

Anejo 11. Estudio de soluciones de muelles

Proyecto básico de ampliación del Puerto deportivo Poble Mar
(T.M. Puebla de Farnals, Valencia)

LLORENS BUFORT, María

Valencia, Junio de 2016



ÍNDICE

1. OBJETO	3
2. INTRODUCCIÓN.....	4
3. TIPOLOGÍA DE MUELLES.....	5
3.1. Obras fijas cerradas.....	6
3.1.1. Obras de gravedad.....	6
3.1.2. Obras de pantallas	11
3.2. Obras fijas abiertas.....	14
3.2.1. De pilotes	15
3.2.2. De pilas	16
3.2.3. Otros tipos	17
3.3. Criterios para elegir tipología estructural.....	17
4. ESTUDIO DE SOLUCIONES.....	19
4.1. Criterios	19
4.2. Coeficientes de ponderación	20
5. VALORACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS	22
5.1. Alternativa I.....	22
5.2. Alternativa II.....	23
5.3. Valoración final	24
6. ELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA.....	25



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Modelos obras fijas cerradas, según la ROM	5
Tabla 2. Modelos obras fijas cerradas, según la ROM	5
Tabla 3. Puntuación para cada valoración	20
Tabla 4. Coeficientes de ponderación de cada criterio	21
Tabla 5. Valoración de las alternativas según criterios	24
Tabla 6. Puntuaciones de las alternativas	25

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Obra de atraque de bloques, sección tipo	7
Ilustración 2. Muelle de hormigón sumergido, sección tipo	8
Ilustración 3. Obra de atraque de cajones, sección tipo	10
Ilustración 4. Obra de atraque de elementos en "L", sección tipo	11
Ilustración 5. Obra de atraque de pantallas sin plataforma superior de descarga, sección tipo	13
Ilustración 6. Obra de atraque de pantallas con plataforma superior de descarga, sección tipo	14
Ilustración 7. Obra de atraque de pilotes, sección tipo	16



1. OBJETO

Este anejo tiene como objeto decidir qué tipo de muelle es el más adecuado para poder ser ejecutado en la playa sur del Puerto deportivo de Puebla de Farnals.

En primer lugar, se expondrán todas las tipologías existentes de muelles que podemos encontrar en un puerto y se describirán cada una de ellas de manera detallada. A continuación, se procederá al análisis de cada una de las tipologías que se hayan considerado adecuadas para la ejecución de los muelles proyectados en la ampliación del presente anejo. Finalmente y tras el análisis anterior, se escogerá la mejor tipología de muelle para el Puerto Poble Marina y se justificará la decisión tomada.



2. INTRODUCCIÓN

Como se ha citado en el apartado anterior, el objetivo fundamental de una obra de atraque y amarre es proporcionar a los buques unas condiciones adecuadas y seguras para su permanencia en el puerto y para que puedan desarrollarse las operaciones portuarias necesarias para las actividades de carga, descarga, estiba, desestiba así como embarque y desembarque de pasajeros entre otros. Para todo esto nos hemos basado en la *ROM 2.0-11 "Recomendaciones para el proyecto y ejecución en Obras de Atraque y Amarre"*.

Las obras de atraque para uso náutico-deportivo, yates y mega yates, deben fundamentalmente garantizar la permanencia segura de los barcos en puerto, facilitando la accesibilidad de sus usuarios. El principal condicionante es que la configuración física del atraque debe permitir el máximo aprovechamiento del espacio disponible para flotas de características muy poco homogéneas.

Por dichas razones, la tipología más conveniente es el pantalán continuo si permanecen atracadas o los campos de boyas en las áreas de fondeo. Los pantalanes se pueden definir como estructuras de atraque y amarre, fijas o flotantes, que pueden conformar líneas de atraque tanto continuas como discontinuas, atracables a uno o ambos lados. El principal elemento diferencial respecto de los muelles es que no disponen de rellenos adosados y, por tanto, no dan lugar a la creación de explanadas. Debemos destacar que los muelles, en cambio, conforman una línea de atraque continua y están conectados con tierra total o parcialmente mediante rellenos a lo largo de la parte posterior de los mismos, lo que da lugar a la creación de explanadas traseras adosadas.



3. TIPOLOGÍA DE MUELLES

Hay diferentes clasificaciones a la hora de organizar las distintas tipologías de muelle. Estas clasificaciones varían en función de las características que se estudien en cada una de ellas. Así, los muelles pueden clasificarse de diversas maneras, las más destacadas y usuales están en función de:

- Posición: fijos o flotantes.
- Método e construcción: prefabricado o in situ.
- Materiales: hormigón, mampostería, etc.
- Afección a la lámina de agua: abiertos o cerrados.
- Modelo estructural: gravedad, pantallas o pilotes.

Como se ha dicho antes, se seguirán las recomendaciones recogidas en la *ROM 2.0-11*, dónde se recoge una clasificación general combinada en función del tipo de afección a la lámina de agua y de su posición, para dentro de ésta clasificar los distintos muelles en función del modelo estructural que defina su comportamiento. De esta manera, la clasificación de los muelles según la *ROM 2.0-11* en función de la tipología estructural de sus partes sería de la siguiente forma:

OBRAS FIJAS CERRADAS	de gravedad	<i>bloques</i>
		<i>hormigón sumergido</i>
		<i>cajones</i>
		<i>otros tipos: en L, entramados...</i>
	de pantallas	<i>sin plataforma superior</i>
	de tablestacas	<i>con plataforma inferior</i>

Tabla 1. Modelos obras fijas cerradas, según la ROM

OBRAS FIJAS ABIERTAS	de pilotes
	de pilas
	otras

Tabla 2. Modelos obras fijas cerradas, según la ROM

Basándonos en las tablas anteriores a continuación se nombrarán las distintas tipologías de muelle que a priori sí podrían tener cabida en nuestro proyecto, las describiremos y atendiendo a lo descrito, haremos una criba para reducir así de manera sistemática el análisis posterior.



3.1. Obras fijas cerradas

Las obras de gravedad fijas masivas o cerradas son aquellas en las que la parte estructural conforma un paramento continuo vertical o cuasi vertical de la línea de atraque desde la superestructura a la cimentación. Aunque en general no permiten el flujo importante de agua a través de ellas, algunas veces este paramento puede disponer de huecos con objeto de reducir la posibilidad de reflexiones debidas a la acción del oleaje.

En función de la forma en que la estructura resiste las acciones y las transmite al terreno de cimentación se dividen en:

3.1.1. Obras de gravedad

En las obras de gravedad, la estructura resiste las acciones debidas a las cargas de uso y explotación y, en su caso, al relleno del trasdós, mediante su propio peso, transmitiéndolas al cimiento normalmente a través de una banqueta de cimentación de escollera, todo uno u otro material granular.

Debido al modo de su funcionamiento resistente, la concepción de este tipo de obras exige disponer tanto de pesos importantes como de superficie considerable en la cimentación que permitan la movilización de una mayor resistencia por rozamiento en el contacto estructura-cimiento para aumentar la resistencia al deslizamiento, reducir las presiones de contacto sobre el terreno para aumentar la resistencia al hundimiento y centrar el punto de aplicación de la resultante de las acciones para aumentar la resistencia al vuelco. Por estas razones, este tipo de estructuras requiere suelos de cimentación de elevada capacidad portante, localizados en niveles accesibles. Estos suelos pueden ser tanto naturales como mejorados o procedentes de una sustitución.

En función de las características de la estructura, las obras de gravedad se dividen en:

3.1.1.1. De bloques

La estructura resistente está formada por bloques de materiales pétreos o prefabricados de hormigón. Los bloques pueden ser macizos o huecos, rellenándose posteriormente con un material de préstamo granular o con hormigón. En general son paralelepípedicos, aunque a veces se construyen con planos inclinados o achaflanados en las caras de trasdós o intradós, con el objeto de reducir las presiones, o de centrar la resultante. Debido a los condicionantes impuestos por el proceso constructivo, los pesos de los bloques prefabricados suelen ser los máximos que permitan los medios disponibles para su puesta en obra, aunque son usuales pesos comprendidos entre 150 y 2000 kN.

La capacidad resistente radica en la movilización del rozamiento entre bloques, los cuales pueden o no estar solidarizados entre sí.

Una sección tipo de esta obra de atraque se recoge en la *Ilustración 1*. La geometría de la sección puede ser muy variada, pero en general puede asimilarse a formas rectangulares o trapezoidales en las que la base es del orden del 50 al 80% de



la altura. Para bloques intermedios, apoyados en otro bloque inferior, la relación base/altura anterior suele estar alrededor del 50% por razones de estabilidad. La anchura de coronación depende de la altura de la superestructura y de los elementos auxiliares a disponer sobre ella, los valores más usuales oscilan entre 1 y 4 m.

El paramento de atraque es generalmente vertical, aunque la presencia de la defensa permite avanzar la base del muro entre 0,5 y 1,0 m, inclinando ligeramente el paramento o haciendo sobresalir el bloque inferior. Esta disposición mejora la resistencia al vuelco y al hundimiento, al centrar el punto de aplicación de la resultante sobre la base de la cimentación.

En el caso de que se disponga un relleno, el paramento del trasdós puede ser vertical, inclinado o escalonado. Los escalonados en el sentido de reducción de la anchura aprovechan el peso del trasdós sobre el escalón y por lo tanto reducen el volumen de hormigón. A veces, y principalmente por razones constructivas, el bloque de la segunda hilada inferior es el mismo de la base colocado del revés, como en la *Ilustración 1*, lo que favorece el aprovechamiento del peso del relleno y el centra do de la resultante. Esta tipología estructural suele ser adecuada para alturas desde coronación a cimientos inferiores a 15 m o en obras de pequeña longitud por requerir menor inversión inicial.

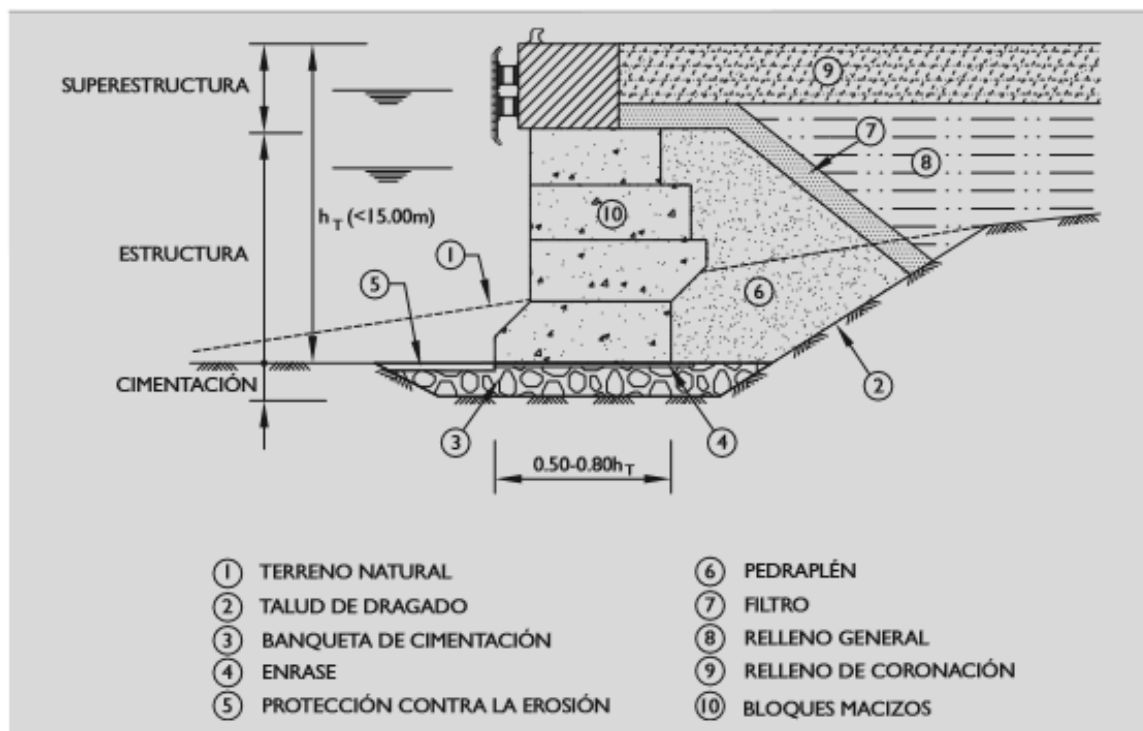


Ilustración 1. Obra de atraque de bloques, sección tipo

3.1.1.2. De hormigón sumergido

La construcción de este tipo de muelles se lleva a cabo bajo el agua, casi en su totalidad, con procedimientos de hormigón sumergido, es decir, bombeando un hormigón rico en cemento con el extremo del tubo embutido en la masa de la zona a hormigonar para que, al expandirse, se evite al máximo el lavado del cemento y el árido fino.



Inicialmente, este sistema se aplicó a muelles de pequeña altura asentados sobre terreno resistente pero en la actualidad se utiliza también en terrenos de baja capacidad portante, sobre banquetas de escollera. Este tipo de muelles está indicado donde no exista espacio para la prefabricación de bloques o medios para su colocación.

Normalmente, las dificultades planteadas por el encofrado obligan a adoptar secciones rectangulares con escasos resaltos o escalones, como podemos observar en la *Ilustración 2*. El hormigonado puede realizarse por tongadas horizontales de 1,50 m de altura mínima, o en sección completa. En el primer caso, el encofrado se limita a las caras laterales de las diferentes tongadas, apoyados en la base o en la tongada inmediatamente anterior, siendo frecuente también utilizar bloques de hormigón como encofrado perdido. Estos bloques tienen entrantes para que penetren por ellos el hormigón y lograr así una mejor unión con el macizo hormigonado in situ. Las juntas horizontales se hacen con llaves para evitar el deslizamiento entre tongadas. Cuando se hormigona en sección completa, por módulos, el encofrado tiene forma de U en planta, acoplando cada puesta en el módulo anterior, dejando una llave vertical.

Como en el caso de las obras de bloques de hormigón, esta tipología estructural suele ser adecuada para alturas desde coronación a cimientos inferiores a 15 m o en obras de pequeña longitud por requerir menor inversión inicial. La relación anchura de la base/altura total se sitúa también entre 0,50 y 0,80 m.

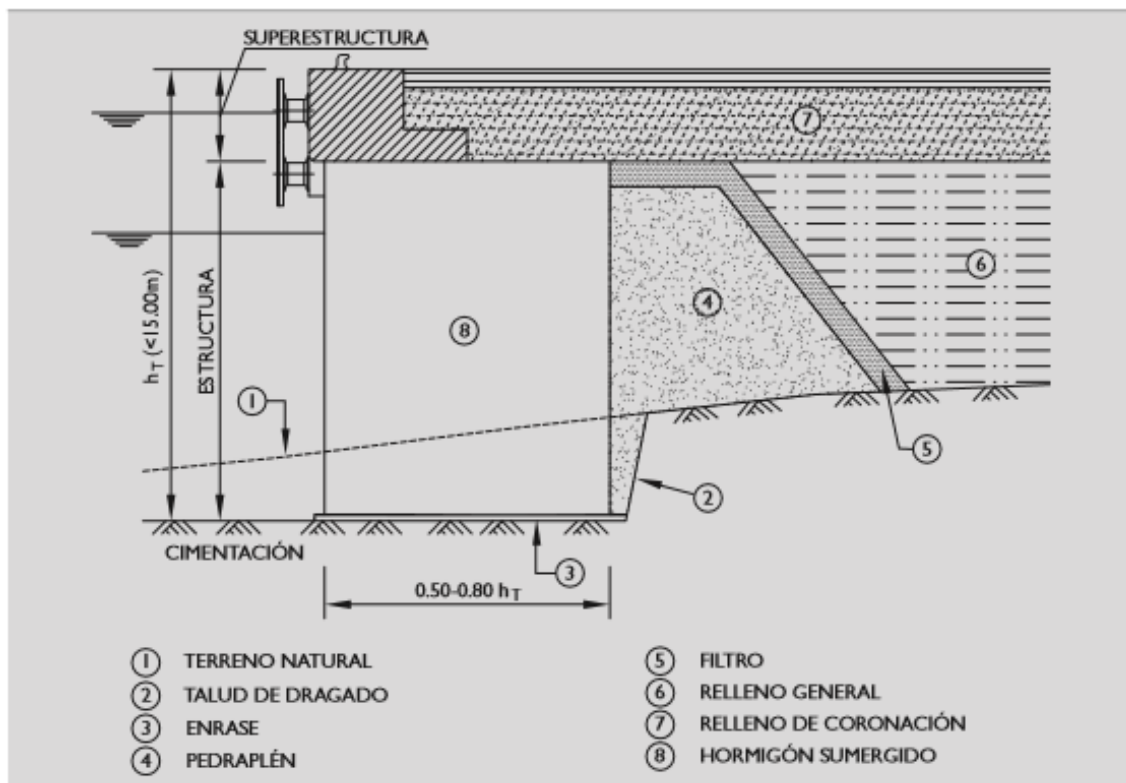


Ilustración 2. Muelle de hormigón sumergido, sección tipo



3.1.1.3. De cajones

La estructura resistente está formada por cajones prefabricados que habitualmente son de hormigón armado (pudiendo ser alternativamente de hormigón pretensado, metálicos o mixtos), aligerados por celdas, contruidos en seco o en diques flotantes y posteriormente remolcados, fondeados y rellenados con agua, material granular o con hormigón pobre.

Los cajones flotantes pueden ser de diferentes formas y tamaños tanto en planta como en alzado, dependiendo de las condiciones y posibilidades constructivas locales. Las plantas y alzados rectangulares son los más usuales. En general, están contruidos por la solera, el fuste, con celdas normalmente rectangulares, cuadradas o circulares en toda su altura, y las zapatas o zonas voladas de la solera con respecto al fuste. Una sección tipo de esta obra de atraque se recoge en la *Ilustración 3*.

La anchura del fuste del cajón o manga viene fundamentalmente determinada por la capacidad resistente y la estabilidad necesaria de la obra de atraque, aunque también por la estabilidad naval del cajón o por condiciones operativas, como el caso en que se necesita recoger con el cajón la pata trasera de la grúa. Aumentando esta dimensión o rellenando únicamente las filas de celdas más cercanas al trasdós es posible reducir las presiones de contacto con el terreno. Para muelles, por razones de estabilidad, son usuales valores entre el 60% y el 80% de la altura, y no mayores de 25 m, aunque hay cajoneros capaces de fabricar cajones de más de 32 m de manga. La altura del fuste para el calado de proyecto viene determinada por condiciones y posibilidades constructivas y de estabilidad naval, considerando una cota de coronación que permita condiciones de trabajo aceptables tanto en el relleno de sus celdas como en la construcción de la superestructura. En España se han alcanzado alturas de hasta 38 m. En cuanto a la longitud del cajón depende también principalmente de las condiciones y posibilidades constructivas disponibles. Las dimensiones más usuales oscilan entre 25 y 40 m. En España se han alcanzado esloras de hasta 66 m.

Otras características dimensionales generales de la sección son:

- Espesor de la solera y la zapata: 0,40 - 1,00 m
- Vuelo de las zapatas: 0,50 - 1,50 m
- Diámetro de celdas circulares: 2, 50 - 3,50 m
- Lado de celdas rectangulares: 3,50 - 4,50 m
- Espesor de las paredes exteriores de celdas circulares: 0,20 - 0,40 m
- Espesor de las paredes exteriores de celdas rectangulares: 0,25 - 0, 50 m
- Espesor de las paredes interiores de celdas circulares en el punto de tangencia: 0,15 - 0, 25 m
- Espesor de las paredes interiores de celdas rectangulares: 0,20 - 0, 30 m



Esta tipología estructural tiene un amplio rango de aplicación, siendo particularmente indicada desde calados de 10 m a calados muy superiores a los 20 m.

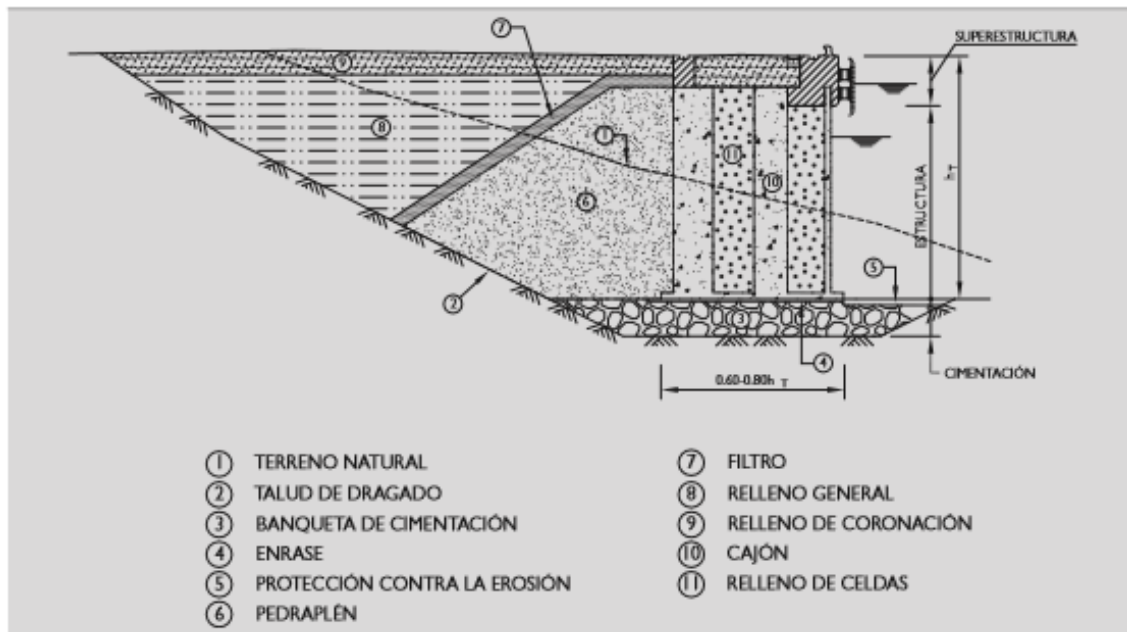


Ilustración 3. Obra de atraque de cajones, sección tipo

3.1.1.4. Otros tipos

Dentro de esta tipología pueden citarse los cajones parcialmente sin solera, aunque no son muy utilizados. Estos mejoran la resistencia al deslizamiento en el contacto estructura-cimiento, aunque producen mayores presiones sobre el terreno de cimentación. En este caso pueden tratarse como recintos. Cuando existan terrenos muy poco competentes en las capas superiores, con espesores moderados sobre el terreno firme, este tipo de cajones puede hincarse, evitando las banquetas de cimentación y reduciendo los dragados necesarios (cajones indios).

Aunque no son muy utilizadas en España, existen otros tipos de obras de gravedad en las que la estructura resistente está formada por elementos en “L”, entramados y otras disposiciones constructivas. El funcionamiento resistente de las estructuras en “L” es similar a los muros de contención clásicos. A su vez, el funcionamiento y las características dimensionales generales son comparables con las de las obras de cajones, en las que se carece de pared de trasdós. En este caso, garantizar el mantenimiento en el tiempo del relleno del trasdós sobre la solera es clave para la estabilidad de la obra. Los elementos en “L” suelen construirse “in situ”, en seco o más comúnmente ser prefabricados, con alturas pequeñas de hasta 7 m. No obstante, con contrafuertes se han alcanzado alturas hasta 20 m. Su longitud varía entre 3 y 12 m, dependiendo de la disponibilidad local de los equipos de puesta en obra. Una sección tipo de esta obra de atraque se recoge en la *Ilustración 4*.

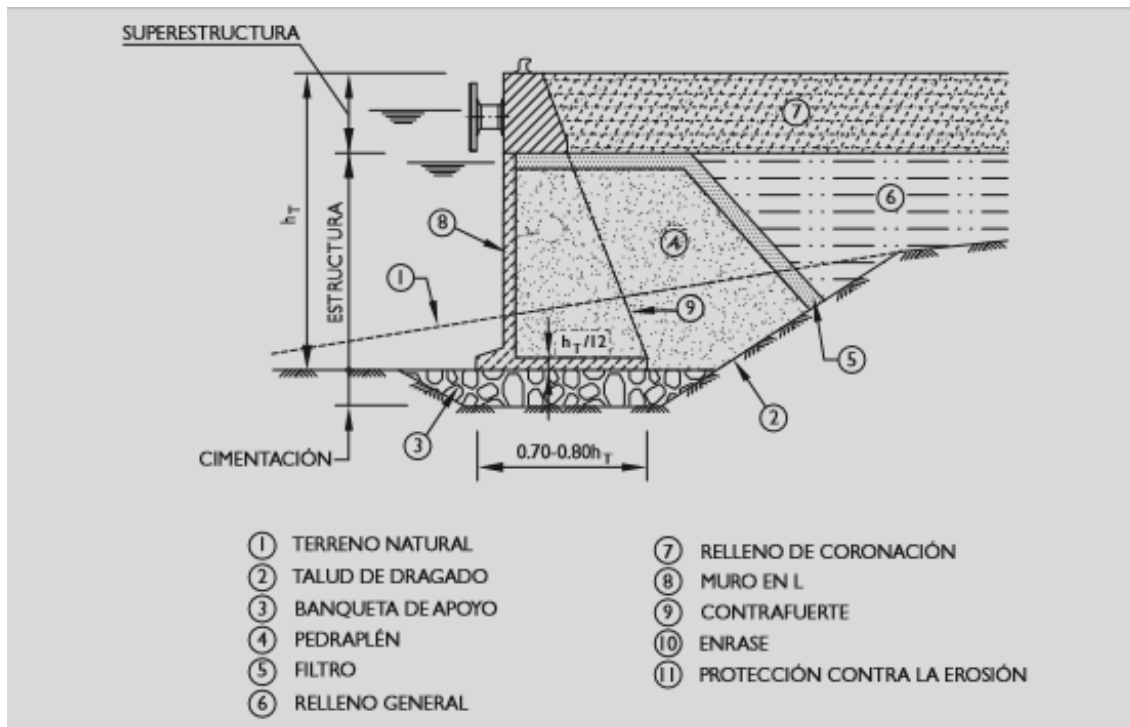


Ilustración 4. Obra de atraque de elementos en "L", sección tipo

3.1.2. Obras de pantallas

En las obras de pantallas, la estructura transmite las acciones horizontales debidas al terreno y a la totalidad o a parte de las cargas de uso y explotación, mediante su empotramiento o apoyo en el terreno de cimentación y la disposición de anclajes en el trasdós, lo que permite el equilibrio de los empujes generados por el terreno de cimentación y por el relleno a ambos lados de la pantalla, combinados con la acción (o reacción) de los anclajes.

La capacidad resistente de la estructura radica fundamentalmente en su capacidad de resistir los esfuerzos de flexión y cortante que se generan a lo largo de la misma.

Esta tipología está especialmente indicada en terrenos arenosos y limosos, se puede utilizar en terrenos cohesivos blandos y está contraindicada cuando el terreno está constituido por roca dura que impida la hincia o en terrenos arenosos con bolos que impidan alcanzar los empotramientos necesarios.

En función de que se disponga o no de elementos estructurales adicionales a la propia pantalla que transmitan directamente al terreno de cimentación parte de las cargas de uso y explotación, las obras de pantallas se dividen en pantallas sin plataforma superior de descarga y las pantallas con esta plataforma. Vamos a analizar ambos tipos.



3.1.2.1. De pantallas sin plataforma superior de descarga

La estructura resistente está constituida únicamente por una pantalla vertical o ligeramente inclinada, y por uno o varios anclajes que contribuyen a aumentar su rigidez y colaboran en su capacidad resistente.

La pantalla puede estar formada por tablestacas metálicas hincadas o por hormigón armado realizado “in situ”.

3.1.2.1.1. Tablestacas

Las pantallas de tablestacas metálicas suelen estar formadas por perfiles simples en “U”, en “Z” o compuestos por elementos de mayor inercia (perfiles laminados en H, tubos metálicos, etc.) entre los que se intercalan tablestacas. La acción de los anclajes suele transmitirse a una viga de reparto que, en el caso de las pantallas de tablestacas, es habitualmente metálica y cuya misión es transmitir la fuerza de anclaje a las tablestacas individuales.

El sistema de anclaje suele ser pasivo, pudiendo consistir en barras o cables de acero unidos debidamente a la pantalla y a una estructura trasera de anclaje que puede consistir en otra pantalla más corta, en un muerto de hormigón, o en una placa vertical, horizontal o inclinada. El muerto o la placa pueden estar simplemente apoyados en el terreno o cimentados sobre pilotes que proporcionan mayor capacidad de reacción.

Para desarrollar el anclaje pasivo se necesita una anchura de casi el 150% de la altura libre de la tablestaca. Los anclajes pasivos deben estar posicionados por encima del nivel medio del mar y dimensionados para evitar flexiones por los asientos del terreno. No obstante lo anterior, el sistema de anclaje también puede ser activo. En este caso suele estar formado por cables de pretensado, barras de acero o micro pilotes alojados en perforaciones y unidos en su parte final al terreno mediante bulbos inyectados de mortero o lechadas de cemento.

La superestructura está constituida por una viga de hormigón en cabeza capaz de repartir las acciones horizontales de uso y explotación que actúan en coronación a lo largo de una cierta longitud de la obra. No suele tener excesiva capacidad para resistir acciones verticales importantes, salvo que se dispongan elementos de transmisión de cargas de la superestructura a las tablestacas.

Generalmente esta tipología estructural suele ser adecuada para alturas libres alrededor de 10 m, aunque se pueden alcanzar hasta 20 m con tablestacas simples y hasta 30 m con tablestacas compuestas.

3.1.2.1.2. Pantallas de hormigón armado

Las pantallas de hormigón armado suelen ser de sección rectangular, o en “T”, con espesores que generalmente oscilan entre 0,60 y 1,20 m. También pueden construirse pantallas con pilotes tangentes. El sistema de anclaje suele ser en la mayor parte de los casos activo, debido a su menor deformabilidad, aunque también pueden ser pasivos. Los sistemas de anclaje son similares a los descritos para las pantallas de tablestacas.



En muchos casos, la coronación de la propia pantalla de hormigón tiene funciones de superestructura, teniendo incluso capacidad para soportar cargas verticales importantes como las producidas por los equipos de manipulación de mercancías.

Este tipo de pantallas puede construirse prefabricadas (pilotes hincados próximos, perfiles machihembrados, etc.) u hormigonadas “in situ” mediante excavación previa del terreno, manteniendo estable la excavación a base de productos tixotrópicos como la bentonita y posterior hormigonado, por lo que debe realizarse desde terreno seco, pudiendo ser éste natural o un relleno provisional. Para esta última metodología constructiva es conveniente que el suelo no sea excesivamente permeable o presente huecos o cavidades importantes.

En función del espesor de la sección resistente adoptado, esta tipología permite alturas libres superiores a los 20 m.

A continuación, en la *Ilustración 5*, se puede observar una sección tipo de una obra de atraque ejecutada mediante pantallas. Esta sección es válida tanto para tablestacas como para pantallas de hormigón.

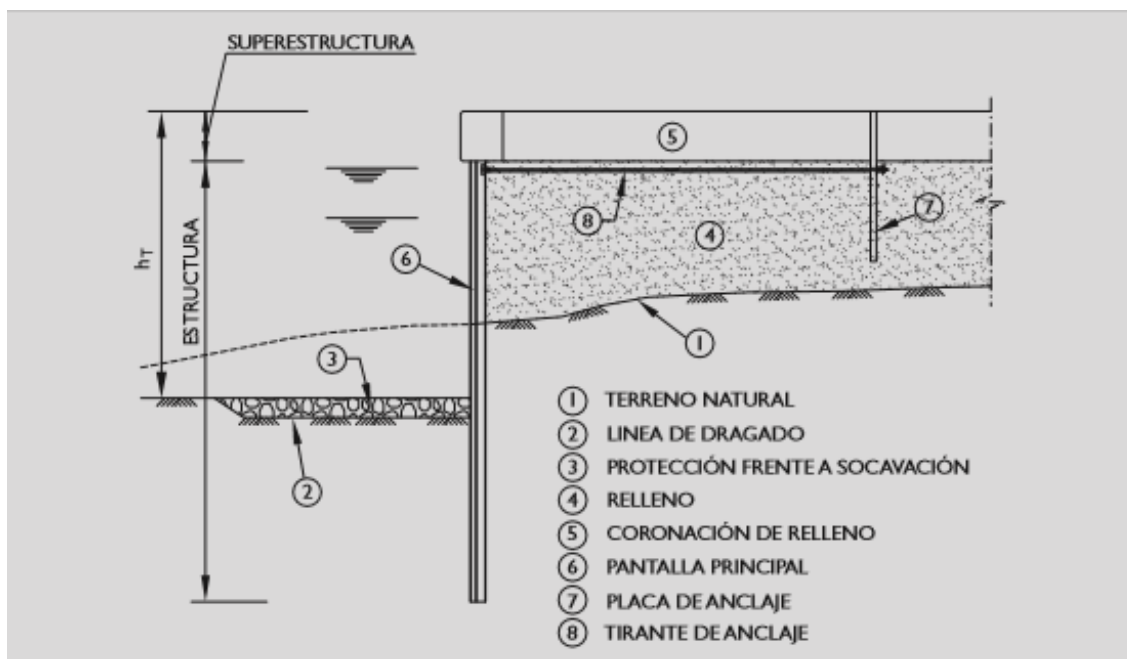


Ilustración 5. Obra de atraque de pantallas sin plataforma superior de descarga, sección tipo

3.1.2.2. De pantallas con plataforma superior de descarga

La estructura resistente es idéntica a la correspondiente a las pantallas sin plataforma superior, con la incorporación, en coronación de la pantalla, por encima del nivel de las aguas exteriores, de una plataforma de hormigón armado en el trasdós, sustentada en la propia pantalla y en varios pilotes verticales y/o inclinados.

La función principal de esta plataforma es disminuir los empujes del terreno de trasdós y transmitir directamente las cargas de uso y explotación a la cimentación sin



incrementar los esfuerzos horizontales sobre la pantalla. Por esa razón puede ser conveniente utilizar esta tipología para pantallas con alturas libres altas y/o cuando las cargas verticales de uso y explotación son muy importantes, cuando los perfiles de tablestacas disponibles localmente son pequeños y, por tanto, no son capaces de resistir grandes esfuerzos de flexión, así como no se disponga de la anchura necesaria para el desarrollo de los empujes. Para ello, una referencia de la anchura de la plataforma puede ser la suficiente para que corte el plano de rotura del suelo del trasdós.

Las acciones horizontales de uso y explotación son transmitidas al terreno por la pantalla, los pilotes y, en su caso, por los anclajes.

Esta tipología de obra de atraque, que no ha sido utilizada prácticamente en España, suele ser adecuada para alturas libres entre 15 y 20 m. Una sección tipo de esta tipología de obra de atraque se recoge en la *Ilustración 6*.

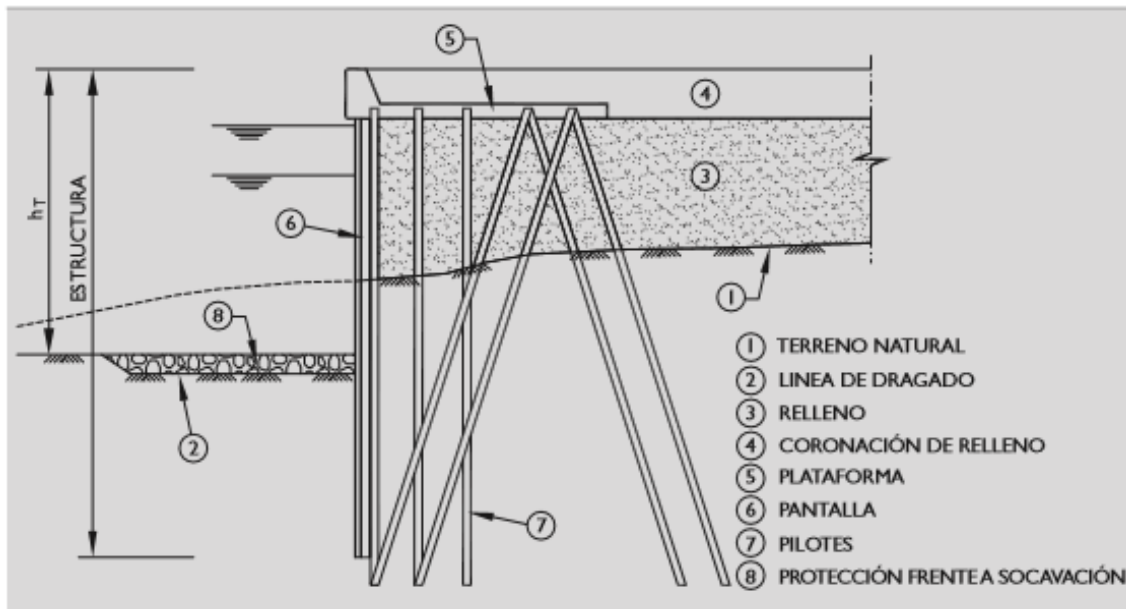


Ilustración 6. Obra de atraque de pantallas con plataforma superior de descarga, sección tipo

3.2. Obras fijas abiertas

Las obras fijas abiertas o muelles plataforma son aquellos en las que la estructura está formada por una plataforma sustentada en pilotes o pilas, siendo el paramento que conforma la línea de atraque no continuo, permitiendo el paso del flujo del agua.

En el caso de que exista un relleno adyacente, la plataforma supone la prolongación de la coronación del relleno sobre el talud del mismo hasta que alcanza la línea de atraque.

Puede considerarse que en esta tipología la estructura integra los elementos de la superestructura propiamente dicha.



En función de la forma en que la estructura resiste las acciones y las transmite al terreno de cimentación, los muelles pueden dividirse en muelles de pilotes, muelles sobre pilas u otros tipos.

3.2.1. De pilotes

La estructura resistente está formada por una plataforma sustentada en pilotes verticales y/o inclinados y, en el caso de que exista un relleno adosado, puede complementarse con una estructura de contención de tierras y de unión con la plataforma en la coronación del talud. También pueden disponerse anclajes en la plataforma con el objeto de mejorar la capacidad resistente de la obra ante cargas horizontales.

La estructura transmite al terreno de cimentación todas las acciones de uso y explotación actuantes sobre el tablero por medio de los pilotes. Cuando todos los pilotes son verticales, están solicitados por esfuerzos axiles, cortantes y de flexión. En caso de disponer pilotes inclinados o verticales e inclinados, estarán solicitados fundamentalmente por axiles. Los pilotes deben empotrarse en el terreno resistente la longitud necesaria para que la transmisión de cargas pilote-terreno reúna las debidas condiciones de seguridad.

Los pilotes pueden ser de hormigón moldeado “in situ” o prefabricados hincados: módulos de pantalla, perfiles metálicos (tubulares o de perfil en H), de hormigón pretensado o mixtos (tubos rellenos de hormigón). Pueden alcanzar profundidades elevadas de hasta 50 m. Las dimensiones en planta, y por tanto la capacidad estructural de los pilotes debe estar en consonancia con la resistencia del terreno y con la profundidad alcanzada. En pilotes hormigonados “in situ” son usuales diámetros entre 0,6 y 2 m. La malla de su disposición en planta suele ser rectangular. La distancia entre pilotes depende de la magnitud y canalización de las cargas de explotación que actúan sobre el tablero, buscando una solución de equilibrio entre capacidad portante del tablero y de los pilotes. No suelen ser usuales separaciones entre ejes de pilotes mayores de 8 m. La longitud de los mismos depende del tipo de terreno, hasta alcanzar el nivel de profundidad que permita por punta y/o fuste resistir las acciones verticales transmitidas y, en su caso, movilizar las reacciones horizontales necesarias para resistir parte o la totalidad de las acciones horizontales.

La plataforma es normalmente de hormigón armado, pudiendo estar constituida por partes prefabricadas y por partes hormigonadas “in situ”.

La contención del relleno en la coronación del talud puede hacerse con una solución de gravedad, con muros de hormigón prefabricados o contruidos “in situ”, normalmente cimentados por encima del nivel medio del mar, o alternativamente puede utilizarse una solución de pantalla de tablestacas.

Es de especial relevancia la posibilidad de asientos diferenciales entre el trasdós flexible y la plataforma rígida, asientos que pueden dificultar la explotación del muelle por los necesarios recrecidos del pavimento del trasdós. Asimismo, es posible la rotura de pilotes por falsas maniobras de atraque, sobre todo con los bulbos de los buques, circunstancia a tener en cuenta en la conservación de las obras de esta tipología. A continuación, en la *Ilustración 7*, podremos observar una sección tipo de esta tipología.



Esta tipología de obra de atraque y amarre puede ser construida para todo calado y en prácticamente cualquier tipo de suelo. Las dificultades que pueden ofrecer ciertos niveles duros que hayan de atravesarse o el empotramiento en roca pueden resolverse con pilotes perforados y hormigonados “in situ”. No obstante, su utilización es obligada en aquellos terrenos en los que el sustrato resistente está a una profundidad excesiva respecto del calado de proyecto.

No obstante lo anterior, cuando el sustrato resistente está a una gran profundidad, la estructura de pilotes puede llegar a ser muy flexible, generando movimientos que pueden ser incompatibles con las condiciones de explotación requeridas. En estos casos, así como cuando las cargas horizontales sean tan elevadas que no permitan un dimensionamiento razonable de la estructura, es recomendable ir a soluciones mixtas, separando la plataforma de los puntos de atraque y amarre utilizando duques de alba o bien, rigidizando la estructura mediante caballetes de pilotes inclinados.

Además, se deberá tener en cuenta las situaciones de “rozamiento negativo”, es decir, aquellas en las que el asiento del terreno de la explanada es mayor que el de la cabeza de los pilotes. Dichas situaciones conducen a esfuerzos de compresión sobre los pilotes mayores que los debidos a las cargas transmitidas por la estructura.

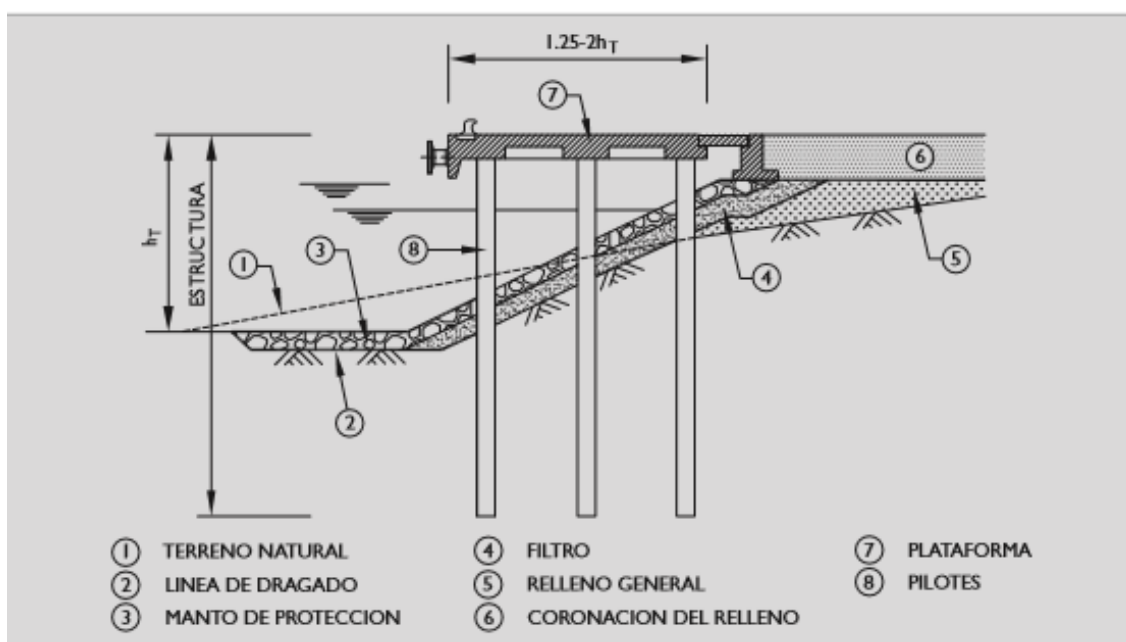


Ilustración 7. Obra de atraque de pilotes, sección tipo

3.2.2. De pilas

La estructura resistente se diferencia de la de pilotes en que está formada por una plataforma apoyada en pilas, generalmente constituidas por estructuras de gravedad.

La resistencia de las cargas verticales y horizontales de uso y explotación y su transmisión a la cimentación se realiza a través de las pilas, mediante su propio peso y



la resistencia al deslizamiento en el contacto estructura-cimiento. En general, la plataforma no se dimensiona para resistir las grandes acciones horizontales de atraque y amarre que se aplican directamente a las pilas.

Las pilas deben situarse a una separación adecuada a la capacidad resistente del tablero que las une, recomendándose que la cara inferior de las vigas integrantes del tablero esté situada por encima del nivel del mar en cualquier condición de marea. Por otra parte, en puertos comerciales, la separación entre pilas no será mayor que la máxima separación admisible entre defensas o puntos de amarre.

Dado que las pilas generalmente son obras de gravedad, esta tipología estructural requiere suelos de cimentación de elevada capacidad portante, localizados a niveles accesibles. Estos suelos pueden ser tanto naturales como mejorados o rellenos de sustitución. Se recomienda que los apoyos de los tableros sobre las pilas sean isostáticos, para absorber mejor los asientos diferenciales entre ellas.

Cuando la anchura de la estructura de un muelle de pilas permite el desarrollo del talud bajo los tableros, siendo éstos rectos o abovedados, el muelle se denomina tipo “claraboya”.

3.2.3. Otros tipos

Otro tipo de obras fijas abiertas es el de las estructuras metálicas rigidizadas en el plano horizontal mediante la disposición de elementos en celosía que se apoyan en el fondo mediante pilotes hincados. Son las llamadas celosías espaciales o “jackets”. Su uso más común es el de plataformas marinas de investigación o extracción de petróleo aunque también se han construido como obras de atraque y amarre.

3.3. Criterios para elegir tipología estructural

Después de analizar cada tipología de muelle que se podría encontrar en una instalación náutica-deportiva procederemos a realizar una selección de alternativas para escoger la que más se adapte a nuestras necesidades.

Para la elección de la tipología estructural más conveniente para una obra de atraque y amarre deberán analizarse las ventajas e inconvenientes y, por tanto, la factibilidad de cada una de ellas frente a los requerimientos de uso y explotación y a los condicionantes geotécnicos, morfológicos, climáticos, medioambientales, constructivos y de los materiales, sísmicos, de conservación y mantenimiento existentes localmente.

Como criterio general, deberá optarse por la tipología estructural más económica de entre las posibles que satisfagan los requerimientos y consideraciones de uso y explotación y medioambientales con las condiciones de seguridad exigidas, valorando su adaptabilidad a la posible evolución de la demanda de tráficos durante la vida útil de la obra. Para dicha valoración económica deberán considerarse tanto los costes de construcción como los de mantenimiento y de reparación en la vida útil y, en su caso, los de desmantelamiento y recuperación ambiental.

Debido a las severas condiciones ambientales y climáticas en las que se encuentran las estructuras de atraque y amarre, en general suele ser mucho más



económico y fiable adoptar tipologías estructurales robustas, simples y durables, que exijan el mínimo mantenimiento durante su vida útil y tengan fáciles procesos constructivos y, en su caso, de desmantelamiento y recuperación ambiental.

Cabe destacar en primer lugar, que hay dos tipologías de muelle en el puerto actual. La primera, que es la que se encuentra en la mayor parte del puerto, trata de una serie de muelles de gravedad, conformados por un muro continuo de hormigón en masa, la segunda, situada en el muelle de Poniente, trata de un muelle claraboya sobre pilotes hincados que sirven de apoyo a los distintos pantalanés que se distribuyen en la dársena.

Se ha de considerar también el calado del puerto, pues como podemos ver en el “Anejo 8. Estudio de demanda y determinación de la flota tipo”, el puerto pretende dar amarre a embarcaciones de hasta 24 m de eslora, por lo que el calado tendrá que ir acorde a esta flota.

Cabe destacar que, como bien refleja el “Anejo 4. Geología y geotecnia”, el terreno sobre el que descansarán los muelles está formado por una capa granular de arenas finas suficientemente competentes. Además, dado que no va a estar sometido a grandes esfuerzos cortantes, se podría decir que sería posible la realización de una cimentación superficial, al igual que las que colindan con el propio puerto. Sin embargo, al tratarse de arenas finas de una capacidad portante media se debería tener en cuenta los posibles asentamientos producidos durante la fase de construcción, aunque serán bajos y con baja cohesión sin problemas corrosivos.

De cara a facilitar la realización de las obras e intentar disminuir su coste se pretende que las obras se ejecuten con elementos prefabricados y preferiblemente que las obras se lleven a cabo desde tierra.

Por lo tanto, teniendo en cuenta todo lo expuesto anteriormente, se concluye que las dos tipologías más adecuadas para la ejecución de los muelles serían:

- Alternativa 1: Muelle de gravedad de bloques.
- Alternativa 2: Muelle de pilotes tipo claraboya.



4. ESTUDIO DE SOLUCIONES

Del mismo modo que se realiza un análisis multicriterio para elegir la mejor alternativa en planta, también se realizará uno para escoger la mejor solución para los muelles y por tanto seguirá el mismo procedimiento.

Primero se establecerá una serie de criterios a considerar en la elección de la alternativa más adecuada ponderándose para las situaciones analizadas. De esta manera se conseguirá determinar la influencia de estos criterios en la decisión final.

Para terminar, valorando los resultados obtenidos, se escogerá la mejor de las opciones analizadas.

4.1. Criterios

Para la toma de decisiones se tomarán los siguientes criterios:

- **Concordancia con el estado actual:** se tiene que tener presente el estado en el que se encuentra el actual puerto y la tipología utilizada para los muelles.
- **Condicionantes constructivos:** se deberá tener en cuenta cada tipología utilizada y considerar su facilidad de construcción y los procedimientos constructivos que se llevarán a cabo durante su ejecución.
- **Condicionantes estéticos:** al tratarse de un puerto deportivo se debe intentar integrar en la medida de lo posible el muelle en la instalación portuaria creando un entorno atractivo y agradable tanto para los usuarios como para los visitantes.
- **Condicionantes económicos:** es el factor más importante a la hora de diseñar y proyectar las obras de atraque y amarre. Las diferentes tipologías conllevan cada una de ellas diferentes costes, debidos a los materiales con los que se ejecuta, su disponibilidad o el proceso constructivo.
- **Condicionantes estructurales y técnicos:** el funcionamiento estructural y por lo tanto la facilidad de cálculo y dimensionamiento, además de su comportamiento durante su vida útil.
- **Condicionantes funcionales:** cómo funcionan las diferentes alternativas y como se integran a las necesidades descritas en anteriores anejos, serán también objeto de consideración.
- **Condicionantes ambientales:** también se deberá considerar la afección que la obra de atraque una vez realizada y durante su construcción, pueda tener con el entorno en el que esta, evitando en todo momento que los residuos generados afecten al medio.
- **Mantenimiento y conservación:** a lo largo de la vida útil de los muelles, se requiere un mantenimiento y una conservación que repercutirá en el coste final.



Los materiales que los conforman pierden sus propiedades, los firmes se degradan y las estructuras que los conforman pierden funcionalidad con el paso del tiempo, llevando a los mismos a perder la función para la que fueron proyectados, incluso llegando al colapso.

Seguidamente se otorgará una puntuación a los diferentes criterios:

VALORACIÓN Puntuación	
muy malo	1
malo	2
adecuado	3
bueno	4
muy bueno	5
excelente	6

Tabla 3. Puntuación para cada valoración

4.2. Coeficientes de ponderación

A cada criterio se le aplicará un coeficiente que pondera la importancia de esta condición respecto de las otras. Las bases serán las siguientes:

- **Concordancia con el estado actual:** seguir con la misma tipología que las que ya están en uso es importante para evitar discontinuidades estructurales y visuales en el caso de que el muelle se amplíe. Su coeficiente de ponderación será de 10.
- **Condicionantes constructivos:** están directamente relacionados con otros criterios como pueden ser los estructurales, la disponibilidad de medios o los condicionantes económicos. Se deberá tener en cuenta la accesibilidad de los medios disponibles, ya sea de materiales como pueden ser el cemento, los áridos o la escollera, así como de la maquinaria tanto terrestre como marítima si fuese necesaria. La distancia o dificultad de disposición de medios para realizar un cierto tipo de muelles es un gran condicionante. Coeficiente de ponderación 10.
- **Condicionantes estéticos:** el diseño de un muelle atractivo puede ser un factor clave para crear un ambiente agradable en el puerto que pueda afectar al turismo de la zona. Coeficiente de ponderación 6.
- **Condicionantes económicos:** están plenamente relacionados con la tipología de muelle utilizada y supondrá una diferencia en el precio final de la obra. Considerar los aspectos económicos es clave para una buena elección. Coeficiente de ponderación de 9.



- **Condicionantes estructurales y técnicos:** los condicionantes estructurales de cada solución tienen un cierto peso ya que todo cálculo estructural que deba llevarse a cabo puede ser realizado con mayor o menor dificultad. Coeficiente de ponderación de 5.
- **Condicionantes funcionales:** de peso similar a la estética, la funcionalidad debe ser considerada con un peso no muy grande ya que no es un aspecto principal en la obra. Coeficiente de ponderación de 4.
- **Condicionantes ambientales:** cualquier obra portuaria requiere un estudio para considerar la afección que una u otra tipología de muelle pueda tener con el entorno y con la calidad de las aguas del puerto. Aunque es importante, durante la construcción y durante su vida útil, no provoca repercusión al medio ambiente. Su coeficiente de ponderación es de 4.
- **Mantenimiento y conservación:** es uno de los factores que se considerará más importantes a la hora de la elección de la tipología de muelle. Cada muelle puede presentar diferentes deficiencias y patologías a lo largo de su vida útil. Cada avería supone un coste añadido que debe tenerse en cuenta a la hora de la elección de la tipología adecuada. Su coeficiente de ponderación es de 8.

CRITERIO	COEFICIENTE
concordancia	10
constructivo	10
estético	5
económico	9
estructural/técnico	5
funcional	4
ambiental	4
mantenimiento	8

Tabla 4. Coeficientes de ponderación de cada criterio



5. VALORACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

5.1. Alternativa I

Dicha alternativa es la misma que el tipo de muelle que está en uso en el puerto, con la variación que esta sería prefabricada de bloques, por lo tanto encajaría a la perfección con las infraestructuras actuales. Pero si se diseñan las obras de atraque y amarre en la playa sur, éstas deberían seguir la misma tipología que tienen en el muelle de Poniente, ya que éstas tienen un buen uso en su explotación. Así mismo, el muelle Sur, constituido una parte sur de escollera para conformar la bocana respetando su talud. Por lo tanto, no sería necesaria la retirada de escollera, se haría un muelle tipo “claraboya”, aunque no esté dimensionado en este proyecto básico. La prolongación del muelle de Poniente por facilidad sería de gravedad, por lo tanto su **concordancia** es puntuada como **MUY BUENA**.

La construcción de un muelle de gravedad ejecutado con bloques de hormigón es bastante simple si la comparamos con otras tipologías. Además, el hecho de que los bloques de hormigón sean prefabricados facilita el proceso constructivo. Para llevar a cabo dicho muelle, se colocarán los bloques de hormigón hasta la cota deseada formando un paramento vertical que será coronado con una viga cantil que dotará al muelle de la continuidad adecuada y corregirá posibles efectos derivados de la colocación de los bloques. A continuación, se llevará a cabo el relleno del trasdós con material seleccionado y se continuarán disponiendo las siguientes capas. Cabe destacar que debido a que sería posible el acceso de la maquinaria terrestre a la zona, no sería necesaria la construcción utilizando medios marítimos, lo que supondría una importante reducción del coste de la obra. Por último, nombrar que los bloques prefabricados deberán ser pedidos a la empresa competente. Por lo tanto, para el criterio de **condicionantes constructivos** se le da una valoración **EXCELENTE**.

El **aspecto estético** de un muelle de gravedad de bloques, tiene poco que destacar. No supone un gran impacto visual, más bien crean una visión agradable y sencilla continuando con la tipología actual, en estos muelles se suelen ejecutar grandes explanadas de hormigón destinadas a distintos usos. La valoración de este aspecto es **BUENA**.

En cuanto al **aspecto económico**, esta solución suele ser adecuada para alturas desde coronación a cimientos inferiores a 15 m o en obras de pequeña longitud por requerir menor inversión inicial. Podemos asignar una valoración **MUY BUENA**.

Los **aspectos estructurales** para muelles de gravedad son básicos, pues el cálculo estructural es quizás el más simple de cualquier tipología y no suele presentar complicación alguna. Por lo tanto la valoración estructural es **MUY BUENA**.

Al fin y al cabo la **funcionalidad** del muelle va a ser dar servicio a las embarcaciones que requieran un atraque, permitiendo la colocación de pantalanes. Debido a su posición dentro de la nueva dársena, es casi imposible que el muro refleje el poco oleaje que incide en la nueva dársena, además en la explanada que conforma se pueden desarrollar distintas actividades relacionadas con el sector náutico-deportivo. Por ello, la funcionalidad recibe una valoración de **ADECUADA**.



La construcción de un muelle de gravedad no representa mucha diferencia con respecto al **impacto ambiental** que pueda producirse con otras tipologías de características similares. Por tanto la valoración de la alternativa I en función de los factores ambientales puede recibir una valoración de **ADECUADO**.

Para terminar con el estudio de esta solución de muelles, el muelle de gravedad de hormigón es un muelle que debido a su proceso constructivo no presenta demasiados inconvenientes a lo largo de su vida útil que deban ser subsanados o que requieran de tareas de conservación. Si hablamos de **mantenimiento y conservación** de esta tipología de muelle, se podría decir que tiene una valoración **BUENA**.

5.2. Alternativa II

En este caso, la alternativa 2 también mantiene una **excelente concordancia** con los muelles ya construidos, ya que también es usada esta tipología para el muelle donde arrancan los pantalanes. Para la ampliación por la playa sur, sería conveniente seguir la misma tipología utilizada en la dársena actual. A su vez, también encajaría perfectamente para hacer la ampliación del muelle Sur, ya que un muelle claraboya con un talud adecuado no aumentaría la reflexión por el oleaje incidente desde la bocana.

En el **aspecto constructivo** de esta tipología de obra de atraque y amarre puede ser construida para todo calado y en prácticamente cualquier tipo de suelo. Aunque un factor importante a tener en cuenta será la necesidad de disponer de una maquina especial capaz de proceder a la hinca de los pilotes que supondrá un coste extra previsto en esta solución. La plataforma superior puede ser hormigonada “in situ” en algunas partes y ser prefabricada en otras. Por lo tanto, para el criterio de condicionantes constructivos se le valora como **ADECUADA**.

La **estética** de un muelle de pilotes hincados es visualmente más atractivo frente a uno con un paramento vertical de hormigón, un muelle de este tipo no es un elemento que suponga un gran impacto visual ni para los usuarios del puerto ni para los visitantes. Debido a ello, podremos asignar una valoración **MUY BUENA**.

El **tema económico** es un aspecto que debe ser tratado para valorar esta segunda alternativa. Esta alternativa requerirá de maquinaria de hinca para que los pilotes puedan transmitir al terreno las cargas superiores en su plataforma y de un operario cualificado para ello, esto incrementará los precios. El criterio económico se valora como **MALO**.

Pasando a definir los **aspectos estructurales y técnicos** atendemos a que esta estructura transmite al terreno de cimentación todas las acciones de uso y explotación actuantes sobre el tablero por medios de los pilotes. El cálculo estructural de muelle de pilotes hincados es más compleja, ya que requerirá conocer la distancia hasta el estrado competente encargado de resistir las cargas transmitidas por los pilotes y la distancia a la que deberán disponerse estos últimos para que la transmisión sea correcta. Por lo tanto la valoración estructural es **ADECUADA**.

En cuanto a la **funcionalidad**, el muelle proporciona en su conjunto unos servicios que permiten la realización de las actividades propias de la náutica como



puede ser el atraque, el amarre y la varada de embarcaciones. La estructura también puede funcionar como estructura de contención de tierras y de unión con la plataforma en la coronación del talud. La valoración funcional para esta alternativa es **BUENA**.

Atendiendo al **criterio ambiental**, el único inconveniente que tal vez podamos destacar de la ejecución de un muelle con pilotes es el relacionado con los residuos que genera la maquinaria propia de este tipo de solución constructiva. Por lo demás, la construcción de un muelle, de cualquier tipología, no representa un impacto ambiental importante que deba marcar la decisión de elegir una u otra tipología. En función de los factores ambientales puede recibir una valoración de **MALA**.

Para terminar, el **mantenimiento y la conservación** van ligados con la posibilidad de asientos diferenciales entre el trasdós flexible y la plataforma rígida, asientos que pueden dificultar la explotación del muelle por los necesarios recrecidos del pavimento del trasdós. Es posible la rotura de pilotes por falsas maniobras de atraque, sobre todo con los bulbos de los buques, circunstancia a tener en cuenta en la conservación de las obras de esta tipología. Por todo ello, la valoración para el mantenimiento es **MALA**, ya que requerirá inspecciones periódicas y de tareas de conservación ya que las averías y patologías que deberán subsanarse a lo largo de su vida útil.

5.3. Valoración final

A continuación vamos a recoger las puntuaciones obtenidas en ambas alternativas para cada criterio, asignándoles el valor que les per toca:

CRITERIO	ALT.I	ALT.II
concordancia	muy buena (5)	excelente (6)
constructivo	excelente (6)	adecuado (3)
estético	buena (4)	muy buena (5)
económico	muy buena (5)	mala (2)
estructural/técnico	muy buena (5)	adecuado (3)
funcional	adecuado (3)	buena (4)
ambiental	adecuado (3)	mala (2)
mantenimiento	buena (4)	mala (2)

Tabla 5. Valoración de las alternativas según criterios



6. ELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA

Con la tabla obtenida de las valoraciones de los diferentes criterios que definen las alternativas, y los coeficientes de ponderación que se han creído convenientes, se obtiene la siguiente matriz multicriterio que ayudará a elegir la mejor solución para el problema.

CRITERIO	ALT.I	ALT.II
concordancia	50	60
constructivo	60	30
estético	20	25
económico	45	18
estructural/técnico	25	15
funcional	12	16
ambiental	12	8
mantenimiento	32	16
SUMA	256	188

Tabla 6. Puntuaciones de las alternativas

Ambas valoraciones no varían en gran manera. Los criterios donde las puntuaciones entre ambas difieren de manera más notable son: el aspecto constructivo, el económico y el mantenimiento.

Como las diferencias entre las puntuaciones de ambas alternativas son mínimas, se podría perfectamente utilizar ambas alternativas, e incluso combinarlas. Después del análisis multicriterio vemos que ligeramente se comportaría mejor el muelle de gravedad, pero hemos estudiado que no sería el más óptimo si lo colocásemos en el muelle Sur, ya que podría dar problemas por reflexión, por lo tanto nos quedamos del lado de la seguridad y escogemos la tipología de muelle claraboya con pilotes hincados para la ampliación del muelle Sur. De esta manera, no sería necesario el desmantelamiento de la escollera que conforma el contradique en su parte sur. Éste muelle está definido en su totalidad, pero no se tendrá en cuenta su cálculo y dimensionamiento ya que queda fuera del alcance del presente trabajo académico.

Por otro lado, se quiere que desde la actual playa sur arranque el pantalán (siempre después de capacitar el terreno y hacer el dragado oportuno) para obtener un espacio suficiente capaz de albergar embarcaciones de mayor eslora. En la dársena actual, los pantalanes crecen desde una tipología de muelle abierto con pilotes hincados tipo claraboya. Por lo que, la nueva dársena al no estar directamente continua a la ya explotada, no será de gran importancia el no mantener la misma tipología, por lo que, el muelle que albergará los nuevos pantalanes será de gravedad de bloques, ya que es el más económico y de fácil construcción.

Esto se ha decidido porque ambas tipologías están funcionando bien en lo ejecutado, integrar una nueva tipología sería ampliar defectos y adquirir una nueva necesidad, un suficiente conocimiento para subsanarlos correctamente. Muchas veces



esto conlleva gastos que no teníamos en cuenta antes e incluso mano de obra cualificada para su mantenimiento. Por lo que después de este análisis se decide que todos los muelles serán de la misma tipología y al quedarnos del lado de la seguridad para ejecutar la ampliación del muelle Sur. Se acepta que los muelles en la ampliación serán de pilotes hincados tipo claraboya, aunque no esté dimensionado en el presente proyecto básico. Mientras que la prolongación del muelle de Poniente será de gravedad con bloques.

