

# Muelles para cruceros: la experiencia de Botafoc (Ibiza) y el desafío del viento

## Quays for Cruise Ships: The Experience of Botafoc (Ibiza, Spain) and the Challenge of the Wind

Eloy Pita Olalla<sup>1\*</sup>, Antoni Ginard López<sup>2</sup>, Víctor Martínez Pés<sup>1</sup>

### Resumen

La demanda creciente de cruceros de gran tamaño en el Puerto de Ibiza originó la necesidad de incrementar la longitud de los muelles transversales al abrigo del dique Botafoc, porque la existente resultaba insuficiente para buques de esloras comprendidas entre 220 y 340 m. Éstos únicamente pueden atracar en el Muelle Adosado al Dique de Botafoc generando interferencias con los petroleros, que también atracan en dicho muelle.

Para dar respuesta a esta situación se prolonga el Muelle Transversal 2 añadiendo 3 duques de alba pilotados, completando, de este modo, una longitud total de atraque de 375 m en el lado sur y 328 m en el lado norte para dar servicio a buques Ro/Ro y cruceros de gran eslora.

La mayor singularidad de estos muelles es la gran “vela” que tienen los buques que atracan en ellos, por lo que la acción del viento es enorme. Esta acción debe ser soportada por el muelle, con unas líneas de amarre que tienen la complejidad de partir de puntos muy altos en los barcos. Frente a esta problemática, se pueden plantear diversas opciones, que serán descritas en este artículo. Además, se mostrarán algunos accidentes acaecidos en algunos muelles de cruceros por esta causa.

En este artículo se describirán las obras proyectadas, insistiendo en los detalles de los duques de alba y reflexionando sobre el estado del arte en este tema y, en particular, sobre los sistemas para resistir las enormes fuerzas horizontales generadas.

**Palabras clave:** muelle; bolardo; viento; crucero; Duque de Alba; pantalán;

### Abstract

*The growing demand for large-size cruise ships at the Port of Ibiza demands enlarging the quays sheltered by the Botafoc breakwater, as they were no longer sufficient for ships whose length is between 220 and 340 m. These vessels could only berth at the quay attached to the Botafoc breakwater, producing interferences with fuel tankers that moor there.*

*In order to overcome this situation and serve Ro/Ro vessels and large cruise ships, one of these jetties was enlarged with three berthing-mooring dolphins built with a pile structure, reaching a total berth length of 375 m on the South side and 328 m on the North side.*

*The unique feature of these quays is the large exposed area (“sail”) on the ships that are moored at the berths, resulting in large forces due to wind. This force must be borne by the quay with complex mooring lines, as the vessel deck is very high. There are many possible solutions to handle this problem, which are described in this article. Moreover, some accidents that have occurred at some cruise quays for this reason will also be shown. In this article the planned construction work is described, emphasizing the details of the dolphins and discussing upon the state of art of this subject and, in particular, the systems required to resist the immense horizontal forces generated.*

**Key Words:** quay; bollard; wind; cruise ship; dolphin; jetty;

## 1. INTRODUCCIÓN

El tamaño de los buques de cruceros que atracan en los puertos de todo el mundo ha experimentado un enorme incremento en los últimos años.

La fuerza ejercida por el viento contra estos buques ha aumentado proporcionalmente al tamaño de los mismos y ello obliga a adaptar las estructuras de atraque existentes.

En el presente artículo se reflexionará sobre el estado del arte del estudio de cargas de amarre, planteándose diversas soluciones para la transmisión de las cargas de los bolardos a la infraestructura desarrolladas y ejecutadas por

la Autoridad Portuaria de Baleares (de ahora en adelante, APB) y por los autores, que han diseñado soluciones, tanto para la primera, como para otras Autoridades Portuarias.

Al final de este artículo, se presentará la solución proyectada en el Proyecto de “Prolongación de la primera línea de atraque para grandes buques en los Muelles Comerciales al abrigo del Dique de Botafoc” [1], que nos permitió profundizar en el tema y ofrecer una solución segura y de calidad.

## 2. EVOLUCIÓN DE LOS CRUCEROS EN LA A.P. DE BALEARS

La APB es una Autoridad Portuaria especialista en la gestión de cruceros. Los que atracan en sus puertos han tenido un rápido aumento de tamaño, pasando de recibir cruceros de un tamaño medio de 19.113 GT en 1999, a

\* Autor de contacto: [epita@increa.eu](mailto:epita@increa.eu)

<sup>1</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Ingeniería Creativa Pita, S.L (INCREA).

<sup>2</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Autoritat Portuària de Balears.

**Tabla 1.** Evolución del tamaño medio de los buques crucero (GT) que atracan en los puertos de la APB. Se incluyen las proyecciones de los años 2015, 2016 y 2017

Año	Palma	Alcudia	Mahón	Ibiza	La Savina	Media
1996	22.310		14.767	13.510	7.169	19.113
1997	24.064	4.260	16.883	18.598	7.508	21.680
1998	26.043	704	16.661	13.939	2.370	22.027
1999	28.154	704	20.491	15.000	1.627	24.402
2000	27.829		20.331	13.675	3.436	24.139
2001	28.719		16.047	8.987	2.462	22.104
2002	34.603		22.294	17.861	5.829	30.062
2003	37.561		23.000	36.460	4.000	36.430
2004	42.646		23.318	24.394	5.000	36.931
2005	49.218		22.819	31.282	2.811	42.567
2006	46.932		25.385	20.950	9.187	40.356
2007	54.413		24.057	23.669	4.322	44.113
2008	53.208		27.186	27.296	11.997	44.978
2009	65.047		18.843	36.331	5.589	51.596
2010	70.880		25.048	44.567	3.738	60.780
2011	75.201		21.864	37.243	4.815	62.428
2012	67.164	2.532	27.366	63.982	6.500	61.364
2013	71.732	23.861	33.775	62.148	4.320	64.372
2014	73.867	24.452	31.098	53.168	3.769	64.348
2015	87.308	30.856	28.184	54.386	4.741	74.637
2016	85.254	38.756	31.630	72.520	6.800	78.019
2017	101.671	30.277	37.145	55.267	7.500	91.552

buques de 91.552 GT en 2011. Dicha evolución, desglosada también por puertos, se recoge en la tabla 1.

Entre los cruceros que visitan sus puertos destaca el *Allure of the Seas*, el mayor crucero del mundo, que hace escala en Palma, con unas dimensiones de 360 m de eslora, 47 m de manga y 9,1 m de calado y un arqueo de registro bruto de 220.000 GT.

Con la aparición de estos gigantescos buques, la APB ha tomado conciencia de la importancia del posible fallo de los sistemas de amarre durante temporales. Dichos fallos son principalmente debidos a la gran vela que tienen los cruceros, expuesta a la acción del viento.

Además, como la cubierta del buque se encuentra a gran altura, las amarras presentan un ángulo muy grande con la horizontal, de manera que la componente vertical genera tracciones de gran valor en una dirección no propicia para el comportamiento estructural del sistema de amarre.

La APB ha tenido que hacer frente a esta problemática adaptando los antiguos muelles, diseñados para buques

más pequeños que los que operan actualmente en el Mediterráneo. Para ello, ha sido necesario realizar un estudio minucioso del tiro de bolardo, un problema singular de los cruceros.

### 3. CONSECUENCIAS DE UN MAL DIMENSIONAMIENTO FRENTE AL VIENTO

Tal y como se ha comentado, muchos muelles operativos en la actualidad no se encuentran acondicionados para soportar las fuerzas que ejerce el viento sobre los grandes cruceros.

Este desajuste de la relación infraestructura-buque ha dado lugar a diferentes tipos de fallos. Normalmente, el eslabón más débil suele focalizarse en el sistema de amarre (bolardo, anclajes bolardo-muelle o amarras), pudiendo también producirse el fallo global del propio muelle. Al localizarse el fallo en el sistema de amarre, éste se comporta como “fusible”, siendo más fácil su reparación que la obra del propio muelle.



**Figura 1.** Ejemplo de rotura de bolardo (izquierda) y de su anclaje (derecha).

Cabe remarcar que las consecuencias de estos accidentes, derivados del fallo del sistema de amarre, pueden ser gravísimas debido a la exposición al riesgo de los cruceristas, ya que pueden producirse, entre otros, los siguientes hechos:

- El desprendimiento de la pasarela de acceso al buque, que conecta a éste con tierra.
- El fuerte "latigazo" que producen las amarras al liberarse de las grandes tensiones a las que están sometidas.
- El vuelo, como un proyectil, del bolardo, cuando éste rompe y es impulsado por las amarras.
- La deriva y choque de los buques al no tener ningún elemento de amarre.
- Normalmente, la gran capacidad de maniobra de los cruceros permite que el capitán sea capaz de controlar al buque mediante el empleo de sus medios de propulsión.

#### 4. CÁLCULO DE LAS FUERZAS TRANSMITIDAS POR EL BUQUE Y SINGULARIDADES DE LOS CRUCEROS

Las fuerzas que transmite un buque amarrado son generadas por distintos agentes: viento, oleaje, corrientes, ondas largas, efectos hidrodinámicos inducidos por los pasos de los buques, etc.

Dado que, normalmente, un crucero suele encontrarse amarrado en aguas abrigadas del puerto, el agente principal que da lugar a mayores fuerzas es el viento. Entonces, el problema puede reducirse a la acción del viento, ya que, en ausencia de efectos de fenómenos de resonancia y onda larga, el resto de las acciones suelen ser despreciables frente a la acción del primero.

Para abordar este problema, la ROM 2.0-11 [2], expone diversos métodos para la determinación de las acciones. Estos se dividen en tres categorías:

- Modelos estadísticos: obtención de las cargas de amarre a partir de sistemas de amarre monitorizados.
- Modelos experimentales: a partir de modelos de escala reducida.

- Modelos matemáticos:
  - Analíticos (pseudo-estáticos).
  - Numéricos (dinámicos).

Debido a la ausencia de medios y de datos, se suele recurrir con frecuencia a los modelos matemáticos por su sencillez y bajo coste.

La resolución detallada del problema del comportamiento del buque amarrado es complicada y, por ello, con cruceros de grandes dimensiones y en condiciones no muy controladas (en las que se intuyan efectos complejos difícilmente modelizables con formulaciones analíticas), recomendamos el empleo de otros modelos más refinados que los matemáticos analíticos, tal y como cita la ROM 2.0-11 [2].

En comparación con los modelos analíticos, los modelos numéricos permiten integrar, además de los efectos de movimientos de los buques y de las cargas de amarre, aquellos otros que no pueden abordarse con formulaciones analíticas, como, por ejemplo, efectos de irregularidad de las variables, resonancia, ondas largas, efectos de segundo orden, etc., así como valorar con mayor precisión los niveles de operatividad de las obras de atraque.

Por ello, debido a la complejidad del problema, debe considerarse seriamente la posibilidad de realizar el estudio del buque amarrado con modelos numéricos de mayor complejidad, que permitan obtener un modelo de la realidad que ayude a conocer mejor el sistema de amarre, y en consecuencia, desarrollar un buen diseño.

Los modelos analíticos (que son los más sencillos) se basan en una simplificación dinámica del sistema que forma el buque amarrado (buque, sistema de amarre y estructura de atraque), estableciendo el equilibrio entre las componentes cuasi-estáticas de las fuerzas actuantes contra el barco, las reacciones de las defensas y las tensiones de las amarras. Además, se exige la compatibilidad de los movimientos del buque con las deformaciones de las líneas de amarre y defensas.

La ROM 2.0-11 [2] propone la siguiente ecuación (ecuación 1) para calcular la componente cuasi-estática de la resultante horizontal del viento, simplificando el cálculo dinámico (ver figura 2):

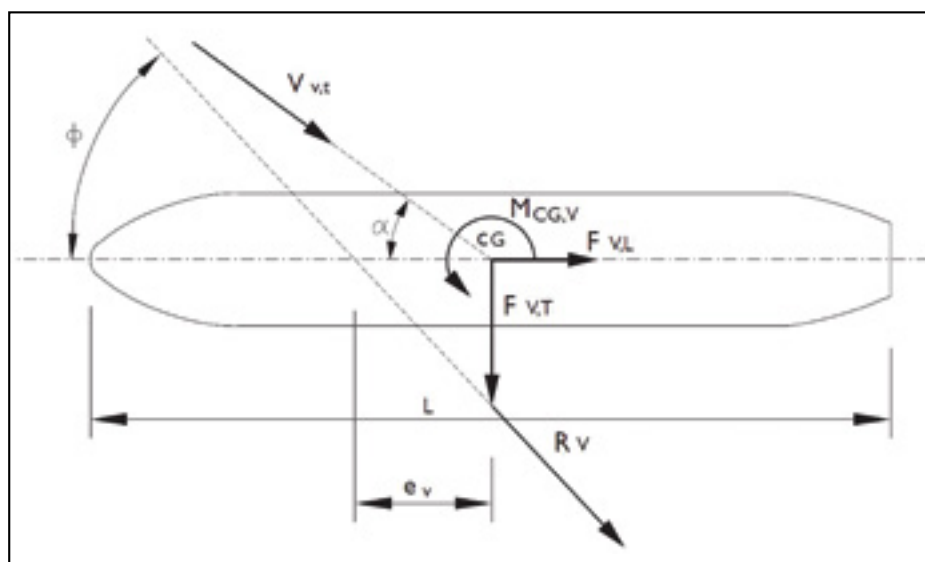


Figura 2. Componente cuasi-estática debida al viento según la ROM 2.0-11 [2].

$$R_V(\alpha) = \frac{\rho_a}{2} \cdot V_{V,t}^2 \cdot \frac{C_{DV,L}(\alpha) \cdot A_{V,T} \cdot \cos^2 \alpha + C_{DV,T}(\alpha) \cdot A_{V,L} \cdot \sin^2 \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \quad [1]$$

$R_V$  = componente cuasi - estática de la resultante horizontal del viento

$\rho_a$  = densidad del aire

$V_{V,t}$  = velocidad del viento en el periodo de medición  $t$  (parta cruceros  $t = 1\text{min}$ )

$A_{V,T}$  = área transversal expuesta al viento

$A_{V,L}$  = área longitudinal expuesta al viento

$\alpha$  = ángulo entre la dirección del viento y el eje longitudinal del buque

$\phi = \arctan [(A_{V,L}/A_{V,T}) \cdot \tan \alpha]$

= ángulo entre la resultante horizontal del viento y el eje longitudinal del buque

$C_{DV,L}$  = Factor adimensional de arrastre para el viento en la dirección longitudinal

$C_{DV,T}$  = Factor adimensional de arrastre para el viento en la dirección transversal

Como se puede apreciar, la fuerza transmitida por el buque está directamente relacionada con el cuadrado de la velocidad del viento y con la superficie expuesta ( $A_{V,T}$  y  $A_{V,L}$ ).

En la figura 3, puede observarse la diferencia entre las áreas expuestas al viento entre diversos buques tipo (cada uno corresponde al de mayor eslora de su categoría). En color gris claro se representa el área expuesta y, en color gris oscuro, el área sumergida, que puede considerarse proporcional al desplazamiento.

Por tanto, si el agente preponderante es el viento (lo cual es lo habitual), queda claro que las cargas de amarre serán proporcionales a la superficie expuesta. Como consecuencia, un buen indicador podría ser el arqueo (registro bruto) del buque (indicación del volumen total del buque) y no lo sería el desplazamiento (área gris oscura de la figura 3).

Debemos indicar que la ROM 2.0-11 [2] propone unos valores mínimos de las cargas de amarre en función del desplazamiento del buque (tabla 2), lo cual no parece lo

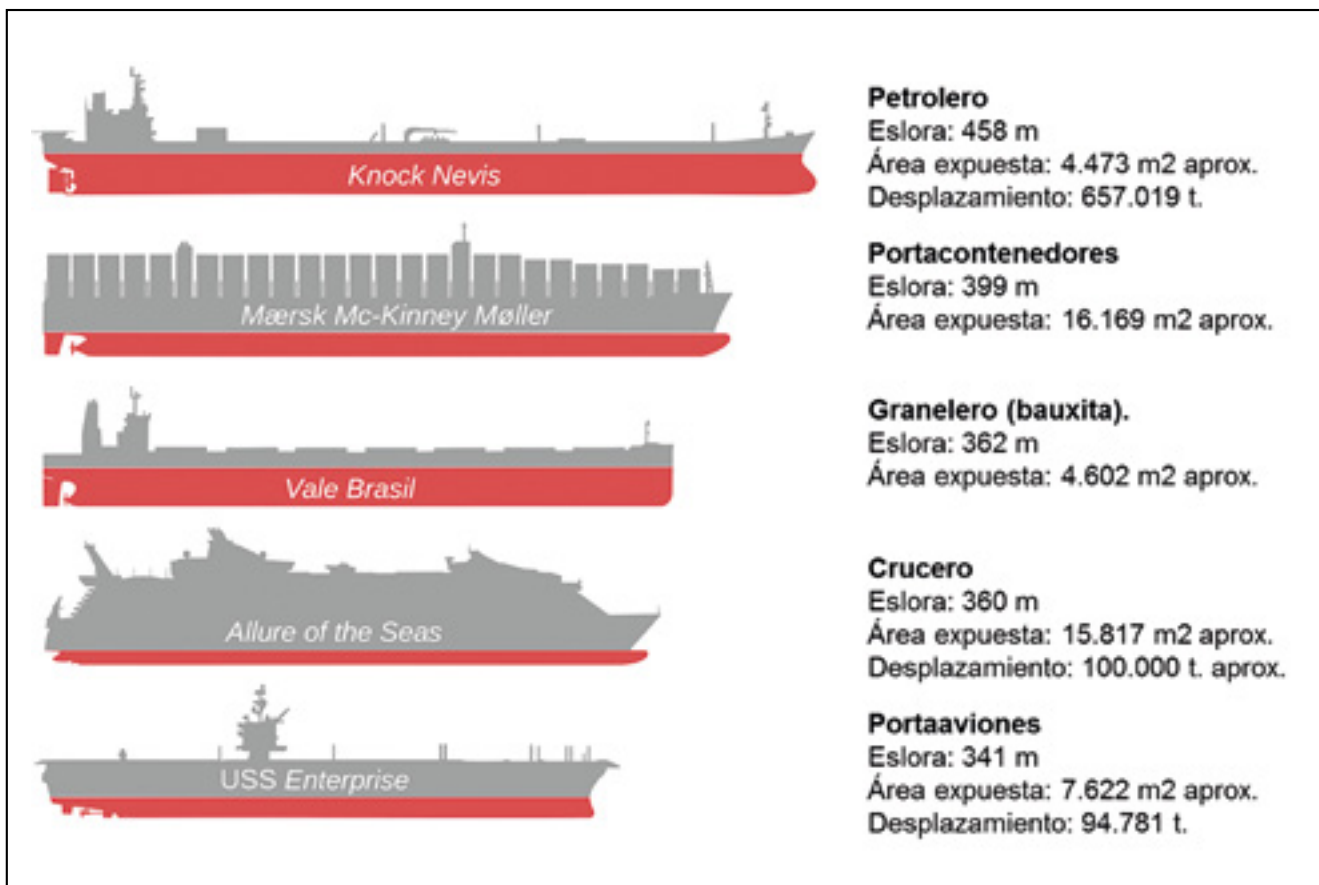


Figura 3. Propiedades grandes buques tipo.

Tabla 2. Cargas de amarre mínimas en función del desplazamiento del buque. Tabla 4.6.4.66 de la ROM 2.0-11 [2]

Buque de mayor desplazamiento máximo para la flota esperable en el atraque (t)	Valor característico mínimo de las cargas de amarres en los puntos del amarre (kN)
$\Delta_{pc} \leq 1.000$	100
$1.000 < \Delta_{pc} \leq 5.000$	250
$5.000 < \Delta_{pc} \leq 10.000$	350
$10.000 < \Delta_{pc} \leq 20.000$	600
$20.000 < \Delta_{pc} \leq 50.000$	800
$50.000 < \Delta_{pc} \leq 100.000$	1.000
$100.000 < \Delta_{pc} \leq 200.000$	1.500
$200.000 < \Delta_{pc}$	2.000

más aconsejable, por las razones apuntadas anteriormente. Esto es particularmente importante en el diseño de un muelle de atraque de cruceros, ya que estos barcos tienen un desplazamiento muy bajo en comparación con su "vela" (figura 3).

Sin embargo, la norma japonesa [3] relaciona dichas cargas mínimas de amarre con el registro bruto, lo cual parece más adecuado (tabla 3).

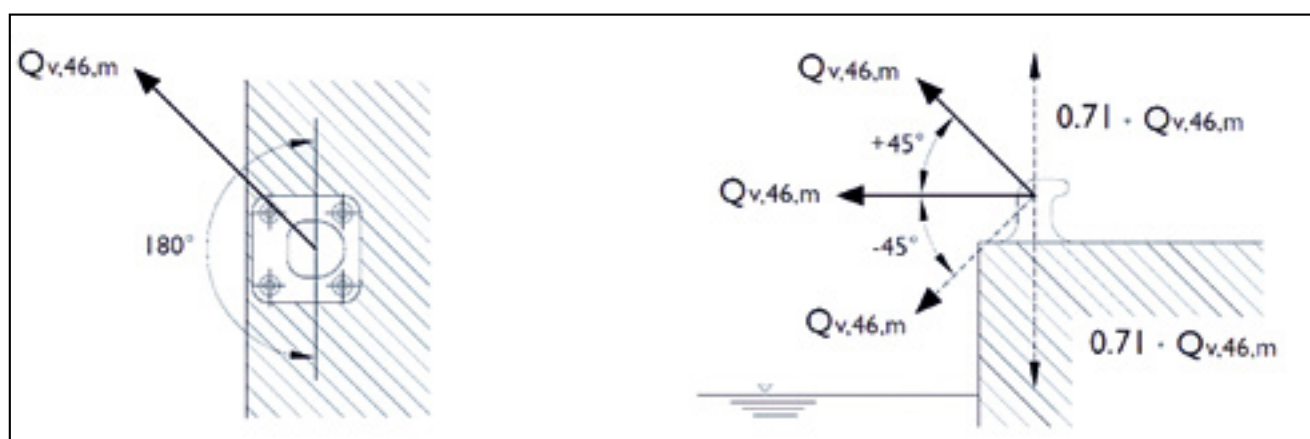
Otro hecho singular que caracteriza la disposición de amarre de los cruceros, es el ángulo de incidencia de las

acciones. Los cruceros, con la cubierta situada a gran altura, generan ángulos muy verticales de las amarras, creando fuerzas verticales ascendentes, que deben ser resistidas por el sistema de anclaje del bolardo. La ROM 2.0-11 [2] nos insta a hacer las comprobaciones de los bolardos en un abanico de actuación, con un inclinación vertical máxima de 45° (figura 4).

No obstante, tal y como se observa en la figura 5 este ángulo puede ser mayor.

**Tabla 3.** Cargas de amarre de acuerdo con la tabla 2.4.1 de la norma japonesa [3]

Gross tonnage (GT) of vessel (tons)	Tractive force acting on a mooring post (kN)	Tractive force acting on a bollard (kN)
200 < GT ≤ 500	150	150
500 < GT ≤ 1.000	250	250
1.000 < GT ≤ 2.000	350	250
2.000 < GT ≤ 3.000	350	350
3.000 < GT ≤ 5.000	500	350
5.000 < GT ≤ 10.000	700	500
10.000 < GT ≤ 20.000	1.000	700
20.000 < GT ≤ 50.000	1.500	1.000
50.000 < GT ≤ 100.000	2.000	1.000



**Figura 4.** Direcciones de actuación del tiro de amarras. Figura 4.6.4.42 de la ROM 2.0-11 [2].



**Figura 5.** Ángulos de las líneas de amarre de los cruceros.

## 5. SOLUCIONES UTILIZADAS POR LA A.P.B. PARA PODER INSTALAR GRANDES BOLARDOS EN MUELLES ANTIGUOS

La mayoría de los muelles existentes en la APB son de gravedad, están dotados de bolardos insuficientes para los nuevos cruceros y, además, no cumplen los criterios de estabilidad de la ROM 2.0-11 [2] para las nuevas cargas de amarre.

La necesidad de acoger los nuevos cruceros de gran tamaño ha obligado a buscar soluciones alternativas compatibles con los muelles existentes, con el objeto que las estructuras existentes puedan resistir los mayores tiros de bolardo.

Los dos principales condicionantes para resolver la renovación de las infraestructuras de atraque y amarre son:

- Transferir las mayores cargas de tiro de bolardo sin afectar a los muelles existentes. En el caso de muelles de gravedad, esto puede obligar a asegurar que cualquier elemento que se introduzca se encuentre fuera de la cuña activa del terreno.

- Versatilidad y compatibilidad con la situación de servicio de los muelles, evitando la interferencia con estructuras, edificaciones y redes de servicios existentes.

A continuación, se describen algunas soluciones planteadas (para muelles de gravedad, pero aplicables a otras tipologías como pantallas) que cumplen estos dos condicionantes, pudiéndose combinar algunas de ellas:

1. **Macizo único apoyado en el muelle:** Consiste en armar fuertemente el tramo de viga cantil situado bajo el bolardo, formando un macizo capaz de soportar los esfuerzos transmitidos. Lógicamente, esta solución sólo es aplicable en el caso en el que el muelle sea estable frente a las nuevas cargas.

En la figura 6, vemos un ejemplo de la APB.

Un caso particular de esta solución para muelle de cajones es que el **macizo esté anclado a los cajones**, tal y como se ve en la figura 7.



Figura 6. Macizo de apoyo fuertemente armado.

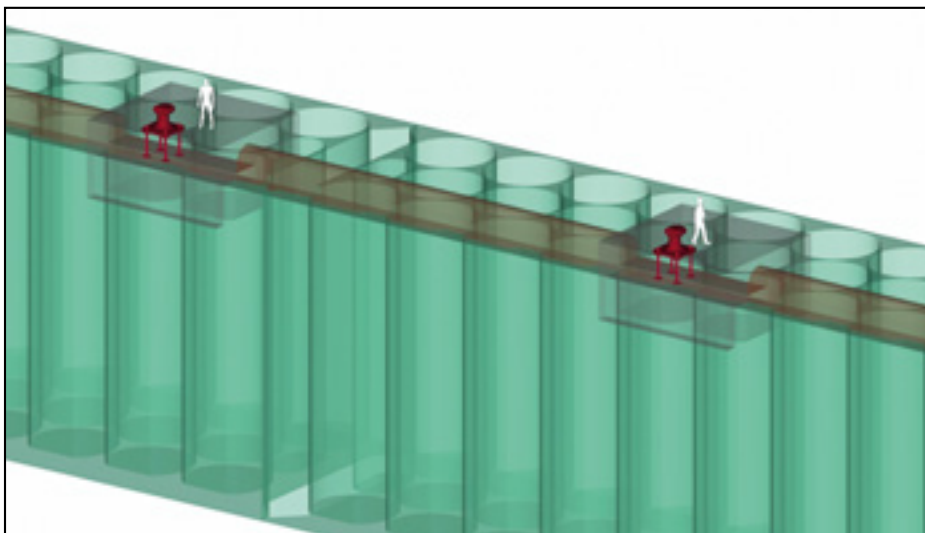


Figura 7. Macizo anclado a cajón.

2. **Macizo micropilotado:** se refuerza el macizo donde se instala el bolardo mediante micropilotes que transmiten las cargas hacia las zonas donde nos interesa. En la figura 8, se muestra un esquema de esta solución.
3. **Bolardos retranqueados:** se disponen bolardos de mayores dimensiones en zonas alejadas del cantil del muelle para reducir el ángulo de las líneas de amarre con la horizontal, de manera que se transmiten los esfuerzos de forma más horizontal a un gran macizo de anclaje. Estos bolardos son utiliza-

dos únicamente en condiciones de tormenta (tipo III, según la denominación de la ROM 2.0-11 [2], puesto que invaden el área operativa). En la figura 9 se muestra un muelle funcionando con bolardos retranqueados.

4. **Macizo sujetado por un “abanico” de anclajes:** consiste en la utilización de anclajes del terreno, ampliamente utilizados en ingeniería, para fijar los bolardos. Esta solución es muy versátil y sólo exige una zona donde poder anclar los tirantes sin que se afecte a la estabilidad del muelle.



**Figura 8.** Macizo reforzado con micropilotes.



**Figura 9.** Bolardos retranqueados.

5. **Macizo sujetado por bloque de reacción:** se transmiten los esfuerzos a un bloque situado en una zona donde no se afecte a la estabilidad del muelle mediante tirantes. Como, normalmente, estos bloques están en la superficie (y, por tanto, sólo pueden recibir tirantes horizontales) esta solución se combina con tirantes verticales anclados en los bloques para “recoger” la componente vertical del tiro del bolaro. La figura 11 muestra un esquema ilustrativo. Puede considerarse una variante de la solución anterior.

En el caso de en **muelles de pequeña manga** (pantalanes) con vigas cantil enfrentadas pueden utilizarse estas mismas como macizo de anclaje (figura 12). Sin embargo, dado que el viento actuará en la misma dirección en los barcos de ambos lados del pantalán, será necesario verificar cuidadosamente el deslizamiento de dicha viga cantil.

Una variante de la solución anterior es el empleo (en el caso de bolardos enfrentados y a falta de viga cantil) del macizo bajo cada bolardo como macizo de anclaje del otro bolardo. En este caso, puede ser necesario reforzar el macizo que ancla el bolado con una pantalla de micropilotes, tal y como se ve en la figura 13. Además, será conveniente que sobre los macizos no se coloquen defensas.

6. **Cosido con micropilotes:** se realiza un cosido de micropilotes inclinados para anclar correctamente el bolardo y evitar la afección a edificaciones próximas a bolardos, tal y como se ilustra en la figura 14.
7. **Pantallas antiviento:** solución un tanto peculiar, compuesta de grandes estructuras que se oponen al viento (figura 15). Estas pantallas reducen la fuerza transmitida por el viento al buque amarrado facilitando, además, las operaciones de navegación y atraque.

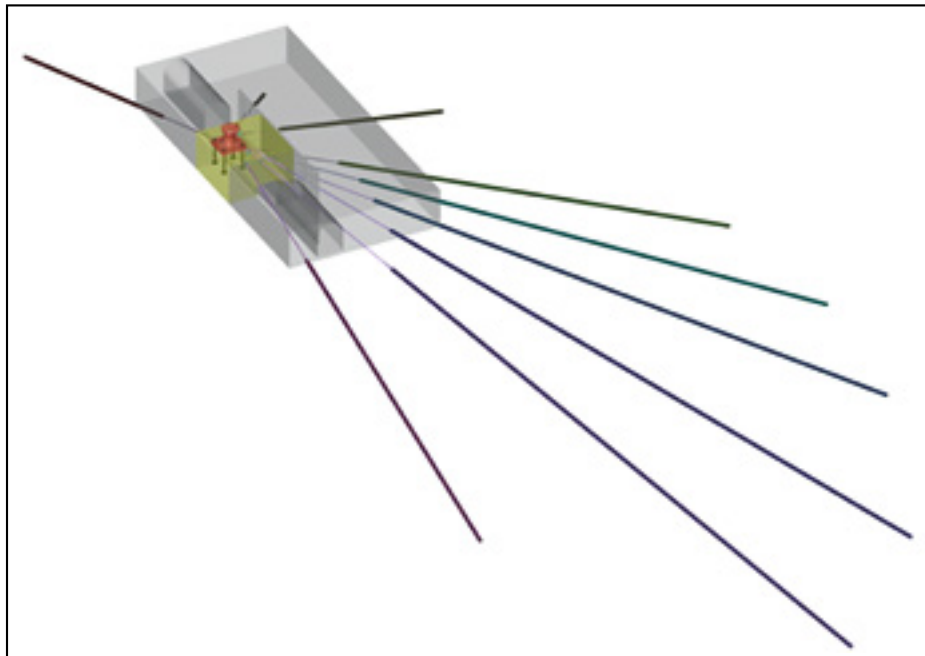


Figura 10. Macizo reforzado con anclajes en forma de “abanico”.

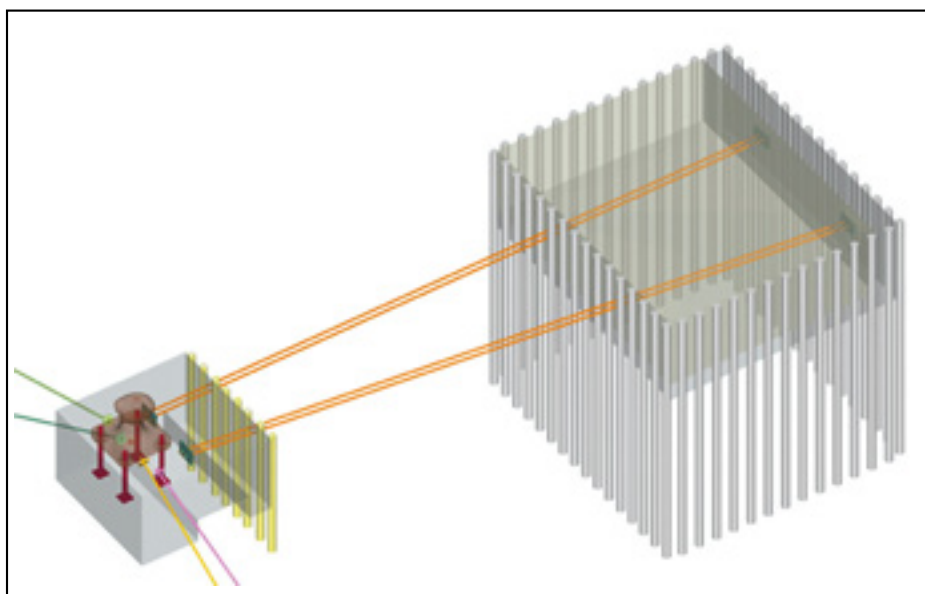


Figura 11. Macizo anclado a bloque de reacción.



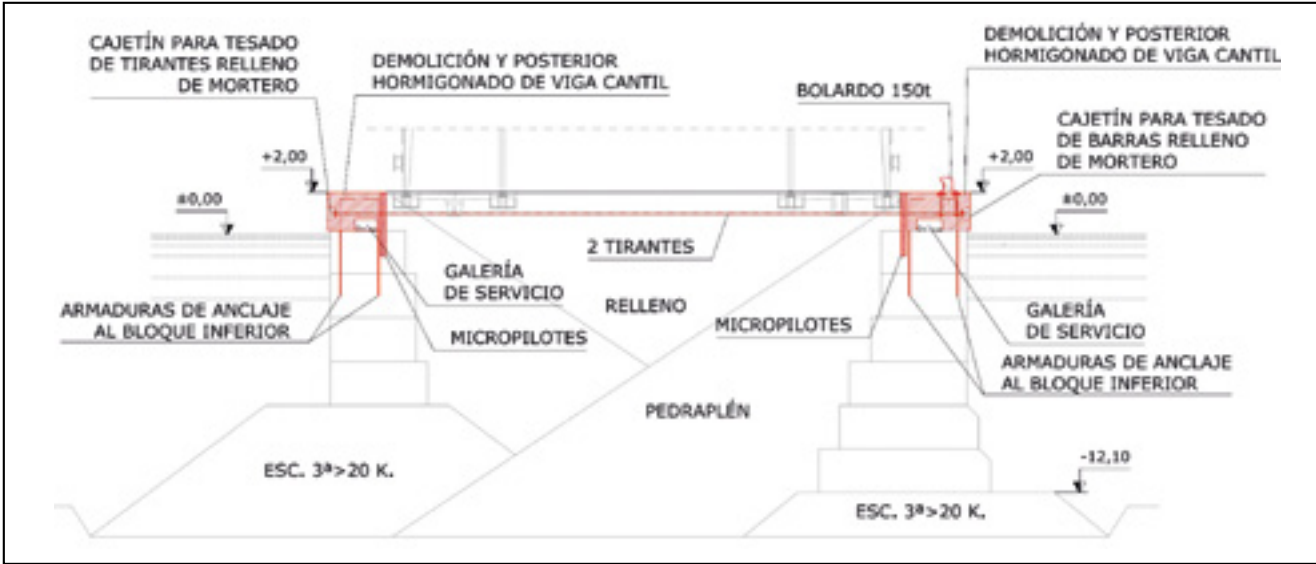


Figura 12. Vigas cantil enfrentadas ancladas entre ellas.

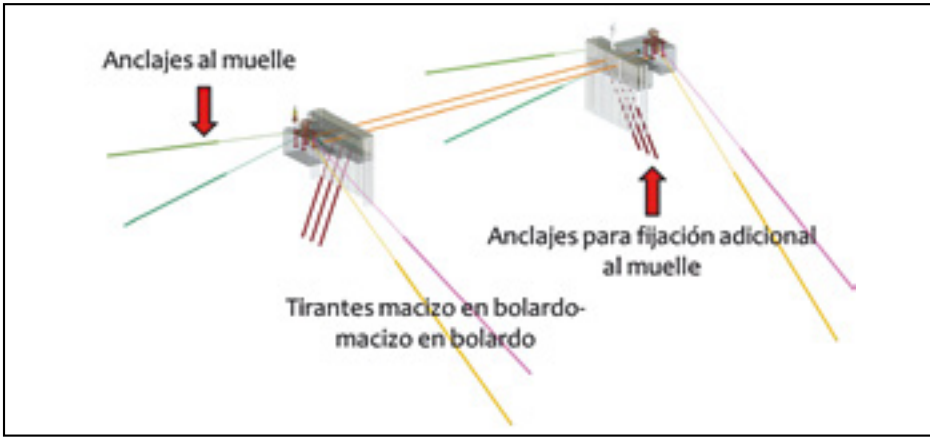


Figura 13. Vigas cantil enfrentadas ancladas entre ellas con fijación adicional al muelle mediante anclajes.

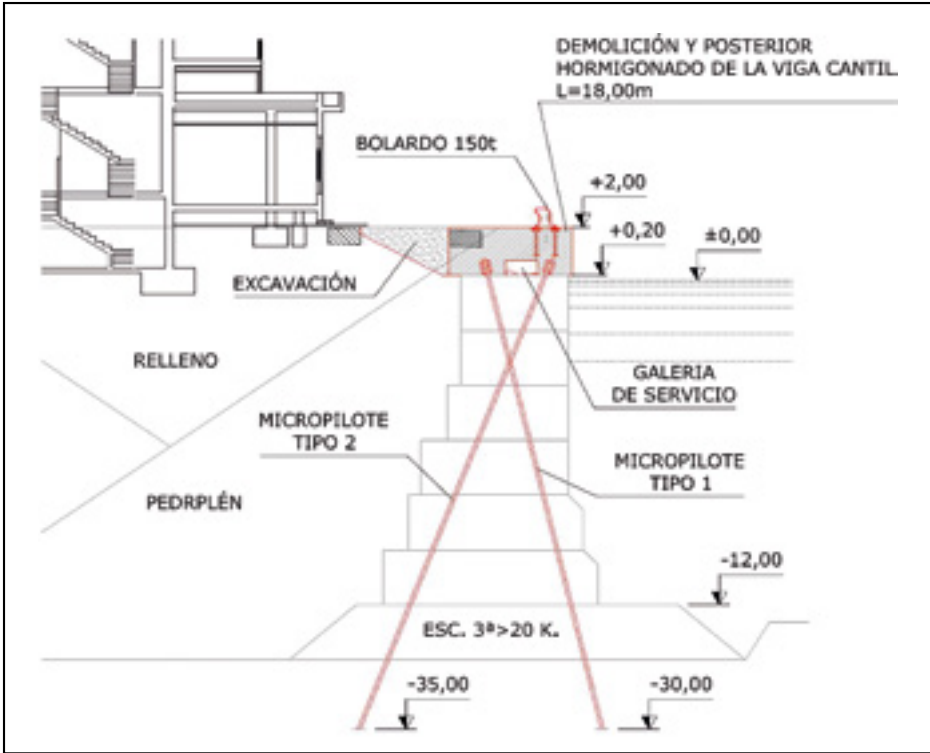


Figura 14. Macizo reforzado mediante cosido con micropilotes.



Figura 15. Pantallas antiviento Canal de Calandkanaal. Puerto de Rotterdam.

## 6. LA EXPERIENCIA DE BOTAFOC (IBIZA)

### 6.1. Situación previa y necesidades

El dique de Botafoc es la principal obra de abrigo del Puerto de Ibiza. Su construcción generó posibilidades de desarrollo de nuevas infraestructuras del puerto que eliminaban las dificultades operativas que se producían en los muelles tradicionales, cuya situación, contigua a áreas de mayor presión urbana, era fuente continua y creciente de conflictos.

Con esta obra se creó una nueva plataforma operativa para tráficos especiales y una generosa área de aguas abrigadas que permitió planificar nuevas infraestructuras portuarias.

Por ello, entre los años 2010 y 2012 se ejecutaron las obras de “Explanada y muelles comerciales al abrigo del dique de Botafoc” [4], y que dieron lugar, entre otras instalaciones, a dos muelles transversales (Muelle Transversal 1 y Muelle Transversal 2) con una longitud total de atraque de 232 m (ver figura 16).

Una vez finalizadas las citadas obras, entran en servicio los dos nuevos Muelles transversales y se les dota de pasarelas de acceso peatonal a los buques.

No obstante, ante la demanda creciente de cruceros de gran eslora, la longitud de éstos resulta insuficiente para buques de esloras entre 220 y 340 m ya que éstos únicamente pueden atracar en el Muelle Adosado al Dique de Botafoc, donde también descargan los petroleros, generándose cada vez más interferencias que afectan negativamente los distintos tráficos. Para dar respuesta a esta situación se prolonga el Muelle Transversal 2.

### 6.2. Trabajos previos

Previamente al desarrollo del trabajo se realizaron dos estudios por parte de la empresa Ingeniería Civil y Ambiental Hidráulica S.L.:

- **Estudio de maniobrabilidad de los buques:** se valoró la viabilidad de las maniobras de atraque de cruceros de grandes dimensiones, determinando las dimensiones máximas admisibles para la prolongación de los atraques.

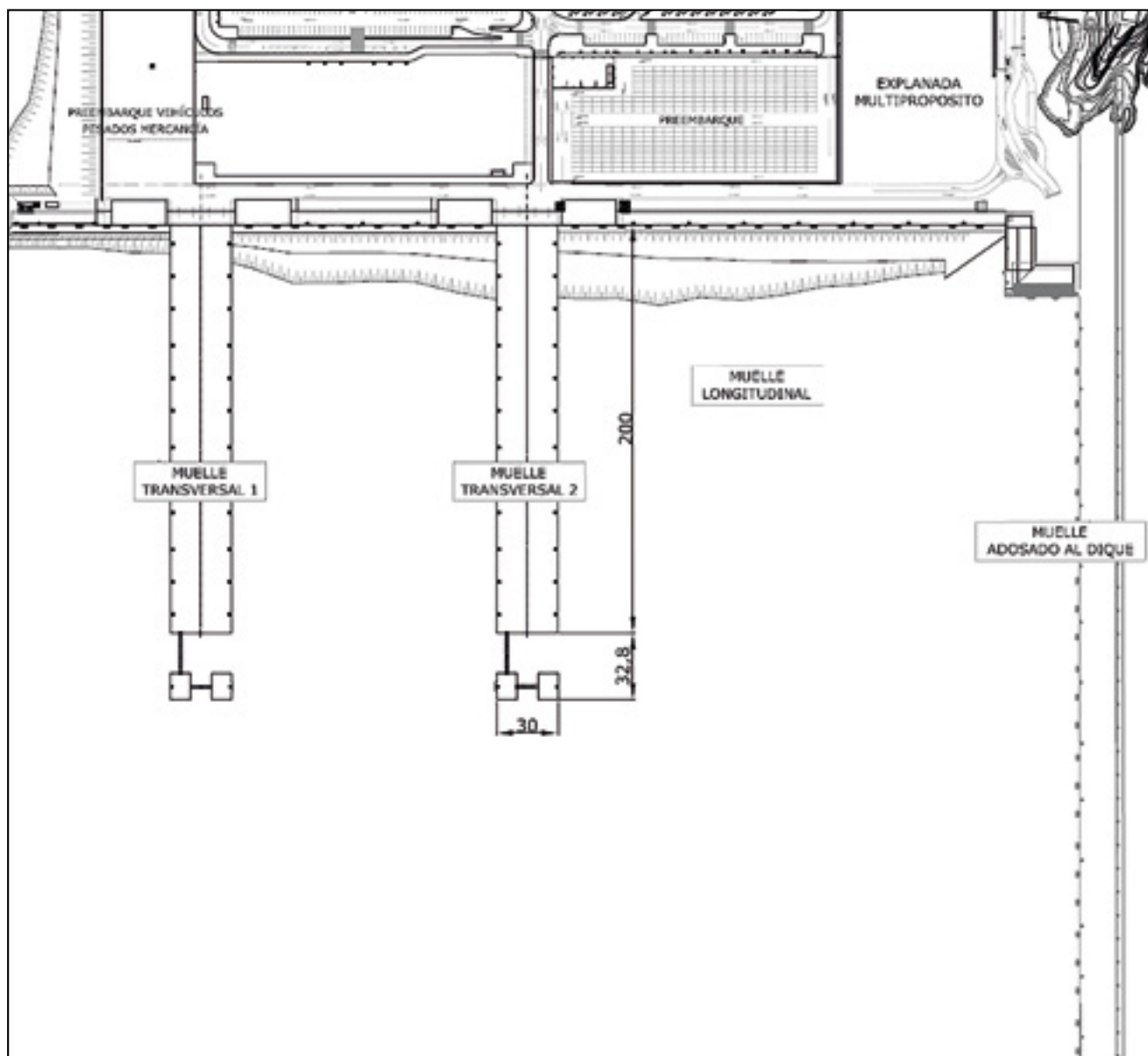
- **Estudio del comportamiento del buque amarrado:** se empleó una herramienta avanzada de simulación para reproducir fielmente el comportamiento del buque atracado y evaluar los esfuerzos en amarras y defensas, teniendo en cuenta las condiciones locales del Puerto y las recomendaciones sobre los límites de operación y estancia.

### 6.3. Solución adoptada

La prolongación del denominado “Muelle Transversal 2” (conocido también como primera línea de atraque) se realizó con una configuración de tres duques de alba que permite completar una longitud total de atraque de 375 m en el lado sur y una longitud de atraque de 328 m en el lado norte. Se distinguen dos tipologías de duque de alba:

- **Los duques de alba 1 y 2:** (numerados desde la estructura actual) están formados por un tablero de hormigón armado de 17,80 x 28,70 x 2,20 m y 16 pilotes, que forman una malla rectangular de 4x4. Estos duques de alba dan servicio a las dársenas situadas a ambos lados del muelle. Se distinguen dos alineaciones de pilotes en estos duques de alba, cada una con unas características específicas de armado y longitud:
  - Alineación A: pilotes exteriores, ubicados a lo largo de ambas líneas de atraque (8 para cada duque de alba). Empotran en arenas y arcillas compactas, llegando a unas profundidades de -43,30 m (duque de alba 1) y -43,40 m (duque de alba 2).
  - Alineación B: pilotes interiores (8 para cada duque de alba). Estos pilotes empotran en la roca 1,20 m (duque de alba 1) y 1,60 m (duque de alba 2).
- **El duque de alba 3:** formado por un tablero (más pequeño) de hormigón armado de 17,80 x 9,80 x 2,50 m y 8 pilotes, distribuidos en dos filas de 4 pilotes. Sólo da servicio a la dársena sur. Estos pilotes están fuertemente armados y empotran 3,10 m en roca.

Todos los pilotes son de hormigón armado con camisa de acero y tienen dos metros de diámetro, aunque su



**Figura 16.** Planta explanada y muelles comerciales al abrigo del dique de Botafoc.

armadura y longitud difiere (ha sido optimizada), sumando una longitud total de aproximadamente 1.835 m. La cota inferior de todos los tableros es de +0,80 m.

La planta y el perfil de las obras se muestran en la figura 17 y la figura 18. En las figura 19, figura 20, figura 21 y figura 22 se definen con mayor detalle los duques de alba.

La decisión de diseñar dos duques de alba de grandes dimensiones (1 y 2) que den servicio a ambos lados, en contraposición con dividirlos en dos más pequeños, como el número 3, tiene como objetivo minorar los esfuerzos (principalmente de tracción y flexión) en los pilotes resultantes de las acciones generadas por los buques (atraque y tiro de bolardo) y reducir así su armadura y longitud, reduciendo, en consecuencia, su coste y plazo de ejecución. Esto también ha permitido distinguir dos tipologías de pilotes (A y B) en los duques de alba 1 y 2, que permiten optimizar su diseño (longitud y armado).

Estos duques de alba 1 y 2 están provistos de 6 bolardos tipo TEE-P (o similar) de 200 t distribuidos en parejas enfrentadas y dos defensas, una para cada línea de atraque.

El dique de alba 3 dispone de 2 bolardos de 300 t tipo TEE-P (o similar), centrados y enfrentados, y una defensa SC-2250 en Calidad C (o similar).

En todos los grupos de bolardos se deja embebido en el hormigón el anclaje de un bolardo de repuesto, de forma que sea sencillo reemplazar el que pudiera romperse, por uno nuevo, en el menor plazo posible.

La ejecución de los nudos entre pilotes y tablero es vital en este tipo de estructuras, ya que condiciona completamente su comportamiento y los esfuerzos que deben resistir pilotes y tablero (ver figura 23).

En general se pueden plantear dos soluciones: empotrar los pilotes en el tablero o ejecutar un nudo que permita el giro relativo entre tablero y pilote.

En Botafoc se optó por la solución empotrada, porque ofrece notables ventajas respecto a la solución simplemente apoyada: menores esfuerzos por cargas horizontales; menos deformaciones; menores efectos de segundo orden; y mejor comportamiento geotécnico frente a empujes. Sin embargo, el cálculo y el diseño se complican y, tal como se puede ver en los documentos del proyecto constructivo [1], los nudos son complicados de ejecutar. Por este motivo, se ha prestado

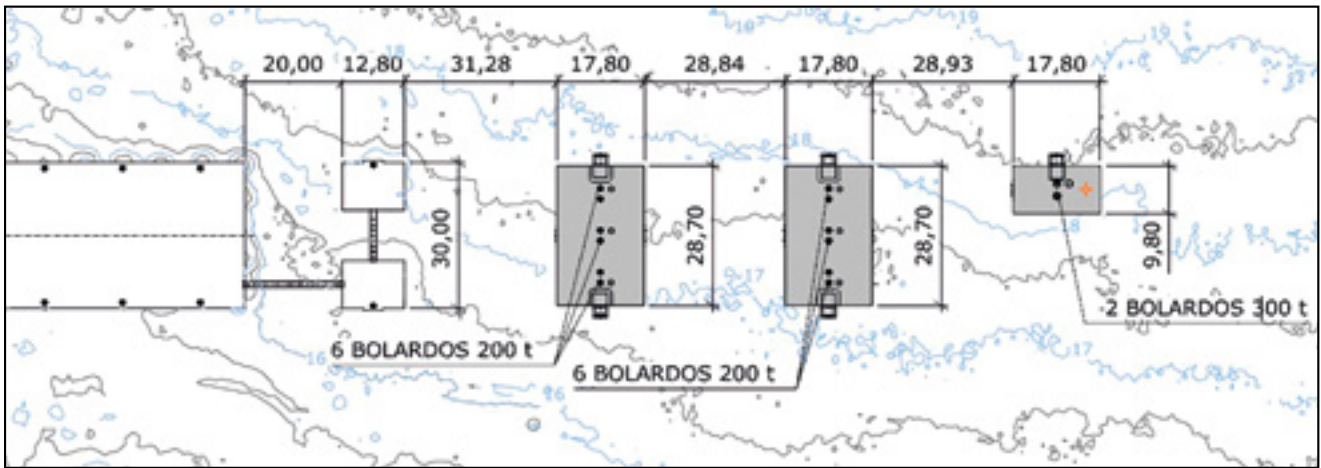


Figura 17. Planta Muelle Transversal 2.

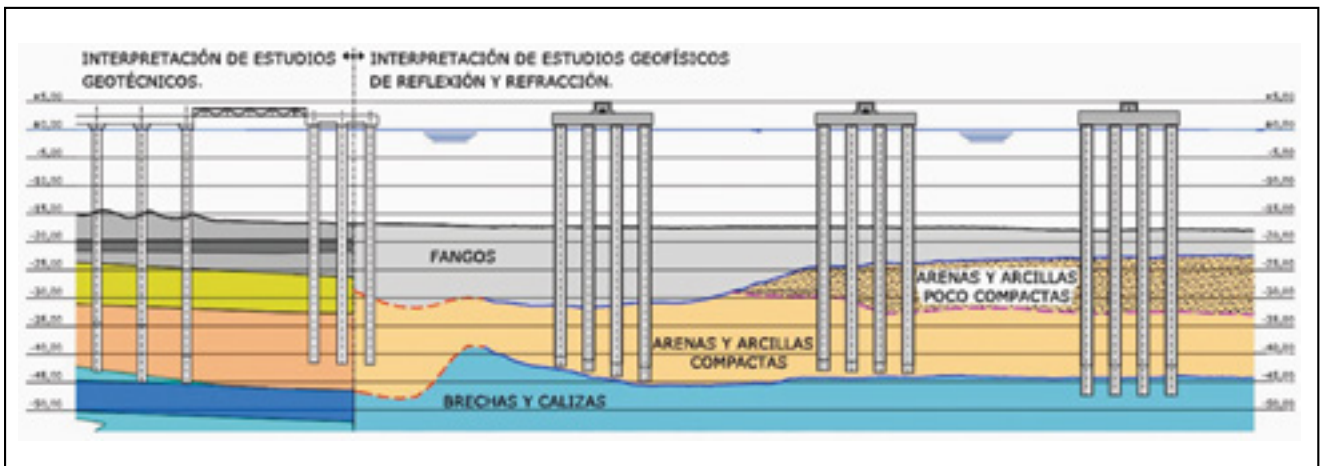


Figura 18. Perfil longitudinal Muelle Transversal 2.

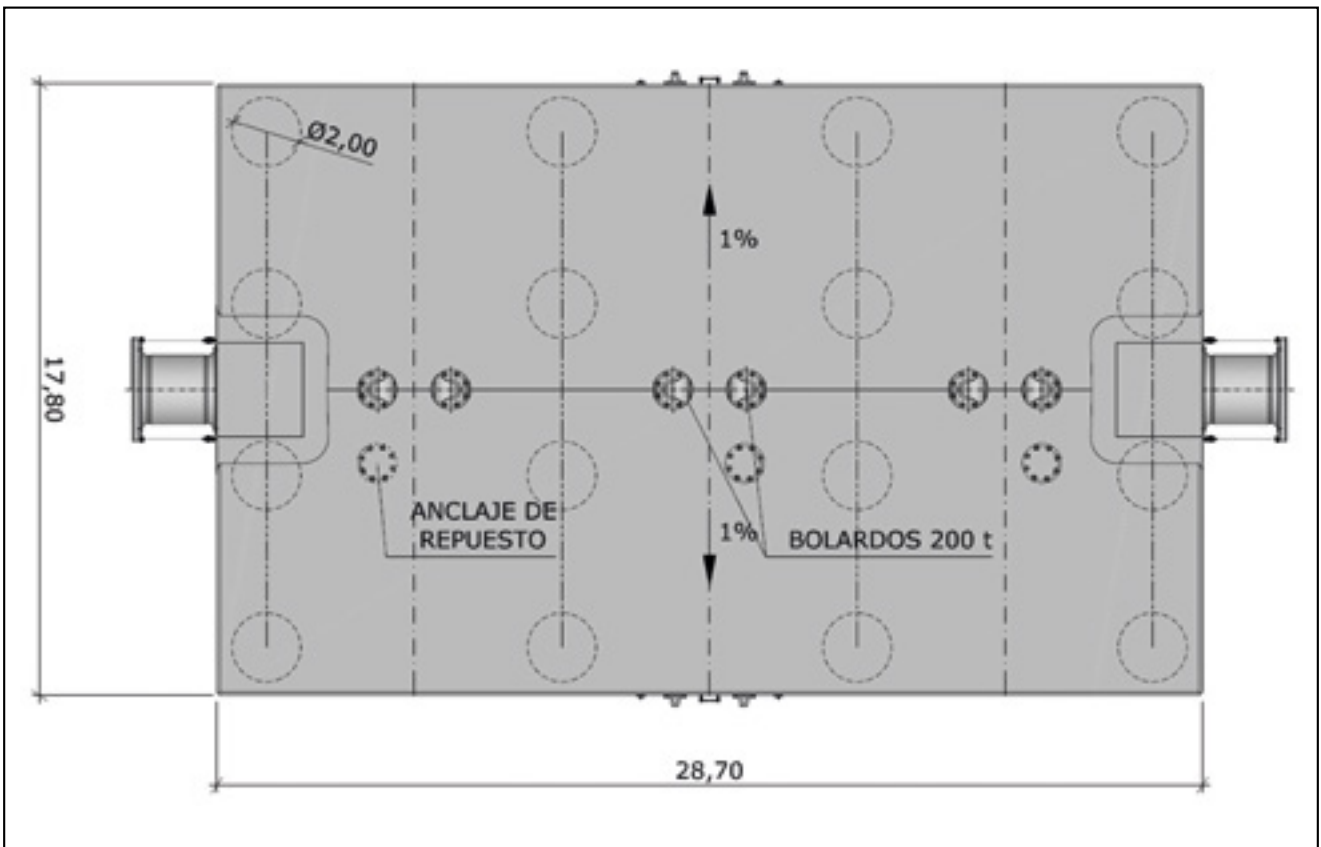


Figura 19. Planta duques de alba 1 y 2.

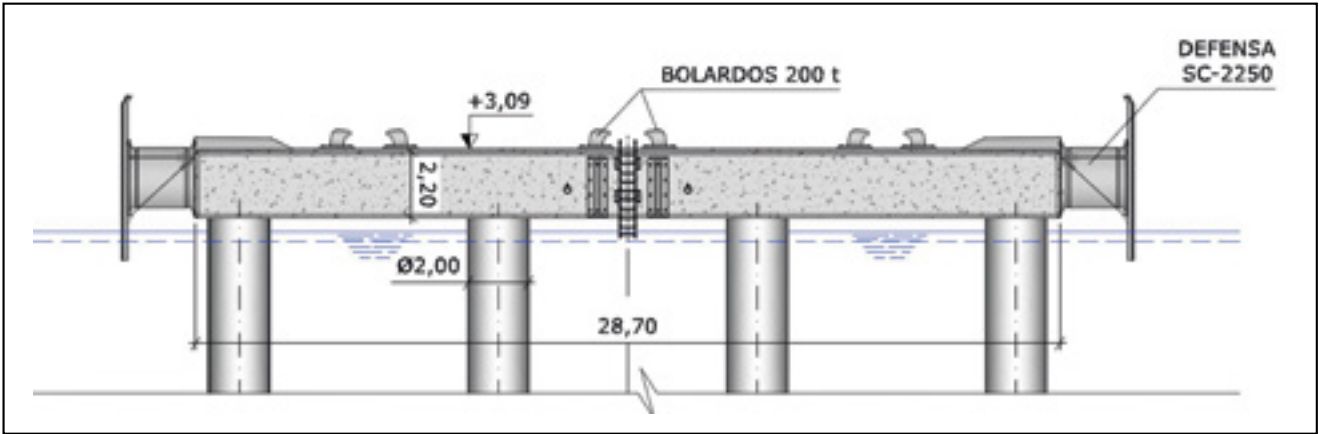


Figura 20. Alzado duques de alba 1 y 2.

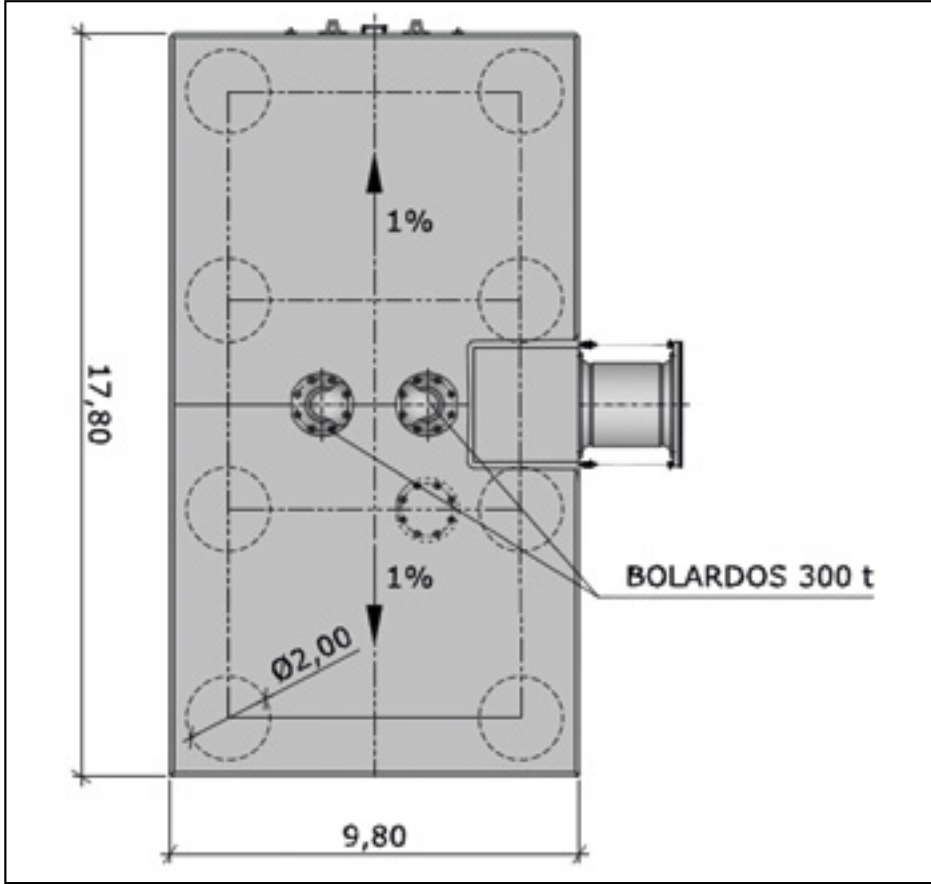


Figura 21. Planta duque de alba 3.

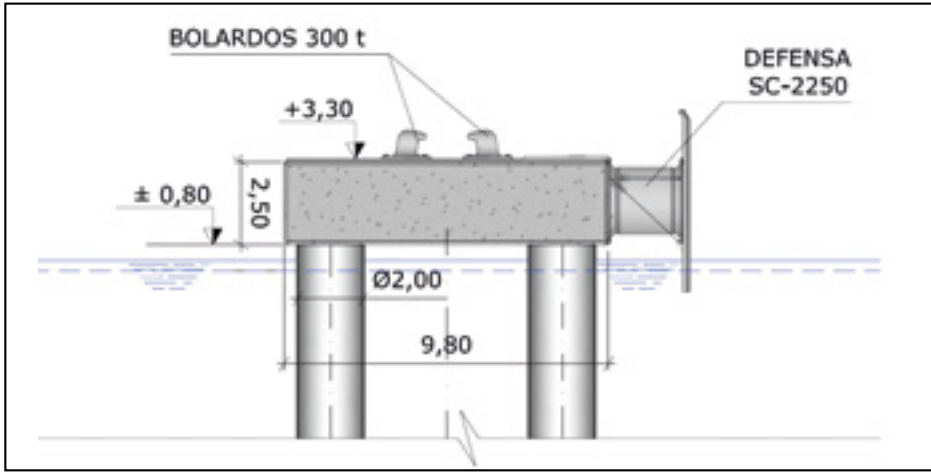


Figura 22. Alzado duque de alba 3.

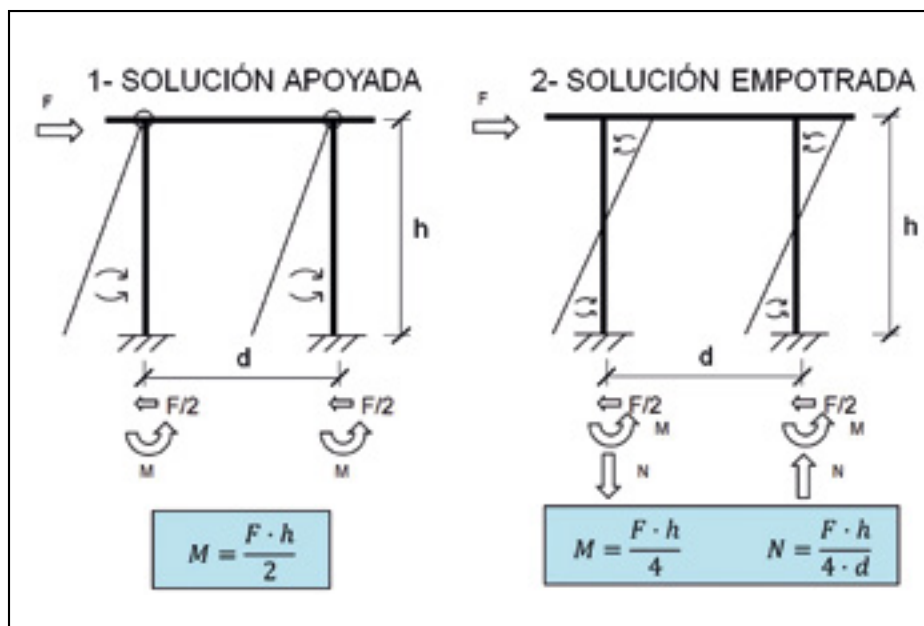


Figura 23. Esfuerzos en los nudos.

especial atención a la definición de los nudos de unión entre el tablero y los pilotes para asegurar el correcto funcionamiento del empotramiento pilote-tablero, esencial para el comportamiento estructural de los duques de alba.

## 7. CONCLUSIONES

La Autoridad Portuaria de Baleares, como tantas otras del mundo, ha experimentado que, en los últimos 40 años, el tamaño medio de los cruceros que atracan en sus puertos ha duplicado su eslora y multiplicado por diez su GT, llegando a tener en la actualidad hasta 360 m de eslora, 46 m de manga y 76 m de francobordo.

Con la aparición de estos gigantescos cruceros, se ha registrado un considerable aumento de la frecuencia de fallo en los sistemas de amarre coincidiendo con episodios de fuerte viento. Dichos fallos son principalmente debidos a la gran superficie expuesta al viento, que da lugar a grandes fuerzas que son transmitidas a los sistemas de amarre.

Además de las grandes fuerzas transmitidas por el viento, la posibilidad de fallo se ve incrementada por los grandes ángulos que forman las amarras con el plano horizontal (alrededor de 45°) debido a la gran altura de las cubiertas de los cruceros. Como consecuencia, la resultante de las líneas en cada punto de amarre es más vertical y se generan tracciones en dicha dirección que no son propicias para su comportamiento estructural.

Por todo ello, y para reducir los riesgos asociados a estos fallos (tanto para los buques como para sus pasajeros durante las operaciones de embarque- desembarque), la APB (apoyada por empresas consultoras de ingeniería) ha realizado un extenso trabajo para estudiar la adaptación de sus muelles a esta nueva situación. En el presente artículo se han expuesto algunas soluciones constructivas planteadas, algunas de las cuales han sido llevadas a la práctica en sus puertos.

En el ámbito normativo, hemos visto que las recomendaciones de diseño en algunos puntos abordan el problema sin tener en cuenta, del todo, las singularidades que presentan los cruceros.

Recomendamos el estudio en detalle del comportamiento del buque amarrado, preferiblemente con modelos numéricos cuando se intuyan fenómenos complejos no detectables con formulaciones analíticas (efectos de segundo orden, resonancia...).

Por último, en este artículo se ha expuesto de forma detallada la solución adoptada para la ampliación de la primera línea de atraque al abrigo del dique de Botafoc [1]. La experiencia permitió a los autores profundizar en la problemática y ofrecer una solución segura y de calidad. Ello supuso un desarrollo tecnológico innovador, caracterizado por:

- Estudio estructural en detalle para la tipología de duques de alba pilotados.
- Empleo de nudos complejos para asegurar el empotramiento de los pilotes en el tablero.
- Posibilitar el amarre en bolardos alejados del cantil, dando lugar a una mejora funcional.
- Disposición de parejas de bolardos en puntos de amarre de servicio a buques situados a ambos lados del atraque.
- Colocación de anclajes de reserva para operaciones de mantenimiento y reparación.

## 8. REFERENCIAS

Pita, E., et al. (2014). Prolongación de la primera línea de atraque para grandes buques en los Muelles Comerciales al abrigo del Dique de Botafoc (P.O. 1075-G). Proyecto Constructivo. Madrid: INCREA.

Ministerio de Fomento (2012). *Recomendaciones para el proyecto y ejecución en Obras de Atraque y Amarre. ROM 2.0-11*. Madrid: Puertos del Estado. Ministerio de Fomento (Gobierno de España).

The Overseas Coastal Area and Development Institute of Japan (2009). *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*. Tokio (Japón): OCEDI.

Pita, E., et al. (2008). *Explicación y muelles comerciales al abrigo del dique de Botafoc. Proyecto Constructivo*. Madrid: INCREA.