, y más específicamente en el campo de la ingeniería portuaria, se propone un nuevo concepto de tipología estructural para la contención de terrenos, teniendo como principal aplicación la construcción de obras de atraque y amarre de tipo muelle.

Este nuevo concepto [14], ideado y patentado [12, 13] por el autor, se denomina sistema Pilote-Lámina en referencia a sus dos elementos principales. Ambos se encargan conjuntamente de contener el empuje del terreno y los esfuerzos transmitidos desde la explanada portuaria debido al uso de la misma.

En la Figura 1.4 se presenta una recreación de muelle construido mediante esta nueva tecnología. En ella se pueden identificar, bajo la viga cantil, tanto los pilotes como las láminas que ocupan los vanos existentes entre ellos, cerrando el paramento frontal del muelle.

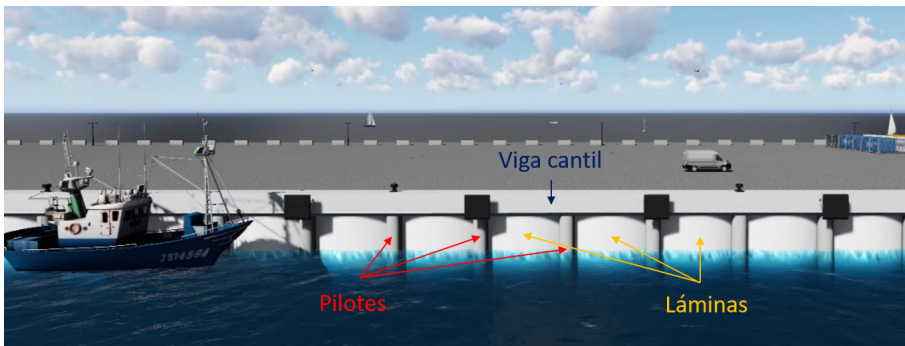


Figura 1.4: Recreación de muelle portuario construido con el sistema Pilote-Lámina. Adaptado con permiso de ref. [7].

1.2. Objetivos

Tal y como se explicará en detalle en el capítulo dedicado a la presentación del sistema (Cap 3), este se basa en la descomposición de la respuesta estructural entre ambos elementos de modo que los pilotes trabajen fundamentalmente a flexión y las láminas a tracción (Figura 1.5). De este modo, se consigue una optimización de los materiales constitutivos de ambos elementos, aprovechando al máximo sus propiedades mecánicas.

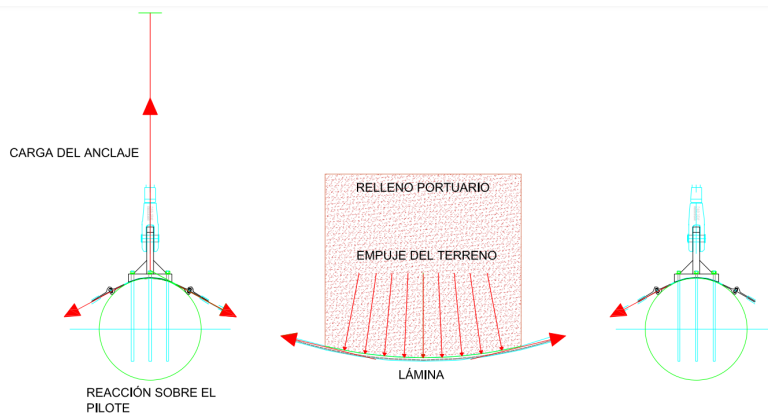


Figura 1.5: Comportamiento estructural del sistema. **Elaboración propia.**

1.2. Objetivos

El objetivo general de esta Tesis Doctoral es avanzar en la comprensión y el desarrollo del sistema Pilote-Lámina como nueva tecnología de construcción de muelles portuarios. Con esta meta en mente, el autor de la misma lleva trabajando intensamente durante los últimos años, tratando de impulsar esta tecnología como alternativa constructiva viable y competitiva en el ámbito de los proyectos de muelles portuarios.

Cabe destacar que el autor, en su afán por alcanzar este objetivo, ha sido parte fundamental para conseguir que se llegase a construir un prototipo a

1. Introducción

escala real del sistema en el puerto de Vilanova de Arousa (Galicia) que será objeto de análisis detallado en esta Tesis Doctoral.

Para lograr el objetivo general expuesto anteriormente, se plantean los objetivos específicos que se enumeran a continuación.

- Analizar en profundidad las principales tipologías estructurales empleadas hasta el momento en la construcción de obras de atraque y amarre, fundamentalmente muelles portuarios.
- Presentar y analizar en detalle el nuevo sistema Pilote-Lámina, propuesto para la contención de rellenos portuarios, de cara a comprender su funcionamiento a nivel estructural, así como los requerimientos de diseño a aplicar a todos sus elementos constitutivos.
- Analizar detalladamente la primera experiencia de ejecución de un muelle con la tecnología propuesta en el puerto de Vilanova de Arousa, identificando aquellos aspectos susceptibles de mejora relacionados con su diseño global y sus elementos constituyentes, o con el procedimiento constructivo empleado. Analizar también el coste económico de la actuación y las posibles afecciones medioambientales provocadas.
- Analizar el comportamiento hidrodinámico del sistema ante la acción del oleaje en términos de presiones generadas sobre el sistema, reflexión, y posibles eventos de rebase.
- Analizar la viabilidad del sistema en su concepción original ante escenarios más exigentes en comparación con el existente en el puerto de Vilanova de Arousa, y estudiar posibles modificaciones a incorporar tanto en el diseño del sistema como en el procedimiento constructivo para poder emplear el sistema para muelles de mayor calado.

1.3. Estructura de la Tesis Doctoral

Además de este primer capítulo de introducción, el presente documento consta de una serie de capítulos cuyo contenido se esboza a continuación.

1.3. Estructura de la Tesis Doctoral

- En el Capítulo 2: **Estado del Arte**, se realiza una revisión de las principales tipologías de obras de atraque y amarre existentes, centrándose fundamentalmente en el caso particular de los muelles. Se describen sus características fundamentales, los procedimientos constructivos asociados, y sus principales modos de fallo. Por último, se presentan varios sistemas que se han propuesto para reducir la reflexión del oleaje al incidir en los paramentos verticales de los muelles u obras de abrigo.
- En el Capítulo 3: **Presentación del sistema Pilote-Lámina**, se describe el sistema de contención de terrenos propuesto, analizando las bases de su comportamiento estructural y los elementos constitutivos que lo integran. Se exponen también ciertos aspectos relevantes que se deben tener en cuenta en las fases de diseño y ejecución del sistema.
- En el Capítulo 4: **Primera experiencia constructiva**, se describe detalladamente la primera experiencia de ejecución del sistema Pilote-Lámina: la construcción de un prototipo a escala real de muelle en el puerto de Vilanova de Arousa (Galicia). Se presenta la actuación realizada y se analiza en profundidad el proceso de fabricación de los elementos constitutivos del sistema y el procedimiento constructivo empleado. Asimismo, se analiza la actuación desde el punto de vista económico, tomando como referencia el coste del proyecto original de muelle que estaba previsto que se ejecutase en ese puerto. Por último, se presentan las conclusiones obtenidas de esta primera aplicación del sistema, destacando las posibles mejoras que se podrían introducir en su diseño y su ejecución.
- En el Capítulo 5: **Ensayos hidrodinámicos**, se presentan los ensayos de laboratorio realizados con modelos físicos a escala reducida para analizar el comportamiento hidrodinámico del sistema Pilote-Lámina. Se analizan varios aspectos de la respuesta del sistema bajo la acción del oleaje: las presiones generadas, la reflexión y los posibles eventos de rebase.

1. Introducción

- En el Capítulo 6: **Adaptación a mayores calados**, se estudia el modo de adaptar el sistema Pilote-Lámina a otros escenarios más exigentes, fundamentalmente mayores calados. Tomando como punto de partida las conclusiones obtenidas de la primera experiencia constructiva, se proponen modificaciones, tanto en el diseño del sistema como el procedimiento constructivo, para emplearlo en la construcción de muelles de mayor entidad. El sistema adaptado se analiza estructuralmente de cara a comprobar su aplicabilidad para alturas de muelle de hasta 26 metros.
- Finalmente, en el Capítulo 7: **Conclusiones y futuras líneas de investigación**, se exponen las conclusiones derivadas de la realización de la presente Tesis Doctoral y se plantean futuras líneas de investigación.

2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se realiza una revisión de las diferentes tipologías de obras de atraque y amarre empleadas hasta la actualidad. Tras introducir los principales elementos constitutivos de una obra de atraque y amarre, se presenta una clasificación de las mismas de acuerdo con la tipología estructural de sus partes. A continuación, la revisión se centra en las principales tipologías de muelle, describiendo sus características fundamentales y los procedimientos constructivos asociados. Posteriormente, se analizan los principales modos de fallo a verificar en función de la tipología de muelle. Finalmente, se dedica el último apartado del capítulo a describir varios sistemas que se han propuesto para reducir la reflexión del oleaje asociada a muelles de paramento vertical cerrado.

2.1. Elementos constitutivos de una obra de atraque y amarre

De cara a poder clasificar en diferentes tipologías las obras de atraque y amarre se distinguen en las mismas una serie de elementos o partes constitutivas claramente identificables. En general, las partes principales de una obra son las que se enumeran a continuación [41]:

- **Cimentación:** parte encargada de transmitir al terreno subyacente las cargas de la estructura de la obra.
- **Estructura:** conjunto de elementos de carácter resistente que tienen por finalidad dotar a la obra de una determinada forma geométrica, conservándola ante las acciones actuantes sobre la misma, que serán transmitidas a la cimentación.
- **Superestructura:** elemento situado en la parte superior de la obra cuya finalidad es servir de unión de los tramos estructurales que la constituyen,

2. Estado del Arte

dotando de continuidad a la línea de atraque generada por la misma y corrigiendo los posibles defectos geométricos existentes entre los tramos. Además, tiene la misión de transmitir y repartir sobre la estructura las acciones asociadas al uso y explotación de la obra.

- Relleno: material de préstamo situado en el trasdós de la estructura de la obra que servirá de base para la creación de la explanada adyacente.
- Elementos de uso y explotación: elementos auxiliares necesarios para hacer viable el correcto uso y explotación de la obra, cuya existencia o naturaleza dependerán de los requisitos operativos establecidos. Entre los más relevantes estarían los siguientes:
 - Vigas carriles: elementos de carácter estructural sobre los que circulan los equipos de manipulación de mercancías de movilidad restringida.
 - Defensas: elementos de naturaleza flexible situados generalmente en el frontal de la superestructura que absorben por deformación parte de los esfuerzos debidos a los movimientos del buque en el atraque.
 - Puntos de amarre: elementos situados sobre la superestructura que permiten definir la configuración del sistema de amarre del buque atracado, cuya misión fundamental es limitar los movimientos del buque en el atraque y transmitir los esfuerzos a la superestructura de la obra.
 - Rampa Ro-Ro: plano inclinado que puede ser fijo o móvil cuya misión es permitir la carga y descarga por medios rodantes, garantizando inclinaciones longitudinales admisibles durante el trayecto entre el buque y la explanada portuaria.
 - Pavimento: capa superior del firme portuario situada sobre la explanada para soportar los esfuerzos generados por la circulación de los equipos de manipulación de mercancías u otros vehículos asociados a la actividad portuaria.

2.2. Clasificación según su tipología estructural

Desde un punto de vista estructural, las obras de atraque y amarre se pueden clasificar en diferentes categorías [41], tal y como se refleja en la Tabla 2.1. Para hacer una distinción entre ellas se considera, por una parte, las características principales de sus partes constituyentes, y por otra, el modo mediante el cuál la obra resiste las acciones a las que está sometida, y transmite los esfuerzos correspondientes al terreno sudyacente. Atendiendo a estos criterios se puede establecer un primer nivel de clasificación formado por las siguientes tres categorías principales:

- **Obras fijas cerradas:** obra de atraque y amarre caracterizada por tener en su parte frontal un paramento vertical continuo desde la parte superior de su superestructura hasta su cimentación. Generalmente, no suelen permitir el flujo de agua a través del paramento salvo que dispongan de algún tipo de sistema cuya finalidad sea la reducción de la reflexión del oleaje.
- **Obras fijas abiertas:** obra de atraque y amarre que consta de una plataforma sustentada en pilotes o pilas, careciendo de continuidad vertical el paramento frontal de su línea de atraque. Como consecuencia, se permite el paso del agua a través del mismo, a diferencia de lo que sucede con las obras fijas cerradas.
- **Obras flotantes:** obra de atraque y amarre cuya estructura se encuentra flotando con una cierta capacidad de movimiento vertical y horizontal, que se encuentra limitada por unos dispositivos de amarre anclados al terreno natural o a una determinada estructura fija.

Dentro de la categoría de **obras fijas cerradas** se pueden diferenciar entre las obras de gravedad, las obras de pantallas y las obras de recintos de tablas-tacas. La principal distinción existente entre ellas radica, por una parte, en el modo mediante el cuál la estructura de la obra resiste las cargas provocadas por el relleno posterior, así como las asociadas a su uso y explotación, y por otra parte, la forma de transmisión de los esfuerzos a la cimentación.

2. Estado del Arte

Tabla 2.1: Clasificación de las obras de atraque y amarre.

Fijas cerradas	Obras de gravedad
	Obras de pantallas
	Obras de recintos de tablestacas
Fijas abiertas	Obras de pilotes
	Obras de pilas
	Otras
Flotantes	Boyas
	Pantalanes
	Cajones
	Estaciones de transferencia

En las **obras de gravedad**, el propio peso de la estructura es el encargado de resistir las cargas y de transmitir los esfuerzos al terreno subyacente mediante una banqueta de cimentación (Figura 2.1). Debido a ello, es preciso poder conseguir estructuras con un peso significativo y una superficie de apoyo suficientemente ancha, así como disponer de suelos de cimentación de elevada capacidad portante. Dentro de las obras de gravedad las principales son los muelles de bloques, los muelles de cajones y los muelles de hormigón sumergido, que se estudiarán en detalle en el siguiente apartado.

Por su parte, las **obras de pantallas** constan, como su nombre indica, de una pantalla que se encarga de transmitir los esfuerzos generados por el relleno posterior, y las cargas de uso y explotación mediante su empotramiento en el terreno natural, disponiéndose en su trasdós de un sistema de anclaje para equilibrar los empujes (Figura 2.2). La pantalla, como elemento estructural, debe ser capaz de resistir los esfuerzos de flexión y cortante a los que está sometida a lo largo de su longitud. Para poder emplear esta tipología tiene que ser viable el hincado de las pantallas para conseguir el empotramiento de las mismas en el terreno. Debido a ello, no está indicada para terrenos formados por roca dura o terrenos con presencia de bolos, empleándose fundamentalmente cuando

2.2. Clasificación según su tipología estructural

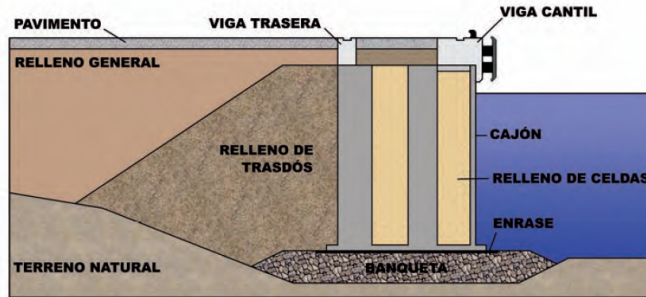


Figura 2.1: Ejemplo de obra fija cerrada de gravedad: muelle de cajones. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.

el fondo marino está constituido por terrenos arenosos o limosos. Se consideran dos tipos de obra de pantallas en función de la presencia de elementos estructurales adicionales que se encarguen de transmitir las cargas de uso y explotación directamente al terreno, aligerando de este modo los esfuerzos sobre la pantalla. De acuerdo con este criterio existen obras de pantallas sin y con plataforma superior de descarga.

Las **obras de recintos de tablestacas** están constituidas por una hilera de recintos de tablestacas metálicas, que se encuentran conectados entre sí, y que posteriormente se rellenan de material granular. Estos recintos se pueden diseñar con diferentes geometrías, siendo los de forma circular los que se emplean más frecuentemente. En este caso la estructura de la obra basa su capacidad resistente en el peso propio del relleno interno, así como en la interacción existente entre los recintos y el terreno natural. En la Figura 2.3 se muestran posibles geometrías de los recintos y una sección tipo correspondiente a esta tipología.

Por lo que respecta a las **obras fijas abiertas**, tal y como se comentaba anteriormente, constan de una plataforma que puede ir sustentada en pilotes o pilas, siendo el primer caso el más extendido (Figura 2.4). En el caso de los muelles, en los que existe una explanada adyacente, la plataforma actúa como

2. Estado del Arte

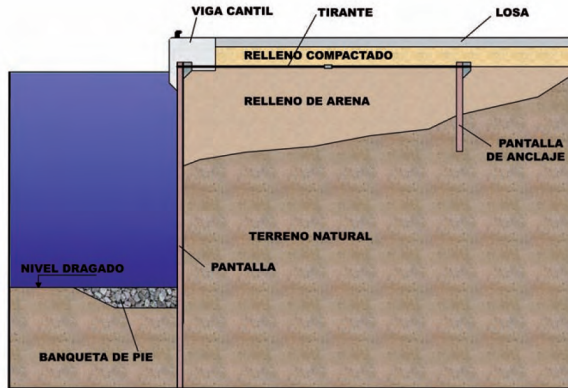


Figura 2.2: Ejemplo de obra fija cerrada de pantallas. *Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.*

una prolongación de la coronación del relleno posterior sobre su talud, dando acceso de ese modo a su línea de atraque.

Por último, dentro de las **obras flotantes**, se pueden distinguir diferentes tipos que se presentan brevemente a continuación. No serán objeto de análisis detallado en esta revisión de tipologías estructurales, ya que la tipología de obra de atraque y amarre que se propone en esta Tesis Doctoral se corresponde con una obra fija, no con una obra flotante.

- **Boyas:** constan de una estructura flotante de geometría normalmente cilíndrica conectada a una o varias líneas de amarre que se fijan al fondo marino mediante un ancla, un muerto o un pilote, dependiendo de la entidad de los esfuerzos a los que esté sometido el anclaje.
- **Pontonas o pantalanés flotantes:** obras de atraque y amarre formadas por una plataforma flotante sin explanada posterior destinadas en la actualidad fundamentalmente a embarcaciones deportivas, aunque también puede tener otros usos. La plataforma se amarra generalmente mediante estructuras fijas de guiado (pilotes o duques de alba) que limitan sus mo-

2.2. Clasificación según su tipología estructural

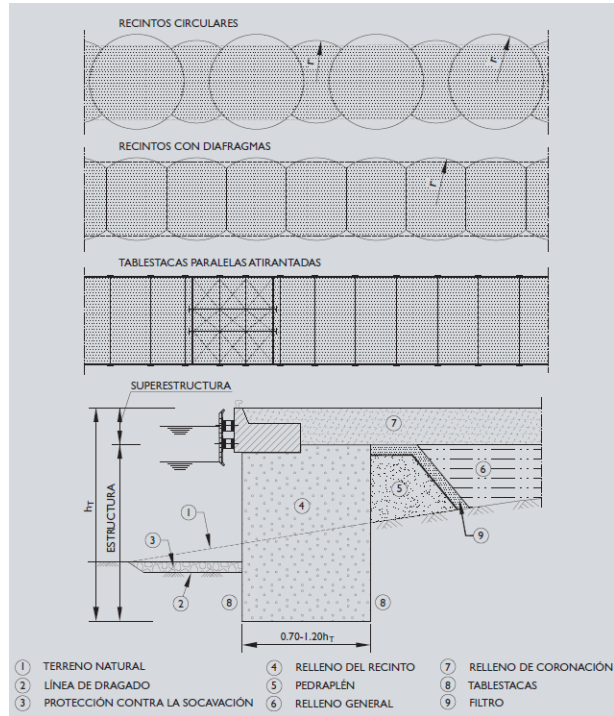


Figura 2.3: Geometrías en planta y sección tipo de una obra fija cerrada de recintos de tablestacas. Adaptado con permiso de ref. [41]. Copyright, 2011, Puertos del Estado.

vimientos, pudiendo ser sustituidas también en algunos casos por líneas de amarre.

- **Cajones:** existen experiencias de empleo de cajones flotantes como obras de atraque y amarre para instalaciones sometidas a importantes cargas de uso y explotación como puede ser el caso del dique-muelle de La Condamine en Mónaco.
- **Estaciones de transferencia:** se trata de buques, u otro tipo de artefacto

2. Estado del Arte

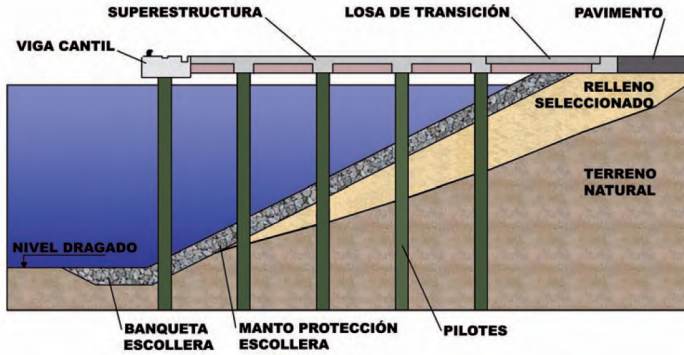


Figura 2.4: Ejemplo de obra fija abierta: muelle de pilotes. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.

flotante, que se encuentran situados en una ubicación determinada de manera permanente y que permite el almacenamiento y transbordo de mercancía.

2.3. Principales tipologías de muelle

Este apartado se centra exclusivamente en las obras de atraque y amarre de tipo muelle, presentando con detalle las tipologías principales existentes. Además de analizar aquellas tipologías que se pueden considerar como clásicas, por su empleo extendido en la construcción de infraestructuras portuarias, se dedica un apartado final a una nueva tecnología relativamente reciente denominada OPEN CELL SHEET PILE (OCSP).

2.3.1. Muelle de cajones

2.3.1.1. Características principales

La estructura de estos muelles de gravedad está constituida por cajones

2.3. Principales tipologías de muelle

con peso suficiente para soportar los empujes de los rellenos que actúan sobre su trasdós así como las cargas de uso y explotación. Los cajones se apoyan sobre una banqueta de cimentación que proporciona una superficie regular y la suficiente capacidad portante para asegurar la estabilidad del terreno frente a los esfuerzos que trasmite el muelle y la agitación producida por las hélices de los buques. En la Figura 2.5 se puede observar una sección tipo de un muelle de cajones donde se identifican sus elementos constituyentes.

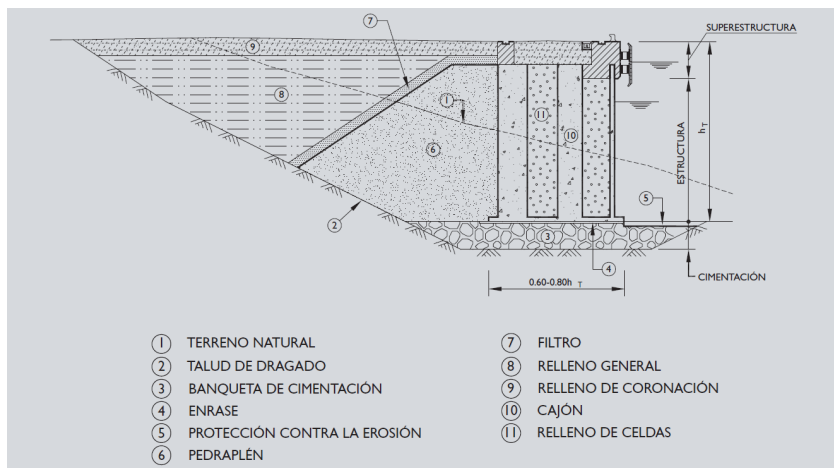


Figura 2.5: Sección tipo de un muelle de cajones. Adaptado con permiso de ref. [41]. Copyright, 2011, Puertos del Estado.

En general, las dimensiones de los cajones suelen depender de diversos factores [37], entre los que se encuentran los medios disponibles para su fabricación, condicionantes marítimos para su remolque y fondeo, su estabilidad naval o los calados necesarios en las diferentes fases. De manera general, se puede indicar que la longitud o eslora de los cajones no suele ser inferior a los 25 m. Por lo que respecta a su anchura (manga) dependerá fundamentalmente de la capacidad estructural requerida. Finalmente, en relación con su altura, en aguas abrigadas, se recomiendan unas cotas mínimas de coronación dependiendo de las condiciones de marea existentes.

2. Estado del Arte

Los cajones están constituidos por celdas interiores cuya geometría suele ser circular o rectangular, aunque puede disponerse también en casos especiales cualquier otra forma que se adapte a los requerimientos exigidos.

Aunque la fabricación de los cajones puede realizarse en instalaciones flotantes o terrestres, generalmente se realiza en las primeras, pudiendo emplearse diques flotantes, pontonas sumergibles guiadas desde estructuras fijas o catamaranes con plataforma sumergible. El procedimiento (Figura 2.6) consiste básicamente en ejecutar en primer lugar la solera del cajón, para posteriormente hormigonar el fuste mediante la técnica de encofrados deslizantes.

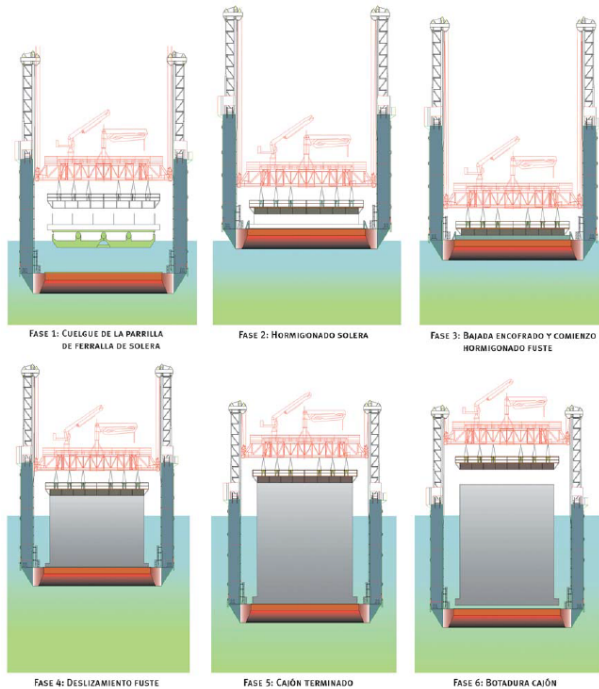


Figura 2.6: Fabricación de cajones en dique flotante. Adaptado con permiso de ref. [37]. Copyright, 2006, Puertos del Estado.

2.3. Principales tipologías de muelle

Una vez fabricados (Figura 2.7), los cajones se trasladan flotando hasta su emplazamiento donde se fondea, para posteriormente rellenar sus celdas interiores con material granular. En la Figura 2.8 se muestra el procedimiento de remolque y fondeo de un cajón en su emplazamiento definitivo.



Figura 2.7: Remolque de cajón para su fondeo en su emplazamiento. **Imagen propia.**

La junta entre cada dos elementos se suele cerrar con un filtro de grava contenida en el extremo del lado mar por un tubo relleno de hormigón que evita la fuga de dicha grava. En la cara del trasdós se suele disponer entre los labios de la junta un geotextil que evite la fuga de dicha grava. El mismo procedimiento suele hacerse sobre la banqueta de cimentación del cajón en los casos en que el relleno del trasdós sea susceptible de traspasarla y producir con su fuga deformaciones en la explanada.

La principal ventaja de esta tipología es su gran resistencia y su monolitismo. Por el contrario, tiene el principal inconveniente de que se necesitan instalaciones muy singulares para su fabricación. No obstante, dado que los cajones son elementos flotantes, se pueden fabricar lejos del emplazamiento definitivo de los mismos, para posteriormente ser transportados por vía marítima hasta el puerto en cuestión cubriendo grandes distancias.

2. Estado del Arte

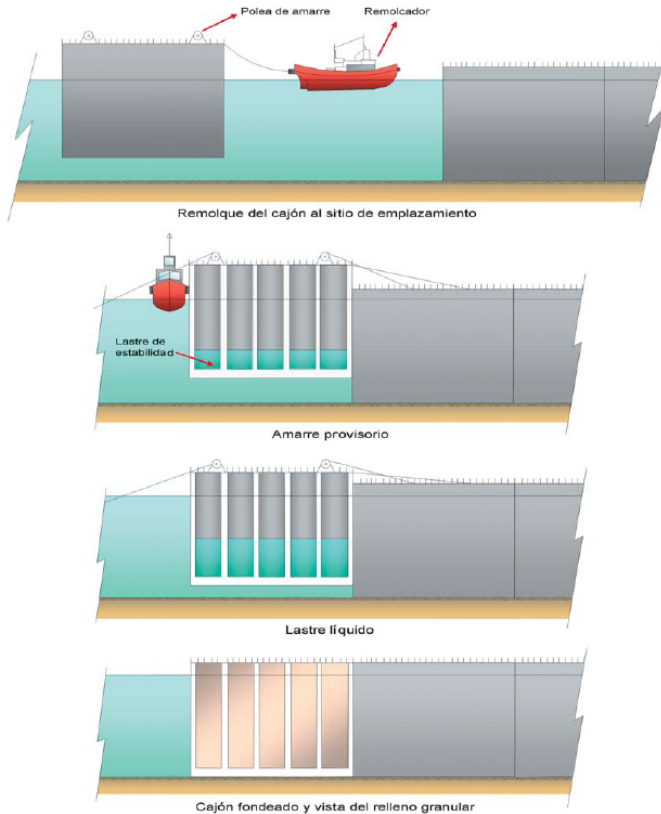


Figura 2.8: Remolque y fondeo de un cajón en su emplazamiento. Adaptado con permiso de ref. [37]. Copyright, 2006, Puertos del Estado.

En España, la primera obra de cajones que se construyó fue el muelle de Levante del puerto de Huelva, con un calado máximo de 8 metros, cuya puesta en servicio se produjo en el año 1932. Posteriormente, en el año 1945, fue el turno del dique-muelle del Sagrado Corazón Puerto de Tarifa, proporcionando un calado máximo de 10 m. En las siguientes décadas, la técnica se aplicó a un considerable número de obras de atraque y amarre en diversos puertos (Pa-

2.3. Principales tipologías de muelle

sajes, Avilés, Gijón, entre otros). Durante la década de los 80, la necesidad de mayores calados en los puertos comerciales provocó que los muelles de cajones se generalizasen como tipología constructiva. Se evolución en la siguiente década pasó finalmente por su empleo en la construcción de obras de abrigo (diques verticales) alcanzándose valores de calado de hasta 28 metros en el dique de la dársena de Escombreras (Cartagena). El muelle de cajones es, en la actualidad, la tipología más común en España para la ejecución de muelles por encima de los 9 metros de calado.

2.3.1.2. Procedimiento constructivo

Las fases más habituales del procedimiento constructivo de un muelle de cajones se enumeran a continuación [36], y se resumen en la Figura 2.9.

- Dragado de la zanja
- Mejora del terreno de cimentación
- Banqueta de cimentación
- Enrase de la banqueta
- Fabricación y transporte de los cajones
- Fondeo de los cajones
- Relleno de las celdas y de las juntas
- Relleno del trasdós
- Colocación de filtro
- Rellenos generales
- Superestructura
- Pavimento

2. Estado del Arte

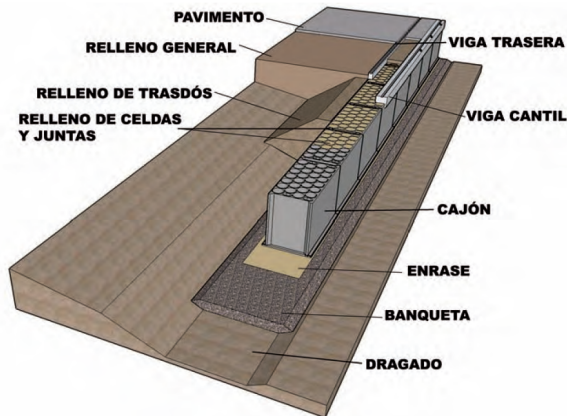


Figura 2.9: Procedimiento constructivo de un muelle de cajones. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.

2.3.2. Muelle de bloques

2.3.2.1. Características principales

Estos muelles están formados por un conjunto de bloques de hormigón prefabricados que se colocan bajo el agua sobre una banqueta de todo uno o escollera convenientemente enrasada, y alcanzan una cota que permita realizar el hormigonado in situ de la superestructura. En la Figura 2.10 se muestra una sección tipo de muelle de bloques con sus partes principales.

Dado que la parte más complicada de la construcción es la colocación de los bloques, se tiende a hacer éstos lo más grandes posibles para disminuir el número de operaciones. No obstante, también hay que tener en cuenta que existe una limitación asociada a la capacidad de izado de la que se disponga. Para solventar este problema, se tiende a bloques huecos que se rellenan, in situ, de hormigón o grava, o bloques aligerados. También es conveniente que haya el menor número posible de tipos de bloques diferentes.

2.3. Principales tipologías de muelle

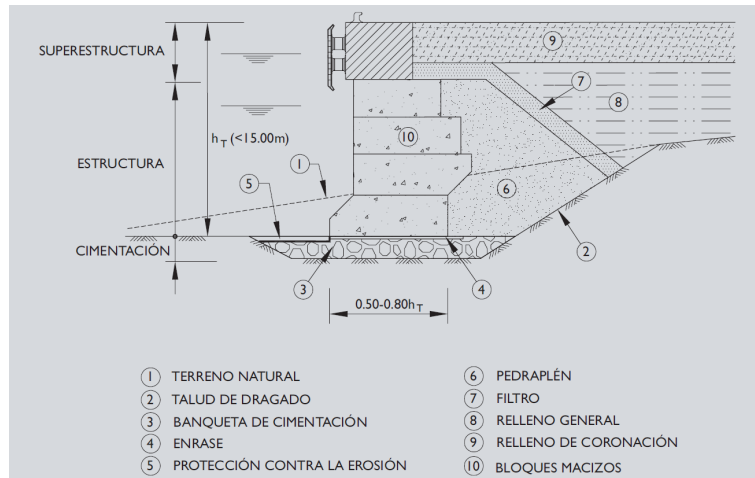


Figura 2.10: Sección tipo de un muelle de bloques. Adaptado con permiso de ref. [41]. Copyright, 2011, Puertos del Estado.

Generalmente, los bloques son normalmente paralelepípedos y macizos aunque también se construyen con huecos en su interior al objeto de aligerar y facilitar su manipulación. No obstante, también se han diseñado con geometrías complejas, generalmente sujetas a patentes, que reducen el volumen del hormigón, permiten trabar las piezas y/o disminuir la reflexión del oleaje, como es el caso de los bloques tipo WAROCK [23] o los bloques tipo BARA [3].

Debe tenerse presente que las discontinuidades existentes entre bloques pueden dar lugar a asentamientos diferenciales y a movimientos tanto en sentido vertical como horizontal. Por otra parte, para evitar la fuga del relleno por las juntas se suele disponer en el trasdós de los bloques un pedraplén o un todo uno de buena calidad.

2. Estado del Arte

2.3.2.2. Procedimiento constructivo

El procedimiento constructivo de un muelle de bloques (Figura 2.11) consta de las mismas fases que el correspondiente a un muelle de cajones, sustituyendo las actividades asociadas a la fabricación y colocación de los cajones por las tareas correspondientes a los bloques: fabricación, acopio y colocación.

- Dragado de la zanja
- Mejora del terreno de cimentación
- Banqueta de cimentación
- Enrase de la banquetta
- Fabricación y acopio de los bloques
- Colocación de los bloques
- Relleno del trasdós
- Rellenos generales
- Superestructura
- Pavimento

2.3.3. Muelle de hormigón sumergido

2.3.3.1. Características principales

Existe también la posibilidad de construir el muelle *in situ* con procedimientos de hormigón sumergido. Generalmente, se emplea para muelles de calado no muy elevado (alturas de coronación a cimentación inferiores a 15 m) ya que el elevado volumen de hormigón necesario hace que no sea una alternativa competitiva. En la Figura 2.12 se muestra un ejemplo de sección tipo de muelle de hormigón sumergido.

2.3. Principales tipologías de muelle

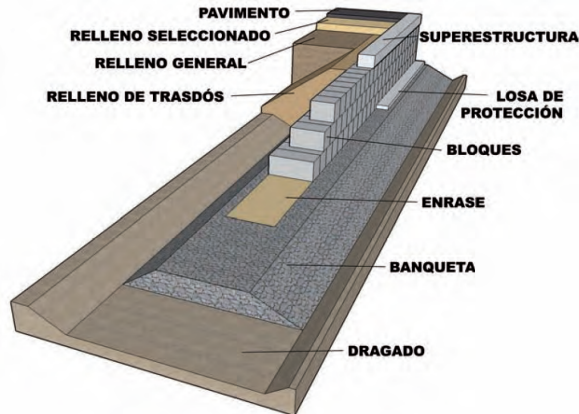


Figura 2.11: Procedimiento constructivo de un muelle de bloques. *Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.*

Normalmente, para facilitar su ejecución se evitan encofrados con geometrías complejas, adoptando secciones rectangulares con escasos resaltos o escalones. Se suele recurrir a este sistema cuando no se dispone del espacio suficiente para el parque de bloques o de los equipos necesarios para su transporte y colocación. Está especialmente indicado para muelles pequeños o medianos asentados sobre terreno resistente, no siendo recomendable su ejecución en ambientes agresivos químicamente.

2.3.3.2. Procedimiento constructivo

El procedimiento de ejecución de esta tipología (Figura 2.13) implica, en general, la realización de las siguientes operaciones.

- Actividades iniciales (diseño de encofrados y dosificación del hormigón)
- Preparación del terreno de cimentación
- Encofrados

2. Estado del Arte

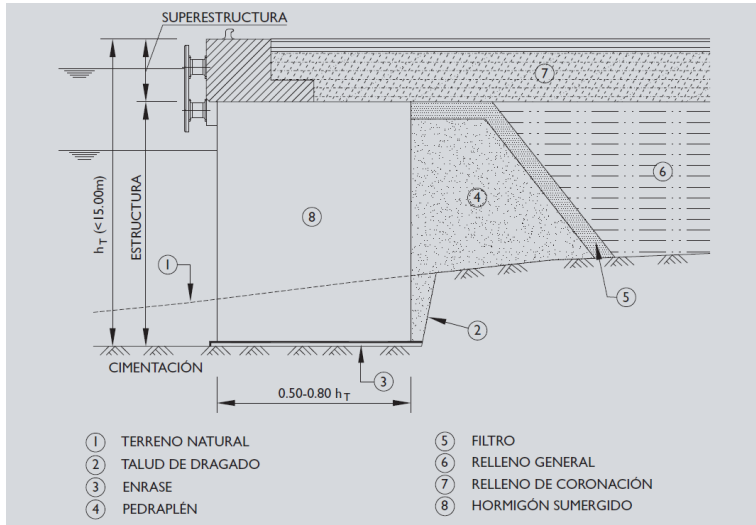


Figura 2.12: Sección tipo de un muelle de hormigón sumergido. Adaptado con permiso de ref. [41]. Copyright, 2011, Puertos del Estado.

- Hormigonado
- Relleno de trasdós
- Colocación de los bloques
- Relleno del trasdós
- Rellenos generales
- Superestructura
- Pavimento

2.3.4. Muelle de pilotes

2.3.4.1. Características principales

2.3. Principales tipologías de muelle

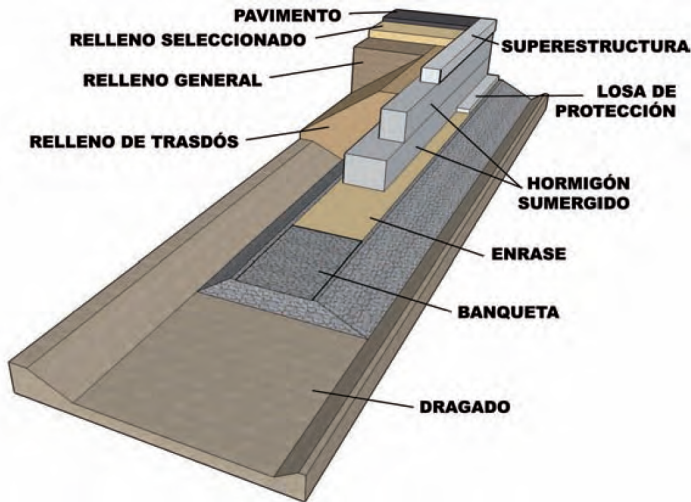


Figura 2.13: Procedimiento constructivo de un muelle de hormigón sumergido. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.

Este tipo de muelles son estructuras formadas por una plataforma sustentada por pilotes que transmiten los esfuerzos al terreno. La plataforma se construye sobre un talud, que va desde la cota de coronación del muelle hasta la cota correspondiente al calado requerido por el muelle en su línea de atraque. Se muestra, en la Figura 2.14, una sección tipo de muelle de pilotes con sus principales elementos.

Los pilotes, que representan el elemento más característico de esta tipología, pueden ser fundamentalmente de dos clases: pilotes fabricados *in situ* o pilotes prefabricados. En este último caso, se distingue entre:

- Pilotes metálicos: suelen ser de sección cilíndrica con valores de diámetro y longitud variable en función del caso específico. Se han alcanzado diámetros de hasta 2 m, y longitudes elevadas (80 m).
- Pilotes de hormigón armado: suelen tener secciones con geometrías re-

2. Estado del Arte

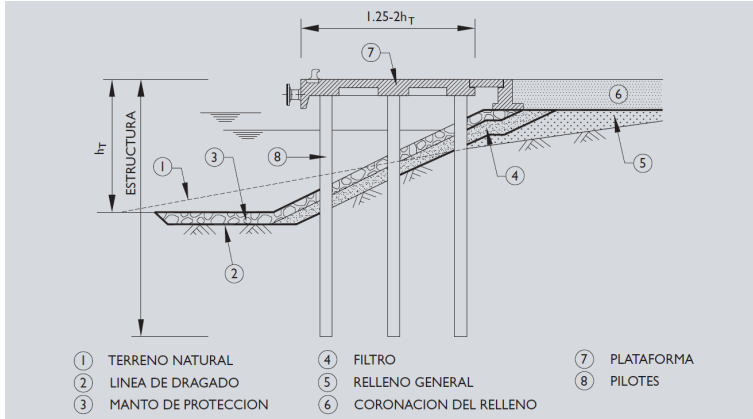


Figura 2.14: Sección tipo de un muelle de pilotes. Adaptado con permiso de ref. [41]. Copyright, 2011, Puertos del Estado.

gulares pero de forma muy variada (cilíndrica, rectangular, etc.), empleándose generalmente para longitudes de pilote inferiores a los 30 m.

- Pilotes de hormigón pretensado: tienen generalmente sección cilíndrica con diámetros entre 0,60 y 1,80 m, y longitudes de hasta 60 m. Han sido empleados en un España en un importante número de casos.

La anchura de la plataforma depende de la inclinación del talud inferior, que es función a su vez de las características resistentes de sus materiales constituyentes. La distancia entre filas de pilotes depende de las cargas que actúan sobre el tablero, tratando de buscar una solución de equilibrio entre el tablero y los pilotes: a mayor separación entre pilotes, el tablero será más caro. Hay que tener en cuenta que, en muchas ocasiones, la ubicación de algunas filas de pilotes viene determinada previamente por la posición de los carriles de las grúas u otros equipos de carga.

Los materiales de relleno a utilizar en los muelles de pilotes pueden ser de tipo y función muy variados. En general existirá un material de protección contra la socavación en el pie delantero del muelle, un manto para proteger

2.3. Principales tipologías de muelle

el talud y un relleno general posterior. Los dos primeros materiales estarán en general formados por escolleras que deberán cumplir unos requisitos técnicos determinados (naturaleza, densidad, alterabilidad, resistencia, etc.).

Los muelles de pilotes se caracterizan por tener un elevado coste de mantenimiento debido a que tienen grandes superficies de hormigón sujetas al ataque del ambiente marino, y a las posibles socavaciones producidas por las hélices de los buques debajo de la plataforma. Están especialmente indicados cuando el terreno natural es de baja capacidad portante con grandes volúmenes de materiales inadecuados, o bien cuando puedan tener asientos importantes. También es recomendable, cuando se trata de reducir al mínimo las interferencias hidráulicas del muelle con su entorno o para evitar problemas debidos a la reflexión del oleaje. En muelles de gran calado pueden presentar importantes ventajas técnicas y económicas sobre estructuras de contención de paramento vertical dado que reduce enormemente los materiales de dragado.

2.3.4.2. Procedimiento constructivo

La construcción de un muelle de pilotes se puede abordar desde una plataforma terrestre (mota) previamente generada mediante la ejecución de un relleno o empleando medios flotantes. En el caso de los pilotes fabricados *in situ* se suelen emplear ambos procedimientos, pero en el caso de los pilotes prefabricados se ejecutan generalmente mediante medios flotantes.

Tanto si la ejecución se realiza desde una plataforma terrestre o mediante medios flotantes, las primeras fases del procedimiento pueden consistir, si se estima oportuno, en la realización de un dragado del terreno natural, y a continuación una mejora del terreno de cimentación. A partir de este momento, comenzarían las fases específicas de cada procedimiento. En el caso de ejecutarse mediante plataforma terrestre las actividades a realizar serían las que se enumeran a continuación [36].

- Relleno de la plataforma terrestre (mota)
- Construcción de los pilotes

2. Estado del Arte

- Construcción parcial de la superestructura
- Dragado terreno natural y rellenos sobrantes
- Formación del talud inferior y relleno con escollera
- Formación de la explanada
- Finalización de la superestructura

Este procedimiento se recoge en las Figuras 2.15 y 2.16 donde se presentan las diferentes fases del mismo: construcción del relleno que conformará la plataforma de trabajo con anchura y capacidad portante suficiente para el soporte de la maquinaria necesaria [fase 1]; actividades asociadas a la construcción de los pilotes: hincado de la entubación [fase 2], excavación de los pilotes [fase 3], colocación de la armadura [fase 4], hormigonado [fase 5], extracción de la entubación [fase 6] en caso de emplear camisas recuperables; descabezado de pilotes y ejecución de las vigas del tablero (sirven de arriostamiento para soportar mejor los esfuerzos y de soporte para el encofrado inferior de la superestructura) [fase 7]; dragado del terreno natural y rellenos sobrantes (evitando golpear los pilotes), y perfilado del talud [fase 8]; protección del talud y del pie con escollera [fase 9]; colocación de las prelosas [fase 10]; hormigonado de la plataforma [fase 11] y finalización de la explanada posterior [fase 12].

En cambio, si la construcción de los pilotes se realiza desde medios flotantes o medios semiflotantes (empleados en zonas sometidas al oleaje), las fases del procedimiento serían las siguientes [36].

- Construcción de los pilotes
- Formación de la explanada
- Relleno entre pilotes
- Protección del taludo con escollera
- Construcción de la superestructura

En las Figuras 2.17 y 2.18 se presentan las diferentes fases del procedimiento mediante medios flotantes, comenzando por las actividades asociadas

2.3. Principales tipologías de muelle

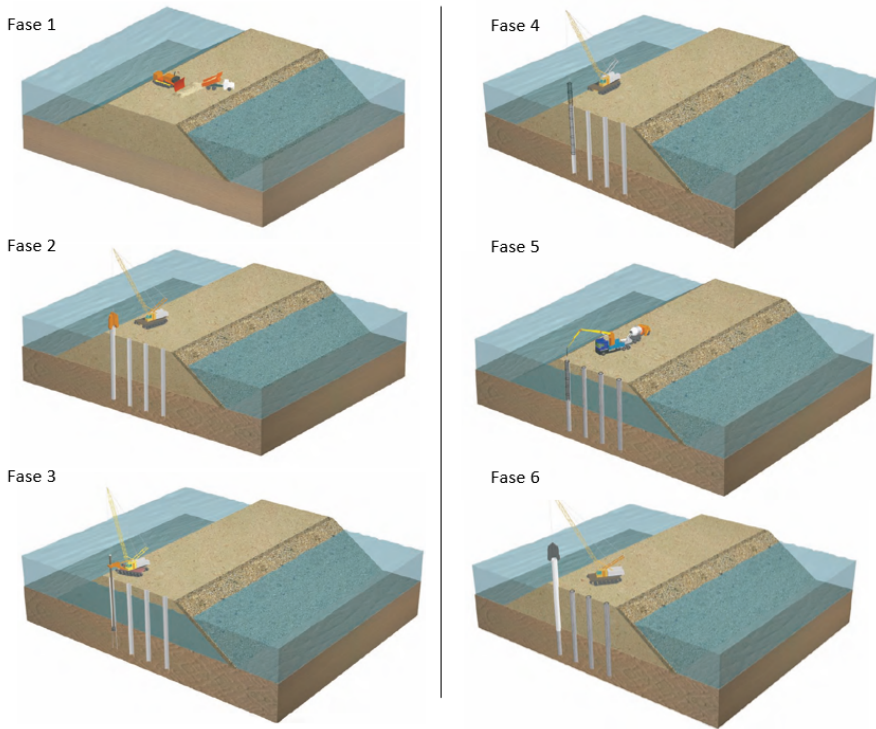


Figura 2.15: Procedimiento constructivo de un muelle de pilotes *in situ* por medio de plataforma terrestre. Fases 1-6. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.

a la construcción de los pilotes: hincado de la camisa recuperable hasta apoyo en la roca y extracción de materiales [fase 1], excavación en roca [fase 2], colocación de la camisa perdida [fase 3], colocación de la armadura [fase 4], hormigonado y recuperación de la camisa [fase 5]. Posteriormente, se ejecuta el dragado [fase 6], se ejecuta el relleno, se perfila su talud, y se coloca la protección de escollera [fase 7], se ejecutan los capiteles de los pilotes [fase 8], se

2. Estado del Arte

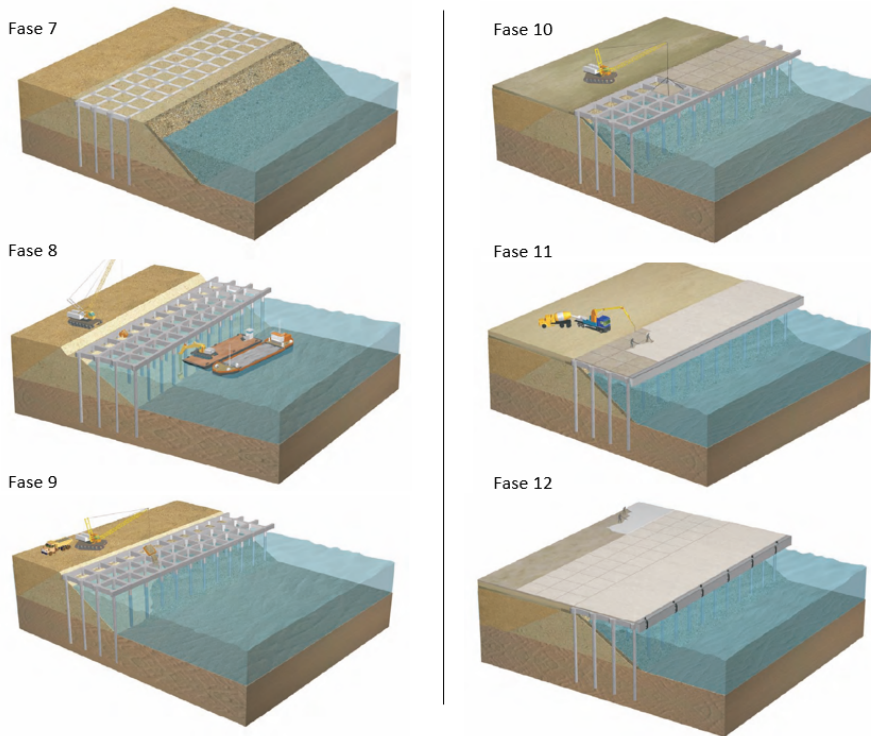


Figura 2.16: Procedimiento constructivo de un muelle de pilotes *in situ* por medio de plataforma terrestre. Fases 7-12. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.

colocan las vigas y se hormigonan los nudos [fase 9 y 10], y tras colocar las preslosas [fase 11] se hormigona el tablero [fase 12]. Quedaría, simplemente terminar la explanada posterior, y colocar los elementos de uso y explotación.

La construcción de los pilotes *in situ* implica la realización de una serie de controles mediante los cuales se deben comprobar diversas cuestiones, y de ser preciso, actuar para introducir las correcciones necesarias. Por una parte,

2.3. Principales tipologías de muelle

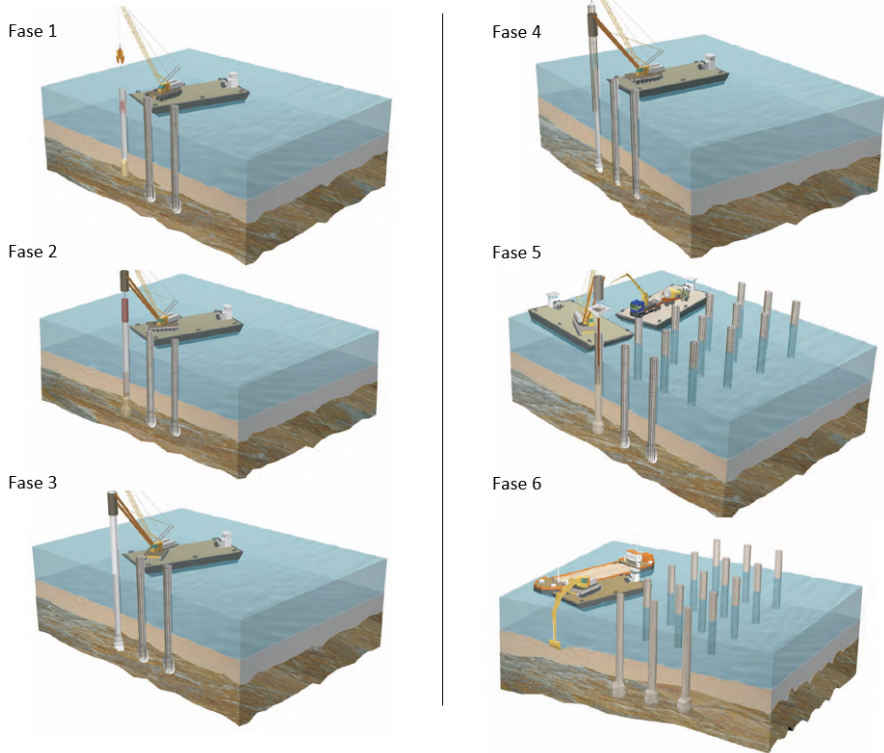


Figura 2.17: Procedimiento constructivo de un muelle de pilotes *in situ* por medio de medios flotantes. Fases 1-6. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.

se debe verificar la correcta ubicación de los pilotes, y que se alcanza la profundidad necesaria para su correcto empotramiento. En relación con el hormigonado, antes de su comienzo se debe corroborar que el fondo se encuentra en buen estado de limpieza, y una vez iniciado se deben evitar que se produzcan discontinuidades. Por último, se debe realizar las comprobaciones pertinentes en relación a los materiales (hormigón y acero), y garantizar que la sección

2. Estado del Arte

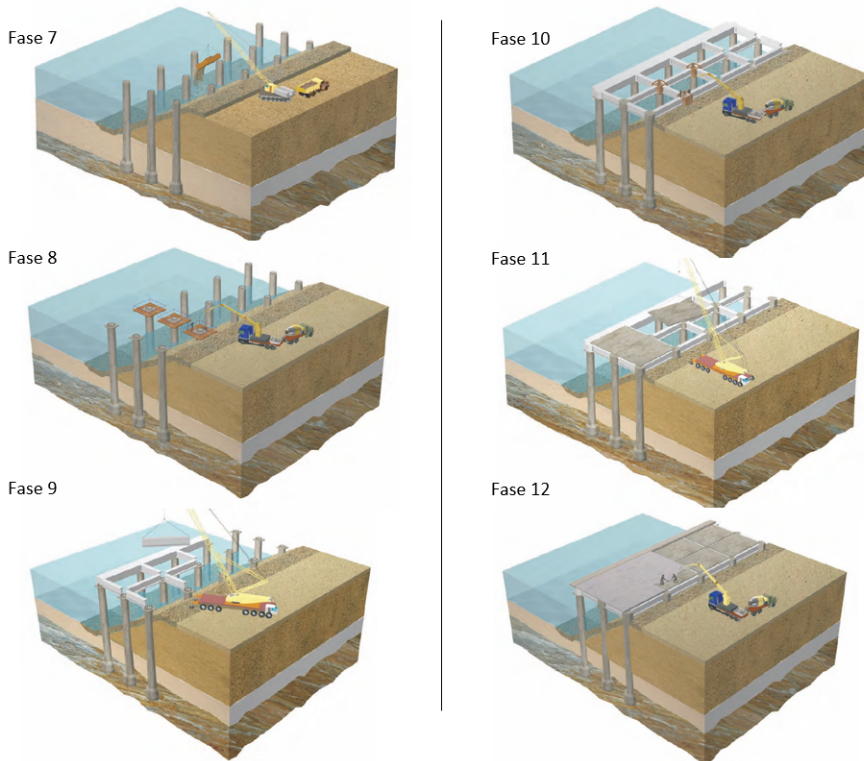


Figura 2.18: Procedimiento constructivo de un muelle de pilotes *in situ* por medio de medios flotantes. Fases 7-12. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.

resultante se corresponde con la definida en el proyecto correspondiente.

El procedimiento constructivo de un muelle de pilotes mediante el empleo de elementos prefabricados requiere de la realización de otras actividades diferentes en la fase de ejecución de los pilotes. Las operaciones más relevantes se resumen a continuación.

2.3. Principales tipologías de muelle

- Fabricación de los pilotes: cada tipología (pilotes metálicos, pilotes de hormigón armado o pilotes de hormigón pretensado) tiene sus características de fabricación específicas y unos requisitos particulares de control de calidad.
- Manipulación, transporte y acopio: para una correcta manipulación de los pilotes se debe garantizar que el sistema de izado (número de puntos y localización de los mismos) no genera esfuerzos en los pilotes superiores a los admisibles. Se deben transportar horizontalmente con un número y localización de los apoyos adecuados, y se tendrán en cuenta los efectos dinámicos asociados al transporte. Por último, se deberá garantizar que los esfuerzos, tanto en los pilotes como en el terreno, son adecuados durante el acopio, y que se puede acceder a los pilotes en el orden requerido.
- Colocación de los pilotes: se deben considerar varios aspectos al colocar los pilotes en sus alojamientos correspondientes. Se debe garantizar un empotramiento correcto, mediante el relleno del espacio existente entre pilote y alojamiento, así como el hormigonado de su interior en la zona de empotramiento en caso de usarse pilotes huecos. Asimismo, es también recomendable rellenar con grava los pilotes metálicos para disminuir la posibilidad de sufrir abolladuras. Conviene también emplear una longitud de pilote adecuada para evitar tener que cortarlos posteriormente.
- Hincado de pilotes: en el procedimiento de hincado de los pilotes influyen diversos factores, entre los que destacan: el tipo de terreno, el tipo de pilote, sus dimensiones (sección y longitud), y su inclinación (existen pilotes parcial o totalmente inclinados que colaboran con su resistencia axial, a soportar los esfuerzos horizontales). Dependiendo del caso particular se consideran distintos métodos de hincado: hincado por percusión, hincado por vibración (Figura 2.19) o hincado mediante empuje del pilote (este último es el menos frecuente).

2. Estado del Arte



Figura 2.19: Hincado de pilote metálico mediante martillo vibrador **Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.**

2.3.5. Muelle de pantallas

2.3.5.1. Características principales

Los muelles pantalla ejercen su función de contención del terreno posterior mediante su empotramiento en el fondo del mismo y por lo general, un sistema de anclaje que aumenta su rigidez. Con frecuencia, las pantallas están formadas por tablestacas metálicas aunque este elemento estructural puede estar formado también por una pantalla de hormigón. En las Figuras 2.20 y 2.21 se muestran dos secciones tipo de muelle de pantallas, sin y con plataforma superior, siendo el primero de los casos el que se abordará en detalle en este apartado.

El terreno donde se construye un muelle de pantallas es un aspecto condicionante, ya que debe presentar un comportamiento resistente adecuado con una cierta capacidad de soporte tanto en sentido vertical como horizontal. En sentido vertical, el terreno debe soportar el peso del relleno y de la superestructura, así como las cargas de uso y explotación, garantizando que no se pro-

2.3. Principales tipologías de muelle

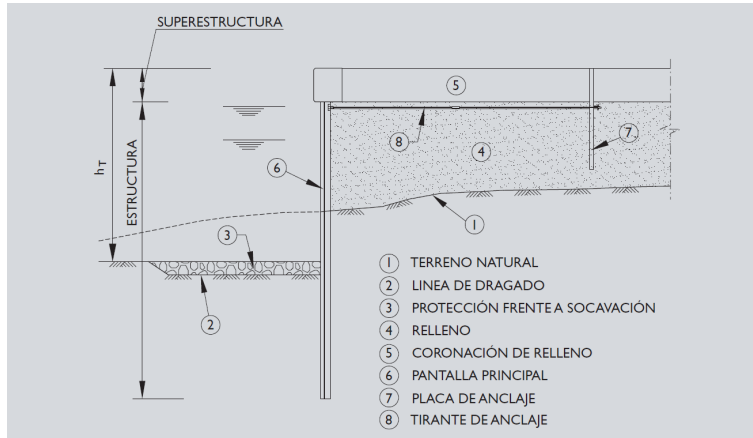


Figura 2.20: Sección tipo de un muelle de pantallas sin plataforma. Adaptado con permiso de ref. [41]. Copyright, 2011, Puertos del Estado.

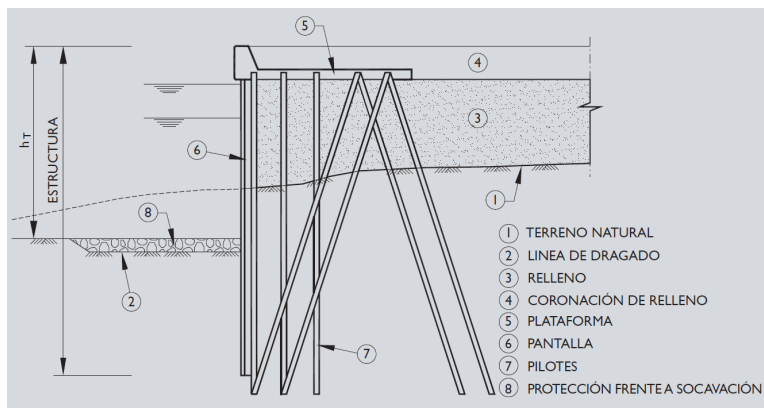


Figura 2.21: Sección tipo de un muelle de pantallas con plataforma. Adaptado con permiso de ref. [41]. Copyright, 2011, Puertos del Estado.

ducen asientos importantes o problemas de estabilidad. En sentido horizontal, las pantallas requieren la colaboración del terreno en su zona de empotramien-

2. Estado del Arte

to, por lo que en terrenos no adecuados sería necesario pantallas muy largas, dando lugar a esfuerzos considerables en la estructura.

El sistema de anclaje suele consistir en barras o cables de acero, unidos a la pantalla y a una estructura posterior de anclaje que puede consistir en otra pantalla más corta, un muro de reacción de hormigón o una placa vertical u horizontal enterrada. En ambos casos pueden estar simplemente apoyados en el terreno o cimentados sobre pilotes, lo que proporcionaría una mayor capacidad de reacción, permitiendo reducir la longitud necesaria de anclaje. También se pueden emplear como sistemas de anclaje diversos elementos (cables o barras de acero, micropilotes) alojados en perforaciones y unidos al terreno mediante rellenos inyectados de morteros o lechadas de cemento.

En esta tipología de muelle es necesario proteger el pie de las pantallas contra los fenómenos de erosión o socavación. Generalmente se emplean rellenos de escollera cuyo origen y calidad deberá cumplir con unos requisitos técnicos determinados.

El relleno posterior de las pantallas se debe realizar preferentemente con materiales granulares, ya que generan menos empuje y son menos susceptibles de movimientos diferidos. En la coronación del relleno, por encima del nivel del agua, pueden emplearse diversos tipos de materiales colocados mediante extendido y compactación, cuyas características deberán cumplir las condiciones exigidas para la futura pavimentación del muelle.

2.3.5.2. Procedimiento constructivo

De igual modo que en el caso de la ejecución de pilotes en la tipología anterior, el hincado de tablestacas se puede abordar desde una plataforma terrestre o empleando medios flotantes (Figura 2.22). Nuevamente, en ambos casos, las primeras fases del procedimiento pueden consistir, si fuese necesario, en la realización de un dragado del terreno natural, y a continuación una mejora del terreno de cimentación. A partir de este momento, comenzarían las fases específicas de cada procedimiento.

Existen dos formas extendidas de ejecutar la hinca de tablestacas. La primera de ellas consiste en ir situando y clavando una o dos tablestacas al tiem-

2.3. Principales tipologías de muelle

po. La segunda exige, primeramente, la colocación de todas las tablestacas con ayuda de unas guideras para después ir hincando, una a una, desde un extremo a otro. En cuanto al procedimiento de hincado, en general, puede hacerse por percusión en la mayoría de los suelos, por vibración en suelos granulares y por métodos hidráulicos en suelos cohesivos.



Figura 2.22: Hincado de tablestacas desde plataforma terrestre (izda.) o por medios flotantes (dcha.). Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.

En el caso de ejecutarse mediante plataforma terrestre las actividades a realizar serían las que se enumeran a continuación [36].

- Relleno de la plataforma terrestre (mota)
- Hinca de la tablestaca desde la plataforma
- Construcción de la expandada para colocar los anclajes
- Anclaje de la pantalla de tablestacas
- Dragado del terreno natural y rellenos sobrantes delante de la pantalla
- Protección del pie con escollera
- Construcción de la superestructura

2. Estado del Arte

En la Figura 2.23 se presentan las diferentes fases del procedimiento desde plataforma terrestre: construcción de la mota y relleno parcial de la explanada [fase 1], hinca de pantallas [fase 2], excavación y colocación de tirantes [fase 3], relleno zona de anclajes [fase 4], dragado delante de la pantalla [fase 5], colocación de la escollera de protección [fase 6], construcción de la viga cantil [fase 7], pavimentación de la explanada y colocación de los elementos de uso y explotación [fase 8].

En cambio, si la hinca de las tablestacas se realiza desde medios flotantes o semiflotantes, tal y como se muestra en la Figura 2.24, las fases del procedimiento serían las siguientes [36].

- Hinca de la tablestacas desde medios flotantes
- Relleno del trasdós hasta el nivel del anclaje
- Colocación de los anclajes y relleno hasta cota de coronación
- Dragado del terreno natural delante de la pantalla (si procede)
- Protección del pie con escollera
- Construcción de la superestructura

Por lo que respecta al empleo de pantallas de hormigón ejecutadas *in situ*, no es una solución estructural muy extendida, ya que suelen presentar varias complicaciones: ejecución sobre rellenos no consolidados y dificultad para reparar paramentos externos o para garantizar recubrimientos de armaduras.

Las pantallas de hormigón se ejecutan sobre plataformas terrestres. Se comienza excavando una zanja cuyas paredes se mantienen verticales gracias al efecto estabilizante de fangos bentónicos. Una vez realizada la excavación, se colocan las jaulas de armaduras y posteriormente se procede al hormigonado.

Generalmente, las pantallas se construyen por módulos, estando sus dimensiones, tanto en longitud como en espesor, condicionadas muchas veces por la maquinaria de construcción disponible. Es habitual que no se superen longitudes de 5 m, con espesores de 0,60, 0,80 o 1,00 m.

Las armaduras se montan en superficie y se colocan en la excavación mediante una grúa. Una vez terminados los distintos elementos de pantalla, se

2.3. Principales tipologías de muelle

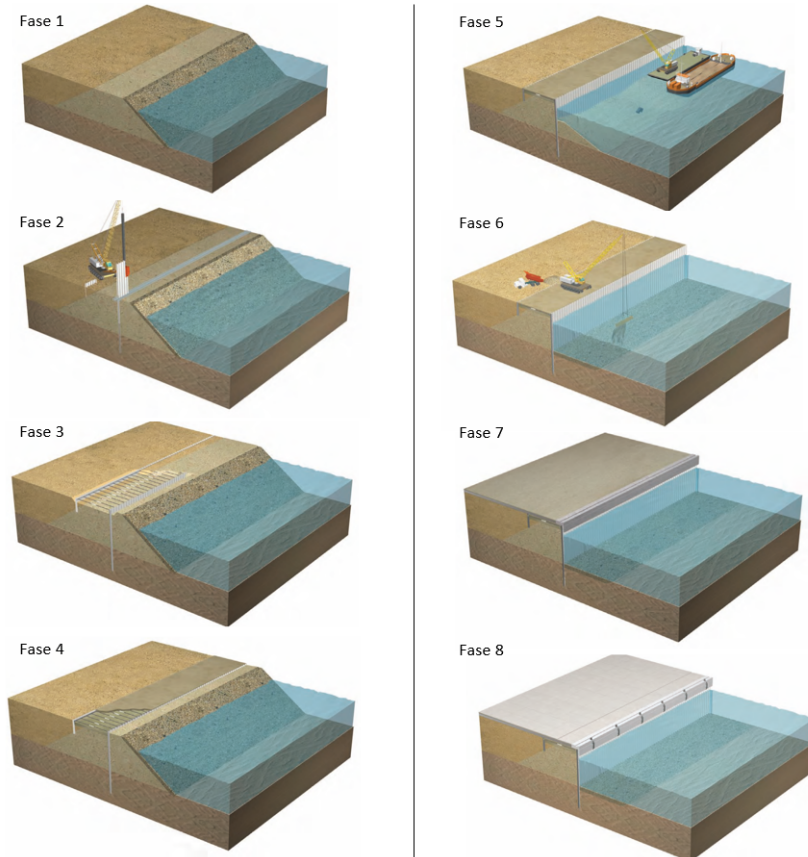


Figura 2.23: Procedimiento constructivo de un muelle de tablestacas desde plataforma terrestre. **Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.**

procederá a sanear la parte superior y se construirá una viga de atado superior, disponiéndose también los tirantes de anclaje si son necesarios.

Las pantallas de hormigón pueden construirse prácticamente en cualquier terreno, permitiendo empotramientos en terreno firme o roca.

2. Estado del Arte

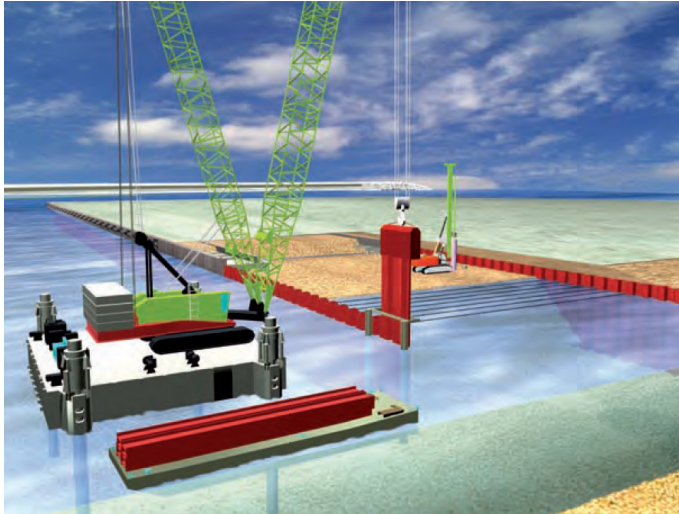


Figura 2.24: Procedimiento constructivo de un muelle de tablestacas con medios flotantes. Adaptado con permiso de ref. [36]. Copyright, 2009, Puertos del Estado.

2.3.6. Tecnología OPEN CELL SHEET PILE (OCSP)

Para finalizar este apartado dedicado a las principales tipologías de muelles cabe mencionar por su singularidad la tecnología *OPEN CELL SHEET PILE* (OCSP) [49] cuya patente [46] pertenece a la empresa *PND Engineers, Inc.*

Esta tecnología consiste en una estructura celular formada por tablestacas planas en la que cada una de las celdas se ejecuta para adquirir una forma en planta de U. De este modo, se generan un determinado número de tramos con paramento vertical semicircular, anclados al terreno mediante hileras de tablestacas ubicadas perpendicularmente.

Desarrollada a principio de la década de los 80, esta tecnología ha sido ampliamente empleada hasta la actualidad (más de 200 infraestructuras construidas) en Estados Unidos y Canadá. Además de emplearse en la construcción de muelles, esta tecnología tiene otras aplicaciones [49], entre las que desta-

can: la construcción de estribos de puentes [47], el confinamiento de dragados contaminados [4], la construcción de islas artificiales, entre otras.

Su principio de funcionamiento estructural consiste en transmitir los esfuerzos de tracción horizontales generados por el empuje del terreno en las tablestacas del paramento frontal hacia las tablestacas de anclaje.

Además de tablestacas convencionales, el sistema consta de otros elementos diseñados específicamente para permitir la conexión entre tablestacas (*Wye Pile*) y para actuar como elemento terminal del anclaje (*Anchor Pile*).

Entre las ventajas [49] que ofrece esta tecnología se encuentran, entre otras, las siguientes: gran capacidad de soporte ante cargas uniformes o localizadas, calados importantes (hasta 28 metros), escasa necesidad de empotramiento en el terreno, buen comportamiento en bajas temperaturas (hielo) o ante eventos sísmicos.

2.4. Modos de fallo

Una de las cuestiones fundamentales a considerar en toda obra marítima o portuaria en todas sus fases de proyecto es la seguridad. El umbral de seguridad mínimo requerido depende de la importancia de la obra, así como de la repercusión económica, social y ambiental que se generaría en caso de producirse su destrucción o pérdida de funcionalidad de la misma [40]. Esta valoración se realiza mediante la determinación del carácter general de la obra, en términos del índice de repercusión económica (IRE) y el índice de repercusión social y ambiental (ISA). En función del valor del primero de ellos (IRE) se pueden distinguir las siguientes categorías de repercusión económica, que se emplearán fundamentalmente en la definición de la vida útil mínima de la obra.

- **R1:** obras con repercusión económica baja ($IRE \leq 5$)
- **R2:** obras con repercusión económica media ($5 < IRE \leq 20$)
- **R3:** obras con repercusión económica alta: ($IRE > 20$)

De modo similar, en función del índice ISA se definen las siguientes categorías de repercusión social y ambiental, que se emplearán para definir la

2. Estado del Arte

máxima probabilidad conjunta de fallo en la vida útil tanto para los Estados Límite Últimos (ELU) como para los Estados Límite de Servicio (ELS).

- **S1:** obras sin repercusión social y ambiental significativa ($ISA < 5$)
- **S2:** obras con repercusión social y ambiental baja ($5 \leq ISA < 20$)
- **S3:** obras con repercusión social y ambiental alta ($20 \leq ISA < 30$)
- **S4:** obras con repercusión social y ambiental muy alta ($ISA \geq 30$)

La seguridad de una obra en fase de proyecto puede evaluarse empleando como parámetro de medida la probabilidad de fallo frente al conjunto de todos los posibles modos de fallo principales asociados a los Estados Límite Últimos (ELU) que pudieran presentarse. Los Estados Límite Últimos son aquellos que producen la ruina por rotura o colapso estructural de la obra o parte de ella, pudiendo deberse a fallos de muy diversa naturaleza:

- Rotura del terreno
- Pérdida de equilibrio estático
- Agotamiento de algún elemento estructural
- Fallos debidos al exceso de presión de agua
- Fallos ocasionados por la filtración de agua en el terreno.

Uno de los modos de fallo más habituales en este ámbito son los de tipo geotécnico, en los que la resistencia del terreno tiene un papel fundamental. Para evitarlos, se debe realizar un reconocimiento detallado del terreno mediante el correspondiente estudio geotécnico y adoptar las soluciones constructivas adecuadas para caso. Asimismo, se deberán emplear modelos de cálculo o experimentales adecuados para la verificación del comportamiento de la estructura, y realizar un seguimiento continuado de la obra, tanto en la fase de construcción como en la fase de explotación de la misma.

En este apartado se presentan los diferentes modos de fallo de tipo geotécnico que se pueden producir en función de la tipología de muelle considerada,

centrándose fundamentalmente en aquellos asociados a los Estados Límites Últimos (ELU), así como los coeficientes de seguridad requeridos. No se entrará en detalle en los métodos de cálculo asociados a cada uno de ellos ya que se encuentran definidos en la *ROM 0.5-05: Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias* [43].

Lo relevante de este apartado es poner de manifiesto la necesidad de tener estos modos de fallos presentes a la hora de diseñar nuevas tipologías de muelle, de cara a considerar en el diseño las medidas oportunas para tratar de evitar su posible ocurrencia.

2.4.1. Muelles de gravedad

Los modos de fallo geotécnicos más comunes en esta tipología de muelles se muestran en la Figura 2.25 y se enumeran a continuación.

- Deslizamiento en el contacto hormigón-banqueta de apoyo
- Deslizamiento del contacto de la banquetta de apoyo-terreno natural
- Hundimiento
- Vuelco plástico
- Estabilidad global
- Erosión interna del trasdós o del cimiento
- Socavación

Para cada uno de los modos de fallo se establecen unos coeficientes de seguridad que deben verificarse (Figura 2.26) de acuerdo a unas condiciones específicas [43].

2.4.2. Muelles de pilotes

En el caso de los muelles de pilotes los modos de fallo principales son los siguientes (Figura 2.27).

2. Estado del Arte

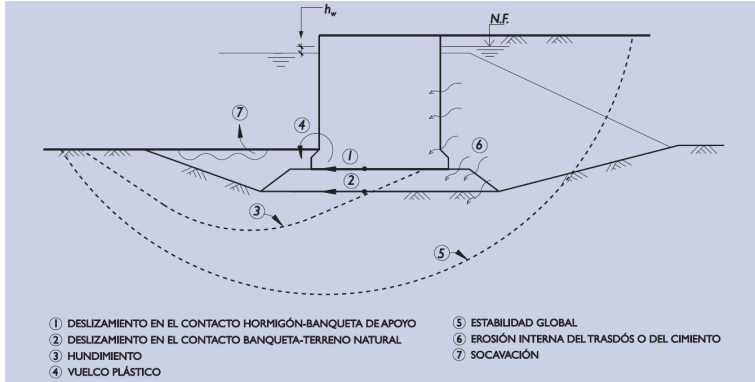


Figura 2.25: Modos de fallo geotécnicos en muelles de gravedad. Adaptado con permiso de ref. [43]. Copyright, 2005, Puertos del Estado.

Tabla 4.2.1. Coeficientes de seguridad mínimos recomendados para el proyecto de muelles de gravedad. ISA bajo (5 a 19)

Apartado donde se define el método de cálculo asociado	Estados Límite Últimos de rotura de tipo geotécnico* (GEO)	Tipos de combinación		
		Cuasi-Permanentes F_1	Fundamentales o Características F_2	Accidentales o Sísmicas F_3
3.5.5	Deslizamiento en el contacto hormigón-banqueta de apoyo	1,5	1,3	1,1
3.5.5	Deslizamiento en el contacto de la banquetta y el terreno natural	1,5	1,3	1,1
3.5.4	Hundimiento	2,5	2	1,8
3.5.6 y 3.7.11.3	Vuelco plástico	1,5	1,3	1,1
3.8	Estabilidad global	1,4	1,3	1,1
–	Erosión interna del trasdós	MP	–	–
–	Socavación del pie del intradós	MP	–	–

* Son los controlados, principalmente, por la resistencia del terreno.

MP En estos casos la seguridad no suele ser cuantificada. El problema puede evitarse tomando medidas preventivas adecuadas (MP).

Nota 1: Antes de utilizar estos coeficientes de seguridad deben conocerse los métodos de cálculo asociados que se definen en esta ROM, descritos en este apartado 4.2 y en los apartados que se indican en la primera columna.

Nota 2: Atendiendo al carácter de la obra y a la duración de la situación de proyecto se deberán hacer las modificaciones mencionadas en 3.3.8 y 3.3.10, a los efectos de adecuar los coeficientes de seguridad recomendados.

Nota 3: Los coeficientes de seguridad indicados frente al hundimiento corresponden al uso de la fórmula polinómica (apartado 3.5.4.8) o al uso de métodos de rebanadas. Para otros métodos se usarán los coeficientes de seguridad mínimos que se indican en la Tabla 3.5.6.

Figura 2.26: Coeficientes de seguridad mínimos para muelles de gravedad. Adaptado con permiso de ref. [43]. Copyright, 2005, Puertos del Estado.

- Hundimiento o arranque de los pilotes
- Rotura horizontal del terreno
- Erosión del talud
- Deslizamiento superficial del talud
- Equilibrio global
- Erosiones internas y arrastres
- Socavación

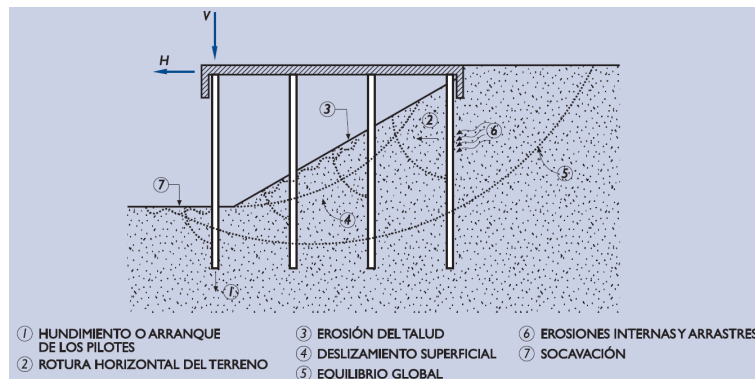


Figura 2.27: Modos de fallo geotécnicos en muelles de pilotes. Adaptado con permiso de ref. [43]. Copyright, 2005, Puertos del Estado.

En este caso, los coeficientes de seguridad a verificar para cada modo de fallo se recogen en la Figura 2.28.

2.4.3. Muelles de pantallas

Finalmente, en el caso de los muelles de pantallas se distinguen los siguientes modos de fallo (Figura 2.29), cuyos coeficientes de seguridad a verificar se pueden observar en la Figura 2.30.

2. Estado del Arte

Tabla 4.3.1. Coeficientes de seguridad mínimos recomendados para el proyecto de muelles y pantalanes pilotados. ISA bajo (5 a 19)

Apartado donde se define el método de cálculo asociado	Estados Límite Últimos de rotura de tipo geotécnico* (GEO)	Tipos de combinación		
		Quasi-Permanentes F_1	Fundamentales o Características F_2	Accidentales o Sísmicas F_3
3.6.6	Hundimiento del pilote	1,4 a 2,6	1,3 a 2,3	1,3 a 2
3.6.7	Arranque del pilote	1,4 a 2,6	1,3 a 2,3	1,3 a 2
3.6.8	Rotura del terreno por empujes horizontales	1,8	1,6	1,5
–	Erosión en talud	MP	–	–
3.8	Deslizamiento superficial del talud	1,4	1,3	1,1
3.8	Equilibrio total	1,4	1,3	1,1
–	Erosiones internas y arrastres	MP	–	–
–	Socavaciones	MP	–	–

* Son los controlados, principalmente, por la resistencia del terreno.

MP En estos casos la seguridad no suele ser cuantificada. El problema puede evitarse tomando medidas preventivas adecuadas (MP).

Nota 1: Antes de utilizar estos coeficientes de seguridad deben conocerse los métodos de cálculo asociados que se definen en esta ROM, descritos en este apartado 4.3 y en los apartados que se indican en la primera columna.

Nota 2: Atendiendo al carácter de la obra y a la duración de la situación de proyecto se deberán hacer las modificaciones mencionadas en 3.3.8 y 3.3.10, a los efectos de aumento y reducción de los coeficientes de seguridad recomendados.

Nota 3: Para hundimiento y arranque el coeficiente de seguridad depende del método de análisis. Ver Tabla 3.6.1.

Figura 2.28: Coeficientes de seguridad mínimos para muelles de pilotes. **Adaptado con permiso de ref. [43]. Copyright, 2005, Puertos del Estado.**

- Giro alrededor del anclaje
- Giro alrededor del pie
- Rotura del terreno en el entorno del anclaje
- Deslizamiento conjunto
- Equilibrio global
- Equilibrio vertical
- Erosión interna

2.5. Criterios de selección de la tipología estructural

Una vez que se han fijado las necesidades a satisfacer por una obra de atraque y amarre, y se han recogido todos los datos necesarios para el proyecto, se procede a acometer la fase de diseño intentando cumplir todos los requerimientos con el menor coste económico, garantizando las condiciones de seguridad

2.5. Criterios de selección de la tipología estructural

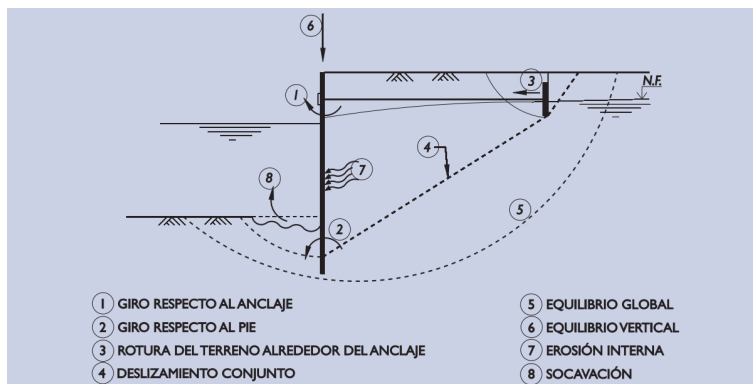


Figura 2.29: Modos de fallo geotécnicos en muelles de pantallas. Adaptado con permiso de ref. [43]. Copyright, 2005, Puertos del Estado.

Tabla 4.4.1. Coeficientes de seguridad mínimos recomendados para el proyecto de muelles de pantallas. Obras de ISA bajo (5 a 19)

Apartado donde se define el método de cálculo asociado	Estados Limite Últimos de rotura de tipo geotécnico* (GEO)	Tipos de combinación		
		Quasi-Permanentes F_1	Fundamentales o Características F_2	Accidentales o Sísmicas F_3
3.7.11.1.3	Giro respecto al anclaje	1,3	1,2	1,1
3.7.11.1.3	Giro respecto al pie	1,3	1,2	1,1
3.7.9.2	Rotura del terreno alrededor del anclaje	3,0	2,4	2
3.8	Deslizamiento conjunto	1,5	1,3	1,2
3.8	Equilibrio global	1,4	1,3	1,1
3.7.11.1.3	Equilibrio vertical	2,5	2	1,5
–	Erosión interna	MP	–	–
–	Socavación	MP	–	–

* Son los controlados, principalmente, por la resistencia del terreno.
 MP En estos casos la seguridad no suele ser cuantificada. El problema puede evitarse tomando medidas preventivas adecuadas (MP).
 Nota 1: Antes de utilizar estos coeficientes de seguridad deben conocerse los métodos de cálculo asociados que se definen en esta ROM, descritos en este apartado 4.4 y en los apartados que se indican en la primera columna.
 Nota 2: Atendiendo al carácter de la obra y a la duración de la situación de proyecto se deberán hacer las modificaciones mencionadas en 3.3.8 y 3.3.10, a los efectos de aumento y reducción de los coeficientes de seguridad recomendados.

Figura 2.30: Coeficientes de seguridad mínimos para muelles de pantallas. Adaptado con permiso de ref. [43]. Copyright, 2005, Puertos del Estado.

y funcionalidad exigidas. Para poder elegir la tipología que mejor se ajuste al caso particular, se ha de estudiar el problema teniendo en cuenta todos los condicionantes [41] que puedan tener importancia para la toma de decisiones.

2. Estado del Arte

A continuación se enumeran una serie de factores que se consideran como los más relevantes en la elección de la tipología.

- **Naturaleza del terreno de cimentación:** la elección del tipo de estructura, muchas veces, está subordinada a la calidad del terreno de cimentación. Se distinguen tres clases de terrenos según sus características.
 - Compactos e incompresibles: presentan buena capacidad portante y ausencia de asentamientos posteriores a la entrada de carga. Los suelos de sedimentos sueltos de poco espesor asentados sobre materiales de buena calidad también forman parte de este grupo.
 - Poco deformables: formados por arenas y gravas principalmente.
 - Muy deformables: formados por arcillas, arenas fangosas y fangos.

Las estructuras de gravedad están indicadas para terrenos del primer y segundo tipo y contraindicadas para los de tercer tipo, tanto por estabilidad general como por asientos. Los muelles de pantalla son adecuados principalmente para terrenos poco deformables, en los que proporcionan soluciones muy competitivas económicamente. También se pueden utilizar en terrenos del primer tipo pero en este caso sería necesario excavar una zanja en la roca para sujetar las tablestacas por su pie. Los muelles de pilotes pueden utilizarse en toda clase de terreno, siendo generalmente la mejor opción en terrenos muy deformables, ya que estas estructuras aseguran la ausencia de asientos. En los dos primeros tipos de terreno compiten con los muelles de gravedad a partir de alturas importantes, del orden de 20 m.

- **Calado:** si la estructura debe construirse en un lugar donde el fondo marino se encuentra mucho más alto que el calado requerido para el muelle o, incluso, se encuentre por encima del nivel del mar, entonces resultan competitivas estructuras de tipo pantalla. Además, se evita tener que realizar dragados importantes, que serían necesarios para estructuras de gravedad o pilotadas. Si el terreno natural es de buena calidad, queda incorporado al relleno de trasdós del muelle, lo que supone también un

2.5. Criterios de selección de la tipología estructural

ahorro importante. Si los calados existentes son muchos mayores que los requeridos por el atraque, la solución más competitiva sería la de una estructura de pilotes.

- **Heterogeneidad del terreno de cimentación:** en terrenos muy heterogéneos con variaciones importantes de condiciones de cimentación en distancias próximas habrá que juzgar la flexibilidad de adaptación de las distintas tipologías de muelles posibles. No obstante, en principio, los muelles de pilotes son los que mejor se adaptan a estas condiciones.
- **Clima marítimo:** deberán analizarse las condiciones de oleaje existentes durante la construcción de una obra situada en una zona de aguas no totalmente abrigadas. Las estructuras de gravedad construidas con cajones flotantes requieren, en el momento del fondeo de los cajones, que el mar esté en calma. La construcción de estructuras de tablestacas es también muy sensible al oleaje, hasta que el recinto está completamente relleno.
- **Disponibilidad de materiales de construcción:** cada tipología de muelle requiere de una clase y volumen de materiales distinto. La elección de una solución que cuente con material accesible será un factor muy importante en la obra, sobretodo desde el punto de vista de los costes de construcción. Por ejemplo si se proyecta una estructura donde se necesitan cantidades importantes de escollera y las canteras están alejadas del lugar de ubicación de la obra, posiblemente sea más económica otra donde, con otra tipología estructural, se disminuya la medición de dicho material.
- **Agitación debida a reflexiones del oleaje:** cuando se prevean problemas de agitación debido a reflexiones de oleaje, están más indicadas las estructuras más abiertas, tipo pilotes, que las de paramento vertical, puesto que las primeras producen rotura de oleaje. También son preferibles las estructuras de pilotes, frente a las opacas como cajones o bloques, cuando existan problemas de desagüe en dársenas cerradas.

2. Estado del Arte

- **Relación con los equipos de transferencia:** los equipos de transferencia de movilidad reducida (grúas, pórticos, etc.) transmiten a las obras de atraque importantes solicitudes. En ocasiones estas solicitudes ya se han tenido en cuenta en el diseño del muelle optimizándolo, pero en otras no se han tenido en cuenta y se necesita disponer para ese fin elementos complementarios, como vigas flotantes o sobre pilotes. Estos elementos añadidos han de tenerse en cuenta en las comparaciones de las diferentes soluciones.
- **Capacidad de adaptación a otros usos:** este factor puede tener importancia cuando no está bien definido el uso definitivo de la obra de atraque. Las estructuras de tipo gravedad, sobre todo las de cajones flotantes, son las que tienen un mejor comportamiento mientras que las pilotadas son las que están más condicionadas para futuros aumentos de las sobrecargas.
- **Posibles incrementos de calado:** esta posibilidad existe, igual que el caso anterior, cuando aún no están muy definidos los usos definitivos de la obra de atraque. Si se piensa que en el futuro pueden atracar buques de mayor calado, entonces estará indicada una obra de pilotes, en donde un aumento de calado no entraña grandes problemas. Sin embargo en obras de gravedad con cimentación directa, el aumento de calado podría resultar problemático.
- **Coste económico:** cuando se establece una comparación de costes entre varias tipologías, se puede hacer teniendo en cuenta la construcción y el mantenimiento o únicamente la construcción. En las etapas de diseño será suficiente comparar los costes de construcción, dado que en obras marítimas los costes de mantenimiento serán muy pequeños en relación con los primeros.
- **Afecciones medioambientales:** deberá seleccionarse la tipología que garantice la protección de los ecosistemas marino y costero y sus recursos naturales. Pese a que la decisión de mejorar o establecer ins-

talaciones portuarias se basa normalmente en parámetros económicos, geográficos y políticos, antes que de naturaleza ambiental.

2.6. Estructuras antirreflejantes

Uno de los principales inconvenientes que presentan los muelles fijos cerrados, así como las obras de abrigo de tipo dique vertical, es que su paramento vertical refleja casi totalmente el oleaje que incide sobre ellos, aumentando la agitación portuaria, dificultando la navegación y el atraque en las inmediaciones del muelle, aumentando los esfuerzos y rebases sobre la estructura, y generando otros efectos adicionales no deseados. Debido a ello, se han llevado a cabo un gran número de investigaciones cuyo objetivo es el desarrollo de estructuras portuarias con baja reflectividad, como pueden ser los estudios recogidos, entre otros [30, 6, 60, 20].

Este tipo de estructuras antirreflejantes han sido implementadas en diversos puertos a lo largo de todo el mundo debido a su alta capacidad de absorción de energía, la reducción del rebase, la menor erosión, la reducción de fuerzas (especialmente las impulsivas), los menores efectos negativos sobre la costa, con el consecuente ahorro económico y mejora ambiental que ello supone.

En este apartado se van a presentar de forma resumida algunos diseños de este tipo de infraestructuras portuarias, pudiéndose obtener información más detallada en otras fuentes recogidas en la bibliografía [15, 57].

Una gran cantidad de diseños propuestos se basa en estructuras antirreflejantes tipo Jarlan [27], que constan de cámaras huecas que permiten la entrada de agua en su interior a través de huecos situados en su paramento frontal expuesto al oleaje. De este modo se provoca la disipación de energía mediante el efecto de la turbulencia y la viscosidad del flujo a su paso por las perforaciones.

Aplicaciones de esta tipología de estructura vertical pueden encontrarse en Japón [55] o Italia [9, 10]. A modo de ejemplo, se destaca el caso del dique Duca Degli Abruzzi del Puerto de Nápoles, caracterizado por incluir un frontal curvado para reducir esfuerzos y reflexiones que podría asemejarse, en cierta medida, a la geometría del sistema Pilote-Lámina, que se presentará y analizará en detalle en el próximo capítulo.

2. Estado del Arte

A partir del concepto inicial de la tipología Jarlan se han ido desarrollando nuevas variantes o alternativas. Una de ellas consiste en incluir escollera dentro de las cámaras perforadas para provocar la reducción del flujo en el interior y, en consecuencia, una mayor disipación de energía [26]. Ejemplos de esta tipología en España se pueden citar los puertos de Bilbao (testero del espigón nº 2), Algeciras, o Carboneras (Almería), entre otros [45]; así como en otros países como Israel, Italia, o China [28].

Otra alternativa la constituyen las estructuras con pared curvada, bien con un frontal de perfil semicilíndrico, o bien mediante cámaras cilíndricas verticales. Las principales características de éstas son, por una parte, la reducción que provocan en las fuerzas actuantes sobre el dique, y por otra, su aportación para evitar la presencia de corrientes longitudinales. Ejemplos de esta tipología de cámara semicircular se encuentran en el puerto de Tanger (Marruecos) o en el puerto de Beirut (Líbano). Otro ejemplo de estructura antirreflejante de cámara perforada cilíndrica es el diseño propuesto para un área recreativa del puerto japonés de Nagashima [52].

En España se han registrado varias patentes con propuestas de diseños de sistemas antirreflejantes, entre otras: “*Dique rompeolas*” [50], “*Estructura de baja reflexión*” [8], “*Dique antirreflejante de cámaras cilíndricas*” [17],

o “*Estructura marítima vertical con cámaras de unidades múltiples para la atenuación de la reflexión de oleaje*” [33].

Algunas tipologías se basan en el empleo de elementos prefabricados, generalmente cajones o bloques, que han sido utilizadas preferentemente para la construcción de muelles. Entre ellas, se encuentran las propuestas que se enumeran a continuación: IGLOO [54], WAROCK [23], BARA [3], ARPA [16] o GMAR [34].

3. PRESENTACION DEL SISTEMA PILOTE-LÁMINA

El sistema Pilote-Lámina [14] es un nuevo concepto para la contención de terrenos, siendo especialmente indicado para la construcción de diferentes tipos de infraestructuras portuarias como pueden ser muelles, islas artificiales o diques verticales. Inicialmente, el sistema ha sido diseñado específicamente para muelles portuarios teniendo en cuenta tres factores que condicionan particularmente la elección de la tipología a emplear: el coste económico, la maquinaria necesaria y la posible afección medioambiental de la actuación.

Como su propio nombre indica, el sistema está compuesto fundamentalmente por dos elementos estructurales: pilotes y láminas, que se encargan de forma conjunta de soportar tanto el empuje del terreno como los esfuerzos generados en la explanada, trabajando los pilotes fundamentalmente a flexión y las láminas a tracción. De este modo, se consigue una optimización de los materiales constitutivos de ambos elementos, aprovechando al máximo sus propiedades mecánicas y generando un ahorro de coste económico significativo.

En la Figura 3.1 se muestra una recreación de muelle construido mediante el sistema Pilote-Lámina, donde se pueden observar sus elementos principales.

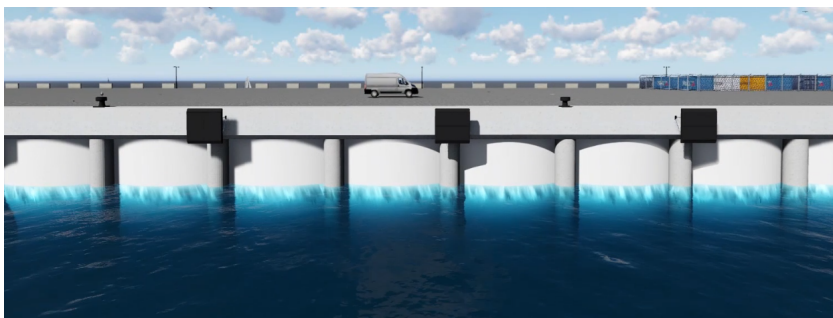


Figura 3.1: Recreación de muelle construido con el sistema Pilote Lámina. Adaptado con permiso de ref. [7].

3. Presentación del sistema Pilote-Lámina

3.1. Comportamiento estructural del sistema

Tal y como se explicaba anteriormente, la solución que se propone con este sistema consiste en descomponer el trabajo estructural en dos componentes, convirtiendo el empuje ejercido por el terreno y otros elementos (tanto estáticos como dinámicos) en un esfuerzo de tracción absorbido por las láminas que se transmite a los pilotes que pasan a trabajar fundamentalmente a flexión.

El comportamiento estructural del sistema se ilustra en la Figura 3.2 donde puede observarse la idea fundamental en la que se basa el sistema. Los esfuerzos horizontales generados por el relleno portuario y los elementos de la superestructura del muelle actúan fundamentalmente sobre los elementos lámina situados entre cada dos pilotes. Las láminas trabajan a tracción simple, deformándose hasta alcanzar una determinada geometría de equilibrio. Cada una de ellas se encuentra anclada por ambos extremos a sus pilotes laterales mediante un elemento de conexión, transmitiéndoles los esfuerzos correspondientes. Los pilotes, que se encuentran anclados a un muro de reacción, realizan a su vez un trabajo de flexión para resistir los esfuerzos provenientes de las láminas. De este modo, tal y como se explicaba anteriormente, cada material trabaja de acuerdo a sus propiedades específicas permitiendo optimizar cada uno de los elementos del sistema. En la Figura 3.3 se pueden observar, en un caso genérico, los esfuerzos a los que están sometidos los pilotes.

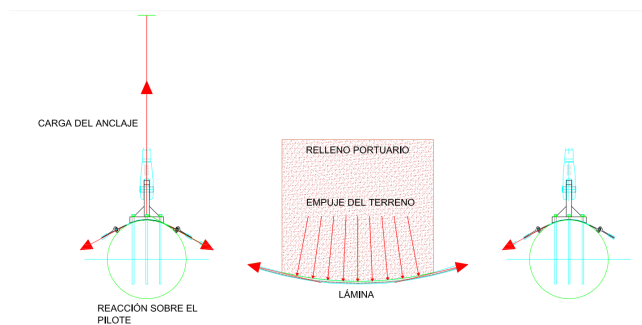


Figura 3.2: Comportamiento estructural del sistema. **Elaboración propia.**

3.2. Elementos constitutivos del sistema

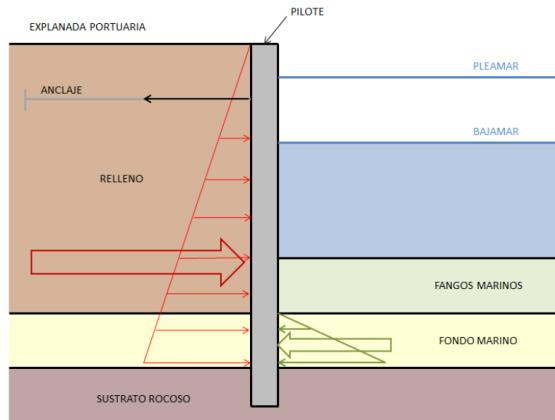


Figura 3.3: Esfuerzos sobre el pilote. **Elaboración propia.**

3.2. Elementos constitutivos del sistema

Como se ha explicado previamente en la sección anterior, los dos elementos principales del sistema son los pilotes y las láminas. No obstante, consta también de otros elementos adicionales que son fundamentalmente los tres siguientes: sistema de conexión entre lámina y pilote, anclajes (con sus correspondientes muros de reacción) y la viga de coronación (viga cantil) que sirve de superestructura, solidarizando estructuralmente los pilotes. Los aspectos más destacados de cada uno de los elementos del sistema se presentan a continuación.

3.2.1. Pilotes

El sistema, en su concepción inicial, está constituido por una línea frontal de pilotes que se encargan de asumir los esfuerzos de flexión transmitidos por las láminas. Su ejecución se puede llevar a cabo desde el mar mediante el empleo de pontonas o en tierra empleando rellenos auxiliares provisionales. En

3. Presentación del sistema Pilote-Lámina

la Figura 3.4 se muestra una recreación de una línea de pilotes que está siendo ejecutada mediante el primero de los procedimientos. Los pilotes se ejecutan con una camisa metálica perdida que deberá llevar incorporado el sistema de conexión por donde se deslizarán posteriormente las láminas durante la fase de ejecución correspondiente. Además, es necesario tener en cuenta como se va a realizar el anclaje con el pilote. Debido a ello, las camisas perdidas deberán estar dotadas de un elemento de unión con el tirante de anclaje a los muros de reacción, o en su defecto, permitir su instalación posterior.



Figura 3.4: Recreación de línea de pilotes siendo ejecutada desde pontona.
Adaptado con permiso de ref. [7].

3.2.2. Láminas

Los elementos tipo lámina trabajan por forma, deformándose en función de los esfuerzos a los que están sometidos hasta alcanzar una determinada geometría de equilibrio. Los parámetros geométricos más relevantes en relación con las láminas son por un lado la longitud de las mismas, que está relacionada, como es evidente, con la distancia entre los pilotes, y por otro lado el espesor de material a utilizar. Como se verá posteriormente, los valores de espesores

3.2. Elementos constitutivos del sistema

de lámina necesarios para los casos analizados hasta la fecha, aunque varían en función de diversos factores (material considerado, longitud de lámina, calados, etc.) se pueden considerar reducidos.

En la Figura 3.5 se puede observar una recreación de un estado de la ejecución del sistema donde las láminas se encuentran ya colocadas entre los pilotes, cerrando los vanos existentes entre ellos. A pesar del aspecto continuo del paramento frontal de las láminas, realmente, cada vano está constituido por un determinado número de elementos de tipo lámina que se colocan, unos apoyados sobre los otros, cubriendo la altura existente entre la cota de pie del muelle y la cota de las cabezas de los pilotes.

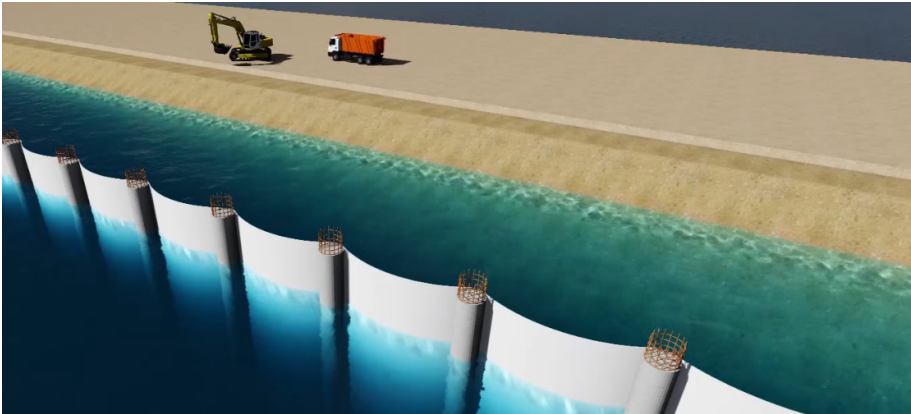


Figura 3.5: Recreación de láminas colocadas entre los pilotes. Adaptado con permiso de ref. [7].

En el trasdós de las láminas se coloca también un geotextil antes de proceder al comienzo del relleno de su parte posterior, tal y como se muestra en la Figura 3.6. En ella, se puede apreciar claramente la curvatura de las láminas y la geometría resultante en la parte superior del sistema, sobre la que se deberá ejecutar posteriormente la viga de coronación (viga cantil). Por otra parte, se observa también la unión de las láminas con los pilotes que se materializa mediante un determinado sistema de conexión.

3. Presentación del sistema Pilote-Lámina

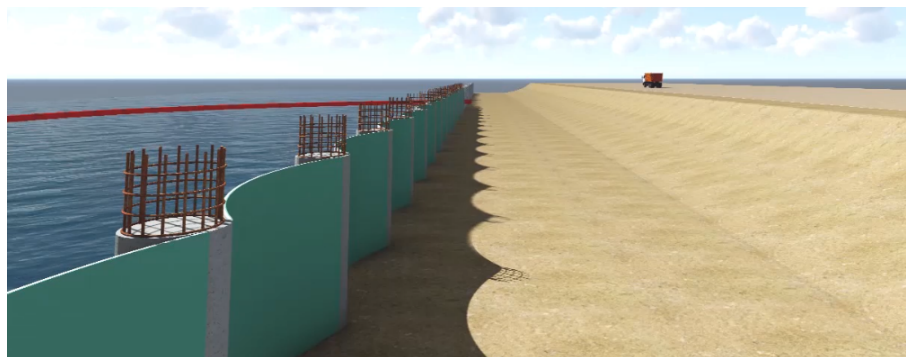


Figura 3.6: Recreación de una vista posterior de las láminas con su geotextil correspondiente. Adaptado con permiso de ref. [7].

3.2.3. Sistema de conexión entre pilote y lámina

El sistema de conexión entre pilote y lámina es un componente estructural crítico del sistema Pilote-Lámina, ya que debe ser capaz de asumir los esfuerzos que se producen en una zona caracterizada por una fuerte concentración de tensiones que se transmiten de la lámina al pilote. Deberá estar formado por elementos de conexión situados longitudinalmente tanto en los pilotes como en los extremos laterales de las láminas, siendo muy importante que permitan el giro de la lámina para que ésta pueda adoptar la geometría de equilibrio correspondiente a los esfuerzos que actúan sobre ella.

Además, es fundamental que el diseño de los elementos de conexión permita una colocación simple y rápida de las láminas en sus respectivos pilotes, para facilitar la operación durante la ejecución. Para ello, su posicionamiento se deberá poder realizar mediante un deslizamiento vertical sencillo, introduciendo los extremos de las láminas en los elementos de conexión (guías) de los pilotes de modo que ambos elementos queden correctamente ensamblados.

Tal y como se describirá en el próximo capítulo, en la primera experiencia de construcción de un prototipo real de muelle con el sistema Pilote-Lámina se emplearon semi-secciones de tablestacas como elementos de conexión.

3.2.4. Anclajes y muros de reacción

Los pilotes que conforman el sistema Pilote-Lámina van unidos mediante unos tirantes de anclaje (Figura 3.7), constituidos por una barra de acero, a unos muros de reacción situados en la parte posterior del muelle que quedarán embebidos en el relleno portuario. De este modo se dota de mayor rigidez a los pilotes y se refuerza su capacidad estructural.

Para poder colocar los tirantes de anclaje se ejecutará parcialmente el relleno hasta alcanzar una cota suficiente que permita posicionar los muros de reacción, acceder a los elementos de anclaje de los pilotes (o si es necesario instalarlos durante esta fase de la ejecución del sistema), y conectar entre ambos las barras de anclaje correspondientes. Tras conectar los tirantes de anclaje se continua con la ejecución del relleno hasta alcanzar su cota de coronación.

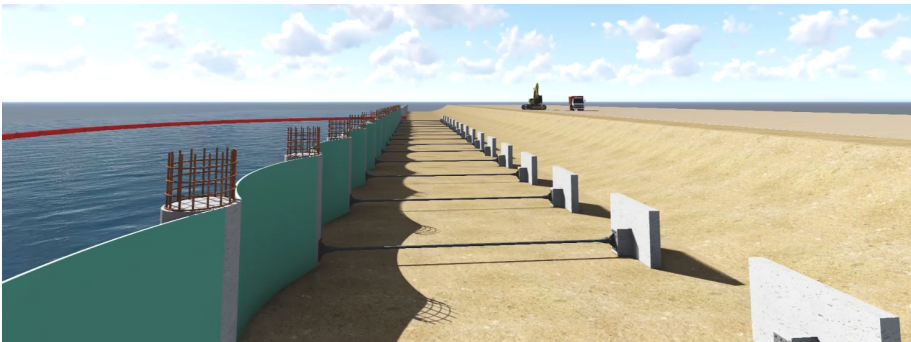


Figura 3.7: Barras de anclaje entre los pilotes y sus correspondientes muros de reacción. *Adaptado con permiso de ref. [7].*

3.2.5. Viga de coronación

Finalmente, una vez terminado el relleno hasta la cota superior de los pilotes, se procede a terminar el sistema Pilote-Lámina mediante la ejecución de una viga de coronación (viga cantil), cuya misión a nivel estructural es mantener unidos todos los pilotes del sistema, actuando como viga de atado. En

3. Presentación del sistema Pilote-Lámina

la imagen anterior (Figura 3.7) se puede apreciar que cada pilote tiene en su cabeza una armadura de espera, cuya misión es materializar su unión con la viga de coronación.

Para ejecutar la viga es conveniente realizar previamente un primer hormigonado de su losa inferior. De este modo, se evita la necesidad de disponer encofrados complejos en la parte inferior de la viga, ya que esa zona presenta una geometría particular debido a la curvatura de las láminas. En la Figura 3.8 se muestra una recreación de la fase de hormigonado de la viga. Una vez posicionada la armadura sobre los pilotes, se coloca a ambos lados de la misma los encofrados laterales, y se comienza el hormigonado. En la práctica, esta operación se realizará generalmente dividiendo la viga en tramos de una determinada longitud.

Con la ejecución de la viga de coronación, el sistema Pilote-Lámina queda finalmente completado. Por último, para terminar el muelle y ponerlo en servicio, quedaría simplemente ejecutar el pavimento portuario de la explanada posterior, y colocar los elementos de uso y explotación necesarios (defensas, puntos de amarre, escaleras, etc).

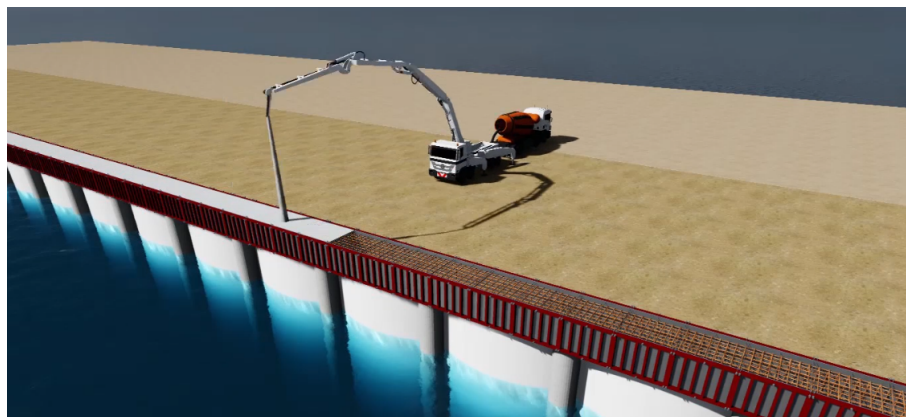


Figura 3.8: Recreación de la fase de hormigonado de la viga de coronación del sistema. *Adaptado con permiso de ref. [7].*

3.2. Elementos constitutivos del sistema

A continuación, en las Figuras 3.9 y 3.10 se muestra una recreación del aspecto final del muelle una vez terminado, y una imagen del sistema Pilote-Lámina ejecutado en el puerto de Vilanova de Arousa, respectivamente.

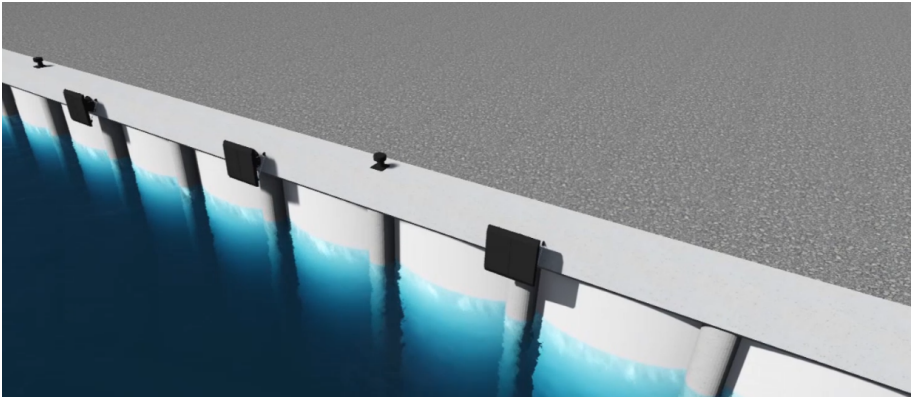


Figura 3.9: Recreación de muelle construido con el sistema Pilote Lámina. Adaptado con permiso de ref. [7].



Figura 3.10: Sistema Pilote-Lámina ejecutado en el puerto de Vilanova de Arousa. Imagen propia.

3. Presentacion del sistema Pilote-Lámina

4. PRIMERA EXPERIENCIA CONSTRUCTIVA

En este capítulo se describe de forma detallada la primera experiencia de ejecución del sistema Pilote-Lámina que se llevó a cabo con la construcción de un muelle en el puerto de Vilanova de Arousa (Galicia). Este primer prototipo a escala real se pudo construir gracias a un proyecto concedido por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) correspondiente a la convocatoria del año 2013 para la Comunidad Autónoma de Galicia de procedimiento de concesión de subvenciones destinadas a fomentar la cooperación estable público-privada en investigación y desarrollo (I+D), en áreas de importancia estratégica para el desarrollo de la economía española – FEDER ININTERCONECTA.

En el proyecto, denominado *Desarrollo de un sistema constructivo para la contención de terrenos basado en el trabajo de tracción de láminas delgadas* (proyecto PILOTE-LÁMINA), participaron tres empresas: Construcciones López Cao S.L., Temha S.L. y Grupo ABN; junto con dos organismos de investigación: Universidad de A Coruña (UDC) y Universidad de Santiago de Compostela (USC). Asimismo, contó con la colaboración de la Consellería do Mar, Portos de Galicia y la empresa Enxa Galicia S.L propietaria de la patente del sistema Pilote-Lámina.

Tras analizar en profundidad todo el proceso de fabricación de los elementos constitutivos del sistema y del procedimiento constructivo empleado, se presentan las principales conclusiones obtenidas como resultado de esta primera y exitosa experiencia de aplicación práctica del sistema Pilote-Lámina.

4.1. Elección del emplazamiento

Se analizaron diversas alternativas para el emplazamiento en el que se ejecutaría el prototipo a escala real contemplado en el proyecto, estando todos ellos ubicados en instalaciones portuarias gallegas. A partir de una primera preselección de emplazamientos, y tras realizar un análisis de ventajas e inconvenientes de los mismos, se seleccionaron finalmente dos ubicaciones que

4. Primera experiencia constructiva

presentaban las características más apropiadas para la ejecución del proyecto. Estas ubicaciones, que se describen con detalle a continuación, pertenecían al puerto de Ferrol y al puerto de Vilanova de Arousa respectivamente.

4.1.1. Puerto de Ferrol

El puerto de Ferrol es un puerto de interés general del estado gestionado por la Autoridad Portuaria de Ferrol-San Cibrao dependiente del Organismo Público Puertos del Estado. En la Figura 4.1 se puede observar una vista aérea de parte de las instalaciones interiores del puerto, estando resaltadas con un recuadro rojo las correspondientes al puerto interior de Ferrol.



Figura 4.1: Vista aérea del puerto interior de Ferrol (recuadro rojo) [24]. PNOA cedido por copyright Instituto Geográfico Nacional - Xunta de Galicia.

El emplazamiento seleccionado, junto con los muelles que componen la infraestructura portuaria del puerto interior de Ferrol (muelle Fernández Ladreda, Nuevo Muelle y muelle Cerramiento Norte del Fernández Ladreda) se pueden observar en la Figura 4.2. La ejecución del proyecto en este emplazamiento se concibió como una prolongación del muelle de Cerramiento Norte

4.1. Elección del emplazamiento

del Fernández Ladreda hasta la escollera donde se asentaría el futuro Nuevo Muelle de acuerdo con el Plan Director del Puerto de Ferrol [1]. Entre las obras de ampliación planteadas para el puerto interior se contemplaba la ampliación del Nuevo Muelle (Figura 4.2) por ambos costados convirtiendo la antigua terminal de carbón de Endesa en una terminal de contenedores.



Figura 4.2: Emplazamiento seleccionado en el puerto de Ferrol [24]. PNOA cedido por copyright Instituto Geográfico Nacional - Xunta de Galicia.

El hecho de que el Plan Director contemplase esas futuras obras de ampliación convertía este emplazamiento en una ubicación de gran interés para comprobar la viabilidad del nuevo sistema constructivo ya que, en el hipotético caso de que las obras ejecutadas no cumplieren con las características exigidas por la Autoridad Portuaria, este quedaría embebido por las obras de ampliación correspondientes.

La longitud total de la actuación sería en este caso de 80,81 m, consiguiendo una línea de atraque efectiva de 70,37 m con un calado medio del orden de los 10 m. De este modo se conseguiría un aumento significativo de la línea de

4. Primera experiencia constructiva

muelle para la explotación comercial del puerto, permitiendo la operativa de un número mayor de buques en ese muelle, mientras no se ejecutasen las obras de ampliación previstas. Además, cabe resaltar que se trata de una zona especialmente solicitada por la explanada libre anexa a la línea de atraque y que es utilizado por mercancía general, siendo esta la de mayor valor comercial. Con la actuación se evitaría también la necesidad de desplazar paralelamente al muelle la mercancía acopiada en la zona de tránsito para poder cargar o descargar los buques y se obtendría también un incremento (aunque no tan importante en comparación con las obras previstas) de metros cuadrados disponibles para acopio de mercancías en la zona de tránsito.

En la Figura 4.3 se puede apreciar una operación de un buque comercial con la actual configuración del Muelle de Cerramiento Norte del Fernández Ladreda, destacando la zona sin utilidad que se mantiene por la falta de línea de atraque, que genera problemas de estiba en la superficie anexa a la misma, siendo necesario desplazar los acopios de mercancías para servir a los buques.



Figura 4.3: Operación de carga en el muelle Cerramiento Norte del Fernández Ladreda. **Imagen propia.**

4.1. Elección del emplazamiento

El principal problema que podría surgir en este emplazamiento está asociado con el pie del talud de la escollera de contención de la explanada existente, ya que en el caso de que llegase a invadir la línea de pilotes del nuevo sistema a ejecutar, los bolos dispersos podrían interferir en el pilotaje del mismo. A pesar de que no imposibilitaría su ejecución, sí que cabría esperar un incremento sustancial del coste de ejecución de la obra. Debido a ello, este emplazamiento pasó a un segundo plano y se optó por analizar más en detalle la alternativa de ubicación que se presenta a continuación.

4.1.2. Puerto de Vilanova de Arousa

El puerto de Vilanova de Arousa pertenece al sistema portuario gallego cuya gestión corresponde a la Xunta de Galicia, a través del ente público Portos de Galicia. Está ubicado en la parte meridional de la Ría de Arousa, dentro de la comarca del Salnés (provincia de Pontevedra). Las instalaciones del puerto y el emplazamiento seleccionado se pueden observar en la Figura 4.4. La ejecución del proyecto daría lugar a una nueva línea de atraque con su correspondiente explanada adosada al dique de abrigo del puerto.

Uno de los factores favorables de este emplazamiento y que sería determinante para su elección final es que para esa misma zona ya estaba proyectada una actuación para la construcción de un muelle que no llegaría a ejecutarse debido a las dificultades presupuestarias de la época. Por lo tanto, se disponía de información sobre la solución del proyecto original lo que permitiría llevar a cabo una comparación con la nueva tipología propuesta en términos técnicos, económicos y medioambientales. Asimismo, existía un compromiso por parte de la Administración Autonómica de buscar una solución para dar servicio a los buques mejilloneros del lugar, que necesitaban mayor longitud de atraque y superficie de trabajo. Este compromiso con el puerto de Vilanova de Arousa se reflejó en la actitud de Portos de Galicia hacia el proyecto, involucrándose decididamente en el mismo, destacando el fuerte apoyo tanto de su Presidente, D. José Juan Durán Hermida como de la Conselleira del Mar de la Xunta de Galicia, Dña. Rosa Quintana Carballo, que sería clave para facilitar que se pudiese llevar a cabo esta primera experiencia con el nuevo sistema Pilote-Lámina.

4. Primera experiencia constructiva



Figura 4.4: Emplazamiento seleccionado en el puerto de Vilanova de Arousa [24]. PNOA cedido por copyright Instituto Geográfico Nacional - Xunta de Galicia.

El proyecto original aprobado por Portos de Galicia [51] para esa dársena contemplaba una actuación que abarcaba toda la longitud del dique de abrigo, lo que implicaría la transformación de toda la escollera interior en muelle de atraque para buques pesqueros. Teniendo en cuenta las condiciones del terreno y del entorno, y con el fin de evitar al máximo los materiales a dragar, hizo que se proyectase un muelle de pilotes, con losas en la superestructura. La planta de la actuación y la sección tipo correspondiente se pueden observar en las Figuras 4.5 y 4.6, respectivamente.

En dicha sección tipo se consideran dos alineaciones de pilotes: una primera situada en la cabeza del talud del dique de abrigo y una segunda que posteriormente será la línea de atraque del futuro muelle. Puede observarse la viga cantil donde se instalarían las defensas y los norays, así como las vigas transversales para el reparto de las cargas que asumirán las losas de la explanada del muelle. Asimismo, se observa que se mantiene el talud del dique de abrigo actual en la parte inferior de la plataforma.

4.1. Elección del emplazamiento

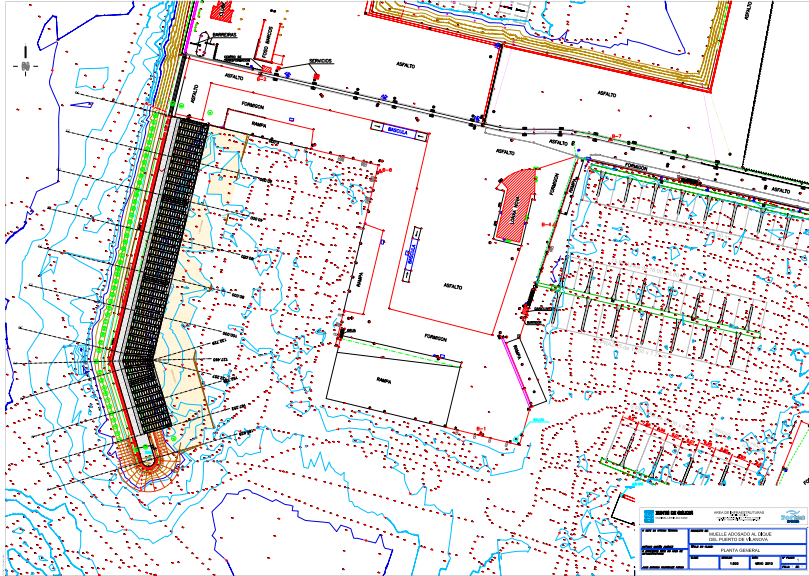


Figura 4.5: Planta de la actuación prevista por Portos de Galicia para el puerto de Vilanova de Arousa. **Usado con permiso de ref. [51]. Copyright, 2010 Portos de Galicia.**

Otro aspecto favorable para este emplazamiento era poder disponer del estudio geotécnico incluido en el proyecto original. Gracias a ello, se disponía de información para caracterizar el ámbito del emplazamiento, no siendo necesario contratar este estudio dentro de las actuaciones a realizar en el proyecto PILOTE-LÁMINA.

Por último, en relación con las ventajas de este emplazamiento, es importante indicar además que las posibles afecciones durante la actuación a usuarios y actividades portuarias se pueden considerar prácticamente nulas.

El principal inconveniente que surge en este emplazamiento es la existencia de una importante capa de sedimentos litorales formados por fangos y arena. Esa capa, situada en la superficie del fondo marino, presentaba unas ca-

4. Primera experiencia constructiva

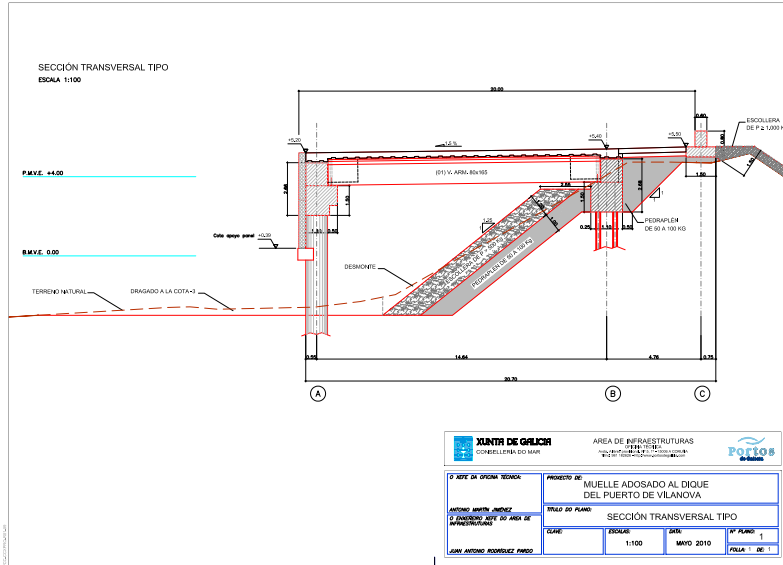


Figura 4.6: Sección tipo de la actuación prevista por Portos de Galicia para el puerto de Vilanova de Arousa. **Usado con permiso de ref. [51]. Copyright, 2010 Portos de Galicia.**

racterísticas inadecuadas para servir de apoyo a la cimentación de un muelle (baja compacidad y consistencia, elevado contenido en materia orgánica y deficientes propiedades geomecánicas). El espesor de esta capa se caracterizaba por ser muy variable, estando comprendido entre los 3,80 y los 21,50 metros. Debido a ello, sería necesario actuar previamente sobre esa capa con el objetivo de prevenir futuros asentamientos. Como solución, en lugar de emplear el procedimiento constructivo inicialmente pensado para el sistema Pilote-Lámina, que consistía en el empleo de medios flotantes para la ejecución de los pilotes, se podría ejecutar el sistema desde una plataforma terrestre, creando previamente un relleno que movilizase los fangos hacia el exterior y ejerciese de precarga. A pesar de tener un coste económico mayor, tiene la principal ven-

taja de que los trabajos se realizarían desde tierra firme, con todo lo que ello implica. No obstante, presenta el inconveniente de tener que retirar todo el material adicional aportado, siendo especialmente problemática la retirada entre pilotes, ya que se podría llegar a dañar fortuitamente alguno de los elementos de conexión incorporados en las camisas perdidas de los pilotes.

Todos los factores mencionados anteriormente hicieron que la elección del emplazamiento para la ejecución de la actuación prevista en el proyecto piloto del sistema Pilote-Lámina fuese finalmente la correspondiente al puerto de Vilanova de Arousa.

4.2. Descripción de la actuación

En este apartado se pretende describir someramente la actuación realizada, proporcionando información relevante sobre sus principales características. Muchas de las cuestiones aquí abordadas serán tratadas con mayor profundidad en los apartados posteriores a medida que se vayan explicando las diferentes fases de ejecución que se emplearon en el procedimiento constructivo.

La actuación consistió en la ejecución de un muelle mediante el sistema Pilote-Lámina en los primeros 57,10 m del actual dique de abrigo, con una cota de coronación situada a la +5,30 m y una cota de pie de muelle a la -3,00 m. El calado del muelle en condiciones de BMVE (bajamar máxima viva equinocial) y PMVE (pleamar máxima viva equinocial) es aproximadamente de 3,07 m y 7,29 m respectivamente. El nuevo muelle genera en su parte posterior una explanada con una anchura aproximada de 23,40 m desde el borde del cantil proporcionando una superficie útil del orden de los 1300 m².

A pesar de que esta longitud de la actuación no cubre la totalidad de la longitud correspondiente al dique existente se consideró adecuada para comprobar el comportamiento del sistema Pilote-Lámina una vez ejecutado, siendo esta la finalidad última del proyecto.

En la Figura 4.7 se presenta la planta (parte inferior) y el alzado (parte superior) de la actuación, donde se observa la línea de atraque generada y la explanada posterior para las operaciones de buques, fundamentalmente barcos mejilloneros.

4. Primera experiencia constructiva

El muelle consta de un total de 11 pilotes que se denominarán P1 a P11, de izquierda a derecha mirando de frente al muelle, para facilitar su identificación. Los 8 pilotes centrales (P3 al P10) tienen una sección circular de diámetro igual a 1,15 m, con una camisa metálica perdida de 6,00 mm y una distancia entre ejes de 6,20 m. En los extremos se emplearon unos pilotes de cierre (P2 y P11) con una sección especial reforzada debido a la asimetría de carga a la que estarían sometidos. En el extremo adyacente al muelle existente (parte derecha de la Figura 4.7) se unió el pilote de cierre (P11) con el paramento del muelle existente mediante un cosido con hormigón armado, mientras que en el extremo opuesto (parte izquierda de la Figura 4.7) el cierre se realizó mediante una escollera hasta el dique de abrigo. Además, en este último caso se ejecutó un segundo pilote (P1) junto al pilote de cierre, modificando la alineación en planta en esa zona para que el pie de la escollera de cierre no afectase a la operativa del nuevo muelle. Estas soluciones adoptadas en ambos extremos de cierre se explicarán con mayor detalle posteriormente en la parte dedicada al procedimiento constructivo.

Como se puede apreciar en el alzado del nuevo muelle, la altura de los pilotes variaba en función de la posición longitudinal de los mismos con respecto al dique, oscilando entre los 12,50 y 17,60 m con una longitud de empotramiento en el macizo rocoso de aproximadamente 3,00 m.

Tanto los pilotes centrales (P3 al P10) como el pilote de cierre P2 contaban con anclajes que los conectaba a sus muros de reacción correspondientes (9 muros de reacción en total). Los muros están constituidos por un macizo rectangular de hormigón armado de 2,50 m de alto por 4,00 m de ancho con un espesor de 0,50 m. En la parte central del macizo se dispuso una cabeza prismática de 1,00 m de longitud de sección 0,40 x 1,20 m donde se ubica la orejeta de anclaje. Los anclajes consisten en una barra de acero de una longitud aproximada de 13,50 m y una sección de 90,00 mm de diámetro, estando colocados a una cota de +2,50 m (2,80 m por debajo de la cota de coronación).

En los vanos existentes entre los pilotes P2 y P11 (9 vanos en total que se denominarán del V1 al V9 siguiendo el mismo criterio empleado para los pilotes) se colocaron verticalmente un total de 7 láminas de 1,00 m de altura y 6,20 m de longitud, hasta alcanzar la altura de la cabeza de los pilotes, salvo en

4.2. Descripción de la actuación

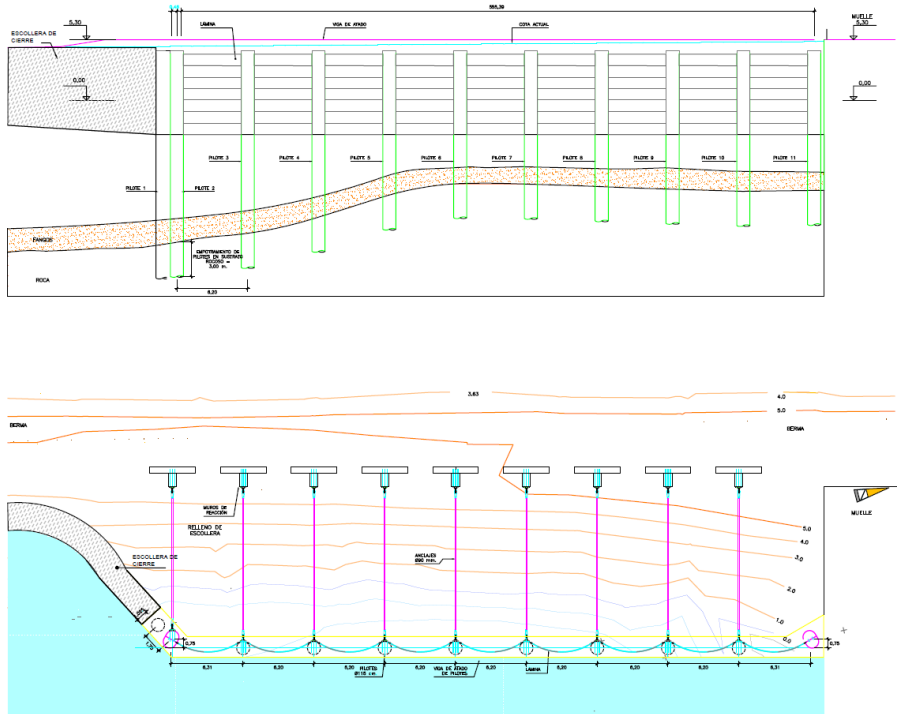


Figura 4.7: Planta y alzado de la actuación del proyecto PILOTE-LÁMINA.
Elaboración propia.

los vanos V8 y V9 en donde se colocaron únicamente 6 láminas. Las láminas constan de 5 flejes metálicos de 9,00 cm de ancho y 8,00 mm de espesor, separados 10,00 cm, en cuya parte posterior se sitúa una plancha de polietileno de 4,00 cm de espesor y una lámina de geotextil que se encargan de contener el terreno y transmitir los esfuerzos a los flejes metálicos, siendo estos los responsables de la función estructural de las láminas.

Por lo que respecta a los elementos de conexión entre los pilotes y las láminas, se materializó su unión mediante secciones de tablestacas. En los pilotes centrales (P3 al P10) se incorporaron longitudinalmente a modo de guía de po-

4. Primera experiencia constructiva

sicionamiento a ambos lados de sus correspondientes camisas perdidas, salvo los pilotes de cierre que disponen únicamente de un elemento de conexión (P2 y P11). En el caso de las láminas, sus extremos consistían en sendas secciones de tablestacas a las que se soldaron los flejes metálicos mencionados anteriormente, conformando de este modo el esqueleto estructural de las láminas.

Finalmente, la actuación correspondiente al sistema Pilote-Lámina termina con la ejecución sobre los pilotes de la viga cantil del muelle, consistente en una viga de atado de hormigón armado de sección rectangular de 1,20 m de alto y 1,825 m de ancho. La viga se ubicó de forma que la distancia horizontal entre el centro de los pilotes y el borde del cantil es igual a 0,825 m. Como se puede apreciar en la Figura 4.7 la viga consta de dos tramos: el tramo principal que genera la línea de atraque de 57,10 m y un segundo tramo de longitud considerablemente inferior (3,10 m) en el extremo de la la escollera de cierre.

Los principales parámetros geométricos del muelle ejecutado con el sistema Pilote-Lámina en esta actuación se resumen en la Tabla 4.1.

4.3. Procedimiento constructivo

El procedimiento constructivo que se llevó a cabo en la ejecución del muelle consistió en las siguientes fases. Se comenzó con los trabajos de construcción del relleno provisional que serviría de plataforma de trabajo para la ejecución de los pilotes. Se decidió emplear este procedimiento en lugar de emplear una pontona teniendo en consideración la gran cantidad de fangos que conformaban el lecho marino, ya que el relleno actuaría como una precarga que permitiría desplazar los fangos de la zona de ejecución. Paralelamente a la ejecución del relleno, se iniciaron los trabajos en taller para la fabricación de los elementos del sistema y la realización de los ensayos de laboratorio para caracterizar su comportamiento mecánico. Posteriormente, se ejecutarían los pilotes, los muros de reacción y se colocarían entre ellos los anclajes correspondientes. A continuación, se retiraron parcialmente los rellenos ejecutados previamente para poder proceder a la colocación de las láminas entre los pilotes. Una vez colocadas, se retomaron los trabajos para la construcción del relleno definitivo y se ejecutó la viga de coronación. Finalmente se instalaron

4.3. Procedimiento constructivo

Tabla 4.1: Parámetros principales de la actuación.

Parámetro	Valor
Longitud línea de atraque (L)	57,10 m
Cota coronación (z_c)	+5,30 m
Cota pie (z_p)	-3,00 m
Altura total (h_T)	8,30 m
Calado en BMVE (d_{BMVE})	3,07 m
Calado en PMVE (d_{PMVE})	7,29 m
Diámetro pilotes (D_p)	1,15 m
Altura total pilotes (H_p)	12,50 - 17,60 m
Espesor camisa perdida (e_p)	6,00 mm
Longitud de empotramiento (H_e)	3,00 m
Intereje pilotes (B_p)	6,20 m
Diametro anclajes (D_a)	90,00 mm
Cota anclajes (z_a)	+2,50 m
Longitud anclajes (L_a)	13,50 m
Altura de lámina (H_l)	1,00 m
Longitud de lámina (L_l)	6,20 m

4. Primera experiencia constructiva

las defensas y los norays, y se dotó a la explanada resultante de un pavimento de naturaleza bituminosa. Para el seguimiento del comportamiento del sistema se instalaron durante la ejecución galgas y sensores que fueron colocados en ubicaciones predefinidos y se dejaron unas arquetas de registro desde donde acceder a los datos. A continuación se comentan y analizan detalladamente las diferentes fases del procedimiento constructivo.

4.3.1. Fabricación de elementos en taller

Una de las principales ventajas del sistema Pilote-Lámina en comparación con otros sistemas de construcción de muelles, es la gran cantidad de elementos que se pueden fabricar en taller, permitiendo un mayor control de calidad, una optimización del coste de los elementos estructurales y una reducción del número de operarios necesarios en la propia obra. De hecho, como se comentará posteriormente se podrían haber fabricado en taller un número superior de elementos con respecto a los que finalmente se fabricaron durante el proyecto.

4.3.1.1. Fabricación de las camisas de los pilotes

Las camisas metálicas perdidas empleadas en la ejecución en obra de los pilotes, así como todos sus elementos adicionales (elementos de conexión con las láminas, orejetas de anclaje, guías de posicionamiento, etc.) se fabricaron en taller. Las camisas se ejecutaron en Industrias Catalinas S.A. (Segovia), mediante el empleo de la técnica de “tubo en virola”, consistente en el curvado de la chapa para posteriormente proceder a soldarlas longitudinalmente usando el método de arco sumergido. Mediante este procedimiento se fabricaron las camisas con un diámetro de 1,15 m empleando un espesor de chapa metálica de 6,00 mm. Por lo que respecta a la longitud total de las camisas, el valor deseado se obtuvo soldando el número necesario de elementos, variando en función de la posición longitudinal del pilote en el muelle. Una vez finalizada su fabricación, las camisas se enviaron a los talleres de “Metalurgica Gallega” Herederos de Ignacio de la Iglesia S.A. (Arteixo) para continuar su preparación.

4.3. Procedimiento constructivo

Una vez recibidas las camisas se procedió a incorporar a las mismas los elementos adicionales necesarios, comenzando por los sistemas que servirían de conexión con las láminas. Teniendo en cuenta el tiempo disponible para la realización de los estudios y los ensayos necesarios para analizar posibles sistemas de conexión, así como el tiempo requerido a posteriori para su fabricación, se decidió que sería más operativo emplear elementos estructurales que tuviesen ya un uso contrastado por la experiencia y contasen con homologación oficial. Finalmente, atendiendo al criterio anterior, se optó por el empleo de tablestacas como sistemas de conexión. Para ello, se cortaron longitudinalmente las tablestacas separándoles en dos secciones con elementos de unión que servirían de guía para las láminas. Además de soldar estas secciones en las zonas adecuadas para situar las uniones se incorporó entre ambas un refuerzo central para fortalecer la camisa en esa zona. El resultado final se puede observar en la Figura 4.8 donde se muestra una camisa para uno de los pilotes centrales con sus correspondientes secciones de tablestacas colocadas longitudinalmente a la misma por su trasdós y el refuerzo situado entre ambas (izda.) y un detalle de la guía de unión para las láminas materializa mediante el empleo de la tablestaca (dcha.).



Figura 4.8: Camisa para pilote central (izda.) y detalle de las guías de conexión con las láminas (dcha.). **Imagen propia.**

Adicionalmente, teniendo en cuenta que la perforación de los pilotes se realizaría con un diámetro superior (1,80 m) al correspondiente a las camisas

4. Primera experiencia constructiva

perdidas, se soldaron longitudinalmente unos elementos de guiado (Figura 4.9) cuya finalidad era poder controlar adecuadamente el posicionamiento de las camisas durante la fase de colocación en obra.

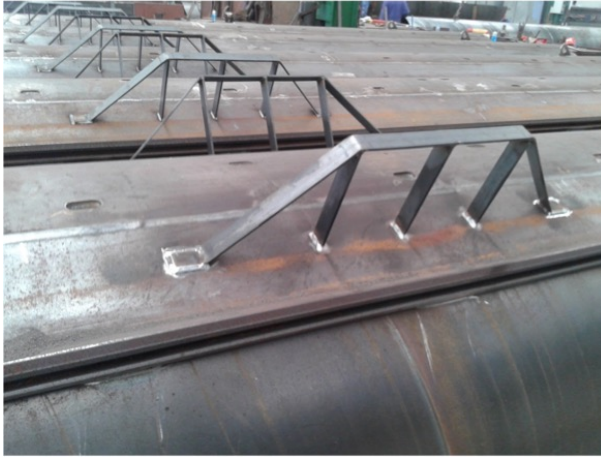


Figura 4.9: Guías de posicionamiento. **Imagen propia.**

De acuerdo con los cálculos estructurales realizados era necesario que los pilotes fuesen anclados a unos muros de reacción situados en su parte posterior. Para conectar los anclajes a los pilotes se diseñaron unas orejetas que se instalarían posteriormente en las camisas una vez posicionadas en obra. Se muestra una de estas orejetas preparadas en taller en la Figura 4.10, donde se puede observar que consta de dos elementos, la propia zona de anclaje y una placa rectangular que serviría para materializar la unión con la camisa. Para conseguir un adecuado posicionamiento de la orejeta en el pilote se ha dotado a la placa de unión de una curvatura idéntica a la que presentan las camisas. Asimismo, para poder realizar posteriormente las perforaciones en el pilote tras su hormigonado e instalar la orejeta empleando pernos anclados mediante la aplicación de resinas epoxi, se realizaron en las camisas de los pilotes unos taladros (Figura 4.11) coincidentes con los existentes en la placa de la orejeta.

4.3. Procedimiento constructivo



Figura 4.10: Orejeta empleada para la conexión con los anclajes. **Imagen propia.**



Figura 4.11: Taladros realizados en la camisa para la posterior colocación de las orejetas. **Imagen propia.**

4. Primera experiencia constructiva

Los pilotes de cierre de los extremos del muelle se diseñaron teniendo en cuenta que las cargas serían asimétricas ya que únicamente estarían conectados a láminas por uno de sus lados. Para ello se diseñaron unas camisas especiales con una sección con mayor capacidad resistente con respecto a las correspondientes a los pilotes centrales. Como se puede observar en la Figura 4.12 esta sección está formada por dos semisecciones simétricas que se unen mediante un perfil de refuerzo que incorpora en uno de sus ejes la sección de tablestaca que serviría de conexión con las láminas.



Figura 4.12: Camisa con sección reforzada para los pilotes de cierre (izda.) y detalle del perfil guías de conexión con las láminas (dcha.). **Imagen propia.**

Finalmente, una vez finalizados los trabajos de conformado y soldadura de los elementos en el taller, se terminaron los elementos mediante un procedimiento de galvanizado en caliente por inmersión en piscina con el objetivo de garantizar un correcto comportamiento a la corrosión.

4.3.1.2. Fabricación de las láminas

La fabricación de las láminas que formarían parte del sistema se llevó a cabo en paralelo a la preparación de las camisas en las instalaciones de la empresa ABN Pipe Systems situadas en Medina del Campo.

4.3. Procedimiento constructivo

Inicialmente se consideró el polietileno de alta densidad HDPE (*High Density Polyethylene*) como material para la fabricación de las láminas como elemento estructural del sistema. Este material se caracteriza tanto por su rigidez como por su resistencia a tracción e impactos. Se analizaron mediante ensayos mecánicos de laboratorio dos tipos de HPDE como posibles candidatos: HDPE20 (HDPE reforzado con un 20 % de fibra de vidrio) y HDPE40 (HDPE reforzado con un 40 % de fibra de vidrio). A partir de los resultados obtenidos se llegó a la conclusión de que era necesario reforzar este material para poder garantizar un correcto comportamiento estructural del sistema, adoptándose como solución el empleo de flejes metálicos embebidos en el polietileno que servirían a su vez de conexión con las secciones de tablestaca empleadas para la unión con las láminas. Estas secciones se prepararon en los talleres de "Metalurgica Gallega" Herederos de Ignacio de la Iglesia S.A. (Arteixo) realizando en las tablestacas los cortes longitudinales correspondientes. Debido al procedimiento de fabricación de las láminas se decidió que era conveniente emplear alturas de lámina de 1,00 m, siendo este valor el usado para definir la dimensión de las secciones de tablestaca.

Posteriormente, se trasladaron las secciones de unión a las instalaciones de ABN Pipe Systems, donde se completaron con la colocación de los 5 flejes metálicos de 9,00 cm de ancho y 8,00 mm de espesor, con una separación entre ellos de 10,00 cm. Después de un proceso de galvanizado se procedió a fabricar las láminas mediante un procedimiento de auto-inyección del polietileno que envolvería los flejes dando lugar a una lámina con un espesor total de 8,00 cm. En la Figura 4.13 se puede observar el procedimiento de fabricación de las láminas con los flejes metálicos dispuestos para su envuelta por el polietileno.

A pesar de que los cálculos estructurales realizados permitían una separación mayor entre los pilotes, en la práctica, la distancia adoptada finalmente entre ellos (6,20 m) quedó condicionada por la preparación de los moldes y el procedimiento de fabricación de las láminas. El empleo de otro material diferente para las láminas, como podría ser el acero, habría permitido diseñar las láminas con longitudes mayores, alcanzando los 8,00 m previstos inicialmente.

Durante la fabricación de las láminas surgieron varios problemas que obligaron a modificar varias cuestiones asociadas al procedimiento y a los mate-

4. Primera experiencia constructiva



Figura 4.13: Proceso de fabricación de las láminas con flejes metálicos embebidos. **Imagen propia.**

riales empleados. Uno de ellos fue la dificultad inicial para conseguir láminas con acabados de suficiente calidad y garantizar el espesor de polietileno en todas las secciones de la lámina. Debido a ello se decidió modificar tanto la composición del material como los moldes empleados para mejorar el procedimiento de auto-inyección. Una vez realizadas las pruebas necesarias hasta alcanzar una solución que proporcionase un acabado satisfactorio, se continuó con el proceso de fabricación de las láminas.

Debido a la longitud adoptada para las láminas fue necesario fabricarlas en dos fases correspondientes a cada una de sus dos mitades con respecto a su eje vertical. Puede observarse en la Figura 4.14 el aspecto de una de ellas tras el proceso de desmoldado. Aunque inicialmente los resultados tras el comienzo de la fase de enfriamiento de la lámina parecían adecuados, a medida que se iba completando el proceso fueron apareciendo problemas de incompatibilidad entre el polietileno y los flejes metálicos debido a desplazamientos relativos entre ambos. Este problema generó la rotura y separación de los materiales (Figura 4.15), siendo necesario replantearse el modelo de láminas ya que el empleo de flejes metálicos embebidos demostró no ser una solución viable.

4.3. Procedimiento constructivo



Figura 4.14: Desmoldado de una de las mitades de una lámina. **Imagen propia.**



Figura 4.15: Separación y rotura de las láminas por desplazamientos relativos. **Imagen propia.**

Después de analizar detalladamente diferentes alternativas se decidió seguir empleando el polietileno para la fabricación de las láminas, pero no como material resistente, sino como un elemento de contención situado detrás de los flejes metálicos, que actuaría como un encofrado perdido. De este modo la lámina de polietileno tendría la misión de transmitir los empujes producidos por el terreno hacia los flejes metálicos, siendo estos últimos los encargados de re-

4. Primera experiencia constructiva

sistir los esfuerzos. Una vez realizados todos los ajustes necesarios asociados al procedimiento de fabricación de este nuevo modelo de lámina, se comenzó con la fabricación de las mismas, consiguieron unos rendimientos muy altos, lo que permitió disponer del número necesario de las láminas en un tiempo reducido. El nuevo modelo de lámina junto con un acopio de láminas se muestran en la Figura 4.16. Se puede apreciar en la parte derecha de la misma una de las láminas sustentada en el aire sujetada por su parte central, deformándose debido a la acción de su propio peso.



Figura 4.16: Diseño final de las laminas (izda.) y acopio de láminas (dcha.).
Imagen propia.

4.3.1.3. Prefabricación de los muros de reacción

No todos los elementos se fabricaron en talleres industriales, la prefabricación de los muros de reacción necesarios para los anclajes de los pilotes se realizó a pie de obra, quedando preparados para su posterior posicionamiento. Los muros están constituidos por un macizo rectangular de hormigón armado de 2,50 m de alto por 4,00 m de ancho con un espesor de 0,50 m. En la parte central del macizo se dispuso una cabeza prismática con una sección de 0,40 x 1,20 m y de longitud igual a 1,00 m en la que iría embebida la pieza de unión con la orejeta de anclaje. En la Figura 4.17 se puede observar la armadura de uno de los muros de reacción situada en el encofrado empleado para el hormi-

4.3. Procedimiento constructivo

gonado (izda.) y la pieza de unión con la orejeta de anclaje que se situaría en la cabeza del muro de reacción (dcha.). El hormigonado se realizó en dos fases, en primer lugar, se hormigonó el macizo rectangular y, en segundo lugar, la cabeza prismática con la pieza de unión del anclaje. Se muestran en la Figura 4.18 varios muros de reacción alineados una vez finalizada su fabricación.



Figura 4.17: Armadura de uno de los muros de reacción (izda.) y pieza de unión con la orejeta de anclaje (dcha.). **Imagen propia.**



Figura 4.18: Muros de reacción terminados. **Imagen propia.**

4. Primera experiencia constructiva

4.3.1.4. Preparación de la armadura de la viga cantil

El montaje de la armadura de la viga cantil del muelle que actuaría también como viga de atado de los pilotes se realizó en los talleres de "Metalurgica Gallega" Herederos de Ignacio de la Iglesia S.A. (Arteixo). En la parte correspondiente al paramento frontal de la viga se terminó la armadura con sendos chaflanes con el objetivo de evitar desconchamientos en su parte superior debidos al propio uso del muelle y posibles enganches de embarcaciones en su parte inferior debidos a desplazamientos originados por la marea.



Figura 4.19: Montaje en taller de la armadura de la viga de coronación (izda.) y acopio a pie de obra con la losa inferior hormigonada (dcha.). **Imagen propia.**

La geometría curva de la parte superior de los pilotes y las láminas sobre la que se debía ejecutar la viga de coronación generaba una complejidad significativa en el encofrado. La losa inferior presenta una zona en voladizo sobre el mar que necesitaría un encofrado especial adaptado a la geometría del muelle. Para evitar este inconveniente se decidió proceder a un primer hormigonado a pie de obra de la losa inferior, consiguiendo de este modo eliminar la necesidad de emplear un encofrado inferior complejo para la ejecución in situ de la viga. En la Figura 4.19 se pueden apreciar los trabajos de montaje en taller de la armadura de la viga (izda.) y el acopio a pie de obra con la losa inferior de la viga hormigonada hasta la cota superior del chaflán correspondiente.

4.3.2. Ejecución del relleno provisional

Los trabajos en el emplazamiento comenzaron con la ejecución del relleno provisional paralelo al dique de abrigo existente en el puerto. Además de servir de plataforma de trabajo para la ejecución de los pilotes, el relleno tenía como objetivo desplazar los fangos existentes en el fondo marino, generando a su vez una precarga en la zona de la futura explanada. La aportación del material se fue realizando progresivamente de modo que se evitase que los fangos quedasen confinados entre el propio relleno y la escollera del dique de abrigo. En la Figura 4.20 se puede apreciar una imagen del proceso de aportación de material. Para la ejecución del relleno, se empleó material de una cantera cercana y, por motivos de seguridad medioambiental se dispuso una barrera de contención para evitar problemas de turbidez y controlar posibles derrames provenientes de la maquinaria que se usaría en la ejecución de las obras.

Entre las coronaciones del relleno provisional y el dique de abrigo se decidió dejar una balsa de agua con una doble finalidad (Figura 4.21). En primer lugar, serviría para garantizar que no quedasen fangos entre el relleno y el dique existente, y en segundo lugar, permitiría posteriormente depositar en la misma el material que actúa de precarga cuando se retirase para alcanzar la cota de servicio del muelle.



Figura 4.20: Ejecución del relleno provisional. **Imagen propia.**

4. Primera experiencia constructiva

Como se comentó anteriormente, se diseñó este relleno provisional con el fin de disponer de una plataforma de trabajo para poder trabajar en la ejecución de los pilotes del muelle en seco. Esta decisión tenía por objetivo inicial conseguir disminuir el coste económico de la obra, ya que se estimaba que el procedimiento alternativo consistente en el empleo de una plataforma flotante tendría un coste superior. No obstante, esta solución no tiene porque ser más económica, pudiendo ser incluso más perjudicial para el medio ambiente.



Figura 4.21: Relleno provisional terminado y balsa de agua. **Imagen propia.**

En la Figura 4.22 se muestra una vista aérea del Puerto de Vilanova correspondiente a una fase de la realización de las obras en la que se puede observar el relleno provisional terminado y la balsa de agua en su parte posterior. Tras pasar 6 meses desde el inicio de la precarga y analizados los asentamientos del relleno provisional, se dió por completada esta fase, coménzandose los trabajos correspondientes a la ejecución de los pilotes.

4.3.3. Ejecución de la línea de pilotes

La maquinaria de obra empleada para la ejecución de los pilotes consistió en una pilotadora y una grúa de apoyo que trabajaron sobre el relleno provi-

4.3. Procedimiento constructivo



Figura 4.22: Vista aérea del relleno provisional con la balsa de agua en la zona central [24]. PNOA cedido por copyright Instituto Geográfico Nacional - Xunta de Galicia.

sional que serviría de plataforma de trabajo (Figura 4.23). Esta maquinaria se caracteriza por su escasa complejidad y su facilidad de transporte, siendo relativamente sencillo conseguirla independientemente del lugar donde se vaya a ejecutar la obra. Los pilotes se ejecutaron con camisa recuperable empleando un diámetro de perforación de 1,80 m, hasta conseguir una longitud de embotramiento cercana a los 3,00 m. Una vez que se iniciaron los trabajos se consiguió ejecutar los pilotes a un ritmo de un pilote cada tres días.

Todos los pilotes se ejecutaron sin ninguna incidencia salientable a excepción del pilote P11, ya que durante la perforación apareció una antigua cadena de fondeo abandonada que provocó que no se pudiese continuar con la excavación. Para este caso particular fue necesario adoptar una solución alternativa para garantizar el buen comportamiento estructural del sistema que se comentará en detalle posteriormente. En la Figura 4.24 se puede observar el inicio de la perforación de uno de los pilotes sobre el relleno provisional y el cabezal empleado durante las operaciones.

4. Primera experiencia constructiva



Figura 4.23: Maquinaria para la ejecución de los pilotes. **Imagen propia.**

Tras la perforación se procedió a la colocación de las camisas perdidas de los pilotes que posteriormente serían hormigonadas. Cabe recordar en este punto que el diámetro de las camisas perdidas era de 1,15 m, existiendo por lo tanto una holgura total de 0,65 m con respecto al diámetro de perforación (0,325 m de holgura lateral). No obstante, esta holgura existente se reducía considerablemente en las zonas donde se ubicaban las guías de posicionamiento (Figura 4.9) que se habían incorporado a las camisas perdidas con el objetivo de facilitar su colocación. En estas zonas la holgura disponible era de 5,00 cm, suficiente para evitar que la morsa de la pilotadora chocase accidentalmente con el pilote al retirar la camisa recuperable.

Para la óptima ejecución del sistema, uno de los aspectos clave es conseguir que los pilotes se coloquen respetando una posición vertical lo más perfecta posible, ya que además de los posibles efectos a nivel estructural que podrían inducir en el sistema, la existencia de desviaciones significativas complicarían la fase posterior de colocación de las láminas. Para ello, se soldaron



Figura 4.24: Inicio de la perforación de uno de los pilotes. **Imagen propia.**

en las camisas perdidas unos elementos adicionales: una base en el pie (Figura 4.25 dcha.) para conseguir un correcto apoyo de la camisa en el fondo de la excavación (esta base no estaba galvanizada ya que quedaría embebida por el hormigón en el empotramiento del pilote), y una sección de camisa (Figura 4.25 izda.) en la cabeza (también sin galvanizar) para favorecer el aplomado del mismo. En el caso de la sección de la cabeza se soldó una cruceta metálica en la parte superior de la camisa que posteriormente se retiraría tras el hormigonado del pilote.

No obstante, la base de apoyo en el pie de las camisas tuvo que ser retirada finalmente pues se observó durante las operaciones que dificultaba su posicionamiento. Resultaba extremadamente complicado apoyar correctamente la base incorporada a la camisa sobre el fondo de excavación existente, ya que el cabezal empleado para su ejecución (Figura 4.24) generaba un fondo de excavación de sección cónica. En la Figura 4.26 se puede ver una de las operaciones de izado de las camisas para su posicionamiento en su correspondiente ubicación

4. Primera experiencia constructiva



Figura 4.25: Sección soldada en cabeza de camisa (izda.) y base en el pie de la camisa para facilitar el apoyo (dcha.). **Imagen propia.**

en la línea de pilotes. En la imagen se puede apreciar las diferentes zonas de las camisas: la zona intermedia galvanizada en la que se colocarán posteriormente las láminas, la zona inferior que quedará embebida en el empotramiento del pilote, y la sección de cabeza adicional para facilitar su posicionamiento.

Una vez colocadas las camisas perdidas en su ubicación correspondiente se continuó con las siguientes fases del proceso, que consistían en la colocación de las armaduras en las camisas y el posterior hormigonado de los pilotes. Para evitar movimientos de las camisas perdidas durante el hormigonado, y protegerlas durante la fase de retirada de las camisas recuperables, se decidió rellenar el espacio existente entre las camisas con grava.

A modo de ejemplo de ejecución de los pilotes una vez colocadas las camisas perdidas se presenta en la Figura 4.27 la armadura (izda.) y el hormigonado (dcha.) correspondiente a uno de los pilotes de cierre. Esta armadura está compuesta por dos partes simétricas debido a la geometría de la camisa perdida (Figura 4.12) que consta de dos zonas separadas por el alma de la viga de refuerzo que se dispuso en su interior. Los pilotes de cierre se ejecutaron en último lugar, dada su particularidad, tanto de armado como de camisa perdida.

4.3. Procedimiento constructivo

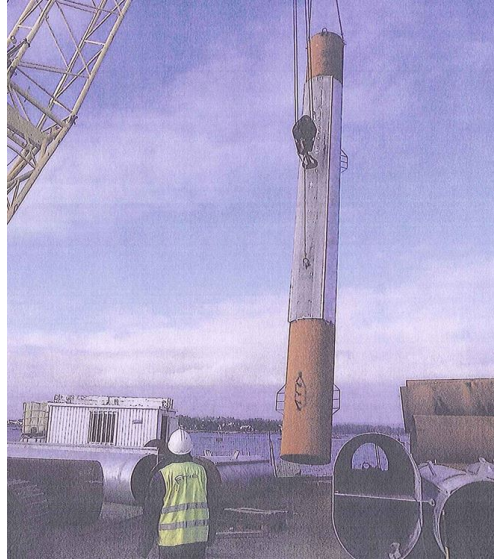


Figura 4.26: Izado de una de las camisas perdidas de los pilotes. **Imagen propia.**



Figura 4.27: Armadura (izda.) y operación de hormigonado de uno de los pilotes de cierre (dcha.). **Imagen propia.**

4. Primera experiencia constructiva

4.3.4. Ejecución de los anclajes

Una vez terminado el hormigonado de los pilotes continuaron las operaciones con la ejecución de los anclajes. Para ello era necesario retirar parcialmente el relleno provisional empleado como plataforma de trabajo y como precarga con el objetivo de poder colocar las orejetas en los pilotes, los muros de reacción y las correspondientes barras de anclaje. Se inició la retirada del relleno en la zona de los pilotes, realizándose una parada a una cota inferior a la correspondiente a las orejetas de anclaje con el propósito de generar una plataforma de trabajo. Desde ella, los operarios se encargaron de realizar las perforaciones necesarias en los pilotes para colocar las orejetas, tal y como se puede apreciar en la Figura 4.28. Posteriormente, se colocaron unas barras de anclaje en las perforaciones que se sellaron con resinas epoxi para materializar una unión segura y resistente.

La solución adoptada para la ejecución de los pilotes consistente en emplear un relleno provisional tiene como una de sus principales inconvenientes la complejidad que genera su retirada en las zonas cercanas a los pilotes. Esta operación debe realizarse con sumo cuidado, tratando de evitar daños en los pilotes y en los sistemas de conexión con las láminas. Estos fueron sometidos a una cuidadosa operación de limpieza para evitar que permaneciese en las guías de posicionamiento material residual del relleno.

Posteriormente, se continuó con la retirada del relleno provisional que fue depositado en la balsa de agua generada entre el relleno y el dique de abrigo (Figura 4.21). Se puede observar en la Figura 4.29 una vista de la línea de pilotes con sus correspondientes orejetas de anclaje en su parte posterior durante el proceso de retirada parcial del relleno.

Por otra parte, se procedió a colocar los muros de reacción correspondientes a cada uno de los pilotes en la posición de diseño proyectada (Figura 4.30). Al coincidir su posición con el dique de abrigo existente, fue necesario realizar en el mismo una excavación hasta alcanzar la cota deseada. Los muros se colocaron sobre una cama de hormigón de limpieza para facilitar su posicionamiento. Se pueden observar las dificultades que surgieron para mantenerlos en su posición debido al diseño geométrico de los mismos.

4.3. Procedimiento constructivo



Figura 4.28: Operarios realizando las perforaciones necesarias en un pilote para colocar la orejeta de anclaje (izda.) y detalle de una orejeta tras su colocación en el pilote (dcha.). **Imagen propia.**



Figura 4.29: Línea de pilotes con las orejetas colocadas y retirada parcial del relleno. **Imagen propia.**

4. Primera experiencia constructiva



Figura 4.30: Excavación del dique y posicionamiento de los muros de reacción. **Imagen propia.**



Figura 4.31: Unión del anclaje del pilote a la barra de anclaje (izda.) y muro de reacción unido al pilote (dcha.). **Imagen propia.**

Una vez colocados los tirantes de anclaje entre los pilotes y los muros de reacción (Figura 4.31) se procedió a proteger los tensores con relleno, y en algunos de ellos se colocaron sistemas de medición de deformaciones con el fin de realizar un seguimiento en la fases posteriores del procedimiento constructivo.

4.3. Procedimiento constructivo

Finalizada la fase de colocación de los anclajes se continuó con la retirada del relleno provisional en la zona de los pilotes hasta alcanzar la cota definida para el pie del muelle (-3,00 m), garantizando así el calado deseado. Estos trabajos se realizaron desde tierra hasta la cota que permitió la marea, para posteriormente continuar con su ejecución con una barcaza desde el mar. Como se mencionó anteriormente, la parte más complicada resultó ser la excavación entre pilotes, y la tarea de limpieza de las guías de posicionamiento para facilitar el deslizamiento de las láminas por los elementos de conexión. El resultado final puede verse en la Figura 4.32, donde se presentan dos vistas diferentes de la línea de pilotes tras la retirada del relleno, preparados para la colocación de las láminas .



Figura 4.32: Vista desde la parte frontal (izda.) y vista desde la parte posterior de la línea de pilotes (dcha.). **Imagen propia.**

Una vez retirado el relleno provisional en la zona de los pilotes se pudo abordar el cierre del sistema contra el muelle existente. Debido a las complicaciones que surgieron durante la perforación del pilote de cierre P11, fue necesario revisar el diseño para buscar una solución que garantizase el comportamiento estructural del sistema. Se diseñó una cimentación específica para el pilote y se reforzó la zona mediante una unión de hormigón armado con el

4. Primera experiencia constructiva

muelle existente. En la Figura 4.33 se muestra la armadura de cosido (izda.) y la unión hormigonada entre el pilote de cierre y el muelle existente (dcha.).



Figura 4.33: Armadura de cosido (izda.) y unión hormigonada entre el pilote de cierre y el muelle existente (dcha.). *Imagen propia.*

4.3.5. Colocación de las láminas

Una vez retirado el relleno provisional hasta alcanzar la cota definida para el pie del muelle se pudo proceder a la colocación de las láminas entre los pilotes que previamente se habían acopiado en obra. Como se comentó previamente, las láminas de 1,00 m de altura y 6,20 m de longitud, constan de cinco flejes metálicos de 9,00 cm de ancho y 8,00 mm de espesor, separados 10,00 cm, que están unidos a las secciones de tablestacas que sirven de elementos de conexión con los pilotes. En la parte posterior de la lámina se sitúa la plancha de poliestireno de 4,00 cm de espesor cuya finalidad es recibir el empuje del terreno y transmitirlo a los flejes que se encargan de la función estructural. En la Figura 4.34 se pueden apreciar las operaciones de preparación para el izado y colocación de las láminas acopiadas en obra. Además, se colocaron galgas en los flejes metálicos para medir deformaciones y poder monitorizar su comportamiento.

4.3. Procedimiento constructivo

Para la colocación de las láminas se empleó un camión grúa y una embarcación de apoyo que disponía también de una grúa propia. Se puede observar en la Figura 4.35 el izado de de una de las láminas por el camión grúa (izda.) y la embarcación de apoyo (dcha.).



Figura 4.34: Acopio de láminas (izda.) y preparación de las mismas para su izado (dcha.). **Imagen propia.**



Figura 4.35: Camión grúa (izda.) y embarcación de apoyo empleada en la colocación de las láminas (dcha.). **Imagen propia.**

Las láminas se fueron colocando sistemáticamente en los diferentes vanos, dejando para último lugar el vano V9 (vano adosado al muelle existente). Al modificarse el diseño del pilote de cierre, debido a los problemas surgidos

4. Primera experiencia constructiva

durante su perforación, se generó finalmente un vano con mayor distancia intereje (6,31 m) en comparación con los restantes (6,20 m). Como consecuencia de ello hubo que fabricar láminas a medida para ese vano de diferente longitud, lo que provocó retrasos en el suministro que obligaron a ejecutar en una fase posterior ese vano. En las Figuras 4.36 y 4.37 se presentan respectivamente una vista frontal y una vista posterior de los dos primeros vanos terminados, anexos al vano cuyas láminas estaban pendientes de recibir.



Figura 4.36: Vista frontal de los primeros vanos completos. **Imagen propia.**



Figura 4.37: Vista posterior de los primeros vanos completos. **Imagen propia.**

4.3. Procedimiento constructivo

Se fueron colocando verticalmente unas sobre otras las láminas necesarias en cada vano hasta alcanzar la cota superior de los pilotes, empleándose 7 láminas salvo en los vanos V8 y V9 donde se colocaron únicamente 6 láminas. La lámina inferior de cada uno de los vanos fue recubierta por una capa de árido 40/70 para garantizar, junto con el geotextil colocado posteriormente en el trasdós de todas las láminas, la contención del relleno de la explanada, evitar posibles problemas de sifonamiento y permitir el paso de agua a través del paramento de las láminas. La evolución de los trabajos de colocación de las láminas se puede apreciar en la Figura 4.38, en una fase en la que ya estaba casi concluida la colocación de las láminas en los vanos centrales del muelle (se pueden observar con detalle en la imagen de la izda. los anclajes y las esperas en los pilotes para la ejecución de la viga cantil).



Figura 4.38: Vista frontal (izda.) y vista posterior (dcha.) de la colocación de las láminas en una fase avanzada de su ejecución. **Imagen propia.**

4.3.6. Ejecución del relleno definitivo

Una vez concluido el posicionamiento de las láminas en los vanos del muelle se continuó con la colocación del geotextil en su trasdós para poder comenzar inmediatamente a ejecutar el relleno definitivo que conformaría la futura explanada. Los trabajos se iniciaron con el objetivo de evitar más demoras en la obra, a pesar de que todavía no se habían recibido las láminas necesarias para completar el primer vano, quedando esta parte del muelle pendiente para

4. Primera experiencia constructiva

una fase posterior de ejecución del relleno. En la Figura 4.39 se puede observar el geotextil colocado en el trasdós de las láminas centrales del muelle, mientras que en la Figura 4.40 se muestra el geotextil correspondiente al último vano con la zona de cierre del muelle en ese extremo. En esta última imagen se puede apreciar el pilote de cierre P2 del muelle unido al pilote adicional P1. Esta solución se tomó debido a que se pretendía terminar el muelle en ese extremo mediante la colocación de una escollera de cierre que entroncase con el dique de abrigo. La ejecución del pilote P1 modifica la alineación del muelle evitando que el pie de la escollera de cierre afecte al pie de la línea de atraque.



Figura 4.39: Vista posterior del muelle con el geotextil colocado en el trasdós de las láminas. **Imagen propia.**

En la Figura 4.41 se puede apreciar una de las fases iniciales del relleno desde la zona del vano V9, estando todavía este vano sin completar con la colocación de las láminas. Los trabajos se llevaron a cabo sin incidencias hasta que se alcanzó la cota de terminación del relleno (Figura 4.42).

Por lo que respecta a la escollera de cierre mencionada anteriormente, se puede observar en la Figura 4.43 una imagen de dicha escollera parcialmente ejecutada.

4.3. Procedimiento constructivo



Figura 4.40: Vista posterior de la zona de cierre del último vano. **Imagen propia.**



Figura 4.41: Fases iniciales del relleno definitivo. **Imagen propia.**

4. Primera experiencia constructiva



Figura 4.42: Relleno definitivo terminado pendiente de ejecutar su coronación. **Imagen propia.**



Figura 4.43: Escollera de cierre ejecutada parcialmente. **Imagen propia.**

4.3.7. Ejecución de la viga cantil

Tal y como se comentó anteriormente, se preparó la armadura de la viga cantil en taller, dividiéndola en varios tramos para que su transporte a obra se pudiese realizar de forma sencilla. En la parte inferior de estos tramos se hormigonó previamente una base para que sirviera de encofrado perdido (Figura 4.19), evitando la necesidad de emplear en obra un encofrado inferior en voladizo con una geometría complicada para adaptarse a la curvatura de las láminas. En la base se dejaron libres los tramos donde se uniría con la armadura de espera de los pilotes, ya que la viga cantil tiene como función servir como viga de atado de los pilotes. Además, se dejaron también pases de tubería teniendo en cuenta la posible colocación de cadenas para el sostenimiento de defensas de neumáticos. Se puede apreciar en la Figura 4.44 sendos tramos de la armadura de la viga cantil y el espacio libre correspondiente a uno de los pilotes del muelle. Para la colocación de los tramos de la viga de atado se contó con la ayuda de una pequeña grúa de apoyo.



Figura 4.44: Colocación de la armadura de la viga cantil. *Imagen propia.*

La ejecución de la viga cantil se dividió en 8 tramos de 5,20 m aproximadamente, 1 tramo de 4,90 m, y por último, el tramo de cierre entre los pilotes P1 y P2. Una vez posicionada la armadura de la viga cantil se colocó el encofrado y se procedió a su hormigonado. En la Figura 4.45 se puede observar el encofrado frontal de los dos primeros tramos del muelle, siendo apreciable también

4. Primera experiencia constructiva

la forma achafanada de las bases hormigonadas previamente en su parte frontal comentada anteriormente, cuya finalidad era evitar posibles problemas de enganches de las embarcaciones.

En el extremo final de la viga cantil se modifica su alineación en planta para que coincida con la definida por el pilote de cierre y el pilote adicional situado en su parte posterior, quedando ambos pilotes atados también por su parte superior. Se puede observar esta zona en las imágenes incluidas en la Figura 4.46 tanto en una fase previa de preparación de la armadura (izda.) como una vez terminada la ejecución de la viga cantil (dcha.). En esta última imagen se puede apreciar la geometría en planta definitiva de la viga cantil en la zona de cierre y como la alineación resultante coincide también con la escollera de cierre mencionada anteriormente. Finalmente, se muestra en la Figura 4.47 una vista frontal de la viga cantil una vez terminada su ejecución.



Figura 4.45: Encofrado frontal de la viga cantil en los dos primeros vanos.
[Imagen propia.](#)

4.3.8. Muelle terminado

Tras finalizar la ejecución de la viga cantil quedaba terminada la parte fundamental de la obra correspondiente al sistema Pilote-Lámina. A continuación, en una segunda fase, se llevaron a cabo los últimos trabajos de terminación del

4.3. Procedimiento constructivo



Figura 4.46: Zona de cierre de la viga cantil antes de su hormigonado (izda.) y una vez finalizada su ejecución (dcha.). **Imagen propia.**



Figura 4.47: Vista frontal de la viga cantil una vez finalizada su ejecución. **Imagen propia.**

muelle para que las embarcaciones pudiesen comenzar a utilizarlo. Para ello, se ejecutó un pavimento portuario de tipo asfáltico y se instalaron las defensas, los puntos de amarre (norays) y unas escaleras de acceso.

4. Primera experiencia constructiva

En las Figuras 4.48 y 4.49 se muestran dos vistas frontales del nuevo muelle una vez finalizado. En la primera imagen (Figura 4.48) se puede observar una perspectiva general del muelle con todos sus elementos de uso ya instalados, así como varios vehículos aparcados en su explanada posterior tras la apertura del pavimento portuario a la circulación. En la segunda imagen (Figura 4.49) se muestra el extremo final del muelle con la escollera ejecutada en esa zona como elemento de cierre del relleno portuario. En ella se puede apreciar el tramo final de la viga cantil apoyada sobre los pilotes P1 y P2 que fueron solidarizados mediante hormigón armado.



Figura 4.48: Vista frontal general del muelle una vez terminado. **Imagen propia.**

Por último, se muestra en la Figura 4.50 una vista aérea del puerto de Vilanova de Arousa, donde se puede apreciar la alineación en planta definitiva de la línea de atraque generada por el nuevo muelle, así como la superficie útil adicional proporcionada por su explanada posterior. También se observa en la imagen el entronque de la escollera de cierre del muelle con el dique de abrigo del puerto.

4.3. Procedimiento constructivo



Figura 4.49: Vista frontal de la escollera de cierre del muelle una vez terminado. **Imagen propia.**



Figura 4.50: Vista aérea del Puerto de Vilanova con el muelle terminado [24]. **PNOA cedido por copyright Instituto Geográfico Nacional - Xunta de Galicia.**

4. Primera experiencia constructiva

4.3.9. Sistemas de auscultación

Teniendo en cuenta que el sistema Pilote-Lámina es completamente novedoso como sistema de contención de rellenos portuarios se instalaron en el prototipo a escala real sistemas de auscultación que permitiesen analizar su comportamiento. Esta tarea la llevaron a cabo los miembros del equipo de investigación *gCONS* de la Universidad de A Coruña que participó en el proyecto PILOTE-LÁMINA, siendo los encargados también de realizar los ensayos de laboratorio necesarios para comprobar la idoneidad de los materiales empleados y del sistema de conexión entre pilotes y láminas. Se colocaron galgas para medir deformaciones tanto en los anclajes como las láminas, obteniendo resultados satisfactorios que indicaban el correcto comportamiento del sistema.

4.4. Análisis económico

En este apartado se analiza la primera experiencia con el sistema Pilote-Lámina desde el punto de vista de su coste económico. En primer lugar, para tener una referencia con la que comparar, se presentan valores de referencia de costes de ejecución de tipologías de muelle clásicas. Posteriormente, se analizan el coste de ejecución del sistema Pilote-Lámina y el coste previsto en el proyecto inicial contemplado para el muelle de Vilanova de Arousa.

4.4.1. Coste económico de tipologías clásicas

Para poder comparar el coste económico del sistema Pilote-Lámina con otras tipologías de muelle se ha analizado en primer lugar la información proporcionada por el *Observatorio de Obras Marítimas* publicado por Puertos del Estado [38]. En esta publicación se analizan los costes de un total de 136 proyectos realizados por las Autoridades Portuarias durante el período (2006-2013). A partir de los datos recavados en ella, y mediante un análisis estadístico, se genera una base de datos de precios unitarios medios. A partir de ellos, se determina el coste por metro lineal de algunas secciones tipo correspondientes a diferentes obras marítimas, entre ellas, varias secciones de muelle.

En la Tabla 4.2 se muestran los valores obtenidos para las secciones de muelle analizadas en el documento anterior. Cada una de ellas se corresponde con una determinada sección tipo cuyas características en cuanto a materiales empleados y dimensiones de sus diferentes elementos están establecidas en el propio documento. De todas ellas, las más interesantes de cara a comparar con el sistema Pilote-Lámina son las correspondientes a un muelle de pilotes (Figura 4.51) y un muelle de tablestacas (Figura 4.52).

Tabla 4.2: Coste económico por metro lineal de diversas secciones tipo de muelle [38].

Tipo de sección	Altura total (m)	Coste estimado (€/m)
Cajones	25,50	30.890,59
Cajones	18,00	22.637,66
Pilotes	22,50	41.194,08
Tablestacas	21,50	46.723,59

A partir de la información recogida en la Tabla 4.2 se deduce que para alturas totales importantes, superiores a 18 metros, el sistema más económico es el muelle de cajones, pasando luego al muelle de pilotes y por último al muelle de tablestacas, comparando siempre la línea de muelle exclusivamente, sin contar los costes adicionales derivados de los posibles dragados para ejecutar una tipología de muelle o la necesidad de una banqueta especial. Todos estos condicionantes harían incrementar el coste económico de las soluciones tradicionales y el abanico de posibilidades se incrementaría sustancialmente.

Estos valores de coste económico en función de los metros de atraque no tienen en cuenta la altura del muelle por lo que es muy complicado realizar comparativas entre instalaciones de diferentes calados. Una posible forma de tener un valor de referencia es introducir también el valor de altura total en el coste, determinando de ese modo un valor de coste por superficie en lugar de un coste por metro lineal. Ponderando los costes económicos por metro lineal de la Tabla 4.2 por las alturas totales de las secciones se obtienen los siguientes

4. Primera experiencia constructiva

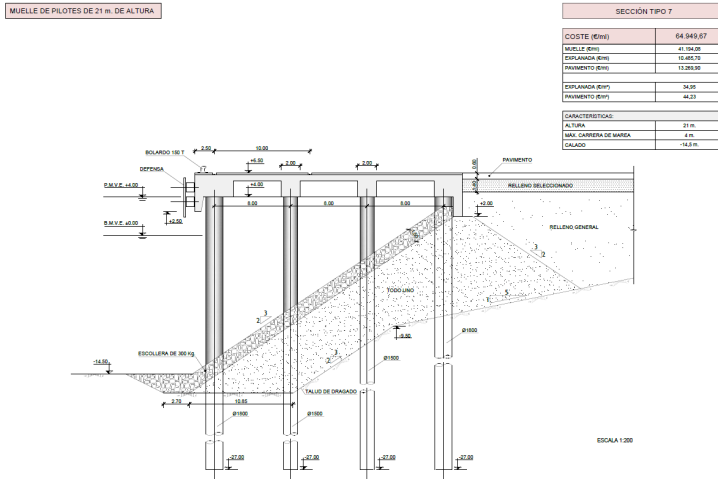


Figura 4.51: Sección tipo de muelle de pilotes. Adaptado con permiso de ref. [38]. Copyright, 2013, Puertos del Estado.

valores para cada tipología: muelles de cajones ($\approx 1250 \text{ €/m}^2$), muelles de pilotes ($\approx 1800 \text{ €/m}^2$) y muelles de tablestacas ($\approx 2160 \text{ €/m}^2$). Por supuesto, estos valores son meras estimaciones iniciales del coste económico, siendo necesario incorporar otros factores de análisis de cara a realizar valoraciones más precisas.

4.4.2. Coste económico muelle de Vilanova de Arousa

La solución proyectada inicialmente para el muelle de Vilanova de Arousa consistía en un muelle de pilotes con su correspondiente plataforma y un relleno posterior protegido por una escollera. En su momento se consideró que ésta era la solución más apropiada dada la gran cantidad de fangos que había en el lecho marino y el coste económico derivado de su retirada y de su depósito en una zona de vertido autorizada, lo cual sería muy superior a la ejecución de la solución proyectada, (en otros proyectos similares la zona de vertido estaba

4.4. Análisis económico

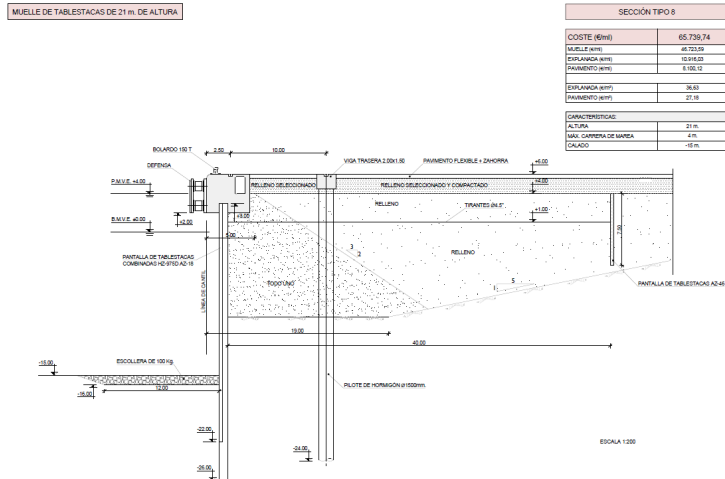


Figura 4.52: Sección tipo de muelle de tablestacas. Adaptado con permiso de ref. [38]. Copyright, 2013, Puertos del Estado.

a unas 20 millas náuticas de Vilagarcía de Arousa). Asimismo habría que modificar la capacidad resistente del lecho marino mediante la ejecución de una banqueta para el posicionamiento de los bloques y/o cajones, según se diseñe.

El presupuesto de ejecución material contemplado para el proyecto inicial ascendía a los 3.345.538,40 € desglosado según los capítulos que se recogen en la Tabla 4.3. La longitud de atraque generada sería del orden de los 167 m, ya que la actuación afectaba a casi la totalidad del dique de abrigo existente, como se puede comprobar en la Figura 4.5. Considerando esta longitud de la línea de atraque y descontando aquellos capítulos del presupuesto que no están relacionados directamente con la ejecución del muelle (capítulos 6 y 7), se puede realizar una estimación del coste económico por metro lineal de la actuación inicial. Este valor asciende a los 18.826 €/m, que se traduciría en aproximadamente 2300 €/m² de coste económico por superficie, si se pondera por la altura total del muelle de acuerdo con su sección tipo (Figura 4.6).

4. Primera experiencia constructiva

Tabla 4.3: Resumen del presupuesto de ejecución material del *Proyecto de muelle adosado al dique de Vilanova de Arousa* [51].

Capítulo 1. Dragados y desmontes	125.504,96 €
Capítulo 2. Rellenos y escolleras	91.734,10 €
Capítulo 3. Cimentaciones e infraestructura	1.664.301,10 €
Capítulo 4. Estructura prefabricada, losas y pavimento	1.016.796,35 €
Capítulo 5. Paneles prefabricados	211.308,15 €
Capítulo 6. Pluviales, abastecimiento y electricidad	43.941,40 €
Capítulo 7. Obras complementarias, protectoras y varios	157.645,34 €
Capítulo 8. Seguridad y salud	34.300,00 €
TOTAL	3.345.538,40 €

De acuerdo con los resultados del proyecto PILOTE-LÁMINA se estima que la actuación realizada tuvo un coste económico por metro lineal de 6.196,81 €/m, lo que representa una reducción considerable con respecto a la solución inicial planteada. Por supuesto, estas estimaciones son meramente orientativas ya que están afectadas por múltiples factores que condicionan las valoraciones a realizar. En todo caso, esta primera experiencia pone de manifiesto que el sistema Pilote-Lámina es competitivo desde el punto de vista económico con respecto a otras posibles soluciones.

4.5. Conclusiones

En este último apartado se presentan las principales conclusiones obtenidas como resultado de esta primera experiencia de aplicación práctica del sistema Pilote-Lámina, resaltando tanto los aspectos positivos como aquellas cuestiones mejorables que podrían haberse diseñado o ejecutado de modo diferente para obtener mejores resultados.

Como primera cuestión que cabe resaltar es que se ha demostrado la viabilidad del sistema Pilote-Lámina mediante la ejecución de un prototipo a escala real de muelle. Desde su puesta en servicio, el muelle ha estado operativo sin

incidencias de ningún tipo, estando a disposición de los buques de la zona para llevar a cabo sus operaciones.

Por lo que respecta al diseño de los diferentes elementos del sistema y el procedimiento constructivo empleado en esta primera experiencia, se han detectado una serie de cuestiones que se comentan a continuación que conviene tener presente de cara a futuras aplicaciones del sistema.

■ Procedimiento de ejecución de los pilotes

La ejecución de los pilotes de un muelle se puede realizar desde una plataforma terrestre o empleando medios flotantes o semiflotantes, tal y como se mencionaba cuando se presentaron las tipologías clásicas de muelles (Cap 2). La solución adoptada en Vilanova para la ejecución de los pilotes, consistente en emplear un relleno provisional que actuase de plataforma de trabajo y de precarga para movilizar los fangos existentes, tiene la ventaja de facilitar las operaciones de la maquinaria pero también presenta varios inconvenientes. Si esta operación se hubiese realizado desde pontona se evitaría la necesidad de realizar un relleno provisional que posteriormente era necesario retirar, reduciendo el coste económico de la actuación y evitando los posibles impactos medioambientales asociados. Hubo que realizar una retirada parcial para poder colocar los anclajes, y posteriormente retirar todo el relleno en los vanos para proceder al posicionamiento de las láminas. Además, uno de sus principales inconvenientes, en el caso particular del sistema Pilote-Lámina, es la complejidad que genera la retirada del relleno en las zonas cercanas a los pilotes, pues debe realizarse cuidadosamente para evitar cualquier posible daño en las guías laterales de los pilotes, ya que de producirse no sería posible posicionar las láminas en los vanos.

■ Material empleado para la fabricación de las láminas

Durante el proyecto se analizaron varias posibilidades en relación con los materiales a emplear para la fabricación de las láminas. Finalmente, se decidió emplear láminas compuestas por flejes metálicos soldados en los extremos a secciones de tablestaca y una lámina de polietileno en su

4. Primera experiencia constructiva

parte posterior a modo de encofrado perdido. A pesar de que este diseño ha funcionado satisfactoriamente en esta primera experiencia, de cara a otras aplicaciones del sistema sería conveniente plantearse la opción de fabricar las láminas directamente en acero. De este modo se podrían alcanzar longitudes de lámina mayores y, en consecuencia, distancias entre pilotes superiores a las empleadas en Vilanova de Arousa.

■ **Anclajes de los pilotes**

Los anclajes de los pilotes del sistema se materializaron mediante la instalación de unas orejetas de anclaje en la parte posterior de los mismos, que permitían la conexión de las barras de anclaje entre estos y los muros de reacción. Como se comentaba anteriormente, para poder colocar ambos elementos fue necesario retirar el relleno provisional hasta la cota correspondiente. En caso de emplearse medios flotantes, se colocarían previamente las láminas entre los pilotes y se iniciaría el relleno de trasdós hasta alcanzar la cota de los anclajes. Posteriormente, tras su ejecución se continuaría con el relleno hasta la cota de coronación de la explanada.

En relación con las orejetas de anclaje en los pilotes, se podría plantear otro tipo de sistema consistente en la realización del anclaje desde el lado mar. Para ello, se dejaría un tubo pasante en la camisa perdida del pilote, y se introduciría posteriormente la barra de anclaje a través del mismo, tensando la barra y materializando la unión desde la parte delantera del pilote. De este modo, la cabeza del anclaje estaría accesible y se evitarían perforaciones en el pilote tras el hormigonado que pudiesen dañar el armado del mismo.

Por lo que respecta a los muros de reacción, se encontraron dificultades durante su colocación, ya que su geometría complicaba el apoyo del macizo en el terreno al inducir el vuelco hacia delante del elemento. Sería conveniente modificar el diseño, incorporando un sistema de apoyo en su parte inferior, para que se pudiesen posicionar adecuadamente.

5. ENSAYOS HIDRODINÁMICOS

En este capítulo se presentan los ensayos de laboratorio realizados para analizar el comportamiento hidrodinámico del sistema Pilote-Lámina. Se presentan en primer lugar los fundamentos de la modelización física aplicables a este tipo de ensayos, para posteriormente describir con detalle la metodología empleada, los resultados obtenidos y las principales conclusiones que se pueden extraer de los mismos.

5.1. Fundamentos

La modelización física se fundamenta en el principio de semejanza, de forma que los modelos físicos construidos a escala para su ensayo en laboratorio deben presentar, ante una determinada sollicitación o acción, una respuesta semejante a la correspondiente al modelo real o prototipo que se pretende estudiar [21, 22, 58]. Si esto se cumple, conociendo la respuesta de un determinado modelo físico a escala se puede inferir la respuesta correspondiente a su modelo real o prototipo mediante unos factores de escala previamente establecidos. Existen diferentes tipos de semejanza que deben ser considerados para la definición tanto de los modelos físicos como de las condiciones de ensayo: semejanza geométrica, semejanza cinemática y semejanza dinámica.

La semejanza geométrica hace referencia a las dimensiones espaciales de los modelos, estableciendo que la relación existente entre longitudes homólogas del modelo físico a escala y el modelo real debe permanecer constante. Esta relación se denomina factor de escala geométrico (N_L), y se puede expresar mediante la ecuación 5.1, siendo L_P cualquier dimensión del modelo real y L_M su dimensión homóloga en el modelo físico a escala.

$$N_L = \frac{L_P}{L_M} \quad (5.1)$$

Por otra parte, la semejanza cinemática establece la necesidad de que exista similitud de comportamiento cinemático, es decir, que exista un comporta-

5. Ensayos hidrodinámicos

miento semejante entre los movimientos del modelo físico a escala y el modelo real. Para garantizar su cumplimiento es necesario que se cumplan dos condiciones: que exista previamente semejanza geométrica, y que la relación entre tiempos homólogos del modelo físico a escala y el modelo real sea constante. Esta última relación se conoce como el factor de escala de tiempos (N_T), determinado del siguiente modo (5.2), donde T_P es un tiempo correspondiente al modelo real y T_M su homólogo en el modelo físico a escala.

$$N_T = \frac{T_P}{T_M} \quad (5.2)$$

Se puede comprobar de forma sencilla (5.3), que si las condiciones anteriores se cumplen ($N_L=\text{cte}$ y $N_T=\text{cte}$), el factor de escala de velocidades (N_V) definido como la relación entre V_P (velocidad correspondiente al modelo real) y V_M (velocidad homóloga en el modelo físico a escala), sería también un valor constante.

$$N_V = \frac{V_P}{V_M} = \frac{L_P/T_P}{L_M/T_M} = \frac{N_L}{N_T} \quad (5.3)$$

Finalmente, la semejanza dinámica hace referencia a la relación entre las fuerzas vectoriales actuantes en puntos homólogos de ambos modelos, exigiendo que esta relación permanezca constante. La semejanza dinámica puede entenderse desde un punto de vista global, de forma que se cumpla para el sumatorio de todas las fuerzas actuantes, o desde un punto de vista específico considerando la semejanza para cada uno de los tipos de fuerza. Si esta última condición se cumple se entiende que entre el modelo físico a escala y el modelo real existe semejanza dinámica perfecta. No obstante, salvo que ambos modelos tengan las mismas dimensiones, no se conoce ningún fluido que permita satisfacer una semejanza dinámica perfecta [22]. Como consecuencia de ello, es preciso establecer en el ámbito de la modelización hidráulica algún tipo de criterio que implique una semejanza dinámica parcial considerando únicamente aquellas fuerzas predominantes que gobiernen el fenómeno físico objeto de estudio.

El criterio de semejanza dinámico más empleado en el diseño de ensayos de laboratorio en el ámbito marítimo y portuario es el criterio de Froude [22]. El número de Froude (5.4), representa la relación entre las fuerzas predominantes en ensayos de modelos físicos en presencia de oleaje: las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (5.4)$$

De acuerdo con el criterio de semejanza de Froude (5.5), este parámetro debe ser el mismo para el modelo real (Fr_P) y el modelo físico a escala (Fr_M).

$$Fr_P = Fr_M \rightarrow \frac{V_P}{\sqrt{gL_P}} = \frac{V_M}{\sqrt{gL_M}} \quad (5.5)$$

A partir de la expresión anterior, se puede establecer la relación que debe de existir entre los diferentes factores de escala para que se cumpla la semejanza de Froude durante los ensayos de laboratorio. Se deduce que, una vez establecido un factor de escala geométrico (N_L) para la construcción del modelo, tanto el factor de escala de tiempos (N_T) como el factor de escala de velocidades (N_V) deben ser ambos iguales a la raíz cuadrada de N_L , es decir:

$$N_T = N_V = \sqrt{N_L} \quad (5.6)$$

Estas consideraciones servirán de base para la definición de la geometría del modelo físico a escala así como de las condiciones de oleaje a considerar en los ensayos realizados.

5.2. Metodología

5.2.1. Canal de ensayos

Los ensayos se realizaron en el canal de generación de ola-corriente de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería (Figura 5.1) perteneciente a la Universidad de Santiago de Compostela (USC). Como indica su denominación,

5. Ensayos hidrodinámicos

el canal permite realizar ensayos con modelos físicos a escala sometidos a la acción del oleaje, a la acción de corrientes, o a una combinación de ambas.



Figura 5.1: Canal de ola-corriente de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería. **Imagen propia.**

El canal está constituido por una estructura metálica que tiene las siguientes dimensiones: 20 metros de longitud, 1 metro de altura y una sección transversal de 0,65 m de ancho útil. Se encuentra apoyado sobre una estructura porticada de 1 m de altura que dispone de una pasarela lateral de 0,4 m de anchura, que permite el acceso a cualquier punto del mismo.

El sistema de generación de oleaje del canal consiste en una pala de tipo pistón (Figura 5.2) que tiene una longitud de carrera de 60 cm. El sistema permite generar tanto oleaje regular como irregular, y también reproducir series temporales obtenidas a partir de mediciones de campo. Dispone de un sistema de absorción activa de oleaje reflejado (AWACS) cuya finalidad es la eliminación del oleaje que vuelve a la pala en dirección contraria a la generación debido a la reflexión provocada por los modelos físicos.

Para evitar la aparición de ondas transversales se colocaron unos paneles longitudinales ranurados de una longitud total de 5,50 m (Figura 5.3). Las ondas transversales son oscilaciones de la superficie libre perpendiculares al sentido de propagación del oleaje que se generan como consecuencia de la existencia de paredes verticales impermeables. Surgen cuando se dan unas con-



Figura 5.2: Pala de generación de oleaje. **Imagen propia.**

diciones particulares que dependen fundamentalmente de la anchura del canal, de la profundidad de ensayo y del período del oleaje ensayado.



Figura 5.3: Vista lateral (izda.) y superior (dcha.) de los paneles longitudinales para la disipación de ondas transversales. **Imagen propia.**

5. Ensayos hidrodinámicos

Tabla 5.1: Predimensionamiento para el muelle de Vilanova de Arousa.

Parámetro	Valor
Cota coronación (z_c)	+5,30 m
Cota pie (z_p)	-3,00 m
Altura total (h_T)	8,30 m
Diámetro pilotes (D)	1,25 m
Intereje pilotes (B)	8,00 m
Luz de las láminas (l)	7,12 m
Flecha de las láminas (f)	1,07 m
Desarrollo de las láminas (d)	7,53 m

5.2.2. Definición de la escala de trabajo

La selección del factor de escala geométrico (N_L) a emplear para la construcción del modelo físico y la definición de los ensayos se realizó a partir de un análisis en el que se consideraron varias cuestiones, siendo las más relevantes las siguientes: la reproducción adecuada de la geometría del sistema, las profundidades de trabajo, y las condiciones de oleaje a ensayar.

Se ha comenzado analizando como factor determinante la reproducción adecuada de la geometría del sistema, con la intención de poder simular en el laboratorio un número determinado de vanos de suficiente anchura. Para ello, se tomó como referencia el predimensionamiento (Figura 5.4) realizado en el Proyecto Pilote-Lámina para el muelle de Vilanova de Arousa, cuyos principales parámetros geométricos se recogen en la Tabla 5.1.

Teniendo en cuenta que el ancho efectivo del canal es de 0,65 m y que la distancia entre ejes de pilotes es 8 m, se han obtenido los factores de escala geométricos correspondientes a la simulación de 2, 3 y 4 vanos completos, obteniéndose los siguientes valores para los parámetros geométricos principales del modelo (Tabla 5.2).

A continuación se analizaron las profundidades de trabajo en el canal para diversas condiciones de marea en la zona de estudio. A partir de los regis-

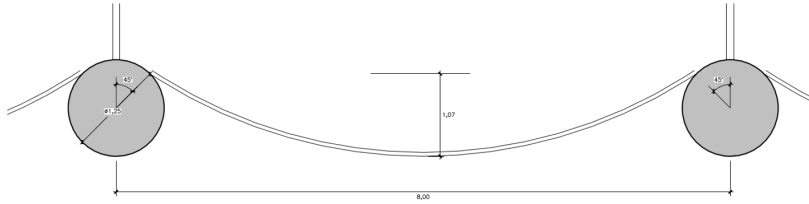


Figura 5.4: Disposición geométrica de láminas y pilotes prevista inicialmente.
Elaboración propia.

Tabla 5.2: Dimensiones del modelo en función de la escala seleccionada

Nº vanos	N_L	Dimensiones básicas [cm]		
		Diámetro pilotes	Intereje pilotes	Altura total
2	25	5,0	32,0	33,2
3	37	3,4	21,6	22,4
4	50	2,5	16,0	16,6

tros históricos de la Red de Datos de Puertos del Estado para el punto más próximo, que en este caso es el mareógrafo 1 del Puerto de Vilagarcía, se definieron inicialmente tres casos de estudio que se recogen en la Tabla 5.3. Las profundidades de trabajo correspondientes a cada uno de los niveles de mar considerados se muestran en la Tabla 5.4. Como se puede apreciar, a medida que se aumenta el factor de escala geométrico se reducen las dimensiones y las profundidades en el canal. Por diversos motivos, no conviene trabajar con valores de profundidad reducidos por lo que se selecciona inicialmente como factor de escala geométrico $N_L = 25$.

Para la escala de trabajo seleccionada, se estudiaron diversas cuestiones relacionadas con las condiciones de oleaje a ensayar: capacidad del sistema de generación del oleaje, rotura del oleaje, reflexión, ondas transversales, etc. Para ello se definieron unas condiciones de oleaje iniciales con el objetivo de analizar las posibles combinaciones de altura de ola (H) y período de onda

5. Ensayos hidrodinámicos

Tabla 5.3: Niveles de mar considerados en Vilanova de Arousa

Nivel de mar	Profundidad (m)
Medio	5,19
Pleamar	6,94
Bajamar	3,94

Tabla 5.4: Profundidades de trabajo en el canal

Nº vanos	N_L	Profundidades [cm]		
		Nivel medio	Pleamar	Bajamar
2	25	20,8	27,8	13,8
3	37	14,0	18,8	9,4
4	50	10,4	13,9	6,9

(T) que sería razonable emplear en los ensayos. Se analizaron, alturas de ola (H) desde los 2,0 a los 16,0 cm, con intervalos de 2,0 cm (valores de modelo); y período de onda (T) desde los 1,0 a los 3,0 s (valores de modelo), con intervalos de 0,2 s. Para sus posibles combinaciones, se realizaron análisis teóricos y ensayos preliminares, para los tres casos de profundidad (nivel medio, pleamar y bajamar). A partir de los resultados obtenidos se decidió realizar los ensayos exclusivamente en condiciones de nivel medio y pleamar, ya que la profundidad correspondiente a la bajamar era demasiado reducida, generando problemas en la generación del oleaje y la medición de la superficie libre.

5.2.3. Modelo físico

El modelo físico empleado durante los ensayos consta de un cajón rectangular de sección suficiente como para poder colocar adecuadamente los diferentes elementos de la instrumentación. En el paramento frontal del cajón se simula la geometría de dos vanos del muelle, repartidos del siguiente modo:

Tabla 5.5: Parámetros geométricos del modelo físico.

Parámetro	Valor
Diámetro pilotes (D)	5,00 cm
Intereje pilotes (B)	32,00 cm
Altura de lámina (H)	33,20 cm
Cota pie (z_p)	-12,00 cm
Cota coronación (z_p)	+21,20 cm
Luz de las láminas (l)	21,20 cm
Flecha de las láminas (f)	4,28 cm
Desarrollo de las láminas (d)	30,12 cm

un vano central completo y dos semivanos laterales. De este modo, se dispone de un vano completo en la zona central del canal, zona óptima de estudio y alejada en la medida de lo posible de efectos espurios derivados de la presencia de las paredes laterales del canal. En la Tabla 5.5 se recogen las principales características geométricas del modelo físico.

El cajón se construyó mediante láminas de madera de 1 cm de espesor, mientras que los elementos que constituyen el sistema pilote-lámina situado en el paramento frontal se han ejecutado mediante tubos, en el caso de los pilotes, y láminas de PVC de pequeño espesor, en el caso de las láminas, para poder darles la geometría adecuada. En la representación 3D (Figura 5.5) se pueden apreciar también los orificios realizados tanto en los elementos de PVC como en el cajón de madera para colocar los sensores de presión (Figura 5.6): 4 sensores en el pilote izquierdo y 4 sensores en el eje vertical de la lámina central del modelo, que permitirán conocer las presiones debidas al oleaje.

5.2.4. Disposición experimental

Una vez colocados los sensores de presión en sus posiciones correspondientes se situó el modelo al final del canal, lo más lejos posible de la zona de generación, tal y como se muestra en las Figuras 5.7 y 5.8.

5. Ensayos hidrodinámicos

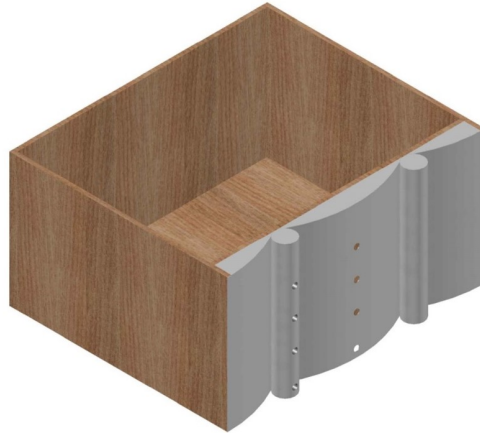


Figura 5.5: Representación 3D del modelo físico. **Elaboración propia.**

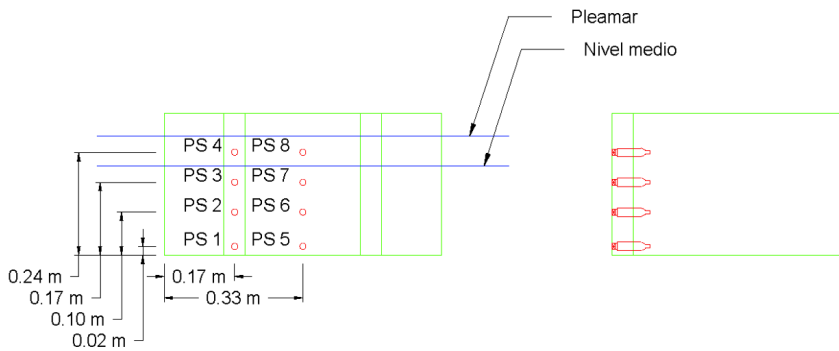


Figura 5.6: Disposición experimental de los sensores de presión (PS). **Elaboración propia.**

Además de los sensores de presión, se colocaron sensores de nivel para medir la posición de la superficie de agua en el canal y en el paramento frontal del modelo (Figura 5.9). Un primer grupo de cuatro sensores se colocó en las pro-

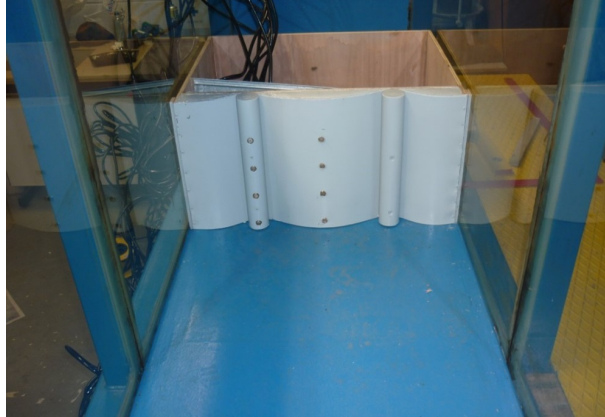


Figura 5.7: Modelo instalado en el canal (vista frontal). **Imagen propia.**

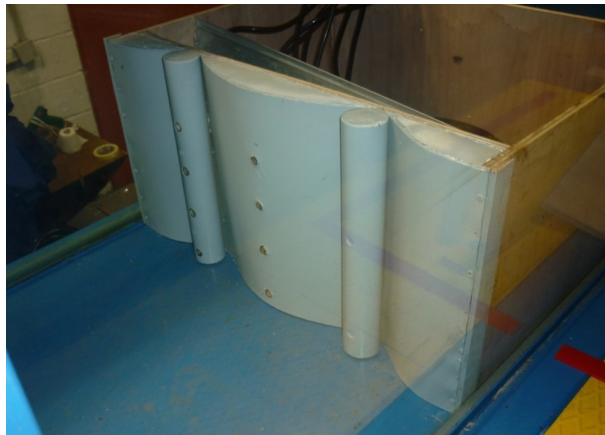


Figura 5.8: Modelo instalado en el canal (vista lateral). **Imagen propia.**

ximidades del modelo. Dos colocados sobre el paramento para medir el run-up en la lámina (*WG7*) y en el pilote (*WG8*), y dos más, ligeramente retrasados respecto a este paramento, para observar posibles reflexiones (*WG5* y *WG6*).

5. Ensayos hidrodinámicos

Se colocó un segundo grupo, formado por tres sensores, para la medición de la ola incidente y reflejada (*WG2*, *WG3* y *WG4*). Finalmente, se dispuso un sensor para registrar la ola generada por la pala (*WG1*) y uno adicional reservado para la medición del rebase (*WG9*). Asimismo, para evitar la aparición de ondas transversales se dispusieron dos paneles longitudinales de 5.50 m. Estos paneles están formados por láminas verticales de madera separadas entre ellas por un reducido espacio. Esta configuración reduce la anchura efectiva del canal en esa zona para evitar la aparición de ondas transversales y facilitar su mitigación en caso de que se produzcan.

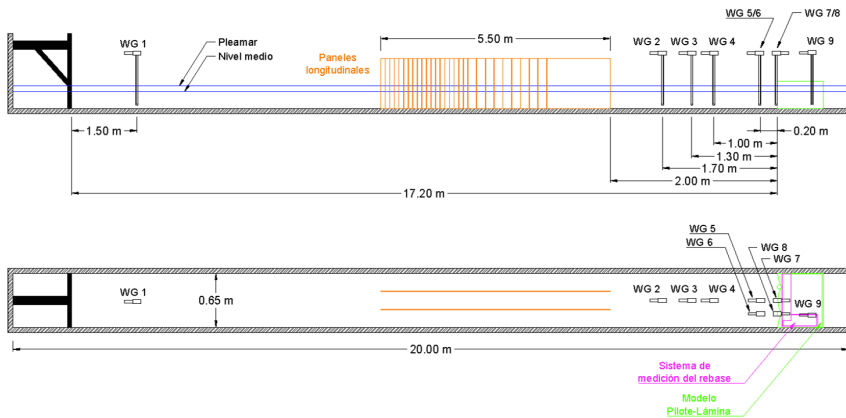


Figura 5.9: Disposición experimental de los sensores de nivel (*WG*). **Elaboración propia.**

En los ensayos realizados en pleamar, en los cuales existe una probabilidad elevada de producirse eventos de rebase, se colocó detrás del paramento frontal un sistema de medición de rebase. Dicho sistema está formado por una canaleta, encargada de recoger los volúmenes de rebase; un depósito, en el que se almacenan dichos volúmenes; y un sensor de nivel, encargado de realizar la medición (Figura 5.10).

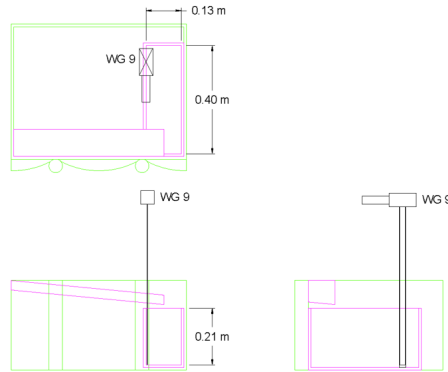


Figura 5.10: Sistema de medición de rebase. **Elaboración propia.**

5.2.5. Programa de ensayos

5.2.5.1. Ensayos con oleaje regular

Los ensayos con oleaje regular quedan definidos por la altura de ola (H), el período (T) y el nivel de marea. Se emplearon 4 alturas de ola: $H = 2$ cm, 4 cm, 6 cm y 8 cm, valores de modelo (equivalentes a $H = 0,5$ m, 1,0 m, 1,5 m y 2,0 m, en valores de prototipo); 13 períodos: $T = 0,8$ s, 1,0 s, 1,2 s, 1,4 s, 1,6 s, 1,8 s, 2,0 s, 2,2 s, 2,4 s, 2,6 s, 2,8 s y 3,0 s (equivalentes a $T = 4$ s, 5 s, 6 s, 7 s, 8 s, 9 s, 10 s, 11 s, 12 s, 13 s, 14 s y 15 s, en valores de prototipo) y 2 niveles de marea: el nivel medio $h = 20,8$ cm (equivalente a $h = 5,2$ m, en valores de prototipo) y la pleamar $h = 27,8$ cm (equivalente a $h = 6,95$ m, en valores de prototipo). Cada ensayo consiste en la generación de 50 olas, lo que se traduce en una duración de ensayo diferente para cada período determinada por la siguiente expresión:

$$t_e = 50T \quad (5.7)$$

siendo T el período y t_e la duración del ensayo (valores de modelo).

5. Ensayos hidrodinámicos

5.2.5.2. Ensayos con oleaje irregular

Las condiciones de oleaje irregular durante los ensayos fueron definidas mediante el espectro JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) cuya expresión es la siguiente [19]:

$$S(f) = \beta_J H_s^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp \left[\frac{-5}{4} (T_p f)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[\frac{-1}{2} \left(\frac{T_p f - 1}{\sigma} \right)^2 \right]} \quad (5.8)$$

donde $S(f)$ es la densidad espectral, f es la frecuencia, H_s es la altura de ola significativa, T_p es el período de pico, γ es el factor de pico, σ es el factor de forma espectral, β_J un parámetro que se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$\beta_J = \frac{0,0624}{0,230 + 0,0336\gamma - 0,185(1,9 + \gamma)^{-1}} [1,094 - 0,01915 \ln \gamma] \quad (5.9)$$

El factor de pico empleado durante los ensayos fue $\gamma = 3,3$, mientras que para el factor de forma σ se emplearon los siguientes valores en función de la frecuencia de pico (f_p).

$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{si } f \leq f_p \\ 0,09 & \text{si } f > f_p \end{cases} \quad (5.10)$$

El rango de frecuencias (f_{min} , f_{max}) empleado en la definición del espectro se determina en función del valor del período de pico (T_p):

$$f_{min} = \frac{1}{2T_p} \quad (5.11)$$

$$f_{max} = \frac{1}{0,2T_p} \quad (5.12)$$

Por lo tanto, una vez seleccionados estos valores, las condiciones de oleaje de cada ensayo quedan definidas por la altura de ola significativa (H_s) y el

período de pico (T_p). Durante los ensayos, se emplearon 3 alturas de ola significativa: $H_s = 2$ cm, 4 cm y 6 cm (equivalentes a $H_s = 0,5$ m, 1,0 m y 1,5 m, en valores de prototipo) y 6 períodos de pico $T_p = 1,0$ s, 1,4 s, 1,8 s, 2,2 s, 2,6 s y 3,0 s (equivalentes a $T_p = 5$ s, 7 s, 9 s, 11 s, 13 s y 15 s, en valores de prototipo). Asimismo se ensayaron 2 niveles de marea: el nivel medio $h = 20.8$ cm (equivalente a $h = 5.2$ m, en valores de prototipo) y la pleamar viva media observada $h = 27.8$ cm (equivalente a $h = 6.95$ m, en valores de prototipo).

La duración de cada ensayo se obtiene multiplicando el número de olas por el período medio:

$$t_e = 200T_z \quad (5.13)$$

siendo T_z el período medio obtenido a partir del período de pico T_p y del factor de pico γ (ambos en valores de modelo), mediante la siguiente expresión:

$$T_z = \frac{T_p}{\left(1,30301 - 0,01698\gamma + \frac{0,12102}{\gamma}\right)} \quad (5.14)$$

5.2.6. Caracterización del comportamiento

El comportamiento del modelo se caracteriza mediante los análisis de onda incidente-reflejada, de las presiones sobre la estructura y de los caudales de rebase de la misma. Para la realización de estos cálculos se dispone de los registros de elevación de la superficie libre (η) en cada uno de los sensores de nivel y la presión absoluta (P) en los sensores correspondientes. A continuación se detalla el procedimiento de cálculo de cada uno de estos conceptos.

5.2.6.1. Análisis onda incidente-reflejada

La reflexión es el proceso por el cual parte de la energía de un determinado tren de olas genera otro tren en sentido contrario al incidir sobre un obstáculo.

5. Ensayos hidrodinámicos

Cualquier estructura marítima provoca que el oleaje incidente se vea sometido a un proceso de reflexión. Su evaluación se realiza empleando una variable compleja (5.15), donde $|R|$ y ε representan su módulo y su argumento respectivamente. Este último proporciona información sobre el desfase entre la ola incidente y la reflejada.

$$R = |R|e^{-i\varepsilon} \quad (5.15)$$

Al módulo de la reflexión $|R|$ se le denomina habitualmente coeficiente de reflexión (K_r), y se define como la relación entre la altura de ola reflejada y la altura de ola incidente (5.16),

$$K_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (5.16)$$

En el caso de oleaje irregular, el coeficiente de reflexión se calcula a partir de los flujos de energía (5.17),

$$K_r = \sqrt{\frac{E_r}{E_i}} = \sqrt{\frac{\int S_r(f)df}{\int S_i(f)df}} \quad (5.17)$$

donde E_r y E_i son la energía del oleaje reflejado y del oleaje incidente, mientras $S_r(f)$ y $S_i(f)$, los espectros de densidad de energía del oleaje reflejado e incidente, respectivamente.

De entre los diferentes métodos de separación de oleaje incidente-reflejado existentes en la literatura [31, 22, 18, 35], en este trabajo se utilizó el método de Mansard y Funke (1980) [31] modificado por Baquerizo (1995) [2]. Se trata de un método basado en el análisis espectral del oleaje y válido tanto para oleaje regular como oleaje irregular, ya que obtiene el espectro incidente y reflejado, y a partir de ellos el coeficiente de reflexión como cociente entre la energía reflejada y la energía incidente. Así, este método precisa de los registros temporales de elevación de la superficie libre medidos en tres puntos a lo largo de la dirección de propagación del oleaje. Para la realización de los cálculos se consideraron los registros de superficie libre de los sensores $WG2$, $WG3$ y $WG4$ dispuestos convenientemente para efectuar dicho análisis.

5.2.6.2. Rebase

Para medir el caudal de rebase sobre el modelo físico se dispuso, como se comenta anteriormente, un depósito detrás de la misma. Se utilizó un sensor de nivel auxiliar (*WG9*) para medir las oscilaciones del nivel en el depósito: η_9 . El volumen de rebase acumulado $V(t)$ para cada instante durante el ensayo se obtuvo como el producto entre el nivel en el depósito η_9 y su superficie interior ($0,40 \text{ m} \times 0,13 \text{ m} = 0,052 \text{ m}^2$), empleando la siguiente ecuación (5.18):

$$V(t) = 0,052\eta_9 \quad (5.18)$$

El caudal de rebase instantáneo por metro lineal de estructura, $Q(t)$, se obtuvo (5.19): como la derivada respecto del tiempo del volumen instantáneo, dividido por el ancho efectivo del modelo, $B = 0,65 \text{ m}$.

$$Q(t) = \frac{1}{B} \frac{dV(t)}{dt} \quad (5.19)$$

5.2.6.3. Amplificación de la altura de ola

La estructura Pilote-Lámina está formada por pilotes entre los cuales se disponen láminas delgadas, dotadas de una cierta curvatura. Esta configuración característica conforma una geometría sobre la cual se originarán múltiples reflexiones que pueden dar lugar a amplificaciones indeseadas de la altura de ola incidente. De esta forma se determinará la existencia o no de estos efectos de amplificación de la altura de ola, así como su comportamiento ante las diferentes condiciones de oleaje ensayadas. Para ello se compararán los registros de los sensores de nivel *WG5* y *WG6* (retrasados 20 cm respecto al paramento frontal). Para cuantificar este efecto se calculó el factor de amplificación, $A_{x/y}$ entre dos sensores cualesquiera x e y , definido como:

$$A_{x/y} = 100 \left(\frac{H_x}{H_y} - 1 \right) \quad (5.20)$$

siendo H_x y H_y las alturas para cada una de las posiciones.

5. Ensayos hidrodinámicos

5.2.6.4. Presiones en el paramento

Uno de los factores más importantes a considerar a la hora de realizar el diseño de una estructura costera vertical es la determinación de las leyes de presiones inducidas por el oleaje. Para ello se utilizarán los registros obtenidos por los 8 sensores de presión colocados en el paramento frontal del modelo: *PS1*, *PS2*, *PS3* y *PS4* situados sobre uno de los pilotes; y *PS5*, *PS6*, *PS7* y *PS8* situados en el eje vertical de la lámina central del modelo. Estos sensores permitirán conocer las leyes de presiones generadas por los diferentes oleajes regulares e irregulares sobre la estructura, determinando las presiones máximas a las que se verá sometida la estructura así como aquellos oleajes más desfavorables.

5.3. Resultados

5.3.1. Análisis onda incidente-reflejada

Se obtuvo el coeficiente de reflexión (K_R) para cada uno de los casos ensayados. Se presentan los valores obtenidos para oleaje regular (Figura 5.11) e irregular (Figura 5.12) en función del período y de la altura de ola, diferenciándose aquellos casos correspondientes a nivel medio y a pleamar. Para oleaje regular, los valores del coeficiente de reflexión oscilan entre 0,90 y 1,00, apreciándose un ligero incremento de los valores para el caso de pleamar. No se aprecia una variación significativa en función de la altura y el periodo de la ola. Para el caso del oleaje irregular, los valores del coeficiente de reflexión oscilan entre 0,95 y 1,00, apreciándose un ligero aumento también para el caso de pleamar. Tampoco se aprecia una clara tendencia de comportamiento en función de la altura de ola o del periodo, como cabía esperar tras los resultados de oleaje regular. A la vista de los resultados, no se aprecia que la configuración propuesta para la estructura pilote-lámina tenga un comportamiento diferente al correspondiente a una estructura vertical de sección recta en términos del coeficiente de reflexión.

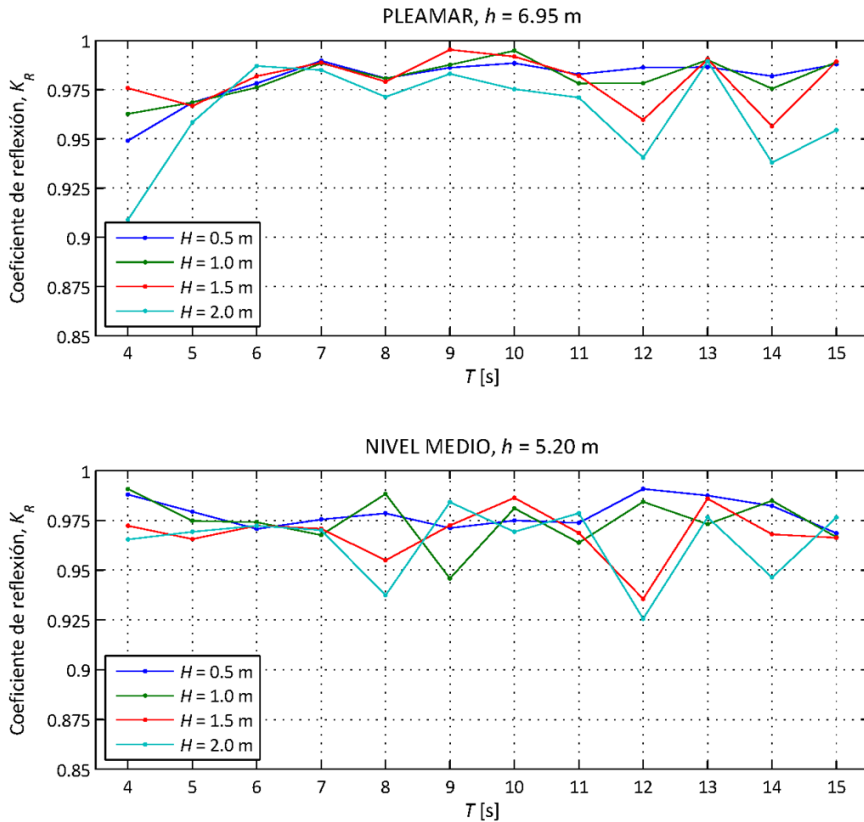


Figura 5.11: Coeficiente de reflexión (K_R), en función del periodo y la altura de ola. Oleaje regular. **Elaboración propia.**

5.3.2. Rebase

El rebase se produce cuando la suma del oleaje incidente y el reflejado en el paramento de la estructura supera el francobordo disponible. No obstante, el comportamiento del rebase es completamente diferente bajo condiciones de oleaje regular y oleaje irregular. En el primer caso, teniendo en cuenta el ca-

5. Ensayos hidrodinámicos

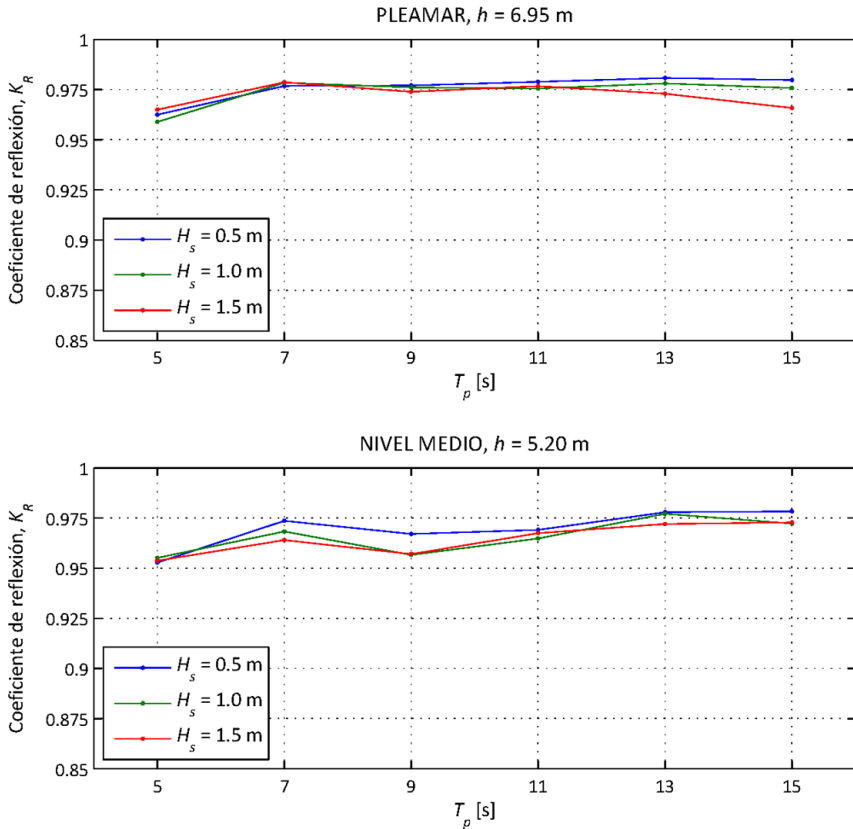


Figura 5.12: Coeficiente de reflexión (K_R), en función del periodo y la altura de ola. Oleaje irregular. **Elaboración propia.**

rácter regular del oleaje en el que las diferentes ondas individuales presentan valores similares de altura de ola y período, si la suma del oleaje incidente y el reflejado en el paramento de la estructura supera el francobordo disponible se producirán eventos de rebase para cada una de las olas individuales. Ade-

más, una vez superada la altura de ola umbral para el rebase, una vez que se incrementa la altura de ola se incrementan, como no puede ser de otro modo, los caudales de rebase. En el caso del nivel medio los oleajes ensayados no alcanzaron en ningún momento la condición de rebase. Sin embargo, para el caso del nivel de pleamar se detectaron eventos de rebase para alturas de ola de prototipo de $H = 2,0$ m para todos los períodos ensayados, y para $H = 1,5$ m en los dos casos de período más altos ($T = 14$ s; $T = 15$ s).

En el segundo caso, oleaje irregular, cada uno de los espectros empleados para su definición se traduce en una serie de olas individuales con diferentes períodos y alturas de ola por lo que los eventos de rebase se producen de forma no continua en el tiempo dependiendo de las condiciones de oleaje en cada momento. De los diferentes oleajes irregulares estudiados, únicamente aquellos con altura significativa $H_s = 1,5$ m presentaron eventos de rebase. En la Figura 5.13 se muestran los registros de caudales de rebase durante cada uno de los ensayos correspondientes a esta altura de ola. Se puede observar que tanto la magnitud de los eventos de rebase como el número de eventos por ensayo aumentan cuando lo hace el período de pico del oleaje.

5.3.3. Amplificación de la altura de ola

Dada la especial configuración en planta de la estructura, se analizó la posible amplificación del oleaje en los puntos singulares, es decir, en los pilotes. Para ello se comparó la altura de ola entre dos pares de sensores diferentes para los ensayos con oleaje regular y se obtuvo el coeficiente de amplificación.

En la Figura 5.14 se presentan los coeficientes de amplificación del oleaje, definidos según la Ecuación 5.20, entre los sensores *WG6* (alineado con el pilote) y *WG5* (alineado con el centro de la lámina), ambos retrasados 20 cm respecto al paramento frontal. Se puede observar que únicamente para los períodos más pequeños ($T = 5$ s y, en mayor medida, $T = 4$ s) se produce amplificación. En la situación de pleamar esta amplificación aumenta respecto de la del nivel medio.

5. Ensayos hidrodinámicos

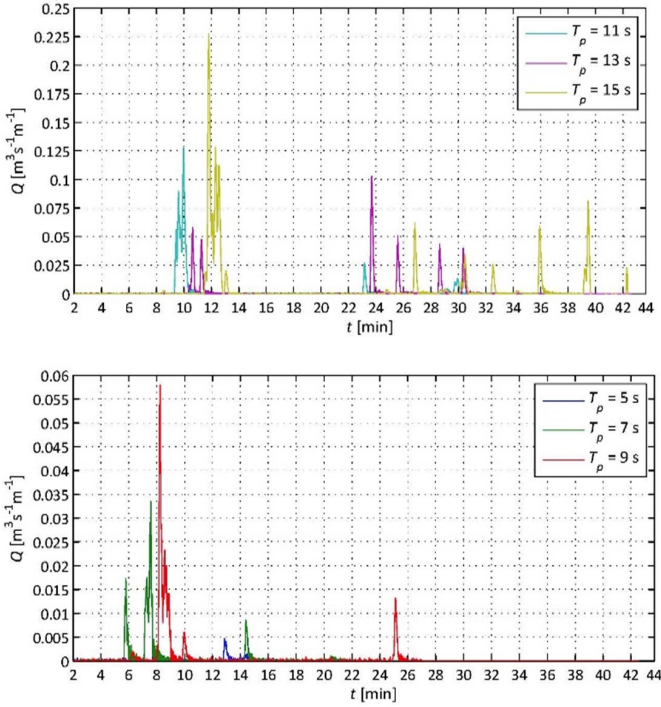


Figura 5.13: Caudales de rebase (Q) a lo largo del tiempo para los diferentes períodos de pico ensayados bajo oleajes irregulares con $H_s = 1,5$ m. **Elaboración propia.**

5.3.4. Presiones en el paramento

A efectos de determinar las sollicitaciones más desfavorables que debe soportar la estructura debido a las presiones del oleaje se contemplan dos situaciones límite: presiones máximas sobre la estructura y presiones mínimas. En primer lugar se realizó una comparación entre las medidas de los sensores colocados en la lámina con los sensores colocados en el pilote. Se pretende así comprobar la existencia de sobrepresiones en alguno de estos dos elementos.

5.3. Resultados

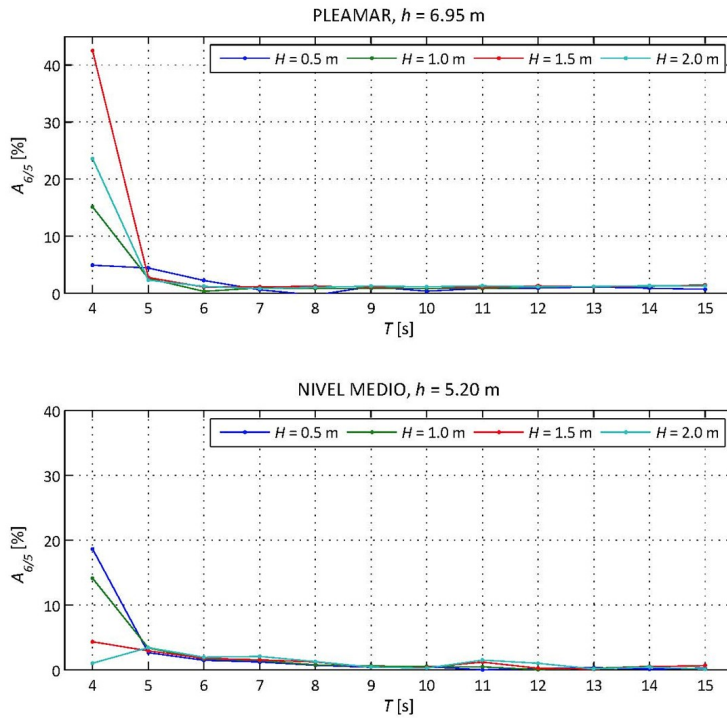


Figura 5.14: Coeficiente de amplificación del sensor *WG6* respecto al sensor *WG5*. **Elaboración propia.**

La comparación se realizó mediante una regresión lineal de las medidas (Figura 5.15), utilizando para ello las presiones máximas para cada ensayo tanto de oleaje regular (Figura 5.15 - arriba izda.) como irregular (Figura 5.15 - arriba dcha.), así como las presiones mínimas, nuevamente tanto para oleaje regular (Figura 5.15 - abajo izda.) como irregular (Figura 5.15 - abajo dcha.). El ajuste entre los valores de presión es excelente en todos los casos, con todos los valores coincidentes con la línea de ajuste perfecto. A tenor de estos resultados se puede asegurar que no existen diferencias significativas entre las

5. Ensayos hidrodinámicos

presiones soportadas por la lámina y el pilote. Así, en sucesivas figuras, dado que los valores de presión registrados en los dos elementos son muy similares, se presentarán los resultados únicamente para los sensores del pilote.

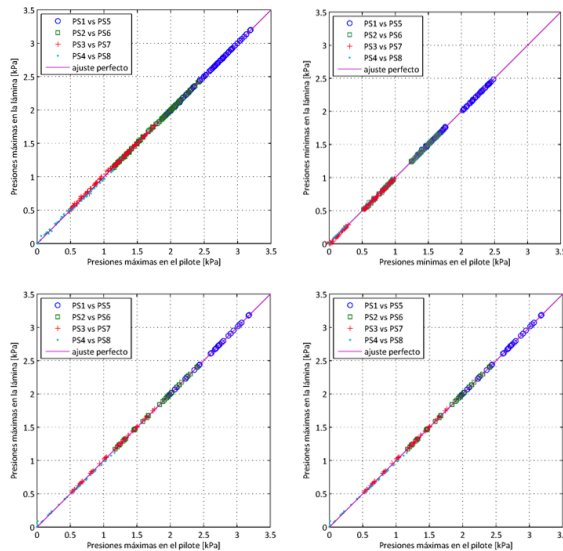


Figura 5.15: Regresión lineal entre los valores de presión en pilote y lámina.
Elaboración propia.

En la Figura 5.16 y 5.17 se presenta, para los oleajes regulares ensayados, el comportamiento de la presión máxima en función de la altura de ola y del período, para nivel medio y pleamar, respectivamente. Se puede observar que la presión aumenta cuando lo hace la altura de ola y también cuando lo hace el período. Aunque lógicamente la presión aumenta cuando se pasa de nivel medio a pleamar, el comportamiento que muestra respecto a las condiciones de oleaje es muy similar en ambos casos: la presión aumenta cuando lo hace tanto la altura de ola como el período.

Por último, se presentan los diagramas de presiones para las condiciones de

5.3. Resultados

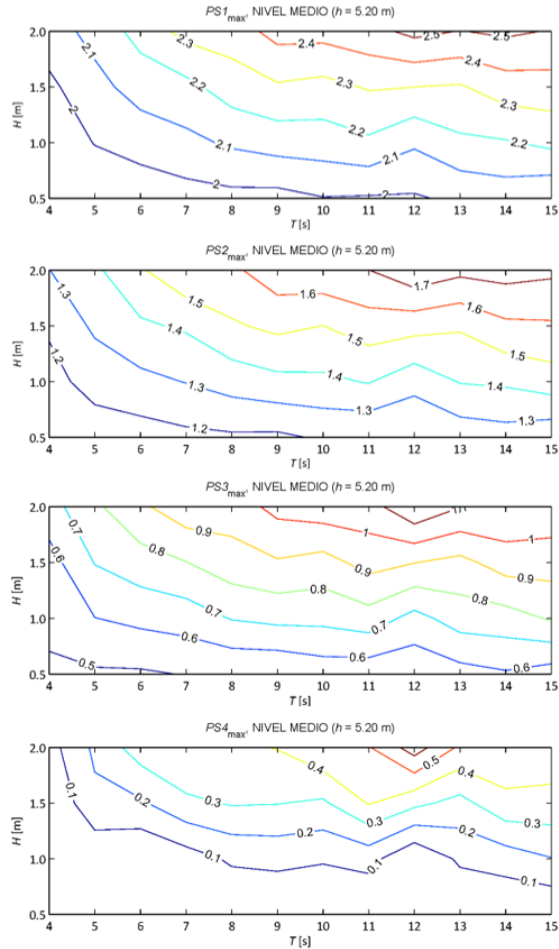


Figura 5.16: Evolución de las presiones máximas en función del período (T) y de la altura de ola (H) para el nivel medio. **Elaboración propia.**

oleaje irregular que, de entre todas las estudiadas, resultaron ser las más desfavorables. Como era de esperar a la vista de las gráficas anteriores, la condición

5. Ensayos hidrodinámicos

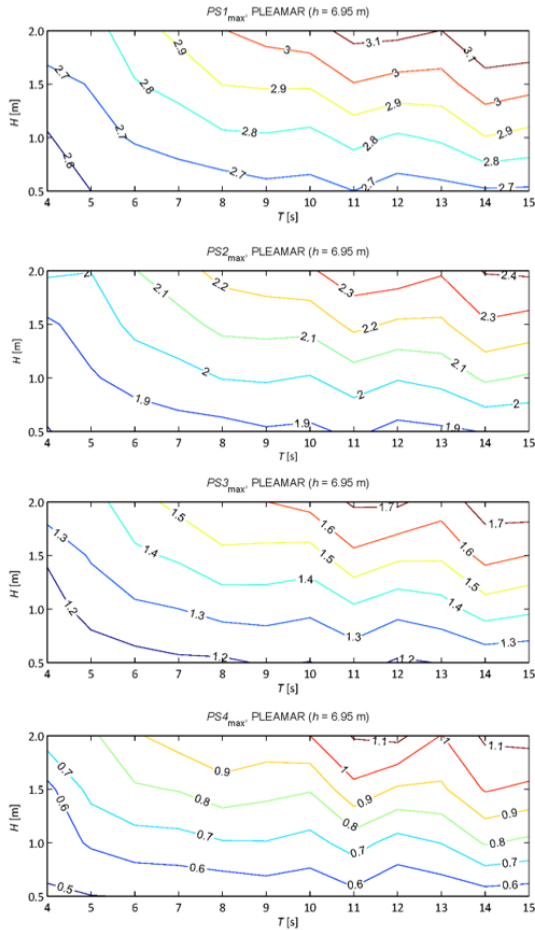


Figura 5.17: Evolución de las presiones máximas en función del período (T) y de la altura de ola (H) para pleamar. **Elaboración propia.**

más desfavorable es la correspondiente a la mayor altura de ola significativa y al mayor período de pico ($H_s = 6$ m, $T_p = 15$ s), tanto en nivel medio como en

5.3. Resultados

pleamar. Así, para cada uno de los niveles se muestran los diagramas de presiones máximas (Figuras 5.18 y 5.19) y mínimas (Figuras 5.20 y 5.21) sobre la estructura.

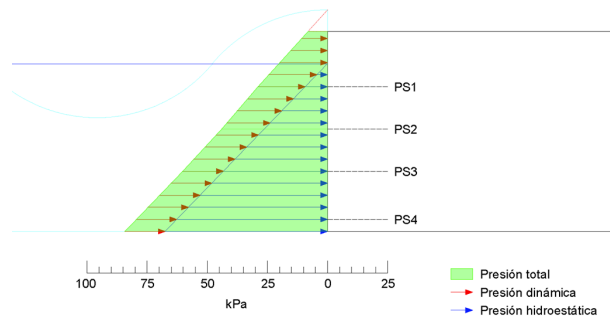


Figura 5.18: Diagramas de presiones máximas para el caso más desfavorable de pleamar. **Elaboración propia.**

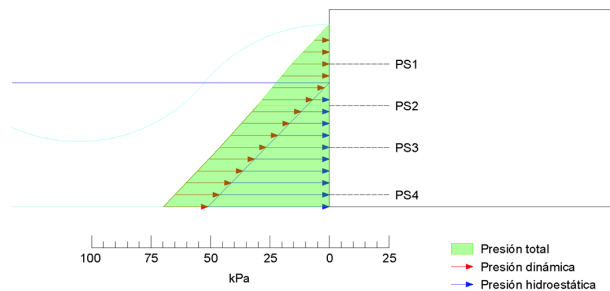


Figura 5.19: Diagramas de presiones máximas para el caso más desfavorable de nivel medio. **Elaboración propia.**

5. Ensayos hidrodinámicos

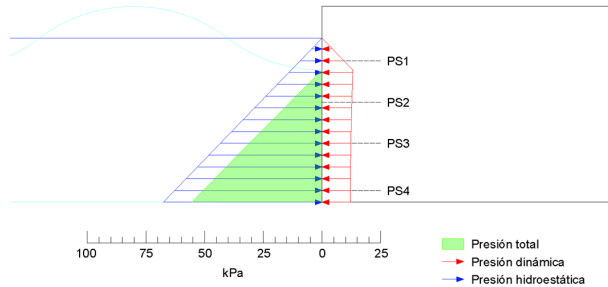


Figura 5.20: Diagramas de presiones mínimas para el caso más desfavorable de pleamar. **Elaboración propia.**

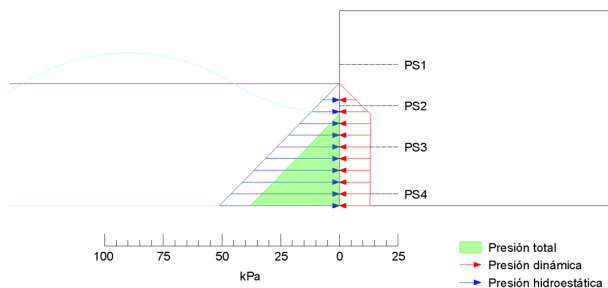


Figura 5.21: Diagramas de presiones mínimas para el caso más desfavorable de nivel medio. **Elaboración propia.**

5.4. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se puede afirmar que el comportamiento hidrodinámico de la estructura Pilote-Lámina no difiere significativamente del correspondiente a una estructura de paramento vertical plano. Por lo que respecta a cada uno de los parámetros analizados, se pueden extraer las siguientes conclusiones del análisis de resultados realizado:

- No se aprecia un comportamiento disipador de la estructura. Los coefi-

cientes de reflexión son similares a los esperados para una estructura de paramento vertical plano

- El rebase se produce, bajo oleajes regulares, para una altura de ola igual o superior a $H = 2$ m para todos los períodos considerados o también para los períodos más largos en los ensayos de altura de ola igual a $H = 1,5$ m. Bajo oleajes irregulares, el rebase se produce para alturas de ola significante igual o superior $H = 1,5$ m, siendo los eventos más intensos y de mayor número cuanto mayor es el período de pico de dicho oleaje
- No se ha observado que la geometría de la estructura pilote-lámina produzca ampliaciones significativas del oleaje en las proximidades de su paramento frontal. Únicamente se aprecia una ampliación de la altura de ola en las proximidades del pilote para los períodos más pequeños ($T = 5$ s y $T = 4$ s en mayor medida), presentando valores de amplificación más altos para el nivel medio que para pleamar.
- No se aprecian diferencias significativas entre las presiones en la lámina y el pilote, siendo los resultados obtenidos similares a los esperados para una estructura de paramento vertical plano. Como era de esperar, las presiones aumentan cuando lo hace la altura de ola y el período, siendo los valores máximos de estas dos variables los que provocan las sollicitaciones de presión más desfavorables.

5. Ensayos hidrodinámicos

6. ADAPTACIÓN A MAYORES CALADOS

Tomando como punto de partida las conclusiones obtenidas a partir de la primera experiencia empleando el sistema Pilote-Lámina en la ejecución del muelle en el puerto de Vilanova de Arousa, se plantea continuar con el análisis de viabilidad del sistema para su uso en otras situaciones diferentes. Para ello se analizó como adaptar tanto el sistema como el procedimiento constructivo a otros escenarios más exigentes en comparación con el existente en Vilanova de Arousa, en los que se tendrían que considerar otras geometrías, otros usos del puerto u otras características asociadas a otras ubicaciones.

Por lo que respecta a la adaptación a otras geometrías, el principal condicionante a tener en cuenta es el incremento del calado. Como es bien sabido, a medida que éste se incrementa, aumenta significativamente el empuje ejercido por el relleno sobre el sistema. Debido a ello los esfuerzos en los diferentes elementos del sistema se incrementan considerablemente siendo necesario analizar nuevamente a nivel estructural cada uno de ellos, así como el sistema en su conjunto. A partir de estudios previos realizados mediante modelización numérica, se ha determinado que a partir de un valor de altura total de muelle del orden de los 16,00 m carece de sentido continuar con el sistema en su configuración inicial, siendo necesario incorporar modificaciones que lo refuercen estructuralmente o que aligeren los esfuerzos a los que se verá sometido.

Por otra parte, en relación con su adaptación a otros usos del puerto, el principal condicionante a tener en cuenta son las sobrecargas sobre la explanada debidas a las diferentes actividades portuarias. En función del uso considerado se deben considerar en el diseño diferentes valores de sobrecarga. Asimismo, en relación con su adaptación a otras ubicaciones son varios los condicionantes a tener en cuenta, entre los que destacan los aspectos geotécnicos y las posibles acciones hidrodinámicas.

En este capítulo se presenta el análisis realizado para la adaptación del sistema a mayores calados. Se comienza proponiendo una serie de adaptaciones al sistema para poder emplearlo en muelles con calados mayores, y un nuevo procedimiento constructivo para poder ejecutarlo. A continuación, se analiza

6. Adaptación a mayores calados

estructuralmente el sistema para su empleo con alturas de muelle de 26 m (calado de 20 m) ante un escenario genérico mediante un predimensionamiento inicial de sus elementos. Por supuesto, ante un caso particular sería necesario analizarlo con mayor detalle incluyendo todas las verificaciones de comportamiento necesarias de acuerdo con la normativa vigente.

6.1. Propuestas de adaptación

Teniendo presente las limitaciones del diseño original, se analizan las posibles modificaciones que se pueden incorporar en el sistema Pilote-Lámina para que sea viable su empleo como tipología estructural ante nuevos escenarios, fundamentalmente mayores calados. Tras analizar diferentes alternativas se seleccionaron las siguientes como las más adecuadas, tanto por su aportación a nivel estructural como por su viabilidad de implementación en el procedimiento constructivo.

- **Doble línea de anclajes:** incorporar un segundo nivel de anclajes es una de las medidas que se pueden adoptar para reforzar estructuralmente el sistema. De este modo, se mejora la capacidad resistente de los pilotes a medida que los esfuerzos de tracción transmitidos por las láminas se incrementan. Esta medida se refleja en la Figura 6.1 donde se incorpora un segundo nivel de anclaje en la parte inferior del relleno.
- **Segunda hilera de pilotes:** también se puede reforzar estructuralmente el sistema mediante una segunda hilera de pilotes en la parte posterior. Esta segunda hilera se arriostraría con los pilotes principales mediante vigas, dando lugar a una estructura formada por una serie de porticos que dotaría al sistema de una mayor capacidad resistente. En la Figura 6.2 se puede observar un esquema que muestra esta modificación.
- **Talud de escollera bajo plataforma de coronación:** esta modificación en el diseño tiene dos objetivos. Por una parte, se elimina el relleno contra las láminas en esa zona, reduciendo en consecuencia los empujes (aunque se trate de una zona donde los esfuerzos provocados por

6.2. Procedimiento constructivo

el relleno son limitados), mejorando la situación a nivel estructural del sistema. Por otra parte, el talud de escollera permitiría disminuir una posible agitación portuaria, motivada por la reflexión del oleaje (sistema antirreflejte). Esta propuesta se verá reflejada en el procedimiento constructivo presentado en el próximo apartado de este capítulo.

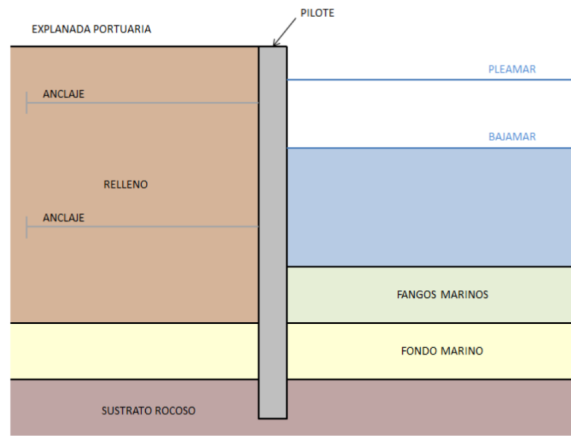


Figura 6.1: Sistema con doble anclaje. *Elaboración propia.*

6.2. Procedimiento constructivo

A continuación, se presenta una propuesta de procedimiento constructivo para ejecutar el sistema Pilote-Lámina con las adaptaciones propuestas anteriormente, de cara a su aplicación en la construcción de muelle de mayores calados. Este procedimiento se ha considerado como el más apropiado tras los casos de estudio analizados, teniendo en cuenta las cargas a las que se ven sometidos los diferentes elementos durante sus diferentes fases. Se considera un perfil geotécnico genérico donde existen tres niveles: un primer nivel formado por sedimentos litorales de tipo fangos, un segundo nivel constituido por se-

6. Adaptación a mayores calados

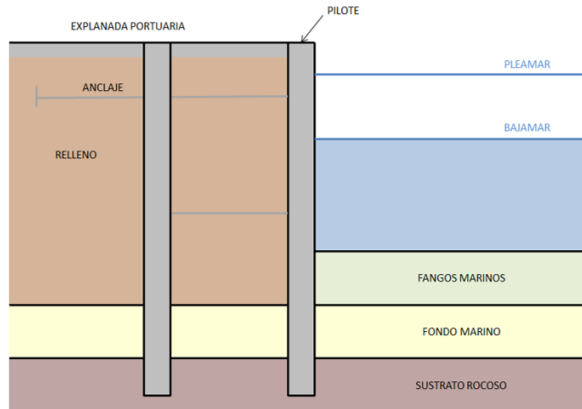


Figura 6.2: Sistema con doble línea de pilotes. **Elaboración propia.**

dimentos litorales de tipo arena, y finalmente el sustrato rocoso que servirá de zona de empotramiento de los pilotes.

- **FASE 1:** en primer lugar se ejecutarían las dos líneas de pilotes (principales y secundarios) desde medios flotantes. Para ello, se seguiría un procedimiento similar al correspondiente a los muelles de pilotes presentado en el Capítulo 2. Una vez ejecutados los pilotes se arriostrarían los pilotes homólogos de ambas líneas con sus correspondientes vigas, formando una serie de porticos entre pilotes. Asimismo, se construiría también en esta fase la viga cantil del muelle sobre los pilotes principales, y la viga posterior sobre los pilotes secundarios. El resultado final de esta fase se puede apreciar en la Figura 6.3.
- **FASE 2:** A continuación, tras terminar la ejecución de los pilotes se daría comienzo a la ejecución del relleno posterior (Figura 6.4). Previamente, si se considera oportuno, se procederá a la retirada de la capa de fangos existente en la zona, de cara a evitar futuros asentamientos indeseados en el relleno. La ejecución del relleno se realiza en una primera fase hasta alcanzar la cota del primer anclaje para poder situar en su par-

6.2. Procedimiento constructivo

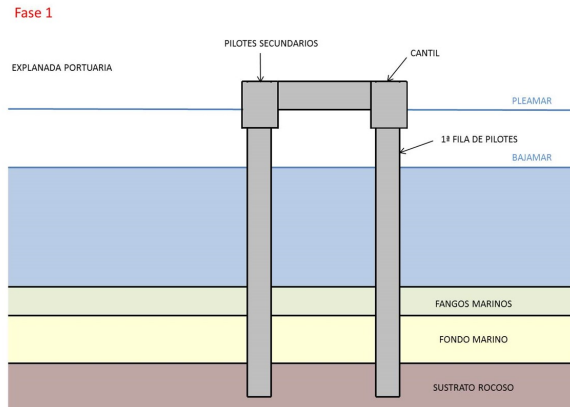


Figura 6.3: Procedimiento constructivo: fase 1. **Elaboración propia.**

te posterior el elemento de anclaje con el terreno (muro de reacción). El anclaje con los pilotes secundarios, así como los anclajes entre pilotes, se pueden materializar mediante elementos similares (orejetas de anclaje) a los empleados en el muelle de Vilanova de Arousa dispuestos en las camisas perdidas de los pilotes (Figura 4.10). No obstante, se pueden valorar otras alternativas para la configuración del anclaje siempre y cuando garanticen su correcto comportamiento. Por supuesto, para poder realizar este primer relleno, deberán haber sido colocadas anteriormente entre los pilotes principales las láminas necesarias hasta alcanzar la cota correspondiente.

- **FASE 3:** Esta fase es similar a la anterior, ya que simplemente se continúa con el relleno hasta alcanzar la cota correspondiente al segundo anclaje (Figura 6.5). Se procede de igual modo hasta colocar todos los anclajes necesarios: se sitúan los elementos de anclaje y se realizan las conexiones oportunas con los pilotes. De esta forma, quedaría finalizada la parte estrictamente estructural del sistema.

6. Adaptación a mayores calados

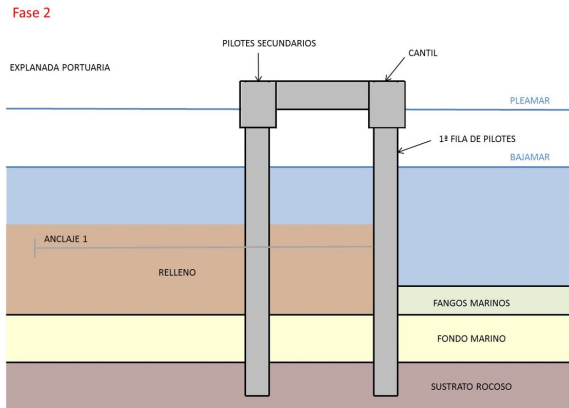


Figura 6.4: Procedimiento constructivo: fase 2. **Elaboración propia.**

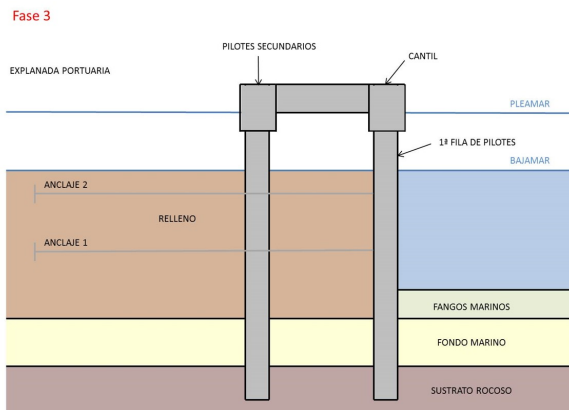


Figura 6.5: Procedimiento constructivo: fase 3. **Elaboración propia.**

6.2. Procedimiento constructivo

- **FASE 4:** Una vez colocado el segundo nivel de anclajes se finaliza el relleno posterior hasta alcanzar la cota de coronación de la explanada (Figura 6.6). El paramento frontal del muelle se finaliza mediante un talud en el que se coloca una escollera de protección, quedando esa parte expuesta como si se tratase de una obra de atraque y amarre abierta. Tal y como se mencionó anteriormente, esta adaptación tiene dos efectos positivos: en primer lugar, a nivel estructural, se evita que en esa parte exista un relleno que esté ejerciendo un empuje adicional; y, en segundo lugar, desde el punto de vista de la agitación portuaria, actuaría como sistema para mitigar la reflexión del oleaje que pudiese incidir en el muelle.

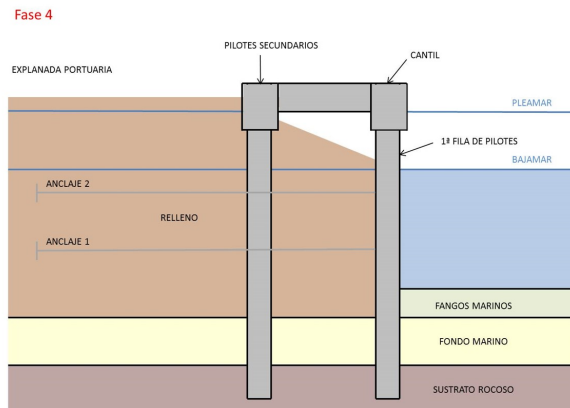


Figura 6.6: Procedimiento constructivo: fase 4. **Elaboración propia.**

- **FASE 5:** En esta fase, una vez alcanzada la cota de coronación del relleno se ejecutaría el pavimento portuario, de acuerdo con las cargas de uso previstas, quedando de este modo terminada la explanada portuaria, tal y como se muestra en la Figura 6.7.
- **FASE 6:** Finalmente, esta última fase se corresponde con la entrada en servicio del muelle una vez colocados los elementos de uso y servicio necesarios (Figura 6.8). En ella, desde el punto de vista de los cálculos

6. Adaptación a mayores calados

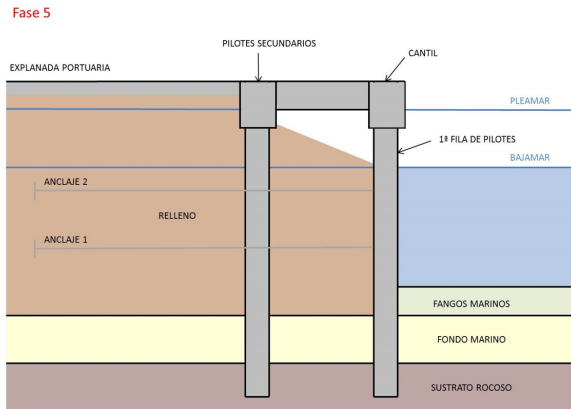


Figura 6.7: Procedimiento constructivo: fase 5. **Elaboración propia.**

estructurales del muelle se consideran las sobrecargas de uso sobre la explanada y las cargas debidas a las líneas de amarre.

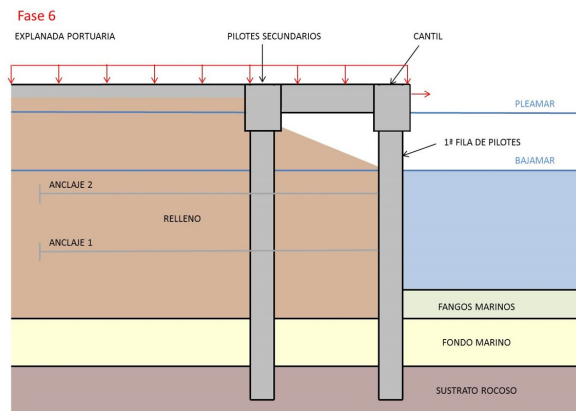


Figura 6.8: Procedimiento constructivo: fase 6. **Elaboración propia.**

6.3. Cálculos estructurales

En este apartado se analiza el comportamiento estructural del sistema Pilote-Lámina, incorporando las adaptaciones propuestas anteriormente y ejecutado mediante el nuevo procedimiento constructivo, ante un escenario mucho más exigente en términos de calado. A continuación se presenta la metodología empleada y los resultados obtenidos.

6.3.1. Metodología

Los cálculos estructurales se han realizado implementando un modelo numérico 3D de elementos finitos mediante el software RS3 de Rocscience. El modelo simula un tramo del sistema centrado en uno de sus pilotes con dos semivanos a ambos lados, empleando la geometría que se describe en el próximo apartado.

6.3.1.1. Geometría del modelo

La geometría adoptada para el modelo (Figuras 6.9 y 6.10) se corresponde con un muelle de 20 m de calado y una cota de coronación situada a la +6,00 m, dando lugar a una altura total del muelle de 26 metros. Para establecer estos valores se han tenido en cuenta los requisitos de francobordo mínimos establecidos por la ROM 2.0-11: *Recomendaciones para el proyecto y ejecución en Obras de Atraque y Amarre* [41].

El sistema Pilote-Lámina consta de dos hileras de pilotes: la primera de ellas (pilotes principales) tienen un diámetro de 1,50 m, mientras que en la segunda (pilotes secundarios) el diámetro seleccionado es de 1,00 m. La separación entre pilotes es de 8,00 m (distancia interjejes) en ambas direcciones; entre los pilotes que componen cada una de las hileras, y entre cada pilote principal y su pilote secundario. Por su parte, la viga cantil que sirve de atado de los pilotes principales tiene una sección de 3,00 x 2,50 m, mientras que la viga de atado de los pilotes secundarios tiene una sección de 1,00 x 1,00 m.

Por lo que respecta al perfil geotécnico se supuso la existencia de un primer

6. Adaptación a mayores calados

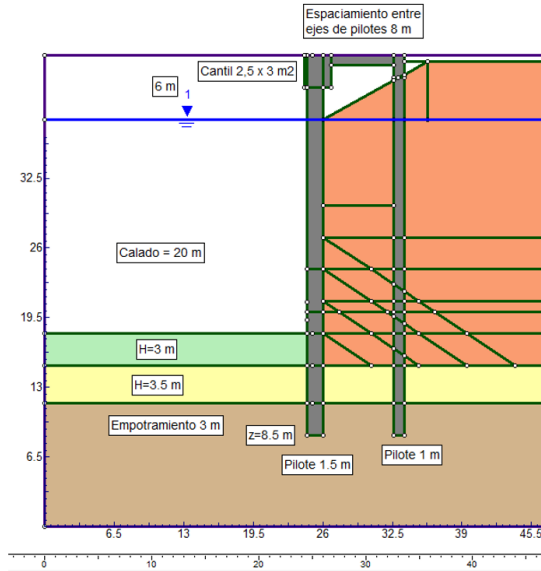


Figura 6.9: Parámetros geométricos del modelo. **Elaboración propia.**

nivel en el fondo marino formado por sedimentos litorales de tipo fangos de 3,00 m de espesor (desde la cota -20,00 m hasta la cota -23,00 m), un segundo nivel constituido por sedimentos litorales de tipo arena de 3,50 m (desde la cota -23,00 m hasta la cota -26,50 m), y finalmente el sustrato rocoso. Para los pilotes, tanto el principal como el secundario, se ha considerado una profundidad de empotramiento de 3,00 m.

Además de la doble hilera de pilotes se han incorporado también las otras dos adaptaciones propuestas: se han considerado dos líneas de anclaje con una carga de pretensado de 500 kN situadas a las cotas: 0,00 m y -8,00 m respectivamente, y se ha finalizado el relleno con un talud de escollera bajo la plataforma con un 3H:2V de inclinación.

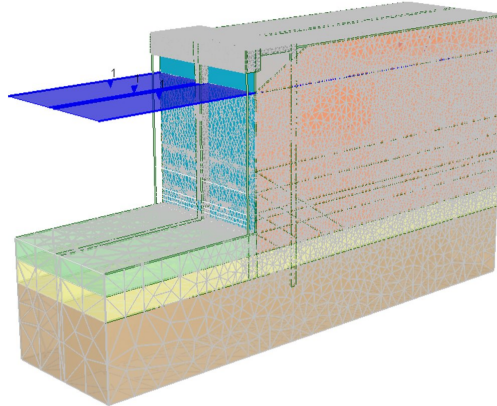


Figura 6.10: Vista 3D del modelo numérico implementado. **Elaboración propia.**

6.3.1.2. Parámetros geotécnicos

Para la realización de los cálculos estructurales se emplearon unos parámetros geotécnicos genéricos. Por lo que respecta al relleno posterior del muelle se utilizó la clasificación de materiales de rellenos portuarios recogida en la ROM 4.1-18: *Recomendaciones para el proyecto y construcción de pavimentos portuarios* [42]. Se seleccionó un relleno de tipo **RH-1** que consiste en un relleno hidráulico con menos del 10% de finos. Los rellenos hidráulicos se forman mediante la sedimentación de partículas sólidas contenidas en un efluente procedente de un dragado, siendo los que generalmente suelen presentar una mejor relación calidad-precio. Para un relleno de este tipo se establecen [42] unos parámetros geotécnicos esperables que se tomaron de referencia para los valores seleccionados en este estudio.

En relación con las propiedades geotécnicas de los materiales que forman parte del perfil geotécnico considerado (fangos, arenas y sustrato rocoso) se tomó como referencia para su definición los valores que proporciona la ROM 0.5-05: *Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias*

6. Adaptación a mayores calados

Tabla 6.1: Parámetros geotécnicos empleados en los cálculos estructurales (γ_{sat} , peso específico saturado; E , módulo de elasticidad; φ , ángulo de rozamiento interno; c , cohesión).

Material	γ_{sat} (kN/m ³)	E (MPa)	φ (°)	c (kPa)
Fangos	16	20	35	10,5
Arenas	18	80	35	5
Sustrato rocoso	-	200	40	200
Relleno	20	100	35	10,5

[43] para la realización de estimaciones previas. A modo de resumen, se recogen en la Tabla 6.1 los valores adoptados para los parámetros geotécnicos más relevantes.

6.3.1.3. Propiedades de los materiales

A la hora de definir las propiedades de los materiales que conforman el sistema se han empleado unos valores de referencia habituales para cada uno de ellos. Se ha considerado, por una parte, que los pilotes están ejecutados con hormigón armado, sin tener en cuenta en los cálculos la camisa perdida empleada en su ejecución. De este modo, los cálculos realizados se quedan del lado de la seguridad al no tener en cuenta la contribución de la camisa perdida a la capacidad estructural del pilote. Se emplearon los siguientes valores para las principales propiedades del hormigón armado: resistencia característica de 30 MPa, peso específico de 25 kN/m³, módulo de elasticidad de 30000 MPa, y coeficiente de Poisson igual a 0,2.

Por lo que respecta a las láminas, a diferencia de las de Vilanova de Arousa, que constaban de flejes metálicos de acero con un encofrado perdido de polietileno, se considera que el elemento estará constituido en su totalidad por acero. Se establecieron los siguientes valores para sus propiedades principales: límite elástico de 500 MPa, peso específico de 78,5 kN/m³, módulo de

elasticidad igual a 2100000 MPa, y coeficiente de Poisson 0,3.

Finalmente, en relación con los anclajes, se definió una carga máxima admisible para los mismos igual a 800 kN.

6.3.1.4. Acciones actuantes sobre el sistema

Además de las acciones derivadas del peso propio de los diferentes elementos del sistema y de los empujes provocados por el terreno se han considerado las siguientes acciones en el análisis del comportamiento estructural del sistema

- **Niveles de agua:** se ha tomado como nivel de referencia de las aguas la bajamar, suponiendo que el nivel freático en el trasdós se encuentra a la misma cota.
- **Sobrecargas de uso y explotación:** una vez en servicio la explanada portuaria estará sometida a sobrecargas asociadas a su uso. En este caso particular, al no considerarse inicialmente un uso específico para el muelle, se ha seleccionado una sobrecarga de 200 kN/m².
- **Sistema de amarre:** para tener en consideración los esfuerzos provocados en los bolardos por las líneas de amarre de los buques, se ha considerado un valor característico de carga de 1.000 kN aplicada sobre la superficie de la viga cantil correspondiente al pilote (3,00 x 1,50 m), dando lugar a una carga repartida de aproximadamente 225 kN/m².
- **Carga adicional transmitida por las láminas:** las láminas se simulan en el modelo numérico mediante elementos de tipo liners que contienen el terreno. Para considerar la transmisión de esfuerzos entre las láminas y el pilote principal se ha introducido una carga adicional de distribución triangular a lo largo de la vertical de su trasdós, simulando el empuje activo del relleno que asumiría el pilote. La carga aplicada tiene un valor de 320 kN/m² en el pie del pilote decreciendo linealmente hasta anularse al alcanzar la cota superior del relleno.

6. Adaptación a mayores calados

6.3.1.5. Fases consideradas en los cálculos

En la definición de las fases de cálculo del modelo numérico se ha considerado el nuevo procedimiento constructivo propuesto para incorporar las modificaciones necesarias para adaptar el sistema a mayores calados. No obstante, las fases de ejecución del relleno de trasdós se han subdividido en otras fases parciales para que la aplicación del empuje sobre las láminas y los pilotes se fuese realizando de forma gradual y, de ese modo, poder analizar con mayor detalle la evolución de los esfuerzos sobre los diferentes elementos.

6.3.2. Resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir del modelo numérico implementado. Se analizan los valores obtenidos de desplazamientos y esfuerzos en los pilotes, así como los esfuerzos axiales en los anclajes. Se realiza también una propuesta de sección de hormigón armado para los pilotes cuya validez estructural se comprueba mediante la determinación de sus diagramas de interacción correspondientes.

6.3.2.1. Desplazamientos

En las Figuras 6.11 y 6.12 se muestran los desplazamientos en las caras frontales del pilote principal y del pilote secundario para cada una de las fases de cálculo definidas en el modelo numérico. Se puede apreciar que los desplazamientos máximos debido a la flexión de los pilotes son del orden de los 12 mm para el pilote principal y de los 6 mm para el pilote secundario, siendo en ambos casos perfectamente asumibles.

6.3.2.2. Esfuerzos en los pilotes

Se analizaron los esfuerzos a los que estarán sometidos los pilotes en las diferentes fases de cálculo consideradas, teniendo en cuenta que los más relevantes son los momentos flectores.

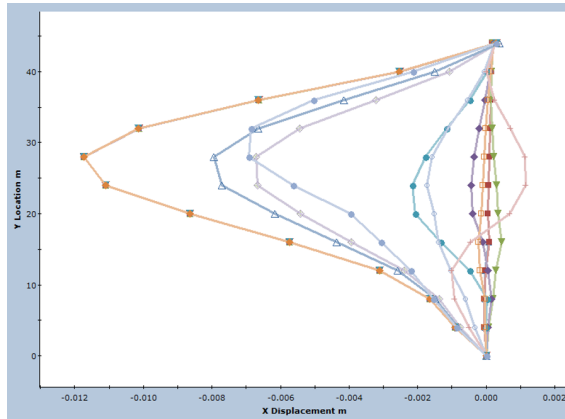


Figura 6.11: Desplazamientos en la cara frontal del pilote principal. **Elaboración propia.**

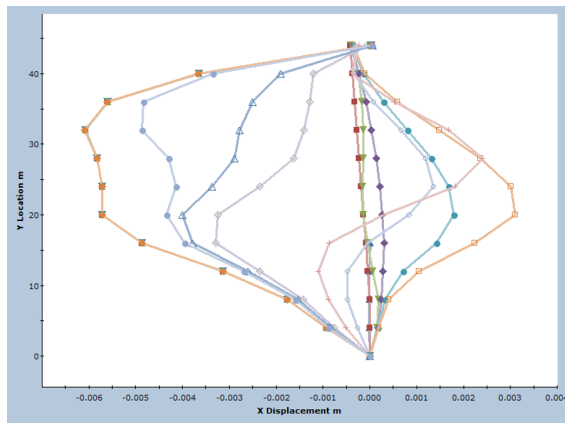


Figura 6.12: Desplazamientos en la cara frontal del pilote secundario. **Elaboración propia.**

En la Figura 6.13 se muestra los resultados obtenidos para el pilote principal en las diferentes fases de cálculo. Se puede observar que el valor máximo

6. Adaptación a mayores calados

del momento flector es algo inferior a los 500 kN·m, siendo este valor el que se empleará posteriormente para la comprobación de la sección.

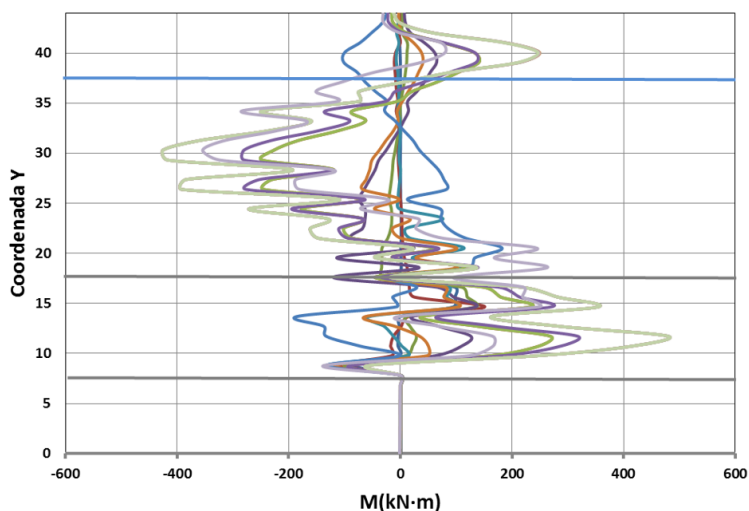


Figura 6.13: Momentos flectores en el pilote principal. **Elaboración propia.**

De igual modo, se muestra en la Figura 6.14 los resultados de momento flector correspondientes el pilote secundario en las diferentes fases de cálculo. En este caso se obtiene un valor máximo del orden de los 550 kN·m.

6.3.2.3. Comprobación de las secciones de los pilotes

Una vez conocidos los esfuerzos a los que están sometidos los pilotes se realiza en este apartado una propuesta de predimensionamiento para el armado de sus secciones, realizándose posteriormente una comprobación de su capacidad resistente.

Los materiales considerados para la sección de los pilotes son en ambos casos: hormigón de tipo HA-30 con una resistencia característica (f_{ck}) de 30 MPa y acero de tipo B-500-S con un límite elástico (f_y) de 500 MPa.

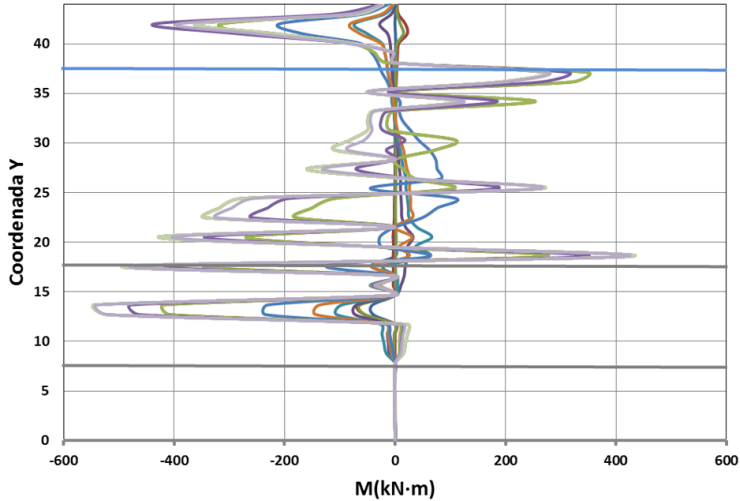


Figura 6.14: Momentos flectores en el pilote secundario. **Elaboración propia.**

Para la sección del pilote principal ($D = 1,50$ m) se propone emplear 32 barras de diámetro (ϕ) de 32 mm repartidas uniformemente en su perímetro con un recubrimiento (r) de 7,00 cm. En cambio, para el pilote secundario de 1,00 m de diámetro se propone una sección con 16 barras ($\phi = 32$ mm) con el mismo recubrimiento que en el caso anterior ($r = 7,00$ cm).

Para la comprobación estructural de las secciones se empleó el *Prontuario de Hormigón Estructural* [25] que permite calcular secciones de hormigón armado. Para determinar la capacidad resistente de las secciones anteriores a flexión compuesta recta se determinó el diagrama de interacción axil-momento correspondiente a cada una de ellas. En los cálculos se consideraron los siguientes coeficientes de minoración de resistencias: $\gamma_c = 1,50$ para el hormigón, y $\gamma_s = 1,15$ para el acero.

En las Tablas 6.2 y 6.3 se muestran los resultados obtenidos del análisis para las secciones del pilote principal y secundario respectivamente.

6. Adaptación a mayores calados

Tabla 6.2: Valores obtenidos del diagrama de interacción de la sección del pilote principal. Parámetros: x , distancia al eje neutro desde la fibra superior de la sección; Nu , valor de axil último; Mu , valor de momento flector último.

x (m)	Nu (kN)	Mu (kN·m)
$-\infty$	11189,5	0,0
0,130	7689,8	2167,9
0,249	4190,1	4217,7
0,337	690,3	6049,2
0,438	-2809,4	7467,0
0,545	-6309,1	8503,1
0,648	-9808,9	9179,5
0,749	-13308,6	9528,5
0,847	-16808,3	9504,7
0,937	-20308,1	9058,3
1,033	-23807,8	8436,8
1,138	-27307,5	7659,9
1,251	-30807,3	6685,7
1,378	-34307	5477,3
1,544	-37806,7	4000,4
1,966	-41306,5	2299,5
$+\infty$	-44806,2	0,0

A partir de estos valores se determinan los diagramas de interacción correspondientes (Figuras 6.15 y 6.16) que permiten delimitar la zona de resistencia de la mismas ante combinaciones de momento y axil.

En el caso del pilote principal (Figura 6.15), se puede apreciar que el valor de momento último (Mu) para una situación de axil nulo ($Nu = 0$) es del orden de los 6300 (kN·m), siendo ésta una situación conservadora con respecto al estado de esfuerzos del pilote, ya que estará sometido también a un esfuerzo de compresión, resistiendo valores superiores de momento flector. Tal y como se mencionaba anteriormente, el valor de flector máximo obtenido a partir

Tabla 6.3: Valores obtenidos del diagrama de interacción de la sección del pilote secundario. Parámetros: x , distancia al eje neutro desde la fibra superior de la sección; Nu , valor de axil último; Mu , valor de momento flector último.

x (m)	Nu (kN)	Mu (kN·m)
$-\infty$	5594,8	0,0
0,093	3965,1	647,5
0,172	2335,5	1277,8
0,225	705,8	1821,2
0,292	-923,8	2265,6
0,360	-2553,5	2569,2
0,429	-4183,1	2786,0
0,496	-5812,7	2903,3
0,559	-7442,4	2882,5
0,619	-9072,0	2735,4
0,682	-10701,7	2548,1
0,751	-12331,3	2317,2
0,827	-13961,0	2028,9
0,913	-15590,6	1670,2
1,023	-17220,3	1219,3
1,302	-18849,9	702,5
$+\infty$	-20479,6	0,0

de los resultados del modelo numérico era del orden de los 500 kN·m. Por lo tanto, se considera que bajo el estado de acciones considerado en este predimensionamiento inicial de la estructura, la sección del pilote principal dispone de capacidad resistente suficiente con un coeficiente de seguridad global elevado, ya que el valor de momento flector está muy por debajo del momento resistente último.

En el caso del pilote secundario (Figura 6.16), el valor de momento último (Mu) para una situación de axil nulo ($Nu = 0$) es del orden de los 2000 (kN·m),

6. Adaptación a mayores calados

siendo el valor de flector máximo obtenido para el pilote secundario era del orden de los 550 kN·m, por lo que se puede considerar igualmente que la sección dispone de capacidad resistente suficiente.

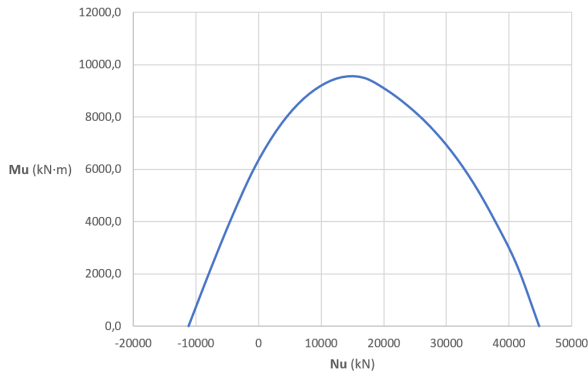


Figura 6.15: Diagrama de interacción Mu-Nu del pilote principal. **Elaboración propia.**

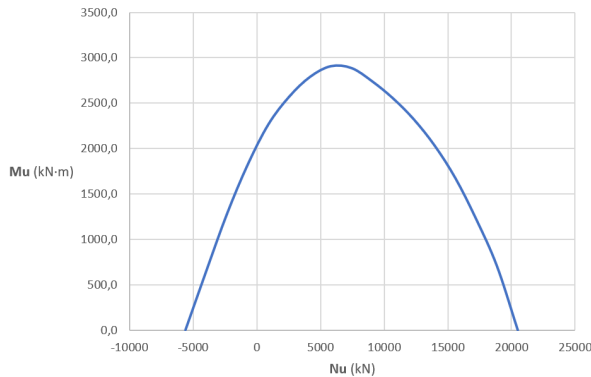


Figura 6.16: Diagrama de interacción Mu-Nu del pilote secundario. **Elaboración propia.**

6.3.2.4. Esfuerzos en las láminas

Por lo que respecta a las láminas los esfuerzos máximos obtenidos derivados de la contención del relleno de trasdós son del orden de los 80-100 kPa. En el caso del muelle de Vilanova de Arousa, la presión aplicada sobre las láminas era del orden de los 43 kPa, duplicándose por lo tanto el esfuerzo al que se ven sometidas. Tal y como se mencionaba anteriormente, se considera que las láminas en esta nueva configuración del sistema se deben fabricar en acero, cuyo espesor deberá dimensionarse acorde a los esfuerzos de tracción esperados. Por lo que respecta a las conexiones de las láminas con los pilotes, se considera que sigue teniendo validez el sistema empleado para el muelle de Vilanova de Arousa, consistente en el uso de secciones de tablestaca para materializar la unión entre los elementos.

6.3.2.5. Esfuerzos en los anclajes

Se ha analizado también la evolución de los esfuerzos en ambos anclajes. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 6.17 y 6.18, donde se observan los esfuerzos axiales del anclaje superior y el anclaje inferior respectivamente. Tal y como se mencionaba anteriormente, se ha considerado una carga de pretensado inicial de 500 kN en ambos anclajes. Este valor se incrementa en ambos casos a medida que se van completando las diferentes fases de cálculo del modelo pero de forma moderada (porcentajes de incremento por debajo del 10% de la carga inicial), manteniéndose siempre en unos niveles aceptables con respecto a su carga máxima admisible (800 kN).

6. Adaptación a mayores calados

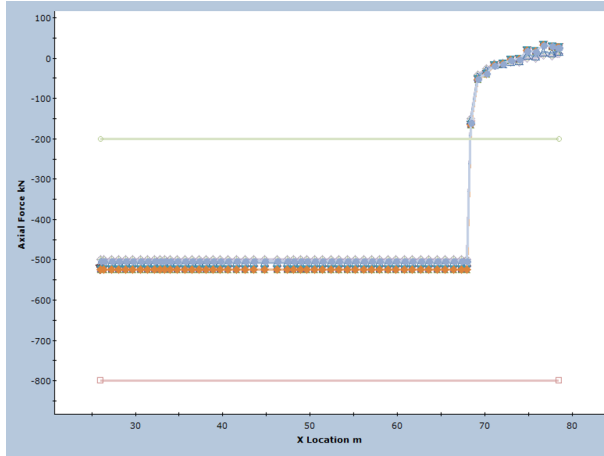


Figura 6.17: Esfuerzo axial al que está sometido el anclaje superior. **Elaboración propia.**

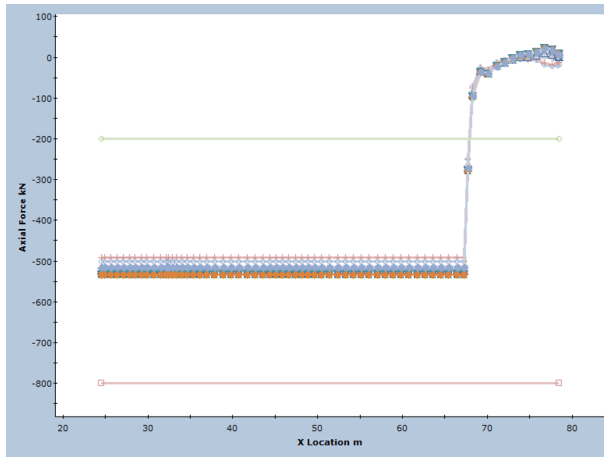


Figura 6.18: Esfuerzo axial al que está sometido el anclaje inferior. **Elaboración propia.**

6.4. Conclusiones

En este capítulo se ha analizado la viabilidad técnica del sistema Pilote-Lámina para su empleo en escenarios más exigentes en comparación con el existente en el puerto de Vilanova de Arousa, donde se ha ejecutado la primera experiencia exitosa de muelle con esta innovadora tipología.

Teniendo en cuenta las limitaciones del sistema, se han propuesto una serie de modificaciones a incorporar en su concepto original de cara a reforzar estructuralmente el sistema para poder emplearlo para muelles de mayor calado. Asimismo, se ha propuesto un nuevo procedimiento constructivo para llevar a cabo la ejecución del sistema.

Esta nueva propuesta de sistema Pilote-Lámina adaptado para mayores calados se ha analizado estructuralmente mediante la implementación de un modelo numérico 3D de elementos finitos empleando el software RS3 de Rocscience. Los resultados obtenidos han permitido comprobar la viabilidad técnica del sistema y realizar un predimensionamiento inicial del mismo ante un escenario genérico de diseño de un muelle de 20 m de calado y 26 m de altura total. No obstante, ante un caso particular de aplicación del sistema sería necesario realizar un estudio más detallado del mismo, teniendo en cuenta los requisitos específicos de diseño que deban considerarse.

6. Adaptación a mayores calados

7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Para finalizar, se exponen en este capítulo las conclusiones derivadas de la realización de esta Tesis Doctoral. Asimismo se plantean una serie de posibles líneas de investigación que permitirían continuar avanzando en la comprensión y el desarrollo del sistema Pilote-Lámina.

7.1. Conclusiones

Como principales conclusiones obtenidas se destacan las siguientes:

- Tras analizar en profundidad las principales tipologías estructurales empleadas en la construcción de obras de atraque y amarre, se propone una nueva tecnología innovadora denominada sistema Pilote-Lámina para su empleo fundamentalmente en la contención de rellenos portuarios. El sistema consta de dos elementos estructurales principales: pilotes y láminas, que se encargan de forma conjunta de soportar tanto el empuje del terreno como los esfuerzos generados en la explanada, trabajando los pilotes fundamentalmente a flexión y las láminas a tracción.
- La primera experiencia constructiva de un muelle ejecutado con el sistema Pilote-Lámina en el puerto de Vilanova de Arousa, ha permitido demostrar su aplicabilidad como sistema de contención de rellenos portuarios, poniendo de manifiesto una serie de ventajas con respecto a otras tipologías:
 - Disminución del coste económico
 - Nula inversión en maquinaria especializada
 - Menor consumo de materiales
 - Mayor trabajo en taller y prefabricación de elementos
 - Poca mano de obra

7. Conclusiones y futuras líneas de investigación

- Disminución del plazo
 - Posibilidad de prefabricar elementos
 - Mayor control de la mano de obra
 - Maquinaria sencilla y ligera
 - Menor impacto medioambiental
 - No se requieren dragados para tratar el lecho marino
 - Menor consumo de materiales
 - Ejecución sencilla
 - Maquinaria simple y fácil de conseguir
 - Poca mano de obra especializada
-
- A partir del análisis realizado de la primera experiencia constructiva se han identificado también varias cuestiones que conviene tener presente de cara a futuras aplicaciones del sistema, ya que podrían haberse diseñado o ejecutado de diferente modo. Las principales hacen referencia a tres aspectos: el procedimiento de ejecución de los pilotes, el material empleado para la fabricación de las láminas, y por último, el diseño y ejecución de los anclajes.
 - Se ha analizado el comportamiento hidrodinámico del sistema ante la acción del oleaje mediante la realización de ensayos de laboratorio con un modelo físico a escala reducida. Se han estudiado varios aspectos: presiones generadas sobre el sistema, reflexión, y posibles eventos de ampliación del oleaje o de rebase. A partir de los resultados obtenidos, se puede afirmar que el comportamiento hidrodinámico del sistema no difiere significativamente del correspondiente a una estructura de paramento vertical plano.
 - Se ha estudiado la viabilidad técnica del sistema Pilote-Lámina para su empleo en escenarios más exigentes en comparación con el existente en la primera experiencia constructiva. Se han propuesto una serie de modificaciones a incorporar en su concepto original de cara a reforzar

7.2. Futuras líneas de investigación

estructuralmente el sistema para poder emplearlo para muelles de mayor calado, y un nuevo procedimiento constructivo asociado para su ejecución. Las modificaciones propuestas consisten en introducir una segunda hilera de pilotes para generar pórticos con los pilotes principales, incorporar una segunda línea de anclaje, y coronar el relleno posterior con una escollera dejando una zona abierta en la parte superior de las láminas.

- El sistema Pilote-Lámina modificado, junto con su nuevo procedimiento constructivo, se han validado estructuralmente mediante modelización numérica. Se ha verificado, mediante la realización de un predimensionamiento inicial, su viabilidad técnica para su empleo en muelles de hasta 20 m de calado (26 m de altura total).

7.2. Futuras líneas de investigación

A raíz del desarrollo de esta Tesis Doctoral se han podido identificar una serie de líneas de trabajo que permitirían continuar avanzando en la comprensión y el desarrollo del sistema Pilote-Lámina como nueva tecnología de construcción de muelles portuarios, entre las que destacan las siguientes.

- Explorar la posibilidad de utilizar el sistema Pilote-Lámina en la construcción de otros muelles para poder analizar su comportamiento a escala real ante escenarios diferentes. Para ello, se está tratando de conseguir financiación, ya sea a través de fondos públicos o privados, para poder emplear esta nueva tecnología en nuevos proyectos portuarios.
- Valorar el empleo de otros materiales constitutivos o metodologías constructivas diferentes para mejorar las prestaciones del sistema o facilitar su ejecución. Una posibilidad ya contemplada en la patente del sistema es el empleo de láminas de hormigón, con una curvatura contraria a la de acero con el fin de que la misma trabaje a compresión.
- Estudiar la posibilidad de emplear el sistema con otras configuraciones diferentes a las propuestas en este trabajo, pudiendo ser una de ellas la generación de recintos cerrados.

7. Conclusiones y futuras líneas de investigación

- Analizar la posibilidad de emplear el sistema como estructura de disipación de oleaje, en lugar de como estructura de contención de rellenos. Para ello, se ejecutaría una línea de pilotes entre los que se situarían láminas que permitirían el paso del flujo por su parte inferior y actuarían de protección ante el oleaje.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Autoridad Portuaria de Ferrol-San Cibrao. *Plan Director del Puerto de Ferrol*, 1999.
- [2] Baquerizo, A. *Reflexión del oleaje en playas. Métodos de evaluación y de predicción*. Ph.D. thesis, Universidad de Cantabria (in Spanish), 1995.
- [3] Berenguer, J.M. *Pieza artificial para la construcción de diques, muelles y riberas de baja reflectividad*. Patente 2183671. Oficina española de patentes y marcas, 2003.
- [4] Bunch, B. W., Childs, J. Schroeder, P. (2011) *Confinement of contaminated dredged material utilizing the OPEN CELL SHEET PILE SYSTEM*. Ed. US Army Corps of Engineers. Engineer Research and Development Center-Environmental Laboratory.
- [5] Chapapría, V.E *Obras marítimas*. Ed: Universidad Politécnica de Valencia, 2020.
- [6] Cho, I.H., Kim, M.H. *Wave absorbing system using inclined perforated plates*. Journal of Fluid Mechanics 608, 1–20, 2008.
- [7] Enxa Galicia S.L. *Vídeo promocional sistema Pilote-Lámina*. <https://www.ecoportsp.com/>. Consultada el 02 de Mayo de 2022.
- [8] Esteban, F., Llamas, R. *Estructura de baja reflexión*. Patente de invención nº 2262405. Oficina española de patentes y marcas, 2007.
- [9] Franco, L. *Vertical breakwaters: the Italian experience*. Coastal Engineering, 22, pp. 31-55, 1994.

- [10] Franco, L., de Gerloni, M., Passoni, G., Zacconi, D. *Wave forces on solid and perforated caisson breakwaters: comparison of field and laboratory measurements*. Proceedings of the 26th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp. 1945-1958, 1998.
- [11] Fernández Muñoz, *Explotación de Puertos*. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Granada, Copicentro Granada S.L., 2008.
- [12] García García, E. F. *Sistema Pilote-Lámina*. Patente de invención ES2682044, 2017.
- [13] García García, E. F. *Mejora de sistema de contención de terrenos*. Patente de invención 2274661, 2003.
- [14] García García, E. F., Castro Ponte, A., Núñez Temes, C., Iglesias Rodríguez, G. *Sistema Pilote-Lámina. Una alternativa innovadora y sostenible para la construcción de infraestructuras portuarias*. VI Congreso Nacional de la Asociación Técnica de Puertos y Costas, Sevilla, 2018.
- [15] Garrido, J.M. (2011). *Análisis y estimación de la reflexión del oleaje en estructuras marítimas antirreflejantes tipo Jarlan*. Ph.D. thesis, Universidad Politécnica de Valencia.
- [16] Garrido, J.M., González-Escrivá, J.A. and Medina, J.R. *Block for Anti-Reflectant Quay*. WIPO Patent Application WO/2008/062086, 2008.
- [17] Garrido, J.M., González-Escrivá, J.A. and Medina, J.R. *Anti-Reflectant Breakwater*. WIPO Patent Application WO/2008/062087, 2008.
- [18] Goda, Y., Suzuki, Y. *Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments*. Proc., 15th ICCE, ASCE, 828-845, 1976.
- [19] Goda, Y. *Random seas and design of maritime structures*, World Scientific, Singapore, 2002.

- [20] Huang, Z., Li, Y., Liu, Y. *Hydraulic performance and wave loadings of perforated/slotted coastal structures: A review*, Ocean Engineering 38 (10), 1031-1053, 2011.
- [21] Hudson, R.Y., Hermann, F.A., Sager, R.A, Whalin, R.W, Keulegan, G.H., Chatham, C.E., Hales, L.Z. *Coastal Hydraulic Models. Special Report n° 5*, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1979.
- [22] Hughes, S. A. *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering. Advanced Series on Ocean Engineering*, vol. 7, World Scientific, 1993.
- [23] Ijima, T., Tanaka, E., Okuzono, H. *Permeable seawall with reservoir and the use of "Warock"*. Coastal Engineering 76, pp. 2623-2642, 1976.
- [24] Instituto de Estudos do Território. Infraestrutura de Datos Espaciais de Galicia. *Visualizador de mapas*. <http://mapas.xunta.gal/visualizador-de-mapas/>. Consultada el 02 de Mayo de 2022.
- [25] Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) y la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). *Prontuario informático del hormigón*, 2022.
- [26] Isaacson, M., Baldwin, J., Allyn, N., Cowdell, S. *Wave interactions with perforated breakwater*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE 126 (5), pp. 229–235, 2000.
- [27] Jarlan, G.E.A *perforated vertical breakwater*. The Dock and Harbour Authority, Vol. 41, n°486, pp. 394-398, 1961.
- [28] Jianyi, W. *Experimental study of perforated caisson breakwaters*. China Ocean Engineering, Vol. 6, pp. 65-78, 1992.
- [29] Ley 6/2017, de 12 de diciembre, de puertos de Galicia.

- [30] Liu, Y., Li, Y.C., Teng, B. *Wave interaction with a perforated wall breakwater with a horizontal porous plate*. *OceanEngineering* 34, 2364–2373, 2007.
- [31] Mansard, E.P., and Funke, E.R. *The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method*. Proceedings of the 17th Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers 1, pp. 154-172, 1980.
- [32] Martínez Santamaría J. M. *Técnicas y metodologías para la evaluación, caracterización y mejora de rellenos portuarios: propuesta de clasificación*. IV Congreso Nacional de la Asociación Técnica de Puertos y Costas. Valencia, 2012.
- [33] Medina, J.R, González-Escrivá, J. A., Fort, L., Martínez, S., Dolores, C., Ponce de León, D., Manuel, J., Yagüe, D., Garrido, J.M. y Berruguete, A. *Estructura Marítima Vertical con Cámaras de Unidades Múltiples para la Atenuación de la Reflexión de Oleaje*. Nº de patente ES200931049, 2009.
- [34] Medina, J.R., Garrido, J.M. and González-Escrivá, J.A. *Anti-Reflecting Modular Element*. WIPO Patent Application O/2008/059083, 2008.
- [35] Medina, J.R. *Estimation of incident and reflected waves using simulated annealing*. *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg., ASCE*, 127(4), 213-221, 2001.
- [36] Ministerio de Fomento. *Guía de Buenas Prácticas para la Ejecución de Obras Marítimas*, Ed. Ente Público de Puertos del Estado, 2009.
- [37] Ministerio de Fomento. *Manual para el diseño y la ejecución de cajones flotantes de hormigón armado para obras portuarias*, Ed. Ente Público de Puertos del Estado, 2006.
- [38] Ministerio de Fomento. *Observatorio de Obras Portuarias*, Ed. Ente Público de Puertos del Estado, 2013.

- [39] Ministerio de Fomento. *Real Decreto Legislativo 2/2011, de 5 de septiembre, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante.*
- [40] Ministerio de Fomento. *ROM 0.0-01: Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias.* Recomendaciones para Obras Marítimas, Ed. Ente Público de Puertos del Estado, 2001.
- [41] Ministerio de Fomento. *ROM 2.0-11: Recomendaciones para el proyecto y ejecución en Obras de Atraque y Amarre.* Recomendaciones para Obras Marítimas, Ed. Ente Público de Puertos del Estado, 2011.
- [42] Ministerio de Fomento. *ROM 4.1-18: Recomendaciones para el proyecto y construcción de pavimentos portuarios.* Recomendaciones para Obras Marítimas, Ed. Ente Público de Puertos del Estado, 2018.
- [43] Ministerio de Fomento. *ROM 0.5-05: Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias.* Recomendaciones para Obras Marítimas. Ed. Ente Público de Puertos del Estado, 2005.
- [44] Ministerio de la Presidencia, Real Decreto 470/2021 por el que se aprueba el *Código Estructural*, 2021.
- [45] Negro, V., Varela, O., Alonso, E. *Technological innovations in the conceptual design of vertical breakwaters.* Proceeding of Coastal Structures and Breakwaters 99, ASCE, pp. 505-514, 1999.
- [46] Nottingham, D. *Earth Retaining System such as a Sheet Pile Wall with Integral Soil Anchors.* U.S Patent No: US-7018141-B2, 2000.
- [47] Nottingham, D. *OPEN CELL™ BRIDGES.* Federal Highway Administration Accelerated Bridge Construction: Highway for Life Conference, 2008.
- [48] Pery, P. *Conceptos de Explotación y Planificación de Puertos.* Ed. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, 2003.

- [49] PND Engineers, Inc. (2016) *OPEN CELL SHEET PILE TECHNOLOGY Brochure*. <https://www.pndengineers.com/about-pnd>.
- [50] Polimón, J. *Dique rompeolas*. N° Patente ES 2232248. Oficina española de Patentes y Marcas, 2002.
- [51] Portos de Galicia. *Proyecto de muelle adosado al dique de Vilanova de Arousa*, 2010.
- [52] Sankarbabu, K., Sannasiraj, S.A., Sundar, V. *Hydrodynamic performance of a dual cylindrical caisson breakwater*. Coastal Engineering 55, pp. 431–446, 2008.
- [53] Shimatani, M., Ukai, A., Sekimoto, T., Ino, H. *Wave Dissipating Caisson and Wave Dissipating Structure*. Patent number JP2002275855, 2002.
- [54] Shiraiishi, N., Palmer, R.Q., Okamoto, H. *Quay wall with wave absorber Igloo*. Proceeding of International Conference on Coastal Engineering 76, ASCE, pp. 2677-2696, 1976.
- [55] Takahashi, S. *Design of vertical breakwaters. Reference Document N34*, Port and Harbour Research Institute, Japan, 2006.
- [56] Tsinker, G.P., *Handbook of port and harbor engineering: geotechnical and structural aspects*, Ed: Chapman and Hall, New York, 1996
- [57] Vázquez, M.V. *Análisis del comportamiento hidrodinámico de un dique vertical formado por cajones con patio interior y geometría cilíndrica*. Ph.D. thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2017.
- [58] Warnock, J. E. Hydraulic similitude. In *Engineering Hydraulics*. Rouse, H., John Wiley and Sons, New York, pp 136-176, 1950.
- [59] Zhu, S.T., Chwang, A.T. *Investigations on the reflection behaviour of a slotted seawall*. Coastal Engineering, 43, pp. 93–104, 2001.

- [60] Zhu, D., Zhu, S. *Impedance analysis of hydrodynamic behaviors for a perforated wall caisson breakwater under regular wave orthogonal attack*. *Coastal Engineering* 57(8), pp. 722–731, 2010.



En esta tesis, se presenta una nueva tipología de obra de atraque y amarre denominada sistema Pilote-Lámina, basada en el funcionamiento conjunto de pilotes y elementos tipo lámina. A nivel estructural, la respuesta del sistema se descompone entre ambos, de modo que los pilotes trabajen fundamentalmente a flexión y las láminas a tracción, consiguiendo una optimización de sus materiales constitutivos y aprovechando al máximo sus propiedades mecánicas. La viabilidad de esta nueva tipología se analiza desde diferentes puntos de vista (funcional, procedimiento constructivo, coste económico, efectos medioambientales, etc.) y se compara con otras tipologías existentes. Las conclusiones obtenidas permiten avanzar en el desarrollo de este innovador sistema como nueva tecnología de construcción de muelles portuarios.