

## Avances tecnológicos en el proyecto y construcción de obras marítimas



### Francisco Esteban Lefler

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos del Estado en excedencia. Ingeniero de Construcción y Electricidad.

Director técnico de Servicios Técnicos en FCC Construcción

### Resumen

En las últimas décadas se ha producido un considerable avance en el proyecto y la construcción de las obras marítimas, determinado por la experiencia española de principios de siglo XXI y los adelantos tecnológicos en medios de posicionamiento y control y equipos de construcción marítima y la demanda de competitividad que supone el actual proceso de internacionalización. Los métodos probabilísticos de diseño, recogidos en las ROM españolas y con cada vez mayor difusión internacional, la información meteorológica oceánica disponible y el esfuerzo en materia de I+D+i han sido esenciales para configurar el avance tecnológico y la preparación para los retos del futuro.

### Palabras clave

Diques, muelles, cajones

### Abstract

*Remarkable developments took place recently in design and construction of maritime works. Technological advances in positioning, control and maritime construction equipment, together with the Spanish experience the beginning of 21st Century and the demand of competitiveness derived from the expansion to worldwide markets made possible those developments. Probabilistic design methodologies adopted by the Spanish ROM Recommendations with increasing international diffusion, the quantity and quality of available metocean information and the efforts in Research, Development and Innovation have been fundamental for the technological development and readiness for the future challenges.*

### Keywords

*Breakwaters, quay walls, caissons*

### Introducción

Entre finales de la década de 1990 y la primera década del presente siglo, se acometieron en España importantes obras de ampliación de puertos, que supusieron más de 15 km construidos de diques en talud y más de 16 km de diques verticales de cajones flotantes de hormigón armado [1] [2]. A estas cifras hay que añadir un importante número de obras de atraque, lo que ha supuesto un considerable avance en las infraestructuras portuarias de los puertos de interés general, así como la generación de un importante conjunto de conocimientos teóricos y prácticos en materia de proyecto y construcción de obras marítimas.

Esta actividad se ha superpuesto en el tiempo con el intenso proceso de internacionalización de los sectores consultor y constructor de nuestro país. Ello ha supuesto la exportación de tipologías constructivas en las cuales las empresas españolas pueden considerarse vanguardia global, así como la necesidad de abordar tipologías y

procesos constructivos que han sido menos frecuentes en la reciente ingeniería marítima española, en entornos donde predominan marcos normativos diferentes. Al éxito en este proceso han contribuido de manera fundamental los avances tecnológicos que, en proyecto y construcción, han acompañado la intensa actividad de nuestra ingeniería marítima en los últimos años y que, seguidamente, exponemos de forma somera, con referencia en experiencias prácticas.

### Avances en el proyecto

En la mayor parte de las obras marítimas, el diseño está directamente ligado a los procesos constructivos de tal manera que es frecuente que las variaciones en los mismos supongan la revisión de aspectos del diseño. Especialmente en el caso de las obras de abrigo, en las cuales el riesgo de construcción viene determinado por la exposición a los agentes de clima marítimo de secciones en ejecución aún inconclusas. También en las obras

de atraque cimentadas sobre pilotes que son, en general, estructuras evolutivas en las cuales el momento en que se materializan las conexiones entre los diferentes elementos estructurales determina la distribución de los esfuerzos sobre los diferentes elementos estructurales, teniendo también importancia los fenómenos reológicos del hormigón. Los avances realizados en los últimos años han sido consecuencia de la evolución simultánea y en constante diálogo, de las herramientas de proyecto y de los procesos de construcción.

#### *Bases de partida*

La generalización y mejora de los sistemas de posicionamiento vía satélite, de los medios acústicos de reconocimiento submarino y de los equipos para reconocimientos geotécnicos en mar abierto, han proporcionado poderosas herramientas de proyecto, reduciendo incertidumbres tradicionalmente importantes y sus consiguientes sobrecostes, y aportado medios para la realización y control de trabajos submarinos, que han incrementado notablemente su calidad y fiabilidad.

Una base fundamental para el diseño de obras marítimas es el conocimiento detallado del clima marítimo, que determina la solicitación fundamental de las obras de abrigo, y es el factor de riesgo fundamental de las operaciones en mar abierto. En España se cuenta con las redes de medida desarrolladas y operadas por el organismo público Puertos del Estado, constituidas por boyas, mareógrafos y radares de alta frecuencia. El tiempo transcurrido desde que comenzaron las medidas instrumentales en el litoral español permite hoy disponer de bases de datos instrumentales con prolongada base temporal, que constituyen herramientas fundamentales para el proyecto.

En la actividad internacional se constata la dificultad de encontrar conjuntos de información instrumental de clima marítimo tan completos como el que se tiene en el litoral español. Es muy relevante, sobre todo para la construcción, el sistema de predicción de viento y oleaje que proporciona Puertos del Estado conjuntamente con la Agencia Estatal de Meteorología, basado en modelos numéricos de generación de oleaje, que emplean los campos de vientos proporcionados por esta última. A través de métodos numéricos se han generado bases de datos de oleaje disponibles en gran parte del litoral mundial, que son datos de partida esenciales para el diseño y la planificación de la construcción.

#### *Normativa y documentación técnica de referencia*

En España se dispone del programa ROM de Recomendaciones de Obras Marítimas, de Puertos del Estado, que recoge la amplia experiencia de proyecto, construcción e investigación de las últimas décadas. Se basa en el método de los Estados Límite, que es el habitual en la ingeniería civil de nuestro entorno. Considera métodos de verificación probabilísticos, semi-probabilísticos y deterministas, haciendo énfasis en los primeros. Los métodos probabilísticos permiten explotar al máximo las bases de datos de clima marítimo, así como las distribuciones de otras variables relevantes para el diseño, sobre las que se cuente con información estadística fiable [3]. Otras publicaciones de Puertos del Estado, como es el caso del 'Manual para el diseño y la ejecución de cajones flotantes de hormigón armado para obras portuarias' [4], exponen criterios de proyecto y construcción de obras marítimas sobre los que existe importante base de conocimiento y experiencia en la ingeniería marítima española.

También se cuenta con las publicaciones de PIANC (Asociación Mundial para las Infraestructuras de la Navegación): la Sección Española de PIANC, constituida por la Asociación Técnica de Puertos y Costas, que cuenta con el inestimable soporte de Puertos del Estado como organización gubernamental, está desarrollando una intensa actividad en sus Comisiones y Grupos de Trabajo, cuyos informes constituyen la referencia globalmente reconocida de las mejores prácticas y conjuntos normativos. El resultado de esta labor es que las ROM y las experiencias españolas están cada vez más reflejadas en estos documentos, alcanzando una progresiva mayor difusión. Además, PIANC es el foro mundial de referencia para compartir información y experiencias técnicas en el proyecto y la construcción de obras marítimas portuarias y costeras, así como en los aspectos ambientales asociados, incluyendo el impacto del cambio climático en las costas, los puertos y las vías navegables, tanto marítimas como fluviales.

El proceso de internacionalización implica trabajar con los clientes y sus empresas consultoras de ingeniería en entornos contractuales en los que rigen normas, reglamentos o publicaciones de referencia que presentan, en ocasiones, diferencias apreciables de criterio y procedimientos con nuestras Recomendaciones ROM y con nuestra práctica habitual. La capacidad de adaptación a nuevas circunstancias, requerida por la internaciona-



Fotografía 1

zación, ha sido un reto superado con éxito por nuestras empresas y sus ingenieros.

### Avances en la construcción

Los adelantos en los medios de posicionamiento, reconocimiento y control, en los métodos de diseño con la incorporación de los métodos probabilísticos y en los medios y equipos flotantes y basados en tierra, han permitido un salto adelante, sin precedentes en la construcción de obras marítimas, que se refleja en las realizaciones de los últimos años.

#### *Maquinaria y equipos flotantes*

La tecnología más característica de la construcción marítima española es la de cajones flotantes de hormigón armado, aplicada tanto a diques de abrigo como a muelles de atraque. El proceso constructivo más frecuente en España se basa en el empleo de encofrados deslizantes en dique flotante, que se hunde controladamente mediante lastrado de sus tanques a medida que progresa el des-

lizado del fuste de los cajones. Se asegura durante todo el proceso la estabilidad naval del conjunto dique-cajón, así como el que la fuerza sobre el plan de la pontona se mantenga dentro de valores admisibles, para lo cual también se procede al lastrado secuencial y controlado del cajón. A lo largo de los últimos años se ha evolucionado hacia diques flotantes de mayor capacidad como el dique flotante Mar del Enol de FCC (fotografías 1 y 2), en los que se pueden construir cajones considerablemente mayores que los que eran habituales al final del siglo XX. Hoy es relativamente normal construir cajones en los diques flotantes en servicio con dimensiones en torno a los 60 (l) x 30 (b) x 35 (h) metros.

El incremento de dimensiones ha permitido alcanzar cotas de cimentación limitadas por las presiones del cajón sobre la banqueta de cimentación de material de cantera, y no por las posibilidades de los equipos de fabricación. La capacidad para construir cajones de mayor manga permite reducir las tensiones sobre el cimiento a igualdad



Fotografía 2

de acciones del oleaje o de sobrecargas en trasdós y, en consecuencia, hacer viable la solución de dique o muelle vertical en condiciones geotécnicas en las que hasta hace poco no lo era. Las mayores esloras de los cajones, especialmente adecuadas cuando el terreno del cimiento es homogéneo, y no hay riesgo de introducir flexiones longitudinales ni cargas concentradas relevantes en la solera, permiten reducir el riesgo de las operaciones de fondeo de cajones en mar abierto al reducir su número.

La necesidad de ejecutar trabajos de precisión, tanto en aguas abrigadas como en aguas abiertas, recientemente impulsada por las nuevas instalaciones de energía eólica marina, ha supuesto un impulso fundamental para las grandes pontonas de patas autoelevadoras, que permiten la realización de trabajos de gran precisión con independencia de la acción del oleaje, pudiendo cargar equipos pesados de hincas de grandes pilotes metálicos o de tablestacas de gran utilidad en la construcción de obras de atraque.

El sector del petróleo y del gas, de muy alta capacidad inversora y alto valor añadido, ha impulsado desde hace tiempo el desarrollo de equipos y maquinaria flotantes especializados, cuyo elevado coste solamente ha podido rentabilizarse dentro de un entorno de importantes flujos económicos. Con el tiempo, algunas de estas técnicas y equipos, con grado de amortización suficiente, han comenzado a resultar asequibles para las mayores obras portuarias y costeras. Por ejemplo, los emisarios submarinos de las estaciones depuradoras han avanzado gracias a la transferencia de la tecnología de conducciones submarinas desarrollada en el marco del sector de petróleo, así como a la posibilidad de emplear los mismos equipos de tendido de tuberías.

Otros equipos que se han empleado en grandes obras portuarias son los barcos de vertido por tubería, que permiten nivelar cimentaciones de escollera a gran profundidad. Estos barcos, desarrollados para la cimentación de plataformas petrolíferas de gravedad, así como para proteger grandes tuberías submarinas, compensan a veces su alto



coste con su rendimiento y precisión. Por analogía, resulta razonable suponer que los medios flotantes que se están desarrollando en la actualidad para la construcción y mantenimiento de parques eólicos marinos puedan emplearse en el futuro en obras portuarias, una vez suficientemente amortizados sus costes de desarrollo.

#### *Obras de atraque*

Durante las últimas décadas la tipología de muelles de gravedad de cajones ha sido la más habitual entre las grandes obras de atraque de los puertos españoles, quedando las obras de atraque de pilotes o tablestacas en clara minoría. En otras zonas, como el continente americano, son en cambio mucho más habituales los muelles de pilotes, que frecuentemente son hincados de acero. Como consecuencia de ello, abundan los equipos para la ejecución de este tipo de cimentaciones, que así resultan económicamente competitivas. Un ejemplo es la nueva Terminal de Contenedores en el puerto de El Callao (FCC Construcción, fotografía 3).

El progresivo crecimiento de los barcos implica la necesidad de obras de atraque con mayor calado, así como emplear equipos de manipulación de mercancías de mayor alcance y capacidad, lo que implica mayores cargas sobre los muelles. Ello favorece en principio el empleo de soluciones de cimentación profunda, aunque la posibilidad de disponer de grandes cajones ha extendido su empleo hacia mayores obras de atraque, cuando la capacidad portante del terreno es apropiada.

#### *Diques de abrigo*

##### *- Conocimiento y previsión de clima marítimo*

Las fuentes de información de clima marítimo disponibles en la actualidad permiten planificar la construcción de las obras exteriores con creciente fiabilidad, teniendo en cuenta los factores de estacionalidad y emplazamiento. La construcción de obras exteriores siempre se lleva a cabo en un contexto de riesgo climático. La informa-



Fotografía 3

ción sobre el clima marítimo permite evaluar los riesgos, prever los intervalos de trabajo disponibles con sus correspondientes bandas de confianza y, en consecuencia, gestionar el riesgo constructivo en términos de planes de obra y costes.

Las herramientas disponibles para la predicción del clima marítimo permiten planificar, incluso con varios días de anticipación, la toma de decisiones sobre las operaciones a mar abierto, en función de las previsiones, así como la puesta en marcha de planes de contingencias prediseñados para situaciones de temporal, incluyendo la disposición de elementos para el abrigo provisional.

*- Diques en talud*

El avance fundamental en la construcción de diques en talud reside en la gestión del clima marítimo durante la ejecución. Un posible diagrama de flujo para este proceso se muestra en la figura 1. Es preciso conocer la interacción con el oleaje (y los suelos en su caso) de las secciones del dique en construcción. Para ello, se cuenta con las

mismas herramientas de proyecto (modelos analíticos, numéricos y físicos), y con los métodos probabilísticos de diseño como elemento esencial de ayuda a la decisión. Una primera evaluación partiendo de los datos históricos de clima permite elaborar los planes de obra, incluyendo los de contingencias frente a temporales. Los modelos de previsión permiten la toma de decisiones en obra a corto plazo, y la evaluación continuada de los procedimientos de construcción. Resulta fundamental el análisis a posteriori de temporales e incidencias para revisar y optimizar los planes de actuaciones y contingencias.

La rápida evolución de los mantos de bloques prefabricados de hormigón en una sola capa, habitualmente sujetos a patentes, es una importante fuente de ahorro económico en los diques en talud. Aparte de sus procedimientos de diseño específicos, que tienen en cuenta la proximidad de la destrucción total con el inicio de averías para asegurar una fiabilidad equivalente a las de los mantos de dos capas, estas soluciones exigen unas tolerancias relativamente estrictas en el acabado de los taludes del

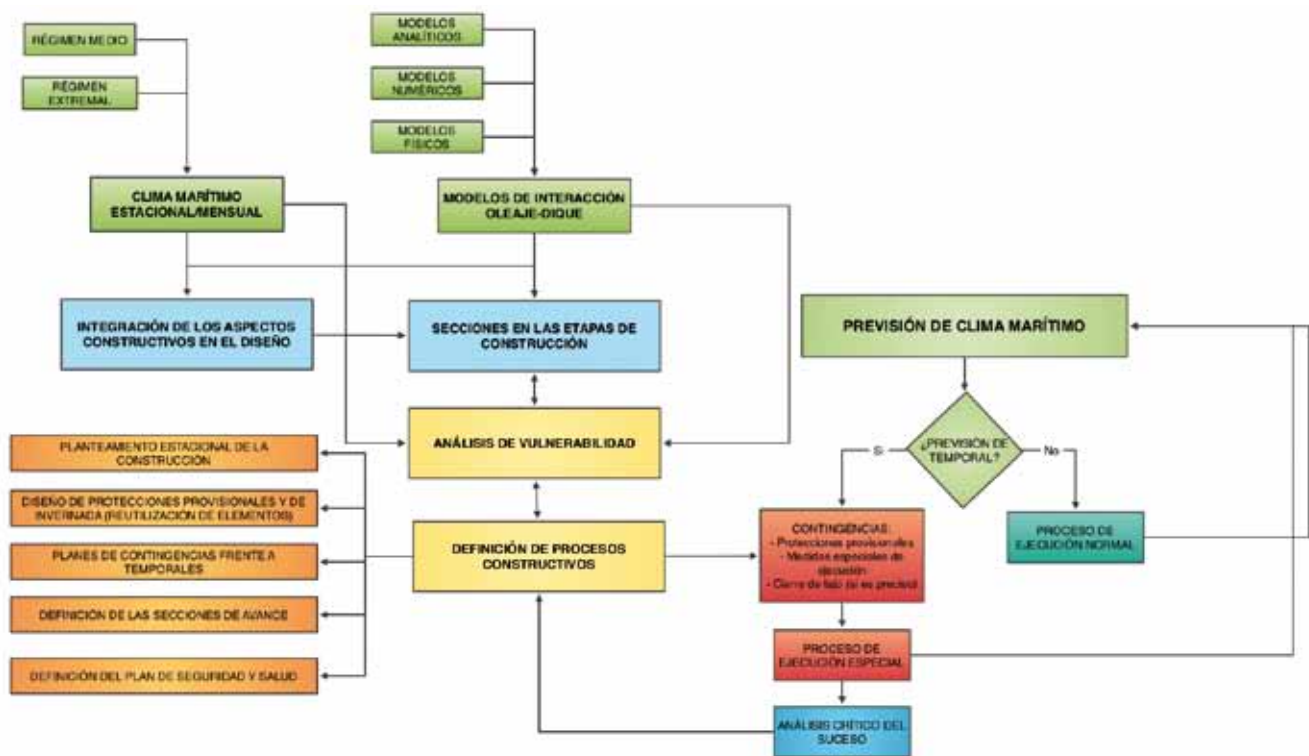


Fig. 1



Fotografía 4

manto secundario, y una gran precisión en la colocación de las piezas del manto principal. Los actuales medios de posicionamiento y control, unidos a la maquinaria de colocación hoy disponible, permiten responder adecuadamente a estos requerimientos.

El proceso de construcción incremental que permite la construcción con medios marítimos, ha permitido aprovechar los procesos de consolidación del terreno para posibilitar la ejecución de diques en talud sobre suelos blandos.

#### - *Diques verticales*

La posibilidad de fabricar grandes cajones flotantes de hormigón armado ha permitido un avance fundamental en la construcción de diques verticales, como ya se ha expuesto. Sus ventajas medioambientales frente al intenso consumo de materiales que suponen los diques en talud, lleva a extender su empleo a condiciones de clima marítimo y geotécnicas que se apartan de las óptimas teóricas para estas estructuras.

Las posibilidades de transportar cajones a grandes distancias ha permitido a FCC Construcción fabricar los primeros cajones del dique de abrigo del superpuerto de Açú (Brasil, con un total de 47 cajones y una longitud de dique vertical aproximada de 2.100 m, fotografía 4) en el Puerto de Algeciras y transportarlos a obra, conjuntamente con los diques flotantes, en barcos semi-sumergibles (fotografía 5). Ello fue necesario al no contar, ni en el emplazamiento ni en sus proximidades, con áreas con abrigo suficiente como para permitir el trabajo de los diques. Estos cajones sirvieron para generar la zona abrigada en la que se implantaron los diques flotantes Mar del Aneto y Mar del Enol para la construcción del resto de los cajones de la obra.

La construcción de diques verticales de cajones en emplazamientos con condiciones de clima marítimo desfavorables, se ha visto favorecida por los adelantos relativos a los procesos de fondeo. En este caso, la ejecución del tramo vertical del dique de la ampliación del Puerto de El Musel puede considerarse un hito técnico de referencia.



En primer lugar, es necesario estudiar la interacción con el oleaje de un flotador complejo, de desplazamiento variable durante la maniobra de fondeo y con su posición controlada mediante amarras; teniendo en cuenta además la influencia de la proximidad de los fondos en el final del proceso y los riesgos de resonancia. Es también necesario el conocimiento del clima marítimo y, muy especialmente, de su variabilidad estacional. El análisis estadístico de los datos históricos de clima marítimo en función de la maniobra de fondeo a realizar constituye una herramienta muy valiosa para la planificación de las obras. En el momento de la ejecución, cuando hay que tomar las decisiones sobre la puesta en marcha de las operaciones de fondeo y planificar las operaciones inmediatas, es cuando cobra la máxima relevancia la previsión de clima marítimo.

En el caso del puerto de Açu, FCC Construcción encargó al Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IH Cantabria) un Sistema Operacional de Clima Marítimo que, proporciona la previsión horaria de viento, oleaje, nivel del mar, agitación y rebase, con horizonte de una semana en los distintos tramos y fases de obra

(figura 2). El sistema integra la información climática con su interacción con las estructuras en las distintas fases de construcción (construcción de cajones, transporte, fondeo, espaldones, etc.), estudiando los rebases en el dique mediante un catálogo de simulaciones realizadas con un modelo IH-VOF e interpretando los resultados de acuerdo con umbrales de trabajo predefinidos por FCC Construcción. El Sistema Operacional [5] ha sido un valiosísimo elemento para la segura ejecución de las obras en condiciones de importante exposición a oleajes muy desfavorables para las operaciones de construcción.

### **Investigación, Desarrollo e Innovación**

Los procesos de innovación cobran gran importancia en el momento actual, en el que han de afrontarse retos cada vez mayores, y abrirse nuevos mercados. La innovación ha sido una constante en la construcción marítima española, siendo ejemplo de ello el dique flotante de La Condamine, en Mónaco.

Un ejemplo de I+D+i relativo a las operaciones con cajones en mar abierto es el Proyecto Dovicaim que, en el



Fotografía 5



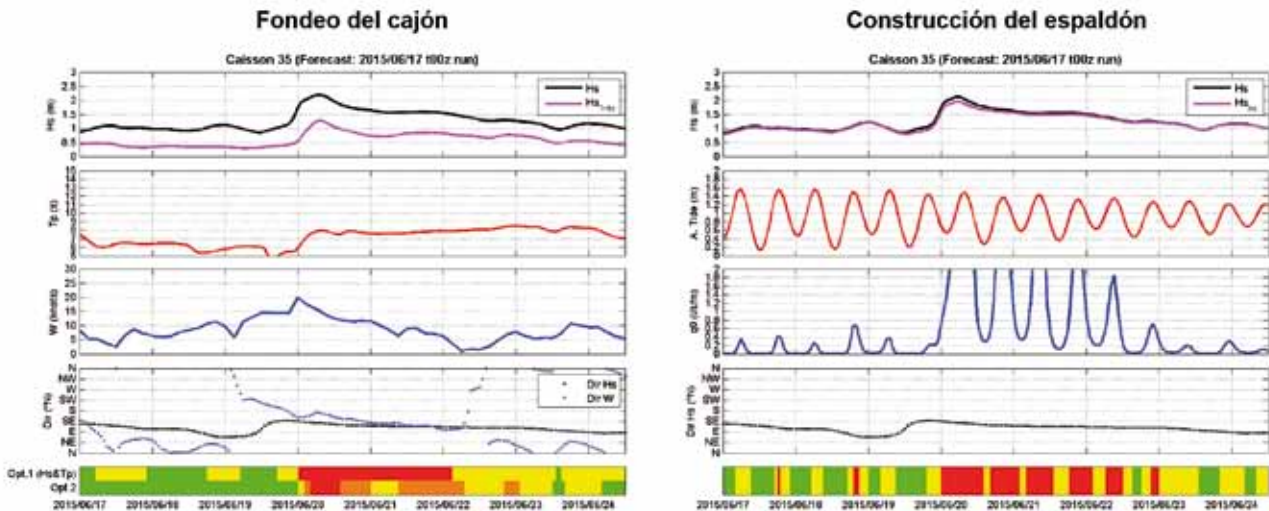


Fig. 2

marco del programa Retos-Colaboración 2014 del Ministerio de Economía y Competitividad, están desarrollando actualmente FCC Construcción y el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria.

Los inconvenientes funcionales de los cajones han sido objeto de proyectos de I+D+i. La reflexión en el paramento vertical provoca excesiva agitación en las dársenas en las obras de atraque, y afecta a la maniobra de las embarcaciones pesqueras y de recreo en las obras de abrigo. Este problema había sido abordado en diversas ocasiones, aunque se apreció la conveniencia de sistematizar la investigación para encontrar una solución de elevada eficiencia. El trabajo se realizó mediante el proyecto ‘Cajones de Baja Reflexión para Muelles y Diques de Abrigo’, financiado con cargo al Programa Profit y desarrollado en el marco de un Convenio de FCC Construcción con el Cedex (Centro de Estudios de Puertos y Costas) de fecha 22 de julio de 2003. Este proyecto dio lugar a la patente ‘Estructura de baja reflexión para diques y muelles’ –P200402227 de 12 de julio de 2007–, complementada posteriormente (fotografía 6), de la que es titular FCC. Esta patente ha dado lugar a diversas realizaciones prácticas, de entre las que destaca por su singularidad el último tramo del Dique del Este del puerto de Castellón (fotografías 7 y 8).

**Retos de futuro**

Las nuevas demandas del transporte marítimo, la necesidad de acometer obras exteriores en zonas muy expuestas



Fotografía 6



Fotografía 7



Fotografía 8

a la acción del oleaje y la de hacer cada vez más competitivas las soluciones técnicas para la construcción marítima, configuran un conjunto de retos a los que la ingeniería portuaria habrá de hacer frente en el futuro inmediato. Entre estos retos, podemos identificar los siguientes:

- El avance en la construcción, transporte y fondeo de grandes prefabricados.
- El incremento de la vida útil de las obras y sus elementos constitutivos con respecto a los valores hoy habituales, que es un requisito contractual cada vez más extendido. Ello implica mejorar la durabilidad de los elementos constructivos, en especial en zonas de especial agresividad ambiental como Oriente Medio, concebir las obras de manera que puedan adaptarse a futuros cambios para hacer frente a las demandas futuras en un contexto de vida útil extendida, y hacerlas adaptables a los procesos de cambio climático.
- El aumento del abanico de tipos estructurales disponible para hacer frente a demandas mucho más complejas, en especial en el caso de terminales especializados.
- Finalmente, continuar por la senda de la innovación como garantía de mejora continuada.

### Agradecimientos

Agradecemos su colaboración a los Servicios Técnicos de FCC Construcción, equipos de obra de los puertos de Castellón y Açu, IH Cantabria y a los clientes y socios de FCC Construcción. **ROP**

### Referencias

- [1] Grau Albert, Juan Ignacio. 'Avances en la Construcción de diques de abrigo en España', III Congreso ATPYC, Barcelona 2008.
- [2] Gutiérrez Serret, Ramón. 'La experiencia española en el proyecto y la construcción de diques de abrigo portuario en el siglo XXI', IV Congreso ATPYC, Valencia 2012.
- [3] Puertos del Estado. Programa ROM. [www.puertos.es](http://www.puertos.es).
- [4] Puertos del Estado. 'Manual para el diseño y la ejecución de cajones flotantes de hormigón armado para obras portuarias', Madrid 2006.
- [5] A. Tomás, G. Díaz, F. Fernández, M. F. Álvarez de Eulate, M. Simancas, A. C. Piqueras, I. J. Losada, F. Esteban, J. López. 'Sistema operacional de alta resolución para la construcción del Puerto de Açu (Brasil)', XIII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Avilés 2015.