

## Paper 33 – Cómo adaptar las terminales portuarias al incremento de tamaño de los buques

Eloy Pita

*Ingeniería Creativa Pita, S.L. (INCREA), C/ Bugarvilla 6, Portal 1, 1º A, 28036 Madrid, España.  
Tlf.: +34 913785266*

Email: [epita@increa.eu](mailto:epita@increa.eu)

### ABSTRACT:

Los barcos que llegan a nuestros puertos tienen unas dimensiones cada vez mayores y las terminales portuarias deben adaptarse a ello si quieren seguir brindando servicio a sus clientes.

El incremento de calado exige unas dársenas más profundas (nuevas obras de dragado) y unos muelles de mayor calado. En los muelles existentes, el incremento de profundidad obliga a actuaciones que varían en función de su tipología: no es lo mismo hacerlo en un muelle de gravedad que en uno de pilotes o tablestacas. La posibilidad de adelantar la línea de muelle facilita estos cambios.

El incremento de la eslora y manga de los buques obliga a unas configuraciones en planta más generosas de los puertos. Ello, unido al aumento de la “obra muerta” y superestructura de los buques, hace que las infraestructuras portuarias deban tener elementos de amarre y atraque de grandes proporciones. En muchos casos, en muelles antiguos, se puede incrementar su longitud fácilmente con prolongaciones o con la adición de duques de alba complementarios. En relación a las defensas, si estos buques consiguen (con sus grandes equipos propulsores) disminuir la velocidad de impacto contra las mismas, se puede reducir mucho la energía a absorber. Si la carga (tiro de bolardo o empuje contra la defensa) aumenta, en las obras antiguas, no basta con cambiar los bolardos o defensas por unos de mayores proporciones, sino que toda la cadena estructural, que lleva las fuerzas desde el barco hasta el terreno, deberá tener suficiente capacidad portante; no podemos olvidar que “una cadena es tan débil como su eslabón más pequeño”.

En esta ponencia se reflexionará, a la luz de varias obras proyectadas por Increa, sobre las soluciones ingenieriles para incrementar la capacidad de infraestructuras existentes.

### 1 INTRODUCCIÓN

En la presente ponencia se plantean diferentes soluciones ingenieriles para dar respuesta al incremento de tamaño de los buques:

- incremento de calado
- incremento de dimensiones en planta
- incremento de la capacidad de los elementos de amarre

### 2 SOLUCIONES PARA EL INCREMENTO DE CALADO

A continuación, se describen las soluciones ingenieriles adoptadas en varias obras proyectadas por Increa para lograr dotar a los muelles de un mayor calado, explicando los condicionantes que han llevado a su diseño.

Además, se exponen algunas reflexiones relativas a algunos trabajos en los que ha participado Increa.

## Muelle de Poniente en Palma de Mallorca (Islas Baleares, España)

El muelle existente tenía una longitud total de 216 m. Estaba constituido por bloques de hormigón cimentados a la cota -9,00 salvo los 20 m más a poniente, que estaban cimentados a la cota -7,16 m. Además, el tacón ro-ro estaba formado por un muelle claraboya, de 35 m de longitud, cimentado a la cota -7,00 m.

El objetivo de la actuación era lograr que todo el muelle y el tacón tuvieran un calado de 9 m.

En la zona de muelle de bloques se incrementó el calado mediante la siguiente solución estructural (ver Figura 1):

- Pantalla frontal de pilotes de 1 m de diámetro
- Cierre trasero de inyecciones de mortero de baja movilidad
- Mejora del terreno mediante inyecciones de jet-grouting

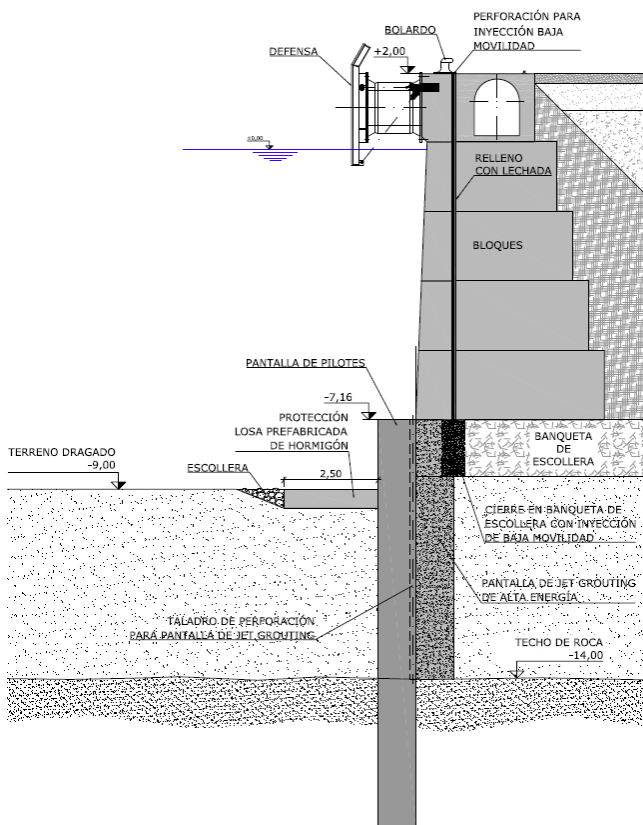


Figura 1: Esquema de disposición de pilotes, columnas de jet-grouting y cierre con mortero de baja movilidad en muelle de bloques

En la zona de muelle claraboya fue suficiente con disponer una pantalla de pilotes (ver Figura 2).

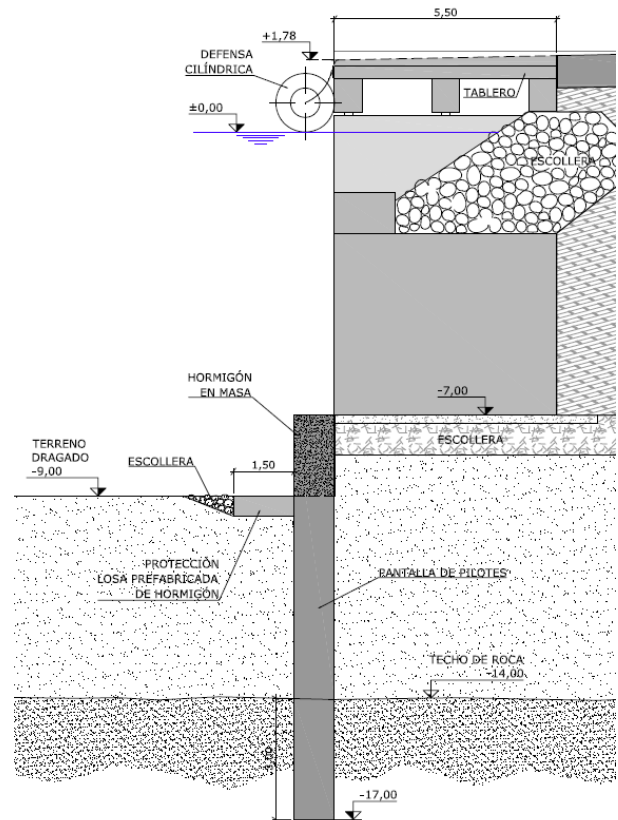


Figura 2: Esquema de disposición de pilotes en muelle de claraboya

La pantalla de pilotes (convenientemente armados) se diseñó para trabajar como una ménsula que resistía las cargas transmitidas por el muro, transmitiéndolas a su empotramiento inferior.

Dado que los pilotes se colocaron por delante del cantil del muelle, el diámetro máximo de los pilotes se limitó a 1 m, dimensión menor que el vuelo de la defensa.

Se estudió la posibilidad de prescindir de la mejora del terreno en el trasdós de la pantalla. No obstante, en la zona de muelle de bloques no fue posible debido a los momentos de diseño excesivos que se aparecían en los pilotes. Es decir, en el muelle de bloques fue necesario mejorar el terreno en el trasdós. En la zona de muelle claraboya la magnitud de los esfuerzos era menor, por lo que no fue necesario realizar la mejora del terreno.

Dadas las características del terreno, predominantemente granular, el mismo resultó apto para realizar un tratamiento mediante jet-grouting. Se ubicaron las columnas de jet-grouting delante de la puntera del muelle, para evitar la necesidad de perforar los bloques existentes.

Para asegurar la formación correcta de las columnas de jet-grouting se previó la ejecución

de un cierre trasero (por delante estaban los pilotes) mediante inyecciones de mortero de baja movilidad. Estas inyecciones se llevaron a cabo mediante taladros a través del muelle de bloques. De este modo, aprovechando la necesidad de tener que atravesar los muelles de bloques, se realizó un cierto cosido entre los mismos, disminuyendo el riesgo de vuelco y deslizamiento de un bloque sobre otro.

Los pilotes se empotraron 4 m en el sustrato rocoso y se armaron para resistir los esfuerzos de flexión, cortante y cumplir con el estado límite de fisuración.

### *Muelle de pilotes para Pescanova en Redondela (Ría de Vigo, España)*

En esta obra la problemática era diferente, dado que era posible adelantar la línea de muelle existente, que era un muelle de bloques cimentado a una cota insuficiente. Sin embargo, el calado del atraque aumentaba según el fondo se alejaba del muelle actual. De esta manera, se ejecutó un muelle de pilotes adosado al muelle existente, con un ancho de 9,5 m, por lo que se alcanzaba una zona donde el calado era suficiente (6,6 m en bajamar).

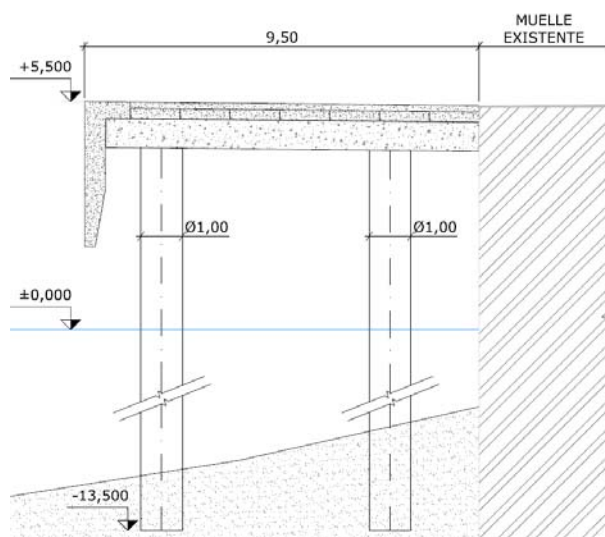


Figura 3: Sección tipo del nuevo muelle de pilotes



Figura 4: Imagen de las obras

Otras características básicas del muelle proyectado se muestran a continuación:

- Pilotes circulares metálicos de diámetro exterior 1,04 m
- Longitud de muelle de 90,05 m
- Cota de coronación de +5,50.

Se realizó un modelo en 3D mediante el método de los elementos finitos para el cálculo de esfuerzos en el conjunto formado por el tablero y los pilotes. La prefabricación de elementos fue muy alta, para simplificar la construcción.

### *Muelle de Combustibles y Ro/Ro en Ibiza (España)*

Se trata de un proyecto de renovación de un antiguo muelle de pilotes, incrementando su calado y capacidad mediante el diseño de una solución de tablestacas.

En este caso se adelantó ligeramente la línea de muelle colocando la tablestaca principal por delante del muelle existente (ver figuras a continuación).

Increa realizó la optimización del conjunto tablestaca-larguero-tirante, (teniendo muy en cuenta las condiciones de de durabilidad).

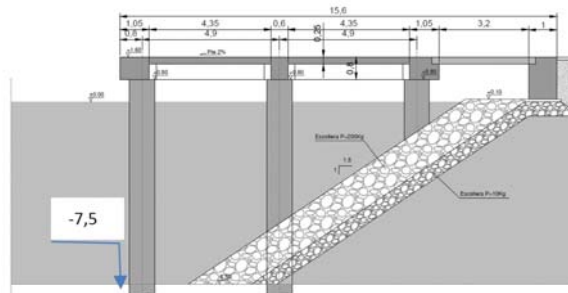


Figura 5: Estado anterior a las obras. Sección tipo muelle Levante, donde se muestra el calado medio previo

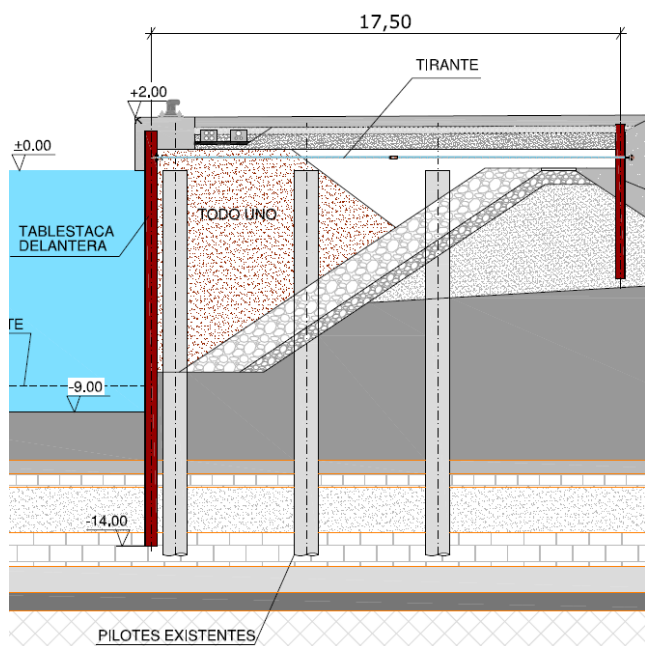


Figura 6: Estado final. Sección tipo muelle Levante

### Ampliación del Muelle de Raíces en la ría de Avilés (España)

En este momento, por encargo de la Autoridad Portuaria de Avilés, Increa está arrancando los trabajos del estudio de alternativas y de redacción del Anteproyecto.

Se trata de un muelle de gravedad cuyo calado y capacidad van a incrementarse a la vez que se adelanta el cantil y se estudian las implicaciones ambientales del dragado a realizar delante del muelle.

Se contemplan las siguientes alternativas:

- Muelle de bloques
- Muelle de tablestacas
- Muelle de pilotes
- Pantalla de pilotes bajo el muelle existente
- Demolición del muelle existente

A priori, consideramos que la alternativa de tablestacas es la que tiene más ventajas:

- No se pone en riesgo la estabilidad de la estructura existente, que quedará embebida en el nuevo muelle.
- Medioambientalmente, se evita la necesidad de llevar a vertedero el material de dragado, pues permite la colocación de la totalidad del material en el trasdós de las tablestacas, con total confinamiento del mismo durante la ejecución.
- Se permite compatibilizar la explotación parcial del muelle actual durante las obras. Si se emplean medios terrestres (en lugar de pontonas) para la construcción, se facilita dicha explotación.

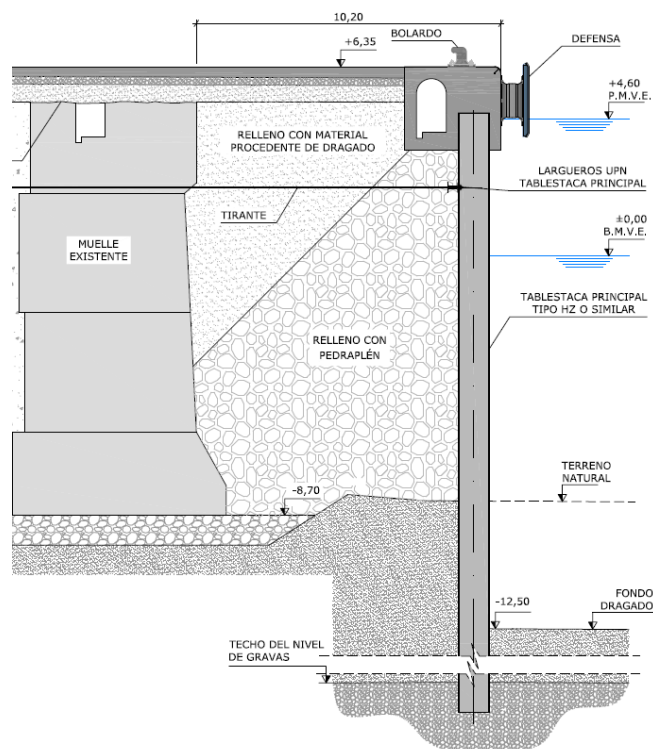


Figura 7: Alternativa de tablestacas. Muelle de raíces en la ría de Avilés

### Consecuencias de un mal diseño

Increa también ha participado en el análisis de las patologías observadas en muelles donde se había realizado un diseño incorrecto de la solución estructural para llevar a cabo el incremento de calado.

En uno de los casos, en los que se planteaba una inyección con jet-grouting bajo un muelle de gravedad formado por cajones, se realizaron inyecciones en el interior de las celdas de los cajones. Esto provocó daños importantes en las paredes exteriores de los cajones, por exceso de presión (y consiguientes esfuerzos), tal como se puede observar en las siguientes imágenes.

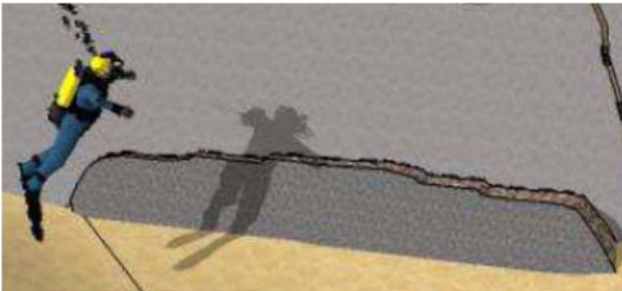


Figura 8: Representación de un buzo para observar el tamaño relativo de las grietas en la base de los cajones



Figura 9: Grieta observada en los cajones



Figura 10: Grietas verticales que dejaron vistas las armaduras de la pared exterior del cajón

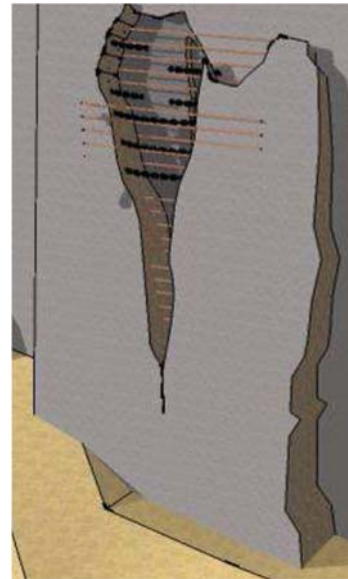


Figura 11: Representación 3D de la fotografía anterior

### 3 INCREMENTO DE LA CAPACIDAD DE LAS INFRAESTRUCTURAS

La fuerza transmitida por el buque a las obras de amarre está directamente relacionada con la superficie del buque expuesta al viento.

En la siguiente imagen puede observarse las enormes áreas expuestas al viento en diversos buques tipo (cada uno corresponde al de mayor eslora de su categoría). En color gris se representa el área expuesta y en color rojo, el área sumergida, que puede considerarse proporcional al desplazamiento.

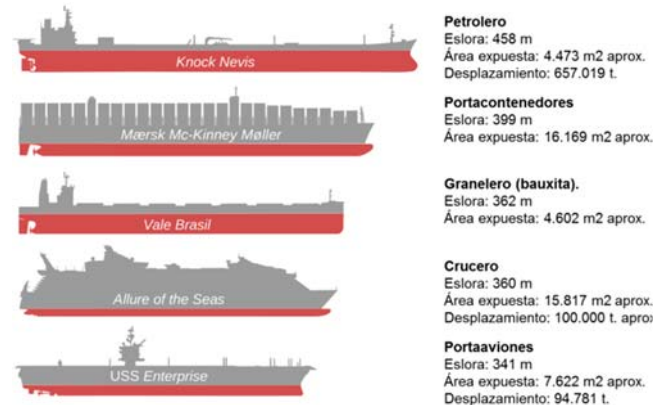


Figura 12: Propiedades grandes buques tipo.

Por tanto, si el agente preponderante para diseñar un sistema de amarre (bolardos) es el viento (lo cual es lo habitual), está claro que las cargas de amarre serán proporcionales a la superficie expuesta y que un buen indicador podría ser el arqueo (registro bruto) del buque (volumen, que correspondería al total de la

imagen del buque). En los últimos años, dicho arqueo no para de crecer.

Si el agente preponderante son las corrientes, será el desplazamiento el que condiciones la fuerza de amarre. Este desplazamiento también aumenta, correlativamente, con el tamaño del buque.

Otro hecho singular que caracteriza la disposición de amarre de algunos buques, como 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, generando fuerzas verticales ascendentes, que deben ser resistidas por el sistema de anclaje del bolardo.

### *Los bolardos del Puerto de Palma de Mallorca (Islas Baleares, España)*

Debido a la llegada de cruceros de grandes dimensiones, las estructuras de amarre construidas en el pasado habían quedado obsoletas y eran cada día más frecuentes los daños en bolardos, etc. La Autoridad Portuaria de Baleares encargó al autor de esta ponencia un estudio de las soluciones más adecuadas para incrementar la capacidad de los bolardos de la mayor parte de sus muelles.

### *Los nuevos muelles en Botafoc (Ibiza, islas Baleares, España)*

Entre los años 2010 y 2012 se ejecutaron las obras de "Explanada y muelles comerciales al abrigo del dique de Botafoc", proyectadas por Increa, que dan lugar, entre otras obras, a dos pantalanes (Muelle Transversal 1 y Muelle Transversal 2) con una longitud unitaria de 200 m más los duques de alba, generando cuatro líneas de atraque de 232 m de longitud.

En la siguiente imagen vemos la planta de las obras construidas.

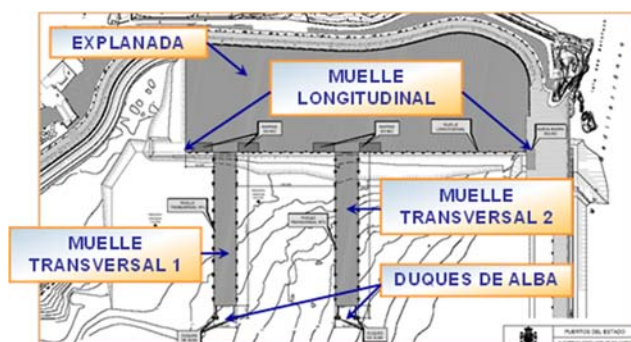


Figura 13: Explanada y muelles comerciales al abrigo del muelle de Botafoc

No obstante, ante la demanda creciente de cruceros de gran tamaño, la longitud de estos muelles transversales resultaba insuficiente para buques de esloras entre 220 y 340 m ya que únicamente pueden atracar en el Muelle Adosado al Dique de Botafoc (que se ve a la derecha de la imagen), donde también ha de producirse la descarga de los petroleros, produciéndose cada vez más interferencias que afectan negativamente a unos y otros tráficos. Para dar respuesta a esta situación, se decidió la prolongación del muelle transversal 2.

Increa resultó adjudicataria de dicho Proyecto, gracias al cual se completó 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 mediante 3 duques de alba pilotados, con las siguientes características:

Los duques de alba 1 y 2 consisten en un tablero de hormigón armado de 17,80 x 28,70 x 2,20 m, empotrados en 16 pilotes de hormigón armado con camisa de acero de 2 m de diámetro. Estarán equipados con bolardos de 200 t y defensas de gran capacidad.

El duque de alba 3 dispone de un tablero de hormigón armado de 17,80 x 9,80 x 2,50 m, empotrado en 8 pilotes iguales a los anteriores. En este caso, los bolardos son de 300 t.

Como buque de diseño se escogieron los cruceros de la Clase Freedom, con una eslora de 339 m, una manga de 38,60 m y un calado de 8,50 m.

Lógicamente, se hicieron los correspondientes estudios de navegación (maniobras de atraque) y de comportamiento del buque amarrado.

En la Figura 14, vemos una planta de las obras. Las estructuras sombreadas son las de nueva construcción. En la Figura 15 se ilustra el Crucero Freedom of the Seas (situado a la izquierda) atracado junto al crucero Oasis of the Seas (crucero de mayor dimensión del mudo, 362 m de eslora y 65 m de manga) en un muelle similar al proyectado en Ibiza.

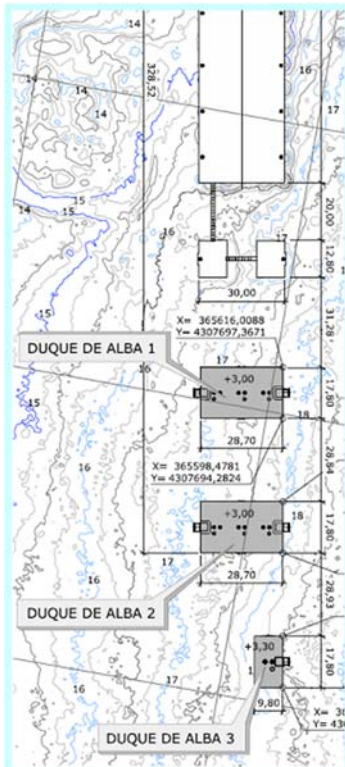


Figura 14: Planta de las obras de los nuevos duques de alba



Figura 15: Vista aérea de los cruceros Freedom of the Seas y Oasis of the Seas (derecha)

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 sobre ellos es enorme. Esta acción deberá ser soportada por el muelle, con unas líneas de amarre que tienen la complejidad de partir de puntos muy altos en los barcos. Además, deben tenerse en cuenta en el diseño las enormes fuerzas horizontales generadas durante el atraque.

La experiencia de la ampliación de la primera línea de atraque al abrigo del dique de Botafoc permitió a INCREA, encargada de la realización del proyecto, 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.

#### 4 CONCLUSIONES

Está claro que los puertos deben adaptarse de forma inteligente al creciente tamaño de los buques que operan en el mundo.

##### *Incremento de calado*

La selección de la tipología de las obras de incremento de calado depende de diversos condicionantes, tales como la posibilidad de adelantar la línea de muelle, la geotecnia (por ejemplo, para la viabilidad de hincado de la solución de tablestacas), la posible interacción de la nueva tipología con la existente o los condicionantes medioambientales (por ejemplo, en caso de los dragados necesarios).

Además, es fundamental el estudio de los detalles constructivos y la posible afección, durante la ejecución de las obras, a las obras existentes.

## *Incremento de dimensiones en planta*

Es fundamental realizar estudios de maniobras para analizar las dimensiones de las dársenas y de las obras de atraque. Una solución barata, en algunos casos, consiste en la construcción de duques de alba que incrementen la longitud útil de los muelles.

## *Incremento de la capacidad de los elementos de amarre*

Con la aparición de grandes buques, 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 a transmitir a las infraestructuras.

En adición a las grandes fuerzas del viento, la posibilidad de fallo se ve incrementada por los grandes ángulos que forman las amarras con el plano horizontal al partir de las elevadas cubiertas de los buques y, en especial, de los cruceros. Esto da lugar a que la resultante de las fuerzas en cada punto de amarre sea más vertical, generando tracciones en dicha dirección que no son propicias para su comportamiento estructural.

Por todo ello, y con objeto de reducir los riesgos asociados a estos fallos, 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...).

## REFERENCIAS

Anteproyecto y documento ambiental de las obras de "Adecuación del muelle de Raíces para nuevos tráfico"; cliente: Autoridad Portuaria de Avilés (Asturias, España); Año: 2016; Adjudicatario: Increa

Refuerzo de bolardos dentro del Proyecto constructivo de prolongación del dique-muelle del Puerto de Santa Cruz de La Palma (islas Canarias, España), cliente: Autoridad Portuaria de Santa Cruz de Tenerife; Año: 2016; Autor: Increa

Asistencia Técnica para la comprobación del comportamiento estructural del pantalán y los duques de alba del muelle transversal 2, para el atraque de buques de gran eslora en el puerto de Eivissa. Islas Baleares (España); cliente: Autoridad Portuaria de Baleares; Año: 2015; Autor: Increa

Proyecto constructivo de prolongación de la primera línea de atraque para grandes buques en los muelles comerciales al abrigo del dique de Botafoc; cliente: Autoridad Portuaria de Baleares; Año: 2014; Autor: Increa

Proyecto constructivo de muelles y explanadas comerciales al abrigo del dique de Botafoc en el puerto de Ibiza (España); cliente: Autoridad Portuaria de Baleares; Año: 2009; Autor: Increa

Proyecto constructivo de la ampliación del muelle de Pescanova en Chapela, Redondela. Pontevedra, España; cliente: FCC-Pescanova; Año: 2008; Autor: Increa

Proyecto constructivo de mejora de calados en ampliación muelle poniente norte en el puerto de Palma de Mallorca (España); cliente: Autoridad Portuaria de Baleares; Año: 2008; Autor: Increa

Proyecto para la instalación de nuevos bolardos para grandes cruceros en el Puerto de P. de Mallorca; cliente: Autoridad Portuaria de Baleares; Año: 2006; Autor: Increa