

**V CONGRESO NACIONAL DE LA
ASOCIACIÓN TÉCNICA DE PUERTOS Y COSTAS**



Asociación
Técnica de
Puertos y
Costas

RETOS DEL SIGLO XXI PARA LOS PUERTOS Y LAS COSTAS

Eficiencia y Cambio Climático



**Bilbao
Noviembre 2014**

Colaboran



Puertos del Estado



Autor:

Asociación Técnica de Puertos y Costas (ATPyC)

Edita:

Organismo Público Puertos del Estado

Coordinación y diseño:

Emilio Piñeiro Díaz. *Puertos del Estado*

Imprime:

Grupo Diario Imprenta, S.L. (Valencia)

ISBN: 978-84-88740-03-8

Depósito Legal: M-28548-2014

Edición: Noviembre 2014

PVP: 50 €

V CONGRESO NACIONAL DE LA ASOCIACIÓN TÉCNICA DE PUERTOS Y COSTAS

RETOS DEL SIGLO XXI PARA LOS PUERTOS Y LAS COSTAS Eficiencia y Cambio Climático

Bilbao
Noviembre 2014



Colaboran



Comité Organizador:

José Llorca Ortega. *Presidente. PUERTOS DEL ESTADO*

Asier Atutxa Zalduegui. *Presidente. AUTORIDAD PORTUARIA DE BILBAO*

Macario Fernández-Alonso Trueba. *Presidente. ASOCIACIÓN TÉCNICA DE PUERTOS Y COSTAS*

Carlos Alzaga Sagastasoloa. *Director. AUTORIDAD PORTUARIA DE BILBAO*

Eva Míquel Subías. *Directora Asesoría Corporativa y de Comunicación. PUERTOS DEL ESTADO*

Luis Gabiola Mendieta. *Director de Operaciones, Comercial y Logística AUTORIDAD PORTUARIA DE BILBAO*

Mario Hernández Uriarte. *Jefe de Departamento de Planificación y Proyectos. AUTORIDAD PORTUARIA DE BILBAO*

Manuel Arana Burgos. *Secretario. ASOCIACIÓN TÉCNICA DE PUERTOS Y COSTAS*

Angustias Lerín de Abril. *Jefe de Departamento de Protocolo y Eventos Corporativos. PUERTOS DEL ESTADO*

Comité Técnico:

José M^º Berenguer Pérez. *Berenguer Ingenieros. Junta Directiva de la ATPYC*

Francisco Esteban Lefler. *FCC. Junta Directiva de la ATPYC*

Gonzalo Gómez Barquín. *PUERTOS DEL ESTADO*

Mario Hernández Uriarte. *AUTORIDAD PORTUARIA DE BILBAO*

Ana Lope Carvajal. *PUERTOS DEL ESTADO. Junta Directiva de la ATPYC*

Junta Directiva:

Presidente: Macario Fernández-Alonso Trueba. *MC VALNERA*

Secretario: Manuel Arana Burgos. *PUERTOS DEL ESTADO*

Vocales:

José María Berenguer Pérez. *BERENGUER INGENIEROS*

Rafael Escutia Celda. *PORT INSIGHT*

Francisco Esteban Lefler. *FCC CONSTRUCCIÓN*

Ana Lope Carvajal. *PUERTOS DEL ESTADO*

Miguel Angel Losada Rodríguez. *UNIVERSIDAD DE GRANADA*

José Luis Monsó de Prat. *INHA*

Jorge Martín Jiménez. *AUTORIDAD PORTUARIA DE BALEARES*

Dolores Ortiz Sánchez. *DIRECCIÓN GENERAL DE SOSTENIBILIDAD DE LA COSTA Y EL MAR*

Carlos Sanchidrián Fernández. *PROES*

Marius Tomé, i Covelo. *SEASWELL*

Celia Tamarit de Castro. *PUERTOS DEL ESTADO*

Representante del CJP: Pilar Parra Serrano. *AUTORIDAD PORTUARIA DE MELILLA*

Prólogo

Se cumple este año el décimo aniversario de la celebración de los congresos nacionales organizados por la Asociación Técnica de Puertos y Costas, una iniciativa que arrancó en Huelva en 2004, y que ahora alcanza su quinta edición con el congreso que celebramos en Bilbao. Durante este tiempo se ha configurado como un elemento clave de encuentro y transmisión de conocimiento dentro del ámbito portuario y costero, de tal manera que ya podemos decir que se trata de la cita técnica de referencia de estos sectores en nuestro país.

El Congreso se ha caracterizado desde sus inicios por centrar su temática en los aspectos que, en cada momento, resultaban de mayor interés para los técnicos y profesionales que asisten al mismo. Así, en anteriores ediciones, se ha tratado sobre elementos tales como diseño y construcción de diques, geotecnia aplicada a obras marítimas, gestión de la costa, medio ambiente portuario y costero o desarrollos y proyectos de I+D+i. Para esta quinta edición se ha elegido como temática principal la “eficiencia y el cambio climático”.

La realidad por todos conocida es que el sistema portuario español ha asistido en los últimos años a un desarrollo generalizado de sus infraestructuras, en un proceso inversor que podemos calificar de “histórico”. Fruto de este esfuerzo común, nuestros puertos han mejorado significativamente su posición competitiva en lo que a infraestructura marítima se refiere, sentando con ello unas sólidas bases de futuro, aunque en este momento se haya generado una situación de sobrecapacidad que nos debe llevar a trabajar para conseguir su máxima rentabilización en el menor tiempo posible. A partir de esta situación, desde el punto de vista técnico, el reto fundamental que se nos plantea a día de hoy y ya en un horizonte de corto plazo, es el de la adecuada gestión de estas infraestructuras, de tal manera que los pasajeros y mercancías que transiten por nuestros puertos lo hagan de la forma más rápida y económica posible. En otras palabras, de una forma eficiente. De ahí el título y la temática escogida para este congreso. Y además, dicha eficiencia debe buscarse no solo en lo que se refiere al arco portuario, en sus infraestructuras y servicios, sino en el conjunto de la cadena del transporte, buscando el menor coste generalizado para la misma, estrategia en la que una decidida apuesta por la mejora de la conectividad terrestre de nuestros puertos jugará un papel determinante en los próximos años. Solo con políticas orientadas en esta dirección seremos capaces de ayudar a nuestro tejido productivo, mejorando la competitividad de nuestros clientes y empresas, favoreciendo de este modo su posición en mercados globales y contribuyendo, en definitiva, a consolidar la mejora en la situación económica a la que venimos asistiendo en los últimos meses y que se vislumbra que se consolide a futuro.

Adicionalmente, el congreso dedicará parte de su contenido a la temática ambiental, concepto plenamente integrado tanto en el diseño como en la construcción y posterior explotación de nuestros activos, haciendo especial hincapié en este caso en lo que se refiere a la problemática del cambio climático y su posible impacto sobre nuestros puertos y costas. Este aspecto se configura como otro de los retos a los que deberemos hacer frente en los próximos años, lo que justifica sobradamente su inclusión como elemento relevante en esta quinta edición del congreso, poniendo en común los estudios y avances que la comunidad científica ha llevado a cabo en los últimos años a este respecto.

En definitiva, entiendo que el programa diseñado resulta de gran interés y actualidad para el conjunto de la comunidad española en materia portuaria y costera, alcanzando un elevado nivel técnico en lo que al contenido de sus ponencias se refiere, las cuales han quedado plasmadas en la presente publicación. Con ello garantizamos una adecuada difusión de su contenido a toda la comunidad técnica, más allá de los propios asistentes al congreso. Seguiremos apoyando y trabajando activamente para que este encuentro bienal del sistema portuario y costero español, promovido por la Asociación Técnica de Puertos y Costas, se consolide en el futuro, en el convencimiento de su utilidad para el desarrollo de nuestros puertos.

José Llorca Ortega

Presidente de Puertos del Estado

Presidente de Honor de la Asociación Técnica de Puertos y Costas



Índice

Retos del Siglo XXI del Puerto de Bilbao. <i>Carlos Alzaga Sagastasola</i>	11
Efectos del temporal del invierno 2014 en los puertos de la CAV y soluciones de urgencia. <i>Luis Ignacio López de Aguilera Salazar</i>	21
Estudios náuticos para el acceso y operación de megabuques en los puertos. Aplicación a LNG, portacontenedores, cruceros, bulkcarriers y megayates. <i>Jose Ramón Iribarren</i>	35
Estudio de operatividad en el puerto exterior de Punta Langosteira (A Coruña). Monitorización de movimientos y esfuerzos en amarres en buque atracado. <i>Enrique Peña, Ignacio Trejo</i>	47
El tercer carril. La penetración ferroviaria hacia Europa de los puertos españoles. <i>Joan Borràs i Tous</i>	63
Rehabilitación del dique-muelle de Disa en Salinetas. Gran Canaria. <i>Jorge Alberto Cerezo Macías</i>	71
Nuevas calidades de aceros en tablestacas metálicas, resistentes a la corrosión en ambiente marino. Incremento de la vida útil y reducción de los costes de mantenimiento. <i>João Martins</i>	81
Nuevo puerto pesquero en Nouadhibou, Mauritania. El reto de la internacionalización de la ingeniería española <i>Eloy Pita Olalla</i>	87
Aumento del ciclo de vida de estructuras de hormigón armado en ambiente marino atacadas por cloruros. <i>Pedro Hernández Esteve</i>	97
Sostenibilidad constructiva en desarrollos portuarios. <i>Juan Ramón García Vizcaino</i>	107
Dragado del Puerto de Maó. <i>Juan Carlos Plaza Plaza, Antonio Ginard López, Eladio Santaella, Enric Massutí, Omar Inglese, Raúl González</i>	121
Grupo de trabajo aspectos positivos del dragado: "Innovación medioambiental del Plan de Mantenimiento de Dragado en el Puerto de Lisboa". <i>Alberto del Pino, Grupo de trabajo 'Aspectos positivos del dragado' de la ATPyC</i>	135



Nuevos retos en la gestión del material dragado: Las nuevas directrices de dragado. <i>Jose Sierra Antiñolo</i>	143
Vulnerabilidad del sistema portuario de titularidad estatal ante el cambio climático (primera fase). <i>Enrique Alvarez Fanjul</i>	155
Herramientas de oceanografía operacional aplicadas a la previsión del comportamiento de vertidos accidentales en el ámbito portuario de Bilbao. <i>Jorge Arce, Manuel Gonzalez</i>	169
Diseño de los muelles del Espigón Central de la ampliación del Puerto de Bilbao en el Abra Exterior. <i>Jorge García Morales</i>	179
Plan de protección y desarrollo sostenible de la costa de Flandes. Horizonte 2100. <i>Jeroen Gheysens</i>	193
Suministro de GNL como combustible a buques. <i>Ignacio Sanchidrián Vidal</i>	203
Proyecto Nereidas. Reducción de la huella de carbono en los Puertos. Un reto común europeo. <i>Pilar Parra Serrano</i>	213
Guía de gestión energética en puertos. <i>O. serrano Hidalgo, I. Rodríguez Arévalo, Sara Blanco Monge, P. Bañón Serrano</i>	225
Verificación estabilidad geotécnica de los diques verticales en el programa ROM. Estudio comparado con otros procedimientos de verificación. <i>Juan Ignacio Grau Albert</i>	237
Identificación de daño y puntos críticos en diques de abrigo con tecnologías laser. Aplicación en el mantenimiento y prolongación de la vida útil. <i>Enrique Maciñeira</i>	257
Nuevos materiales en la construcción de cajones para obras marítimas. <i>Salvador Capella Hierro</i>	267



RETOS DEL SIGLO XXI DEL PUERTO DE BILBAO



Carlos Alzaga Sagastasoloa¹

1. INTRODUCCIÓN

En numerosas ocasiones, cuando diseñamos la estrategia a seguir en los desarrollos portuarios, tendemos a olvidar que, la mayoría, sino todos, los criterios que adoptamos para valorar las alternativas, han sido ya analizados con anterioridad. No sólo en años inmediatamente anteriores, sino mucho tiempo atrás. Además, tendemos a tener una perspectiva muy cortoplacista en lo referente al análisis de datos, considerando muchas veces que el historial de un puerto se circunscribe a los tráficos de los últimos diez años, a los oleajes más recientes, a los cuellos de botella que tenemos en cada momento, convirtiendo los mismos en problemas estratégicos a resolver, cuando son, en realidad, problemas del corto plazo.

La pérdida de perspectiva a la hora del análisis de problemas y sus soluciones, nos puede llevar a cometer errores de planeamiento que resuelvan el problema inmediato, pero que no resuelvan los problemas a largo plazo. Es precisamente de las experiencias pasadas en el Puerto de Bilbao y de los problemas futuros de lo que trata esta ponencia, intentando hacer un recorrido histórico y viendo la perspectiva que se ha tenido históricamente a la hora de resolver problemas.

¹ Autoridad Portuaria de Bilbao.

2. ORÍGENES DEL PUERTO DE BILBAO

El Puerto de Bilbao hunde sus raíces en el siglo XIII. De hecho, cuando se otorga la Carta Fundacional de Bilbao en el 1300, lo hace basándose en la existencia del Puerto de Bilbao. Este Puerto no era más que un arenal en el que varaban embarcaciones, alrededor del cual fue naciendo un núcleo de población que en ese siglo XIV apenas estaba constituido por tres calles, que poco después se convertirían en 7 calles, que forman el actual Casco Viejo de Bilbao. En ese desarrollo, además de las viviendas, presuponemos un comercio floreciente con una industria de manufactura que tendría cierta dependencia del Puerto y éste de aquellos. Aquí ya aparece un primer tema importante: es básico comprender la interrelación puerto-ciudad-empresas. No pueden vivir esos tres elementos ignorándose, sino teniéndose muy en cuenta. Esa convivencia/necesidad de relación es la que tiene que guiarnos, hoy día también, en el desarrollo portuario, entre otros factores.

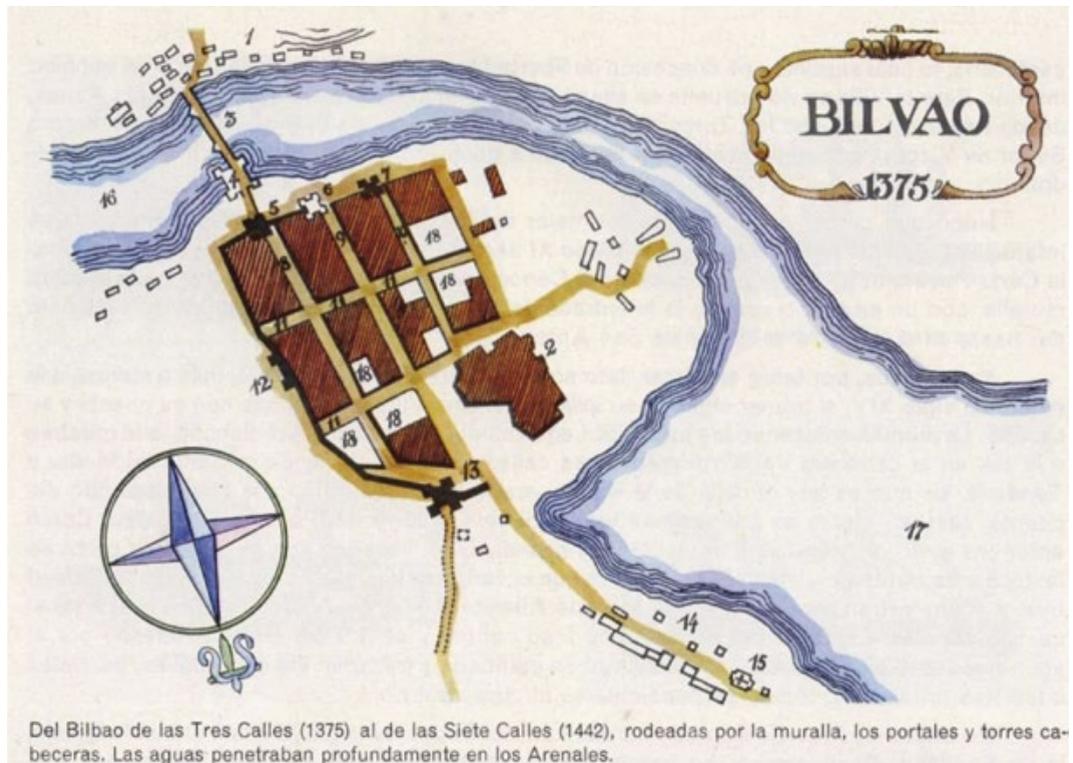


Fig. 1: Puerto de Bilbao en 1375.

Más tarde, en el inicio del siglo XVI, concretamente el 22 de junio de 1511, Juana la Loca, establece las Ordenanzas de constitución del llamado Consulado de Bilbao. Puede considerarse este Consulado como el primer origen de una Autoridad Portuaria, ya que cobraba tributos por carga/descarga de mercancías y con lo recaudado se hacían inversiones de



RETOS DEL SIGLO XXI PARA LOS PUERTOS Y LAS COSTAS

mantenimiento y mejora del Puerto. Ciertamente, muy parecido a lo que constituyen en la actualidad las Autoridades Portuarias.

Pero las funciones de este Consulado iban más allá. Instaló Casas de Contratación (Consulados) en ciudades del Norte de Europa, como, por ejemplo, Brujas. Es decir, tenemos auténticas delegaciones comerciales en el extranjero en una época tan temprana como el siglo XVI, similares o, en algunos casos, más potentes que las actuales. Estos Consulados se dedicaban a la búsqueda de clientes para los productos de exportación y proveedores para la importación. Evidentemente, cuánto más tráfico lograran para el Puerto de Bilbao, además de los beneficios para los comerciantes, mayores ingresos tendría el Puerto de Bilbao y, por tanto, mayores posibilidades de mejora y crecimiento del Puerto, con la consecuencia de desarrollo comercial, completando el círculo. Exactamente igual a como se hace ahora.

Además de las delegaciones comerciales y de las obras de mejora en el Puerto, el Consulado de Bilbao llegó a ejecutar obras de mejora en el llamado Camino de Castilla. Es decir, mejoraban las condiciones de accesibilidad al Puerto interviniendo fuera de lo que era el recinto portuario. Aunque en aquella época no había ferrocarril, es fácil establecer paralelismos con los planes de accesibilidad ferroviaria que se plantean en la actualidad.

Además de todo lo anterior, esta institución se proveyó de un código de comercio propio en el que se establecía el sistema de relación comercial, el orden de amarre, las tasas a pagar, las condiciones que tenían que cumplir quienes quisieran comerciar y transportar en el Puerto, etc. Por tanto, un auténtico código de Pliegos de los diferentes actores de la actividad portuaria.

Aquí vemos otro tema de perspectiva que se resolvió de una manera increíble para una época tan temprana. Ir a buscar a los clientes allí donde estén -no esperar a que vengan- y mejorar las instalaciones más allá del propio Puerto, estableciendo auténticas líneas de tráfico terrestre entre los puntos de producción -por ejemplo, los mercados de lana de Castilla- y el punto de exportación al extranjero, que es el Puerto, además de establecer las condiciones a satisfacer para poder comerciar a través del Puerto. Este sistema funcionó hasta bien entrado el siglo XIX, con la creación de la Comandancia de Puerto y Capitanía Marítima en 1811 y de la Dirección General de Obras Públicas en 1844.

3. ÉPOCA MODERNA

Esta época puede resumirse como la historia de diferentes “saltos”, no tanto cuantitativos, sino, sobre todo, cualitativos en el desarrollo del Puerto de Bilbao.

Hasta finales del siglo XIX, el Puerto de Bilbao se desarrolló, básicamente, en el entorno del actual Término Municipal de Bilbao, situado a unos 13 kilómetros del mar abierto y

siguiendo un trazado sinuoso de la Ría y con un problema de seguridad de la navegación de gran magnitud como era la barra de arena que se formaba en el punto en el que la Ría desembocaba en el Mar, en el entorno de Portugalete. Esta barra de arena provocaba numerosos naufragios de buques, haciendo que el tráfico marítimo fuese inseguro y que algunos armadores se retrajesen a la hora de acercarse a Bilbao.

Este problema fue resuelto por un Ingeniero visionario como fue Evaristo de Churruga que, con la construcción del llamado Muelle de Hierro resolvió para siempre el problema de la barra de arena, haciendo que fuera seguro el tráfico que ascendía por la Ría hacia el Puerto situado en Bilbao.

Si bien esta obra es la más conocida de Evaristo de Churruga, éste tuvo la visión de un Puerto de Bilbao lejos de su origen, algo más aguas abajo del Muelle de Hierro. Una zona de mejores calados y mejor navegabilidad para los buques de mayor porte que se estaban construyendo. Es decir, sin abandonar el Puerto situado en Bilbao, previó que había que dar un salto de gigante construyendo un nuevo Dique y Muelles en Santurtzi. Cosa que logró a inicios del siglo XX. Podemos decir que adaptó el Puerto a las necesidades de los nuevos barcos, pero a un plazo más largo que las necesidades puntuales de ese momento, ya que el calado de 12 metros de los nuevos Muelles, en aquella época, con toda probabilidad poquísimos barcos tendrían necesidad del mismo. Además de ello, vio la necesidad de dotar al Puerto de espacios portuarios de almacenaje de mercancías. El Puerto no perdió su característica de zona de transferencia de mercancías, pero le añadió la posibilidad del almacenaje en grades volúmenes en espacios abiertos lejos del núcleo urbano.

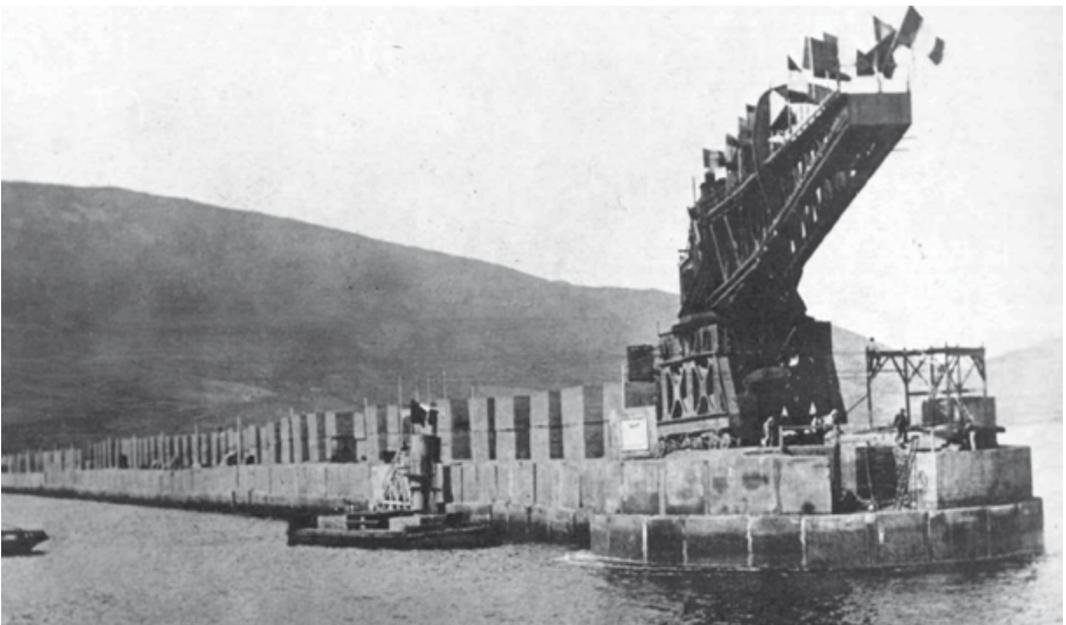


Fig. 2: Dique de Santurtzi (1902).



Tuvieron que pasar casi 70 años para dar otro gran salto cualitativo en el Puerto. En esa década, se produce un acuerdo a varias bandas –Puerto de Bilbao, Administración y el actual Petronor- para la construcción del Dique de Punta Lucero, a cuyo abrigo se situaría la estación de carga-descarga de productos petrolíferos con destino u origen a la nueva refinería situada en el cercano Municipio de Muskiz. Se llega, por tanto, a un acuerdo comercial a largo plazo entre el sector privado y la parte pública –Puerto de Bilbao y Administración- para el desarrollo de una infraestructura portuaria y un desarrollo industrial beneficioso para ambas partes. Tenemos una empresa con una necesidad logística que exige un acceso marítimo, estando situada a su vez cerca del entorno portuario (además de tener instalaciones de almacenaje y bombeo en el propio Puerto), para obtener un producto en bruto, darle un valor añadido y volver a exportarlo. Evidentemente la distancia entre el punto de carga/descarga y el centro de transformación es crítica para la disminución de costes logísticos. Hoy día, en algunos desarrollos portuarios se sigue discutiendo la conveniencia de construir infraestructuras portuarias para la instalación de factorías en el propio Puerto que den un valor añadido a un producto y minorando, en el mismo proceso los costes de logística. En los años 70 ya se había hecho y con gran éxito como se comprueba en el peso que los graneles líquidos tienen en el tonelaje total del Puerto de Bilbao.



Fig. 3: Punta Lucero (1980).



Pasamos ahora a los años 90 del siglo XX. De nuevo, otro salto cualitativo en el Puerto de Bilbao. Entre el Dique de Santurtzi y el Dique de Punta Lucero, se extendía una zona abrigada de unos 5 km. X 2 km., en el entorno del linde entre Santurtzi y Zierbena. En esos años, en la época de otro visionario como Manuel Santos, se toma la decisión de construir la ampliación portuaria de Zierbena, primero con la construcción de los Diques de Abrigo de Zierbena (denominados AZs) y con Muelles de Atraque de grandes longitudes y calados y mucho fondo, consiguiendo, por un lado la entrada de grandes buques y, por otro, disponer de grandes superficies cercanas a las líneas de cantil donde poder establecer actividades industriales, no sólo de almacenaje, sino de generación de valor añadido. No solo de graneles, sino también de productos industriales, en los que las dimensiones (a veces demasiado grandes para su transporte por carretera) o el coste logístico obligan a buscar soluciones en el mismo puerto, colaborando la parte pública con la parte privada, más aún con las dificultades de financiación actuales que se encuentran las empresas.

Si a todo esto le añadimos las necesidades crecientes de superficies para un tráfico de contenedores creciente –que en la época de los estudios de desarrollo de los AZs era un tráfico incipiente-, o la incorporación de tráficos intermodales tipo Ro-Ro, vemos el éxito de una visión a muy largo plazo para la obtención del éxito.



Fig. 4: Ampliación de Zierbena.



4. SITUACIÓN ACTUAL

Nos encontramos en estos años en una situación de fluctuación de los tráficos portuarios, de tal manera que si vemos un gráfico de los tonelajes portuarios movidos en los últimos 10 años, más bien parece una montaña rusa con subidas y caídas de tráficos que impiden saber qué va a pasar y por tanto, definir las necesidades portuarias a largo plazo y, las más de las veces, incluso a corto. Pero si volvemos a coger perspectiva de los tráficos portuarios, vemos que el incremento de éstos en las últimas décadas ha sido exponencial. En los últimos 50 años, el tráfico de mercancías en el Puerto de Bilbao ha pasado de los 6,5 millones de Tm. A los 38,4 millones de Tm. del 2007. Prácticamente 6 veces de incremento de tonelaje en 50 años.

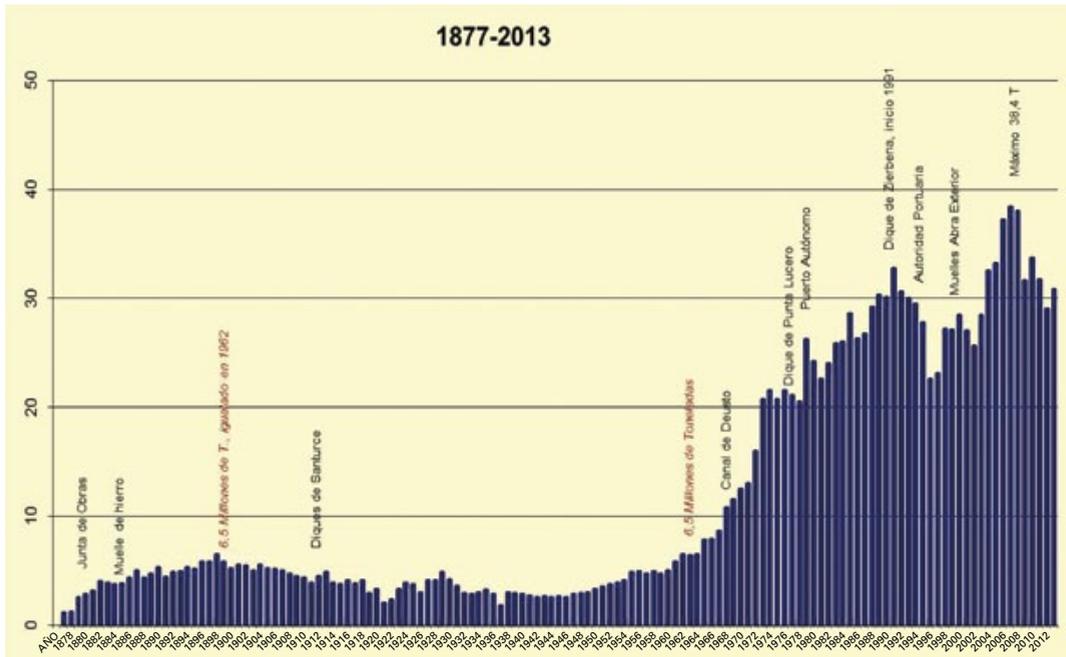


Fig. 5: Evolución de los tráficos del Puerto de Bilbao (1877-2013).

Además, vemos un incremento de tráficos que pasan de la carretera al camión, vía el Short Sea Shipping, Autopistas del Mar, etc. Asistimos igualmente a un crecimiento del número de Puertos Secos, buscando un acercamiento de los Puertos a los potenciales clientes, ya sean usuarios consolidados del tráfico por mar o por la búsqueda de nuevos clientes que, hasta la fecha no veían el mar como alternativa del transporte al verlo como algo lejano y que les resultaba extraño. En este sentido, hay una eclosión de puertos secos por parte de la mayoría de los puertos en los últimos años intentando aumentar el Hinterland portuario, causando solapamientos entre varios en algunas ocasiones. En el caso de Bilbao, se cuenta con puertos secos, ya sea en solitario o compartidos con otros puertos en Castilla-León, Castilla La Mancha, Aragón, Madrid, Euskadi, etc.

Si bien es cierto que los puertos compiten entre sí para la obtención de tráficos, en muchos casos y de manera creciente, se producen ámbitos de colaboración entre diferentes puertos, no con el fin de llegar a acuerdos que perjudiquen a los operadores portuarios, sino todo lo contrario, ya que se pretende la búsqueda de nuevos tráficos que permitan una competencia real entre la carretera y otros medios como el ferrocarril.

5. PERSPECTIVAS DE FUTURO

Son varios los retos que se plantean en la actualidad. Estos retos no son, para nada, retos nuevos. De un modo u otro se han ido planteando y solventando desde siempre. Enumerando algunos de ellos tenemos los siguientes:

a) Interacción Puerto-Ciudad

En el caso del Puerto de Bilbao, aun persistiendo temas menores de conflicto de intereses entre los Municipios ribereños y el Puerto, se han resuelto en gran parte. El Puerto de Bilbao ha escapado de las zonas más densamente pobladas hacia zonas de menos población, actuando con gran generosidad ya sea con cesión de terrenos, ya sea con inversiones. El ejemplo de desarrollo de Bilbao en los últimos 30 años es un ejemplo mundial de desarrollo urbanístico -que no de desarrollismo- en el que la parte principal han sido los terrenos antaño portuarios y hoy convertidos en paseos, Museos, Palacios de Congresos, oficinas, etc.



Fig. 6: Evolución Muelles en Bilbao 1968 – 2008.

b) Entono socio-económico

Los Puertos no pueden perder la visión primigenia que es la de servir al entorno socio-económico del que se nutren y al que nutren como parte de una cadena logística. Es cierto que son una parte importantísima y de gran repercusión en la economía de su entorno, pero no son objetivos económicos per-se, sino que deben dar servicio útil a esas empresas para mejorar sus costes de producción, incluyendo los costes de transporte en el mismo.



RETOS DEL SIGLO XXI PARA LOS PUERTOS Y LAS COSTAS

El Puerto de Bilbao no debe permitirse no ser autosuficiente en la generación de recursos que permitan nuevas inversiones y mejoras de las infraestructuras. Ese es un principio básico e inamovible que hace que gastemos de acuerdo a lo que ingresemos. El resultado económico no es un fin en si mismo, sino que debe de estar al servicio de las industrias y empresas de su entorno económico. Las obras a diseñar hoy día deberían regirse por este principio, que es el de anticiparse a las necesidades que se puedan plantear en el futuro. Recordemos que el periodo de maduración de una obra desde que se empieza a proyectar hasta que se pone en servicio, puede ser de más de 10 años, especialmente en grandes obras. La no anticipación a las necesidades puede hacer que para cuando se termine una obra, ésta ya llegue tarde al objetivo planteado.

Por ello es importante no tener la miopía de ver los tráficos -ya sea en conjunto, o como un tipo de ellos- de los últimos años, sino con mayor perspectiva y previsión. Los ejemplos vistos anteriormente nos permiten decir que una planificación madurada a la vez que atrevida, al menos en el Puerto de Bilbao, es garantía de éxito.

c) Acercar el Puerto a los clientes

Como hemos visto antes también, ya en el siglo XVI, nuestros antecesores en los puertos nos enseñaron la necesidad de acercarnos a nuestros potenciales clientes. Ya sea por la vía de las delegaciones comerciales, ya sea por la vía de los Puertos Secos. El poner el Muelle del Puerto al lado de esos clientes potenciales, agrupando cargas, abaratando el transporte, dando alternativas, etc. harán que los tráficos portuarios crezcan, disminuyendo el “canibalismo” que a veces se produce entre puertos por llevarse los tráficos del vecino. Mejor es generar nuevos tráficos en nichos de mercado nuevos que entrar en una guerra de precios interminable en algunos casos.

d) Ampliar el concepto de Puerto a la generación de valor añadido

Evidentemente los puertos no pueden perder la visión de ser una estación de tránsito y almacén de mercancías. Esto seguirá siendo parte importante del negocio portuario. Sin embargo hay nichos de mercado que ya están empezando a ser explotados como es el de generación de valor añadido a los productos. Antes comentaba la necesidad de disponer de espacios portuarios para aquellas empresas que, por las dimensiones de las piezas que manipulan, tienen necesidad de estar cerca de los Muelles, ya que la carretera se ha convertido en una dificultad del transporte. Además de ello, hay unos costes de logística. Es obvio que cuanto menor sea el tránsito de las materias primas y del producto elaborado, menores serán los costes de logística asociados y harán que las empresas sean más competitivas. Hasta la fecha, esto se hace muy a menudo con graneles líquidos y en menor medida con graneles sólidos y menos aún en productos industriales.

Esta implantación debe ser, no sólo en la simple puesta a disposición de suelos portuarios, sino en contratos a largo plazo que pudieran incluir, colaboraciones entre la parte empresarial y las Autoridades Portuarias.



6. CONCLUSIONES

En resumen, los problemas portuarios llevan siglos, en la mayoría de los casos, planteándose y solucionándose. Sólo cuando se ven desde una perspectiva general muy amplia, en vez de con miopía propia del cortoplacismo, se resuelven satisfactoriamente. No olvidemos tampoco que el periodo que transcurre entre el planteamiento del problema hasta la puesta en servicio de la solución transcurren muchos años. Ello nos obliga, aún más, a tomar decisiones con conocimiento, pero con valentía de visión estratégica. Somos consecuencia de los actos de nuestros antecesores y origen de lo que se encontrarán quienes nos sucedan. Hay un dicho en euskera que lo define perfectamente:

“Izan zirelako, gara. Garelako, izango dira”

Que traducido viene a decir “Porque fueron, somos. Porque somos, serán”. Tengámoslo en cuenta en nuestro trabajo y actuemos con esa perspectiva.



EFFECTOS DEL TEMPORAL DEL INVIERNO 2014 EN LOS PUERTOS DE LA CAV Y SOLUCIONES DE URGENCIA



Luis Ignacio López de Aguilera Salazar¹

1. LA EXCEPCIONALIDAD DE LOS TEMPORALES DEL INVIERNO 2014

El inicio del año 2014 pasará a la historia por las múltiples imágenes inéditas para la ciudadanía, que nos ha dejado a lo largo del litoral Cantábrico. Ha sido necesario rescatar imágenes en blanco y negro del NODO para ver Donostia con niveles de inundación similares por los embates de la mar. Los arrantzales más veteranos no recordaban rebases en nuestros puertos como los ahora vistos, ni se imaginaban que un espaldón como el de Frantxúa que habían visto pasar un siglo por él, pudiera llegar a colapsar. Tampoco los ciudadanos de Zarautz esperaban ver tan dañado su flamante paseo marítimo o cercenadas las dunas de su campo de golf.



¹ Gobierno Vasco.



Son ejemplos que evidencian y nos permiten visualizar muy claramente, la excepcionalidad de lo ocurrido. Estos efectos, generalizados a lo largo de la Costa Cantábrica, están causados por unos episodios de oleaje intenso que debe ser caracterizado para ayudarnos a comprender por qué se han producido daños de semejante magnitud.

Lo primero que hay que destacar, analizando de forma global y no individualizada los temporales de este último Invierno, es su *extraordinaria recurrencia*. Si bien la intensidad de los episodios individuales no ha alcanzado los máximos registrados desde que se dispone de datos estadísticos de calidad; el promedio de las alturas de ola significantes (Hs) nunca había sido tan elevado como en el pasado Invierno, particularmente en los 3 primeros meses del año. Esta conclusión ha sido refrendada por los informes de las diversas agencias meteorológicas, de los que paso a destacar algunos datos muy significativos:

- Analizando los 3 inviernos más agresivos en un puesto de observación frente a la costa vasca (POS02), la frecuencia de episodios de temporal del último invierno es muy superior, como se aprecia en la tabla :

FECHAS	Nº EPISODIOS	
	Hs > 10 mts	7 mts < Hs < 10 mts
Oct. 2013 – Marzo 2014	2	14
Oct. 1988 – Marzo 1989	1	7
Oct. 2008 – Marzo 2009	1	3

Fuente: Informe de AEMET de 18 de marzo de 2014.

- El número de alertas por estado de la mar que ha emitido EUSKALMET en este inicio de año no tiene parangón. De sus informes mensuales podemos destacar que durante el mes de Enero de 2014 se generaron 6 alertas naranjas, en el mes de Febrero 1 alerta roja y 8 naranjas y en el de Marzo, 2 rojas y 2 naranjas.

Sentada, por lo tanto, la base de que la acumulación de temporales es una de las características que singularizan los temporales de este último Invierno, vamos a poner la lupa en analizar de una forma más individualizada el episodio más devastador de los enumerados anteriormente, el de la madrugada del 2 de febrero, para encontrar otro factor de singularidad de lo acontecido.

Efectivamente, el registro máximo de la Hs de esa jornada en la boya direccional Bilbao-Bizkaia resultó ser de 9,26 mts, que si bien es elevado, ha sido superado en una veintena de ocasiones en los últimos 20 años, incluso este mismo invierno en 4 oportunidades y en la misma semana en otras 2 ocasiones como se refleja en la tabla adjunta:



FECHA Y HORA	Hs (mts)	Tp (seg)	Dirección oleaje
08/02/14 (21 :00)	9,84	19,92	290° N
05/02/14 (14 :00)	10,90	18,16	284° N
02/02/14 (06 :00)	9,26	19,92	312° N

Fuente: Puertos del Estado. Registros de la boya Bilbao-Bizkaia.

Este último día, como se ha dicho, resultó el más dañino por su coincidencia con una sobreelevación extraordinaria del nivel del mar, llegándose a registrar en el mareógrafo de Santander una cota de +5,36 mts respecto a la BMVE.

Analizando por separado cada parámetro de ese día se desprende lo siguiente:

- La *altura Hs* de 9,26 mts está asociada a un periodo de retorno de 1,8 años según el régimen extremal de la boya de registro. Por sí misma no es una altura excepcional.
- El *nivel del mar* de +4,81 mts (marea astronómica ese día en Bilbao), es uno de los 3 valores máximos del año y a la vista del resultado obtenido en el mareógrafo de Santander, fué sensiblemente aumentado por un residuo importante de marea meteorológica.
- El *período* de pico (Tp) es también excepcional. Para una Hs de 9,26 el valor más probable habría sido 14,5 seg., muy por debajo de los 20 que se dieron ese día.

La coincidencia de estos 3 factores junto con una dirección del oleaje con una componente Norte, de mayor exposición en nuestra costa, muy dominante el día 2 es lo que confiere un carácter tan excepcional al oleaje sufrido esa jornada.

Sintetizando, a un nivel macro podemos hablar de una sucesión extraordinaria de temporales y a nivel micro la coincidencia de un periodo de pico y un nivel del mar excepcionalmente altos, provocando que en zonas con profundidades reducidas, las condiciones de oleaje en rotura hayan sido extraordinariamente desfavorables, lo que ha hecho que se presentaran alturas de ola inhabituales a pié de esas infraestructuras (espigones, paseos, puentes) situadas a profundidades someras, causando daños e inundaciones desconocidas en la era moderna.

2. EFECTOS EN LOS PUERTOS DE LA CAV

Los eventos principales que produjeron daños en nuestras infraestructuras portuarias se dieron en la tarde del día 6 de enero y madrugada del 7, en la madrugada del día 2 de febrero y en la tarde del día 3 de marzo. Las pérdidas materiales han sido cuantiosas, pero como veremos a continuación, reparables. El comportamiento cívico de la población costera ha sido una constante en esas fechas, lo que no ha evitado que hubiera que lamentar una pérdida humana en el puerto de Ondárroa, por arrastre de ola, el 28 de enero.

El primer temporal significativo, en cuanto a daños, es el de la tarde del 6 de enero y posterior madrugada. El dato más relevante es el altísimo periodo del oleaje que se alcanza (entre 22 y 23 seg.), lo que se traduce en la entrada en nuestras dársenas de grandes masas de agua asociadas a dichas ondas largas. Al margen de los daños en las estructuras de protección por la gran energía de las olas, las enormes celeridades de la lámina de agua provocan numerosas averías en elementos de amarre, así como rebases masivos que afectan zonas protegidas; siendo los principales daños los siguientes:

- Roturas de elementos de sujeción, módulos y fingers de pantalán de diversa consideración en los puertos de Donostia, Mutriku, Ondarroa, Lekeitio, Elantxobe, Bermeo, Armintza y Plentzia.
- Inicio de averías en estructuras de protección: contradique de Orio, espaldón dique de Zumaia, martillo, contradique y talud del dique de Frantxúa en Bermeo.
- Rotura y desplazamiento de losas en el muelle de Xixili en Bermeo.
- Daños asociados a los rebases masivos en diversos elementos de urbanización y equipamientos en la práctica totalidad de los puertos, especialmente importantes en pabellón del consignatario MARBECO en el puerto de Bermeo.



Pero cuándo la situación se tornó realmente crítica fue en la madrugada del día 2 de febrero al coincidir el fuerte oleaje con una excepcional sobreelevación del nivel del mar, todo ello ha sido analizado con detalle en el apartado anterior. La alerta roja se extiende entre las



3:00 y las 9:00, amaneciendo nuestra costa con numerosas infraestructuras destruidas, de las que relaciono a continuación las más significativas para no resultar exhaustivo:

- Uno de los diques verticales de la bocana del puerto de Donostia presenta un descalce de gran magnitud, amenazando con desplomarse. El pretil de bloques de piedra arenisca del contradique sur es desplazado por el oleaje hundiendo embarcaciones y destrozando pantalanes.



- El contradique del puerto de Orío, ya dañado en los anteriores temporales, sufre una rotura completa en un tramo intermedio de su tronco invadiendo la escollera derramada el canal de navegación. El dique de abrigo presenta daños diversos en su espaldón y manto interior.



- El edificio del Servicio de Puertos de Gipuzkoa en Getaria es alcanzado por las olas, destruyendo elementos estructurales del mismo. La misma suerte corren diversas edificaciones del puerto deportivo.





- El dique de abrigo de Zumaia presenta daños en diversos elementos de su espaldón (pretil, botaolas, imposta, barandillas...), así como en la escollera del manto interior, camino de acceso, etc...
- Destrozos en el camino de acceso al dique exterior del puerto de Mutriku y en elementos de urbanización de la playa y piscina de mareas anexa.
- Roturas y desplazamientos de pretils, cantiles de piedra, mampuestos, pavimentos, etc. en los puertos de Armintza y Elantxobe.
- Desplazamiento del morro del contradique de acceso al puerto de Ondárroa, donde también sufren daños edificios e infraestructuras del trasdós del dique.



- Desaparición del pantalán adosado al dique interior del puerto de Mundaka.
- En Bermeo los daños son cuantiosos:
 - Destrucción de gran parte de la estructura de protección de la explanada de Frantxúa, con destrozos en las lonjas de pescadores ubicadas en la misma.
 - Rotura de 3 tramos de espaldón del dique de abrigo y desplazamiento de un modulo del espaldón en el contradique.
 - Hundimiento y roturas diversas de pantalanes en Portu Zaharra y junto a la fábrica de hielo, arrastrando y hundiendo decenas de embarcaciones.





Todos estos daños son visualmente apreciables de forma inmediata, si bien pasan bastantes días hasta que se puede acceder a muchos de estos sitios, dado el estado de la mar que no da tregua. Las campañas de inspección topo-batimétricas puestas en marcha de inmediato, nos permitirán ampliar la lista anterior de daños, observables fácilmente, a otros como son las pérdidas de calado y las importantes mermas, por pérdida de bloques, de los mantos principales de abrigo en muchos de nuestros diques.

Con unas estructuras muy debilitadas los numerosos temporales, ya citados, de los días sucesivos no hicieron más que aumentar la cuantía de los daños; eso sí, en menor medida de lo previsible por la rápida puesta en marcha de actuaciones de protección. Lo más destacable es la rotura de 2 nuevos tramos de espaldón del dique de Bermeo en la tarde del día *3 de marzo*, en el intervalo de tiempo entre las 18:14 y las 18:19 como informan las fotos adjuntas.





3. MEDIDAS DE EMERGENCIA ADOPTADAS. ALGUNAS RESPUESTAS TÉCNICAS

Una situación de este tipo ha requerido una inmediata reacción de la Administración en todos sus niveles. En este artículo me referiré únicamente a la portuaria, en este caso, del Gobierno Vasco. Tras el temporal de 6 de enero y a la vista de los daños apreciados, se aprobaron mediante Resoluciones de 20 de enero, sendos expedientes para declarar de emergencia, conforme a lo previsto en el artículo 113 del Texto Refundido de la Ley de Contratos del Sector Público, los trabajos a realizar de *Reconstrucción en diversos mantos de protección del puerto de Bermeo* y en el *contradique de Orio*. (A la vista de lo acontecido días después, la previsión no pudo ser más certera).

Tras el episodio del 2 de febrero las citadas Resoluciones fueron complementadas y además se pusieron en marcha, con este carácter de emergencia, otras 4 actuaciones: *Consolidación de los diques verticales de la bocana del puerto de Donostia*, *Reestablecimiento del manto interior y camino de rodadura del dique de Zumaia*, *Reconstrucción del morro del contradique del puerto de Ondárroa* y *Recuperación de calados en canales de navegación y zonas de fondeo portuario seriamente afectados por los últimos temporales marítimos*. Estas herramientas que nos da la Ley, nos han permitido contratar con la celeridad necesaria las Asistencias Técnicas necesarias para redactar los proyectos de reparación, los trabajos topo-batimétricos y de reconocimiento submarino y finalmente, las obras de reparación y reconstrucción.

A todas estas obras principales, hay que añadir más de un centenar de obras menores de reposición y reparación de boyas, pantalanos, bolardos, balizamiento, pavimentos y elementos de mobiliario urbano, edificios, etc... También debieron de contratarse los trabajos extraordinarios de limpieza y desescombro en las zonas más afectadas.

La principal obra realizada, por el volumen de la inversión y por la repercusión mediática que ha tenido, ha sido la *reconstrucción de la obra de defensa de la explanada de Frantxúa en Bermeo*.

La mañana del 2 de febrero, esta zona del puerto de Bermeo amanece con más de 100 mts. de su espaldón derruidos, en diversos tramos, así como con la pérdida de parte del manto principal formado por piedra natural de 1 a 3 toneladas. Las lonjas de pescadores ubicadas en el trasdós del muro resultan muy dañadas por el oleaje que bate contra ellas sin protección alguna. El muro antiguo, ciertamente esbelto, se había mostrado estable durante todo un siglo, si bien los rebases aconsejaron hace una decena de años, la realización una protección con escollera de todo su perímetro.

En esos primeros momentos se adoptaron medidas de protección recolocando las escolleras, teniendo en cuenta que la ventana de actuación era muy limitada ya que la previsión era que en la pleamar de esa misma tarde volverían a producirse rebases masivos. Se cuenta para ello con la colaboración, que se extendería al resto de la obra, del grupo de empresas que ejecutan en esos instantes la variante de Bermeo



(Excavaciones Cantábricas, C.Intxausti, Elórtegi y Gaimaz). A duras penas dio tiempo a retirar el pantalán y las embarcaciones hundidas en Portu Zaharra, en evitación de que arrastraran en cascada a los módulos subsiguientes.



Esa misma mañana se chequearon todas las posibilidades de disposición inmediata; es decir en acopio, de bloques de protección, para lo que se contactó con diversas canteras de piedra caliza, así como con la Autoridad Portuaria de Bilbao, por tener en ejecución obras con bloques de hormigón. De esta manera el día 3 de febrero se colocaron en protección del Portu Zaharra 35 bloques de hormigón de 8 Tn. y empezaron a disponerse bloques paralelepípedos de piedra natural de los pesos disponibles en ese momento en cantera, pero siempre por encima de las 10 Tn. Así, durante ese mes de febrero se colocaron cerca de 4.000 Tn. en bloques de piedra natural. Teniendo en cuenta los temporales, ya descritos en el apartado 1 de éste artículo, que se dieron los días 5 de febrero, 8 de febrero y 3 de marzo; podemos estar satisfechos por la eficacia de las medidas adoptadas, ya que no se incrementaron las averías en esta zona.



En paralelo, durante esos meses se trabaja en la redacción del proyecto, por parte de la ingeniería INHA, de lo que será la verdadera reconstrucción de la estructura de protección de Frantxúa. Se estudian diversas alternativas, como las que se aprecian por las imágenes adjuntas:

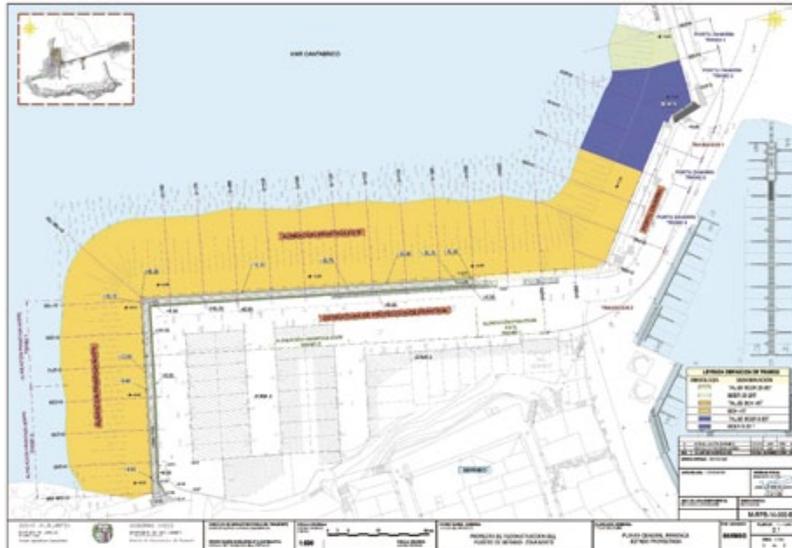


Valorando el impacto de la solución, su fiabilidad, adaptación a las medidas de protección ya tomadas y economía se opta por una alternativa clásica de dique en talud. La solución es calculada conforme a la ROM 0.0, adoptándose los siguientes valores de proyecto:

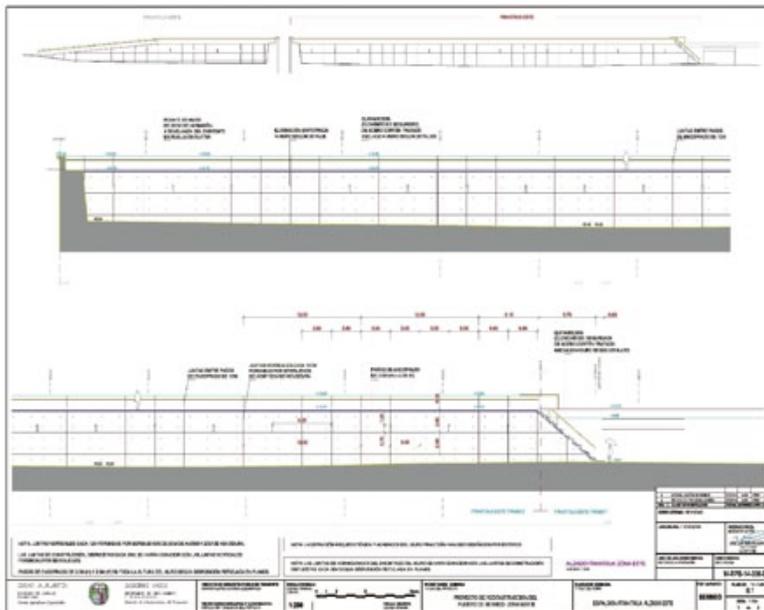
- Vida Útil Mínima: 25 años.
- Máxima Probabilidad Conjunta de Fallo: 0,2

Lo que implica un periodo de retorno de 112 años. Para la determinación final de la altura de ola de cálculo incidente sobre el dique Frantxúa se ha realizado un completo análisis del clima marítimo, siendo lo más destacable que se ha considerado la sobre elevación producida en la altura de ola como consecuencia de la reflexión producida y observada en los sucesivos temporales, por la alineación principal del dique de abrigo del Puerto. El oleaje de diseño considerado para el cálculo de la nueva sección del dique Frantxúa corresponde a valores a pie de dique, tras considerar los fenómenos de propagación y rotura de: $H_s = 5.23$ metros y $T_p = 20$ segundos.

La zona con nueva protección abarca una longitud total de 250 metros, dividida en 3 alineaciones, desde Portu Zaharra hasta la alineación Frantxúa Norte pasando por Frantxúa Este. Se han optimizado las secciones de tal forma que pudieran reutilizarse los elementos dispuestos a modo de protección en las primeras semanas, de tal manera que se han reubicado en la transición con el dique principal los bloques de piedra disponibles, de mayor tonelaje (en verde y azul en plano adjunto). La sección típica de la protección (en amarillo en el plano) ha estado compuesta por un manto principal bicapa de bloques de hormigón de 8 Tn. de alta densidad ($2,75 \text{ Tn/m}^3$), con una berma de coronación a la cota +9,00 y un talud 2:1 hasta apoyar en el terreno natural.



El nuevo espaldón, reflejado en el plano de planta con una trama gris, ocupa la alineación Norte y gran parte de la Este, con una longitud de 160 mts, se corona en su tramo más alto a la cota +12,00, es de hormigón armado y ha sido proyectado cuidadosamente dada la dimensión del mismo, dando la trascendencia debida a la estética del mismo, cuidando el diseño del muro nuevo en convivencia con el antiguo espaldón y aplicándole un tratamiento de envejecimiento y protección. Se puede decir que se ha construido un espaldón para el siglo XXI, sobre el muro que aguantó el siglo XX.





El ritmo de ejecución de la obra durante los meses de verano ha sido muy alto a fin de tener completada la obra de abrigo, como así ha sido, en el mes de Octubre, antes del inicio de la nueva época de temporales. Se ha venido suministrando y colocando 60 bloques al día de media. Presento algunas imágenes de ejecución de la misma:





La obra, es convencional, si dejamos al margen las circunstancias excepcionales ya comentadas en el arranque de la misma, por ello me gustaría incidir en principal novedad que introduce, que no es otra que la utilización de hormigón de alta densidad como material para la fabricación de los bloques del manto principal.

La utilización de escorias procedentes de la fabricación de acero en horno eléctrico cabe considerarla como una buena práctica ambiental, habida cuenta de que el Decreto 34/2003 del Gobierno Vasco regula la valorización y posterior utilización de este residuo en el sector de la construcción, considerando como indicado su uso como materia prima, en éste caso árido para la fabricación de un hormigón de alta densidad ($2,75 \text{ Tn/m}^3$). Este uso es particularmente adecuado en las obras marítimas, en las que es conocida la importancia de la densidad de los materiales que conforman las obras de abrigo, que hace que el volumen y por lo tanto el impacto visual del manto de abrigo disminuya significativamente, en éste caso del orden del 60%. De esta forma en la obra de protección de la explanada de Frantxúa se han valorizado y reutilizado un total de 11.095 Tn de escoria de alto horno, incorporados como árido para la fabricación de los 2.773 bloques de hormigón colocados en esta obra en Bermeo. Otro aspecto destacable de reutilización en la obra ha sido el aprovechamiento de los sillares del tramo caído y demolido del espaldón antiguo. Efectivamente, se ha seleccionado y clasificado ésta piedra para ser reutilizada en la reconstrucción del muro de mampostería del tramo de Portu Zaharra y como manto secundario de la estructura de protección.



Para finalizar, y dado que una imagen, en éste caso dos, valen más que mil palabras, termino exponiendo el estado de la explanada de Frantxúa tras el episodio del 2 de febrero y la situación en que, poco más de 7 meses después podemos verla.



Explanada de Frantxúa. 2 de febrero de 2014.



Explanada de Frantxúa. 25 de septiembre de 2014.



ESTUDIOS NÁUTICOS PARA EL ACCESO Y OPERACIÓN DE MEGABUQUES EN LOS PUERTOS

APLICACIÓN A LNG, PORTACONTENEDORES, CRUCEROS, BULKCARRIERS Y MEGAYATES



José R. Iribarren¹, Ismael Verdugo¹, Carlos B. Cal¹, Raúl Atienza¹

RESUMEN

Es conocida la tendencia al aumento de capacidad de los buques, especialmente en los últimos años y en algunos tráficos. El motivo es la economía de escala resultante. Sin embargo, la infraestructura portuaria está diseñada para una vida operativa más larga. Por tanto, es frecuente que los puertos deban recibir buques superiores a los de diseño. Se hace necesario un análisis de viabilidad del acceso y operación de los nuevos buques en los puertos existentes. Este trabajo se concentra en los aspectos náuticos, pero hay muchos otros factores a considerar (medios de carga/descarga, capacidad de almacenamiento, etc.).

Según los casos, será necesaria una adaptación de las normas de acceso y operación, la actualización de los equipos o incluso un refuerzo de las estructuras portuarias. Se presentan diversos casos de aplicación con buques gaseros, portacontenedores, graneros y cruceros. Incluso en el campo de los puertos deportivos, los megayates requerirán una verificación y revisión de operaciones.

Es fundamental el trabajo conjunto de Autoridad Portuaria, Capitanía Marítima, Prácticos, Operadores de Terminales y Capitanes, a fin de recoger las diferentes experiencias y puntos de vista. Una medida beneficiosa es la definición y puesta en práctica de programas de entrenamiento previos a la entrada en servicio de los nuevos buques, empleando el simulador de navegación.

¹ Siport21.



1. INTRODUCCIÓN

Es un hecho conocido la marcada tendencia al aumento de capacidad de los buques, especialmente en los últimos años y en algunos tráficos de manera destacada. El motivo es, evidentemente, la economía de escala resultante en las diversas fases del transporte.

Sin embargo, la infraestructura portuaria está diseñada para una vida operativa más larga. Ello da lugar a que, de manera muy frecuente, los puertos y terminales deban recibir buques superiores a los iniciales de diseño. En los puertos españoles, por ejemplo, esta situación se ha dado una y otra vez con los buques gaseros, los portacontenedores y los cruceros. La aparición de nuevas clases de buques obliga a revisar la capacidad de las terminales para recibirlos. Incluso en el campo de las marinas y puertos deportivos, la adaptación a los megayates (embarcaciones por encima de 50 m de eslora) es una cuestión de gran interés en muchos lugares.

Así pues, resulta fundamental el desarrollo de un análisis de viabilidad del acceso y operación de los nuevos buques en los puertos existentes. Este trabajo en particular se concentra en los aspectos náuticos:

- Navegación
- Maniobra
- Seguridad y Riesgos
- Amarre

aunque hay muchos otros aspectos adicionales a considerar:

- Medios de carga/descarga (grúas, rampas, brazos de transferencia de productos líquidos, etc.)
- Capacidad de almacenamiento (tanques, explanadas de contenedores, etc.)
- Instalaciones para recepción y transporte de pasajeros
- Suministro de electricidad o avituallamiento, etc.



Desde este punto de vista, se hace necesario verificar la aplicabilidad de la normativa náutica vigente para determinar:

- Límites de acceso meteorológicos (viento, oleaje) o por marea
- Formación de remolque a emplear
- Procedimientos de emergencia

y la capacidad de las instalaciones y equipos portuarios:

- Defensas y bolardos o ganchos de amarre
- Compatibilidad de sistemas de carga y acceso
- Balizamiento, etc.

En su caso, el análisis llevará a:

- una revisión y actualización de las normas de operación
- la mejora o ampliación de capacidad de los equipos
- incluso a obras de dragado o refuerzo de las estructuras portuarias

Para este análisis de viabilidad, será necesario recopilar información detallada de la infraestructura portuaria y sus instalaciones, así como de las características y dimensiones de los nuevos buques. Y por supuesto, caracterizar adecuadamente las condiciones marítimas y meteorológicas locales (niveles de marea, vientos, corrientes, oleajes).

A partir de aquí, se emplearán de manera progresiva Recomendaciones y Normas nacionales e internacionales sobre las diversas cuestiones, pero lo más habitual es recurrir a un análisis preciso y detallado empleando herramientas de simulación avanzadas.

En este sentido, destacan especialmente los modelos numéricos de maniobra de buques con autopiloto, de respuesta dinámica del buque atracado y de interacción entre buques ("passing ships"). Y como elemento de máxima capacidad, los simuladores de maniobra en tiempo real dotados de un puente de mando con instrumentación completa y sistema visual de altas prestaciones. Ello permite trabajar en un escenario virtual de gran realismo en el que la ejecución de las maniobras es muy próxima a la realidad, considerando la globalidad de los factores que influyen en su desarrollo, tanto desde el punto de vista físico como de comportamiento humano (ciclo de percepción, toma de decisiones, ejecución y comprobación).

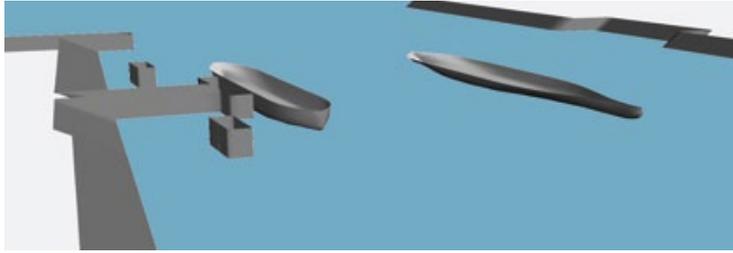


Figura 1. Modelo numérico de interacción entre buques (Ropes "Passing ships").

Una vez aprobada la viabilidad y comenzadas las operaciones, es muy recomendable realizar un seguimiento sistemático de las maniobras y operaciones que se lleven a cabo con los nuevos tipos de buques, a fin de verificar progresivamente la validez de las conclusiones de los estudios y su progresiva transposición a reglamentos de actuación.



Figura 2. Simulador de maniobra de buques en tiempo real.

2. CASOS DESTACADOS

2.1 Buques LNG

En el campo de LNG (gas natural licuado), hasta 2007 la capacidad máxima se mantuvo en el rango de 138.000-145.000 m³. Sin embargo, los ambiciosos proyectos de explotación de gas de Qatar, a través de Qatargas, llevaron a la aparición de los grandes buques Q-Flex y Q-Max.

Los buques Q-Flex tienen una capacidad de 218.000 m³, con dimensiones 315/303 x 50 x 12 m. A su vez, los Q-Max alcanzan los 267.000 m³, con dimensiones 345/333 x 55 x 12 m. Frente al mayor buque existente en el momento de su aparición, suponen incrementos en eslora de 10% y 20%, respectivamente. La manga aumenta 20% y 30%. El calado se mantiene en los 12 m, dado que es una limitación difícilmente superable en las terminales existentes. La capacidad de transporte crece un 50% y 80% respectivamente con relación a un gran buque de 145.000 m³. El desplazamiento es el doble o superior. Disponen de tanques prismáticos, que permiten limitar el aumento del área expuesta al viento.



Una característica muy relevante de los buques objetivo (tanto el Q-Flex como el Q-Max) se encuentra en la propulsión, que cuenta con dos líneas de ejes y gobierna con dos timones. Además se trata de motores diesel-eléctricos en contraposición a las turbinas de vapor utilizadas tradicionalmente en buques de una sola hélice. El aumento de porte de estos buques con respecto a los existentes hasta entonces se ve compensado con la flexibilidad en la maniobra que les confiere el tener la propulsión desdoblada. Por contra, no disponen de hélice de maniobra de proa.

Se trata, por tanto, de buques con dimensiones significativamente mayores a los máximos existentes hasta entonces, pero con una dotación de equipos propulsores y de gobierno que mejora notablemente sus cualidades de maniobra. En el análisis de viabilidad se busca, pues, establecer si pueden mantenerse los límites meteorológicos de acceso, si son adecuados los espacios de maniobra disponibles y cuáles son las necesidades de remolque para los nuevos buques. Se revisan también las distintas estrategias de maniobra y se verifican las respuestas ante emergencias a través de un cuidadoso análisis de riesgos.

En la actualidad existe una amplia flota, con 16 unidades Q-Flex (primer buque en noviembre 2007) y 13 unidades Q-Max (primer buque en agosto 2008).

Siport21 ha desarrollado estudios para la operación de este tipo de buques en diversos puertos españoles, como Barcelona, Sagunto, Bilbao, Huelva, Ferrol o Gijón. En algunos casos no se ha llegado a admitir su acceso. Pero, por ejemplo, Bilbao BBG fue el puerto donde operó el primer buque Q-Max de 267.000 m³ fuera de Qatar (2009). Sagunto (SagGas) recibió Q-Flex en 2009 y Q-Max en 2010. En Barcelona, la primera escala de un Q-Flex fue en abril 2012 y el primer Q-Max descargó en septiembre del mismo año.

Se han desarrollado análisis semejantes en otros puertos internacionales, como CanaPort (St. John's New Brunswick, Canadá), Altamira (México) o Sines (Portugal). El buque Q-Max se ha convertido en buque de proyecto de las nuevas terminales de recepción y regasificación de LNG.



Figura 3. Buque LNG Q-Max "Al Samriya".



Figura 4. Simulación de acceso de un buque LNG Q-Max (Barcelona).

2.2 Portacontenedores

En cuanto a portacontenedores, es conocido el continuo y enorme crecimiento en la capacidad de los buques, a través de diversas generaciones. Tras los Panamax, los post-Panamax y los post-Panamax Plus, en 2006 hizo su aparición el "Emma Maersk", primer buque de la clase "E", que supuso un notable cambio en el buque de diseño para las nuevas terminales internacionales. Este buque y sus gemelos supusieron un salto en capacidad y dimensiones, 11.000-14.000 TEUs y 398/376 x 56 x 14 m. Ahora, el caso se repite con la nueva clase "Triple E" (18.000 TEUs 399/377 x 59 x 15.5 m), en este caso con propulsión doble. El primer buque de esta clase entró en servicio en noviembre 2013, accediendo ya a Algeciras y previsiblemente en el futuro a varios puertos españoles de gran capacidad (Barcelona, Valencia).



Figura 5. Simulación de acceso de un buque portacontenedores 14000 TEUs (Valencia).

La simulación de maniobras ha sido un factor decisivo en el análisis de viabilidad de los nuevos buques, dadas sus grandes dimensiones y la alta sensibilidad al viento. En los últimos años, Siport21 llevó a cabo estudios de acceso de grandes portacontenedores en diversos puertos españoles, como Barcelona, Valencia, Algeciras, Tarragona o Tenerife.



La ampliación del Canal de Panamá y la construcción de las nuevas esclusas (apertura prevista para 2015) ha dado lugar a una nueva "clase", los New Panamax (buque de diseño de las nuevas esclusas). Con dimensiones 366/350 x 49 x 15 m, se han convertido en la referencia para el diseño de las nuevas terminales en la zona de influencia del canal, pero también en muchos otros puertos existentes que tendrían ventaja operando con estos buques.

En este sentido, hay experiencias muy interesantes en Buenaventura y Cartagena de Indias (Colombia), Lázaro Cárdenas y Altamira (México), El Callao (Perú) o Valparaíso y San Antonio (Chile).

2.3 Bulkcarriers

Los grandes desarrollos mineros en Sudamérica han llevado igualmente a la aparición de bulkcarriers de gran capacidad. El límite actual está en los Valemax (VALE, Brasil) de 400.000 TPM, con dimensiones 360/353 x 65 x 23 m. Con relación a un gran Capesize de 230.000 TPM, se trata de un aumento en eslora del 12%, 27% en manga y 3 m más de calado (+13%). El desplazamiento sube un 36%. Las enormes dimensiones y desplazamiento obligan a valorar con especial cuidado las condiciones de acceso y las necesidades de remolque.

Su operación sólo es posible en un número limitado de terminales con elevada profundidad, normalmente bajo exigentes condiciones de marea. La optimización de este proceso obliga a aplicar habitualmente métodos avanzados de cálculo de metodología probabilista, que combinan las condiciones climáticas (oleaje) y de marea (niveles de pleamar) de la zona para establecer una normativa de acceso global que optimice la explotación.



Figura 6. Comparativa de buques Valemax y Capesize.

En España, la Ampliación del Puerto de Gijón es susceptible de recibir estos enormes buques, una vez realizado un análisis preliminar. La consideración conjunta de las condiciones de maniobra en planta (oleaje, viento y capacidad de remolque), en alzado (profundidad del canal en relación a la pleamar en la entrada, condicionada al oleaje reinante) y la estancia en muelle (profundidad disponible en los diversos atraques en bajamar) permite asegurar un nivel de accesibilidad suficiente. Como se ha indicado, el siguiente paso es realizar una optimización que permita relacionar calado del buque en carga, condiciones de oleaje (dirección-altura-período) y nivel de pleamar requerido para la entrada asegurando un nivel de riesgo mínimo aceptable.



Figura 7. Simulación de acceso de buques Valemax (Gijón).

2.4 Cruceros

En el tráfico de cruceros, el aumento de capacidad es igualmente continuo desde hace décadas. El "Voyager of the Seas" (1999) (137.000 GT, 310 x 48 m, 3.800 pax) fue pronto superado por el "Queen Mary II" (2004) (345 x 45 m, 3.000 pax), un buque muy especial no solo por sus dimensiones sino también por su sistema de propulsión (triple azipod). Posteriormente vendrían el "Freedom of the Seas" (2006) (158.000 GT, 339 x 56 m, 4.000 pax) y su gemelo "Liberty of the Seas", hasta llegar al máximo actual "Oasis of the Seas" (2009) (220.000 GT, 360 x 64 m, 6300 pax) y su gemelo "Allure of the Seas". También destacan el "MSC Fantasia" y sus gemelos (2008) (330 x 38 m, 3.900 pax), en su momento buques máximos en el tráfico del Mediterráneo.



Figura 8. Crucero "Oasis of the Seas", máximo mundial.

Una vez más, ha sido necesario analizar las condiciones de acceso y amarre de estos gigantes en las terminales existentes, con problemas operativos destacados en algunos casos. Se cuenta con experiencias muy interesantes de estudios en simulador en los puertos de Barcelona, Valencia, Palma de Mallorca, Ceuta, Santa Cruz de Tenerife o Ciutadella, La reciente llegada del "Oasis of the Seas" a Málaga, Barcelona y previsiblemente también a Valencia requerirá igualmente reevaluar las instalaciones y procedimientos.

A nivel internacional, se han desarrollado algunos proyectos similares en puertos muy relevantes, como Cartagena de Indias (Colombia), Funchal (Madeira, Portugal) o Túnez.

2.5 Megayates

Fuera ya de los tráficos comerciales, algunas marinas deportivas y astilleros de mantenimiento han de hacer frente a un nuevo negocio. Aumenta el número y dimensiones de los denominados superyates o megayates, embarcaciones de eslora superior a 50 m que requieren de instalaciones de muy alto nivel de calidad.

De nuevo, se registra una carrera hacia barcos mayores y de prestaciones muy especiales, para armadores muy exigentes. Los mayores barcos de los últimos años son "Al Salham" (139 m), "Prince Abdulaziz" (147 m), "Al Said" (155 m) y "Dubai" (162 m). El mayor barco existente, el "Eclipse", de 165 m de eslora (2009) fue superado hace poco por el "Azzam", de 180 m.



Figura 9. Megayate "Eclipse".

Siport21 ha desarrollado también estudios para este tipo de embarcaciones en diversos puertos españoles, como Barcelona (Astillero Marina Barcelona'92, Marina Port Vell, Port Forum), Vilanova, Tarragona, Mallorca (Port Adriano) o Valencia (Puerto Juan Carlos I de la Copa América).

3. IMPLANTACIÓN Y ENTRENAMIENTO ESPECÍFICO CON SIMULADOR

En estos procesos de análisis, es fundamental contar con la participación conjunta de Autoridad Portuaria, Capitanía Marítima, Prácticos, Operadores de Terminales y Capitanes de las navieras implicadas, dada la complejidad del asunto y la complementariedad en los puntos de vista. El resultado, en la mayoría de los casos, lleva a consensuar procedimientos operativos actualizados, que deben implantarse de forma progresiva. La seguridad es siempre el parámetro fundamental y la aproximación debe hacerse desde la prudencia.

En muchos casos, una medida muy beneficiosa es la definición y puesta en práctica de programas de entrenamiento específicos previos a la entrada en servicio de los nuevos buques, dirigidos a Capitanes, Oficiales y Prácticos. En ellos se verifican y perfeccionan los procedimientos de operación normales, incluyendo estrategias de maniobra en condiciones meteorológicas diversas, formaciones de remolque, etc., siempre para un puerto y buque específico. Pero también, en función de los riesgos asociados al tráfico considerado, se analizan situaciones de emergencia (fallos de propulsión o gobierno, empeoramiento del tiempo, condiciones extremas de viento u oleaje, avería en los remolcadores, etc.). Ello permite ganar una enorme experiencia en poco tiempo y utilizando un medio sin riesgo, lo que facilita experimentar diversas alternativas de actuación y evaluar su eficacia.



Figura 10. Capitanes y Oficiales en una sesión de entrenamiento en simulador.

En este sentido, durante los últimos años el Centro de Simulación de Siport21 (certificado por DNV-GL) ha acogido a centenares de marinos, incluyendo Capitanes, Oficiales, Prácticos de Puerto y Patronos de Remolcadores, que han realizado numerosos cursos de entrenamiento. Durante los últimos años se han realizado más de 175 Programas de Entrenamiento de personal de unas 30 navieras. Se incluyen aquí algunas de las más relevantes a nivel internacional: BP Shipping, Shell, Knutsen OAS, Elcano, Teekay, Golar, Höegh, NYK, MOL, Stena, etc. Han participado casi 600 Capitanes y Oficiales de múltiples países (Rusia, Reino Unido, Croacia, Bélgica, Filipinas, Malasia, Singapur, etc.).



Figura 11. Entrenamiento de maniobras de buques LNG en Bahía Blanca (Argentina).



Habitualmente, en los estudios participan también los Prácticos de los puertos en cuestión, tanto en España (Tarragona, Barcelona, Valencia, La Coruña, Gijón, Sagunto, Algeciras, Santa Cruz de Tenerife, Palma de Mallorca, ...) como en otros países: Lázaro Cárdenas, Manzanillo y Altamira (México), Bahía São Marcos (Brasil), Callao (Perú), Bahía Blanca y Río de La Plata (Argentina), Túnez, Funchal (Portugal), Buenaventura (Colombia).



Figura 12. Entrenamiento conjunto en los simuladores.

Práctico y remolcadores en Altamira (México).

En algunos casos, el entrenamiento realizado involucra Prácticos y Patrones de remolcador, que analizan y deciden sobre las estrategias de actuación conjunta buque-remolcadores empleando varios puentes de simulación simultáneamente. El proceso es muy complejo y requiere una instalación especial, pero su utilidad está claramente demostrada.



ESTUDIO DE OPERATIVIDAD EN EL PUERTO EXTERIOR DE PUNTA LANGOSTEIRA (A CORUÑA). MONITORIZACIÓN DE MOVIMIENTOS Y ESFUERZOS EN AMARRES EN BUQUE ATRACADO



E. Peña¹, I. Trejo², J. Sopelana⁴, J.R. Iribarren²,

J. Gómez², J.D. Pérez³, A. Guerra³, J. Ferreras¹, J. Sande¹,

F. Costa¹, F. Sánchez¹, J. Rabuñal¹, F. Lopez⁴

RESUMEN

La operatividad de un puerto es un elemento fundamental para optimizar las actividades propias del mismo. Por tanto, conocer el funcionamiento hidrodinámico de su dársena y el comportamiento de los barcos atracados es clave para plantear estrategias de operación más eficientes.

Tras el inicio de operaciones del Puerto Exterior de Punta Langosteira (A Coruña), en sus fases I y II, la Autoridad Portuaria de A Coruña decidió desarrollar un ambicioso proyecto para caracterizar el comportamiento de los buques amarrados en el interior del puerto en función de las condiciones marítimas, con el objetivo de establecer las condiciones límite de operación y cuantificar la disponibilidad de las terminales. Se espera que la fase III del plan general finalice en 2016, con la construcción de un contradique interno de 1300 m. Con esta nueva construcción, se habrá completado el Puerto Exterior.

Con este propósito, se definió un equipo técnico involucrando a Siport21 (comportamiento de buques atracados), el grupo GEAMA perteneciente a la Universidad de A Coruña (Grupo de Ingeniería, Agua y Medio Ambiente; movimientos en buque y fuerzas en amarras) y Acuática Ingeniería Civil (dinámicas marinas y modelo numérico en dársena). Se estableció una campaña de medidas para correlacionar las condiciones marítimas y climatológicas

¹ Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA) – CITEEC - Universidad de A Coruña.

² Siport21.

³ Autoridad Portuaria de A Coruña.

⁴ Acuática Ingeniería Civil.

con los movimientos de los barcos. La instrumentación utilizada durante esta campaña incluyó boyas, correntímetros, radares de olas, sensores de presión, anemómetros de precisión, técnicas de cámaras digitales, células de carga, GPS RTK, etc., así como la calibración de un modelo numérico dinámico de buque. Este análisis de medición permitió una definición completa de las condiciones hidrodinámicas en el puerto y de la respuesta de los buques amarrados.

Este artículo técnico describe el trabajo principal desarrollado por Siport21, Acuática y la Universidad de A Coruña durante este proyecto y la metodología desarrollada para alcanzar los objetivos establecidos por la Autoridad Portuaria de A Coruña.

1. INTRODUCCIÓN Y METODOLOGÍA

En septiembre de 2012, en sus fases preliminares I y II, el nuevo Puerto Exterior de A Coruña, comenzó sus actividades. El puerto está situado a 10 km al SO de la ciudad de A Coruña, en el Noroeste de España, y esta localización, frente al corredor marítimo de Finisterre, de cara al Océano Atlántico Norte, es el resultado del balance entre el medioambiente, la seguridad y motivaciones relacionadas con la industria portuaria. El puerto dispone de un dique principal de 3360 m de longitud, un martillo de 390 m de longitud, un contradique interior y un frente de atraque de 914 m (Figura 1.A). En su configuración final, en 2016 (fase III), el contradique interior alcanzará los 1300 m de longitud (Figura 1.B). La profundidad media a lo largo del frente de atraque es de 22m.



Figura 1. Puerto Exterior de A Coruña (1.A Configuración actual del puerto sin la primera fase del contradique ya construida; 1.B Configuración del puerto en 2016).

Teniendo en cuenta las condiciones extremadamente severas de la zona (15.0 m de altura significativa de altura de ola de diseño) y el reciente comienzo de las operaciones, aún sin el contradique interior, la Autoridad Portuaria decidió llevar a cabo un ambicioso proyecto para caracterizar el comportamiento de los buques amarrados dentro del puerto, y así establecer las condiciones límite de operación, cuantificar la disponibilidad



RETOS DEL SIGLO XXI PARA LOS PUERTOS Y LAS COSTAS

de las terminales, evaluar las herramientas de previsión meteorológica desarrolladas para las operaciones del puerto y finalmente, establecer una metodología para analizar el impacto en las operaciones de la configuración final del nuevo puerto y cómo gestionar los nuevos tráficos.

Además de los objetivos principales, se establecieron metas adicionales, como: evaluar los equipos de atraque y amarre de las terminales, analizar nuevos sistemas de amarre para aumentar la operatividad de las terminales y establecer recomendaciones sobre las configuraciones de amarre. Para alcanzar los objetivos principales del proyecto, se creó el equipo técnico multidisciplinar antes mencionado (Siport21, Universidad de A Coruña, Acuática Ingeniería Civil).

El “buque de ensayo”, seleccionado por su disponibilidad, fue el barco anticontaminación Urania Mella, con una eslora de 72m y 3.300 toneladas de peso muerto, que estuvo amarrado en uno de los muelles durante un período de tres meses (Dic 2012 - Feb 2013) por lo que se pudieron registrar escenarios meteorológicos muy variados durante el invierno. Por otra parte, las medidas continuaron para cubrir el estudio de la operatividad de varios tipos de buques (portacontenedores, multipropósito, graneleros).

Los datos medidos y que se presentan a continuación fueron utilizados en el desarrollo de distintos análisis para caracterizar el comportamiento de los buques (análisis espectral, análisis de series temporales, análisis estadístico ...), y diseñar herramientas de previsión de movimientos de buques, basadas en los principales parámetros meteorológicos (altura y período de ola, onda larga, velocidad y dirección del viento, nivel de marea, etc.), hasta que se complete la fase III del nuevo puerto.

Finalmente, se calibró un modelo numérico dinámico de buque amarrado en el dominio del tiempo con los datos registrados para prever el comportamiento de los buques en las diferentes condiciones meteorológicas y en futuras configuraciones del puerto (desarrollo de estructuras de refugio o amarres adicionales).

2. CAMPAÑA DE DINÁMICAS MARINAS Y MODELO NUMÉRICO DE AGITACIÓN

El trabajo de medición de la campaña de medidas meteorológicas y agitación en dársena fue desarrollado por Acuática Ingeniería Civil en coordinación con el resto de actores. Se llevaron a cabo previamente varios estudios sobre las dinámicas marinas predominantes en la zona, para la selección y ubicación de la instrumentación necesaria. Estos estudios permitieron identificar el clima medio, las corrientes inducidas por viento y mareas, propagación de olas y agitación dentro del puerto, detección de los períodos propios y fenómenos de onda larga (Figura 2). Asimismo, se hizo un trabajo de identificación de puntos singulares en la dársena: áreas de concentración de energía, nodos y antinodos asociados al período de resonancia de la dársena, etc. (Figura 2).

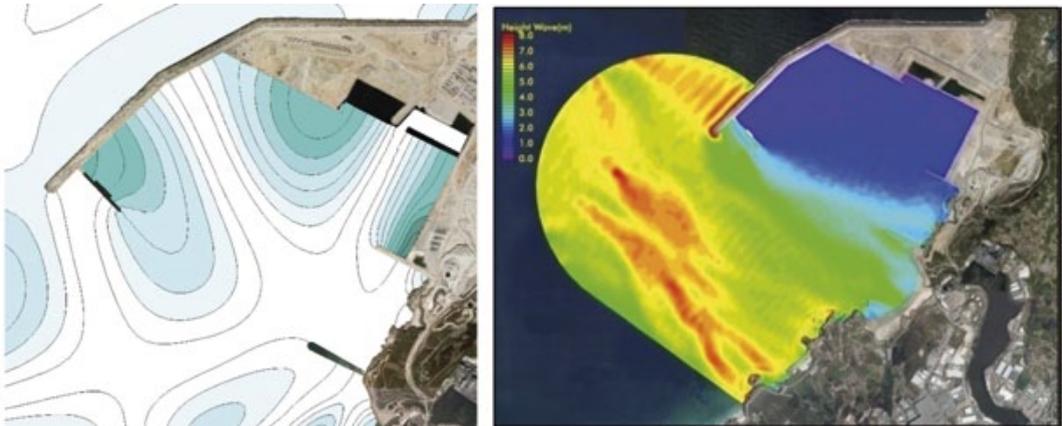


Figura 2: Modos de resonancia de la Dársena (bajamar y $T_p=146$ s), y resultado de propagación para coeficientes de agitación (dirección NW, $T_p=16$ s, $H_s=6$ m y pleamar).

A partir de los resultados obtenidos se seleccionaron los siguientes equipos de medida:

Exterior del Puerto: Boya direccional de oleaje (Datawell® Waverider) y Sensor de Presión para caracterizar las ondas gravitatorias e infragravitatorias en la zona exterior del puerto.

Interior del Puerto:

- Sensores de presión (2) situados en dos esquinas de la dársena, permitieron identificar amplificación de la onda larga durante la campaña, así como valores de agitación escalares de onda corta.
- Correntímetros AWAC (2), situados en la entrada de la dársena y en las proximidades del buque atracado. Los datos medidos por estos sistemas fueron perfiles de corriente direccional, junto con oleaje direccional (onda corta). Con ello se consigue caracterizar el proceso de propagación e identificar corrientes de posibles eventos resonantes.
- Radar MIROS y Estación Meteorológica: Situados en la parte Sur del muelle y en el martillo, respectivamente, para registrar la elevación de la superficie libre (que permite el análisis de onda corta y onda larga) y las características del viento.

La siguiente figura muestra la localización de cada equipo de medida (Figura 3).

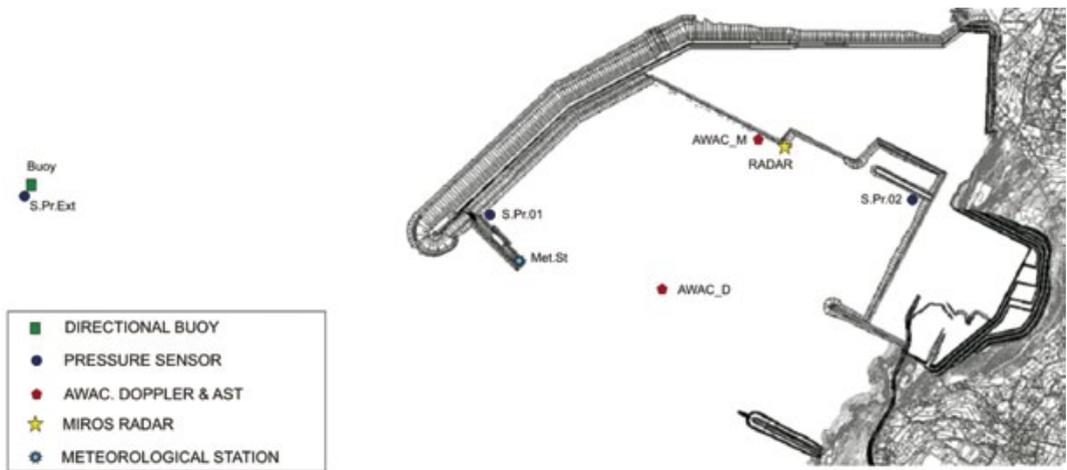


Figura 3. Localización de la instrumentación en la dársena. Boya exterior y sensor de presión en el exterior, AWAC (rojo), sensores de presión (azul) y radar Miros (amarillo).

Los resultados más significativos de esta campaña fueron, en primer lugar, que las condiciones meteorológicas registradas fueron bastante parecidas al clima medio de la zona, aunque un poco más exigentes. Durante la campaña, la altura de ola significativa máxima medida en el interior del puerto fue inferior a un metro (alcanzando en el exterior una máxima de 8.1 m), por lo que se considera que la protección del puerto contra el oleaje de onda corta, incluso en una configuración sin el contra-dique interior, es adecuada. Se identificó que los principales parámetros oleaje (onda corta) que influyen en la agitación interior del puerto son la altura y dirección de ola exterior.

Se detectó un patrón de agitación de oleaje dependiente del nivel del mar, consistente en un aumento de la altura de ola dentro del puerto con la pleamar de mareas vivas que decrece significativamente con la bajada de la marea. Además se registró un efecto importante en este proceso de propagación interior del oleaje, que se corresponde con un cambio en la dirección pico del oleaje en la entrada del puerto. Se alcanzaron variaciones en la dirección de la ola de hasta $\pm 20^\circ$ en un breve periodo de tiempo (horas), mientras que en el exterior, la dirección de la ola era prácticamente constante. Basándose en el análisis desarrollado, se comprobó que estos efectos se relacionan con el nivel del mar (al igual que la agitación interior), por lo cual se asoció a la variación en la reflexión del oleaje en los contornos anexos al puerto (playa y acantilado bajo) con la marea.

Por otro lado, respecto al estudio de olas infragravitatorias, durante la campaña se produjeron dos eventos de amplificación de onda larga, donde se alcanzaron valores máximos de 0.67 y 0.64 m de altura de ola. Relacionando los datos de campo registrados (altura de ola de onda larga, y velocidades) junto con el estudio previo realizado, se concluyó que



dichos eventos de amplificación registrados están asociados a dos modos resonantes de la dársena (con la configuración actual en 2014) asociados a periodos de 102 y de 146 segundos. Estos modos son similares y la dársena oscila, tal y como se observa en la figura 2, entre el martillo y la esquina del Muelle de Ribera con el Muelle Transversal.

3. CAMPAÑA DE MEDICIÓN DE MOVIMIENTOS Y TENSIONES EN AMARRES

El análisis relativo a los movimientos del buque fue realizado con tres metodologías: un acelerómetro-giróscopo, un sistema de medición con cámaras digitales y el sistema GPSFlot (este último se detalla en el siguiente apartado).

Los dos primeros sistemas, así como la medición de los esfuerzos en tres amarres del Urania Mella, fue el trabajo desarrollado por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA) de la Universidade da Coruña, así como la coordinación y el análisis integrado de los resultados del proyecto.

3.1 Metodología

El GEAMA desarrolló para este estudio un sistema medidas basado en el uso de acelerómetros-giróscopos que registran aceleraciones lineales, aceleraciones angulares y la orientación en los tres ejes. El sistema incluye un sensor ADXL345, programable con un microcontrolador ATmega, y un programa específico desarrollado también por el GEAMA (Figura 4). Este programa integra las señales procedentes de los distintos sensores, y se configuró para almacenar datos de forma continuada durante 57 días con una frecuencia de medición fue de 50 Hz. El sistema fue calibrado tanto en estático como en dinámico, e incluso validado con otro sistema de medición en la cabina del propio buque. Las ventajas del sistema son su precisión, reducido tamaño, facilidad de procesado de la información y relativo bajo coste, mientras que la permanencia en el interior del buque representa su única limitación.

Con el objetivo de superar este último condicionante, GEAMA también desarrolló un sistema para medir mediante dos cámaras digitales situadas en el exterior, equipadas con control remoto y situadas frente a la proa y la popa del buque (Figura 5). Para analizar las fotografías se desarrolló un algoritmo basado en la técnica de correlación cruzada estadística usada en PIV (particle image velocimetry). El algoritmo calcula la correlación entre dos imágenes consecutivas y el desplazamiento de un punto de control corresponde a la correlación de la función pico. Para analizar las imágenes se establecieron 10 puntos de control, cuyo desplazamiento permitió medir los movimientos de vaivén, arfada y calcular el cabeceo a partir de los registros. Las ventajas del sistema son de nuevo su precisión y en este caso ubicación en el exterior. El condicionante aquí es la gran cantidad de información generada para su posterior postproceso.

Por último, y dada la experiencia del GEAMA en la medición de esfuerzos en estructuras portuarias (instrumentación de células de carga en campo en diques flotantes y pantallas sumergidas), se realizó una campaña de medida de las tensiones en tres de los amarres



del buque *Urania Mella*: un largo de proa (Figura 4), un largo de popa y un spring de proa. Para ello se instalaron tres células de carga (previamente calibradas) de rango 50 toneladas en tres de las líneas de amarre, que permitieron el registro continuo de las cargas en ellas.



Figura 4. Buque *Urania Mella* atracado y célula de carga en amarre (en rojo, izquierda). Sistema de medición de movimientos en cabina de buque (derecha).

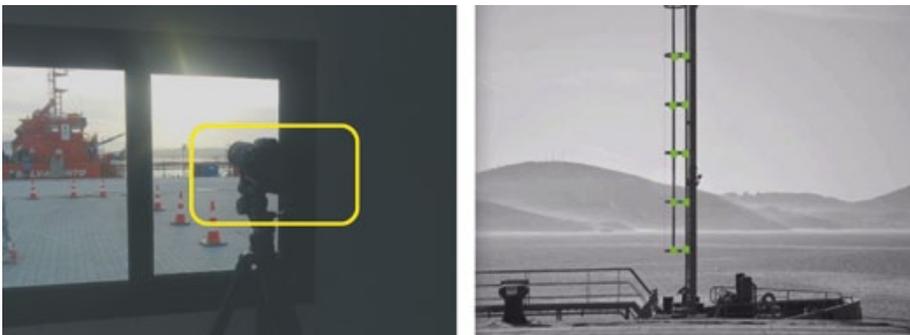


Figura 5. Ubicación de cámara de medición de movimientos y puntos de control.

3.2 Respuesta del buque. Dinámicas marinas

Los resultados obtenidos con el sistema acelerómetro-giróscopo mostraron una gran coherencia, con altas correlaciones entre ellos, especialmente entre el balance y la guiñada. Tras el análisis espectral realizado, se obtuvo que el periodo de oscilación más frecuente en los tres giros está en el entorno de 5-6 s, pudiendo representar la oscilación natural del buque, con otras dos frecuencias predominantes en el cabeceo y la guiñada. Los movimientos de alzada y deriva fueron obtenidos de forma indirecta a partir de los giros registrados.

El análisis combinado de dinámicas marinas y movimientos del buque muestra que existe una buena correlación entre los tres giros (balance, cabeceo, guiñada) y la agitación en el interior de la dársena, con correlaciones con la altura de ola (R^2) en torno a 0.80 en los tres casos. De esta forma, el oleaje de onda corta se identifica como el principal forzador relacionado con el movimiento del buque.

Con el oleaje en el exterior de la dársena la correlación es menor, pero las mayores amplitudes registradas en los giros están claramente asociadas a episodios de mayor energía del oleaje en el exterior de la dársena. El análisis del viento y las corrientes muestran que no siguen un patrón claro con el comportamiento del buque. Sin embargo, la marea explica ciertos episodios de incrementos del balance, especialmente en mareas vivas con aumentos del 70%. Respecto a la respuesta del buque en los dos episodios de onda larga indicados en el apartado anterior (21 y 28 de enero de 2013), no se produjeron incrementos en las amplitudes de los movimientos.

El primer resultado que se presenta en esta parte es la relación entre el cabeceo y el oleaje en el interior de la dársena registrado con el radar Miros (Figura 6). Puede comprobarse la resolución del aparato y su inmediata respuesta frente a los estados de agitación de la dársena. Como resultado de interés para el proyecto, se identifica cómo el cambio de situación de la carga en el barco (finales de diciembre) produjo una variación significativa de los movimientos del buque.

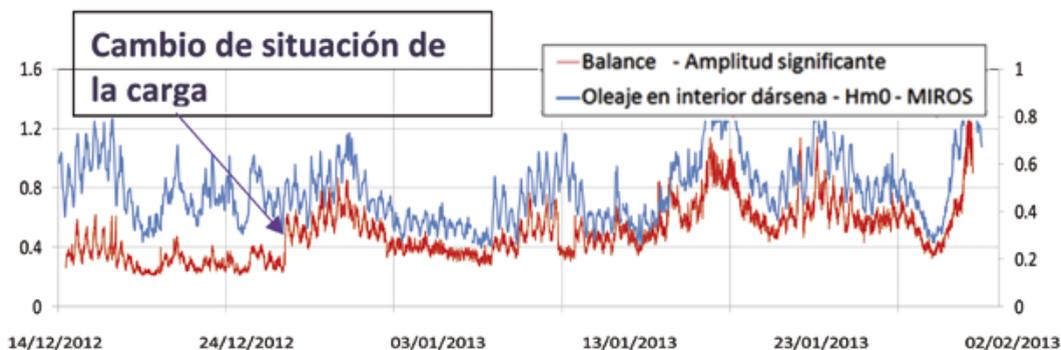


Figura 6. Relación cabeceo (amplitud significativa) -altura de ola interior. Cabeceo en ordenadas -izquierda (°) y altura de ola en ordenadas-derecha (m).

También se obtuvo una relación directa entre la dirección de la ola actuante sobre el buque y la respuesta de éste. La incidencia oblicua genera mayores movimientos de deriva, que son más difíciles de restringir cuando el buque está amarrado en un muelle continuo, debido a la dificultad de dar líneas de través. Se confirmó que la dirección de ola incidente en el muelle es el resultado de la combinación de las olas incidentes -provenientes del martillo del dique principal (efecto de difracción) y las olas procedentes de la costa cercana (efecto de reflexión).

En el análisis de los resultados de las técnicas visuales mediante cámaras, la concordancia en el movimiento de vaivén registrado por ambas cámaras es casi total ($R^2=0.97$), lo cual se considera un indicador de calidad de la medida, validando por tanto la metodología de uso de cámaras. Además, la comparación con el comportamiento registrado con el acelerómetro-giróscopo ofreció valores similares.



3.3 Respuesta del buque. Estudio integrado oleaje-movimientos-amarras.

Como se ha comentado, el estudio integrado de dinámicas marinas y comportamiento del buque (movimientos y tensiones en amarres) es uno de los objetivos fundamentales del proyecto. En la siguiente gráfica (Figura 7), se muestra un análisis conjunto del balanceo, el oleaje en el interior de la dársena, y las tensiones en los amarres. Los episodios identificados como 1,2,3 representan las tres configuraciones de amarres que tuvo el barco. En el primer recuadro (1) los amarres estaban relativamente tensos, con movimientos más reducidos, ocasionando grandes esfuerzos sobre las estachas. El tercer recuadro (3) refleja una situación de amarras totalmente sueltas, provocando movimientos por encima de los habituales, y esfuerzos registrados también significativamente mayores al ponerse en tensión las amarras. El segundo recuadro muestra una situación intermedia (2). Así, se confirma que los amarres se convierten en un elemento determinante en la respuesta dinámica del buque y las tareas de carga/descarga, y por tanto en la operatividad. Las fuerzas medidas en las líneas demostraron la importancia de aplicar una pretensión inicial adecuada para reducir los movimientos del buque.

En relación a las propias amarras, se registraron valores mayores en el largo de proa, con tensiones puntuales máximas de hasta 35 t, y registros significativamente menores en el spring de proa.

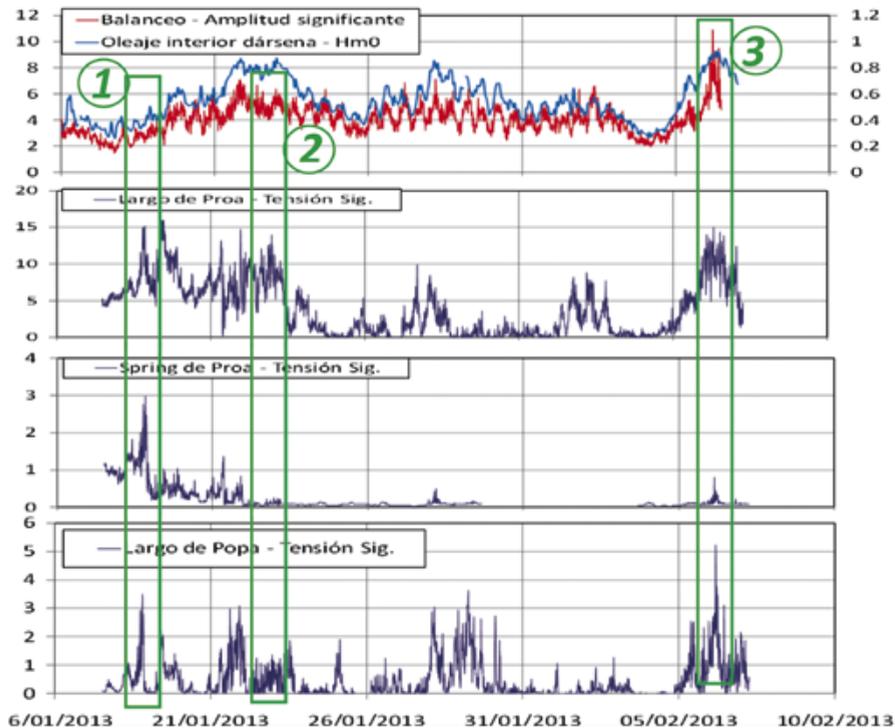


Figura 7. Influencia de la configuración de las amarras sobre los movimientos del buque.



Como conclusión de esta parte, se refleja que los datos medidos fueron adecuados para caracterizar el comportamiento hidrodinámico de la dársena del puerto y la respuesta dinámica del buque en el periodo analizado (Dic 2012 - Feb 2013). Se observó que la modificación en el sistema de amarre puede impactar de forma significativa en la respuesta dinámica de los buques amarrados. Durante la campaña, balanceo, vaivén y deriva se identificaron como los movimientos más limitantes desde el punto de vista de las operaciones del buque.

4. CAMPAÑA DE MEDICIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL BUQUE Y CALIBRACIÓN DEL MODELO SHIP-MOORINGS

El trabajo desarrollado por Sipor21 en el proyecto fue el registro de medidas y análisis del movimiento del buque con el sistema GPSFlot (y otros tres buques más), y la calibración de un modelo de comportamiento de buque en un atraque bajo la acción combinada de viento, olas y corrientes.

4.1 Medidas del comportamiento del buque

Durante la campaña, cuatro buques fueron instrumentados para analizar su comportamiento: el buque anticontaminación "Urania Mella", dos buques tipo "heavy lifter" ("BBC Konan" y "BBC Vermont") y un granelero ("Santa Elena"). La siguiente tabla incluye las principales características de cada buque, el número de líneas de amarre utilizadas y los períodos en los que se realizaron las medidas:

Buque	Eslora	Manga	Calado	Número de Líneas de Amarre	Peso Muerto	Período de medidas
Urania Mella	73.5 m	15.0 m	2.8 m	12	3000 t	10/12/2012-7/02/2013
BBC Konan	126.5 m	20.3 m	6.6 m	10	7200 t	14/01/2013-15/01/2013
BBC Vermont	138.5 m	21.0 m	8.0 m	12	12780 t	28/01/2013-31/01/2013
Santa Elena	190.0 m	32.2 m	12.0 m	12	55000 t	14/02/2013-17/02/2013

Tabla 1: Principales características de los buques.

Hay que señalar que el buque "Urania Mella" mantuvo la misma posición de amarre en el Muelle Transversal durante la campaña de medida. Los otros tres buques estuvieron amarrados en distintas posiciones a lo largo del muelle, lo que permitió analizar el efecto de las olas incidentes a lo largo del muelle en el comportamiento del buque.



Para medir los movimientos del buque, Siport21 utilizó el sistema GPSFlot (Figura 8) diseñado y configurado por Siport21 para medir y registrar los movimientos en los 6 grados de libertad de un objeto flotante. Este sistema está basado en el uso de JAVAD® "JNSGyro-4T" que incluye cuatro receptores Euro-GDA. Las señales procesadas por el "JNSGyro-4T" son enviadas a un ordenador portátil, donde se encuentra el programa "GPSView", desarrollado también por Siport21, que permite configurar diferentes parámetros para gestionar los datos procesados y registrarlos.

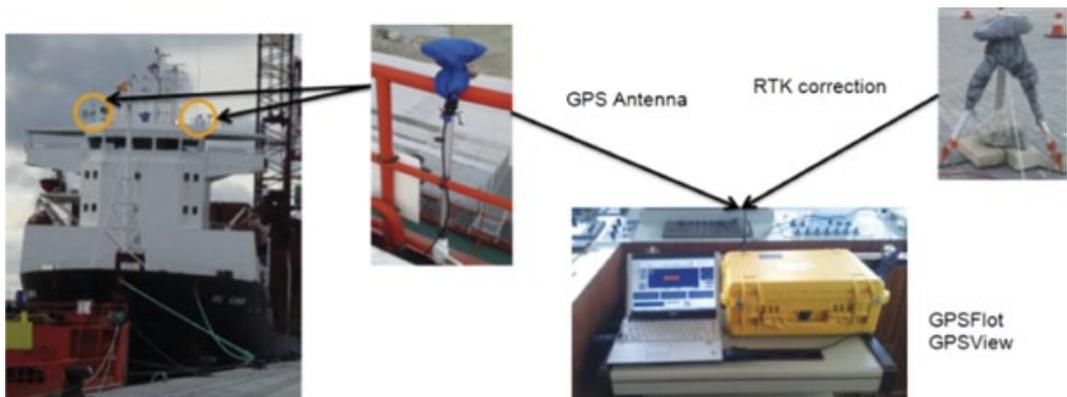


Figura 8. Sistema GPSFlot.

El sistema se configuró para almacenar datos de forma continua y con una frecuencia de medición de 5 Hz.

4.2 Análisis del comportamiento del buque

Con objeto de analizar el comportamiento del buque, se procesaron los datos almacenados para obtener parámetros que caracterizasen los movimientos. Después de filtrar todas las señales registradas y separarlas en bloques de 15 minutos (giróscopo y tensiones en las líneas de amarre) y 30 minutos (medidas del GPSFlot), se realizó un análisis estadístico para cada grado de libertad, obteniendo así los siguientes parámetros estadísticos: valor máximo, valor significativo y periodo medio. Se generaron nuevas series temporales utilizando los parámetros obtenidos para compararlas con las series temporales climatológicas ("Curvas de estado dinámico") (Figura 9). A partir de esta comparación fue posible obtener una primera aproximación a los principales factores que afectan al comportamiento del buque.

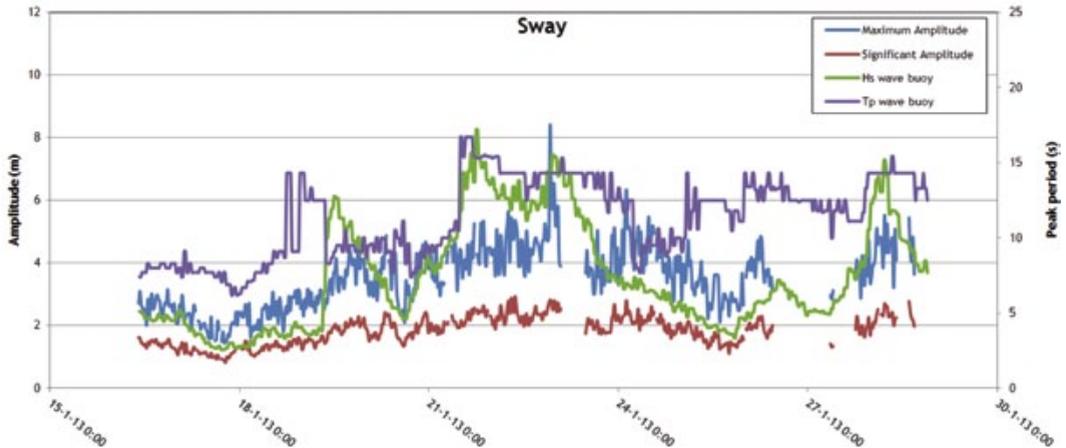


Figura 9. Curvas de estado dinámico. Movimiento de deriva. Medidas del GPSFlot.

En todos los casos se comprobó que la respuesta de los barcos a la componente de onda larga fue despreciable.

Para completar el análisis de comportamiento del buque, Siport21 realizó un análisis espectral de las series temporales de movimientos del buque registradas. Este análisis permite conocer la respuesta del buque en función del espectro de las fuerzas que actúan sobre él y así conocer las causas de los movimientos. Se recuerda la posibilidad de diseñar cambios en el sistema de amarre (configuración de amarre y defensas) con el objetivo de reducir la amplitud de los movimientos, incrementando o reduciendo la rigidez de la configuración de amarre para desplazar el pico de respuesta de los barcos.

En este caso, el sistema dinámico (barco, líneas de amarre y defensas) responde principalmente a las olas y al viento incidentes. La respuesta dinámica está condicionada por las líneas de amarre y las defensas en el caso de la deriva, vaivén y guiñada, mientras que la arfada, cabeceo y balance dependen principalmente de las fuerzas restauradoras asociadas a dichos movimientos.

Finalmente se realizó un análisis estadístico multi-variable con el objeto de obtener valores numéricos que permitan cuantificar la importancia relativa de cada fuerza externa en la respuesta de los buques.

El análisis estadístico de los datos medidos con el GPSFlot se realizó con los cuatro barcos instrumentados con el sistema GPS. El análisis comprendió tanto el estudio de la correlación entre las condiciones meteorológicas y los movimientos del barco, como los cálculos de un ajuste lineal multivariable para los movimientos del barco. Las variables utilizadas en el estudio fueron: nivel de marea, altura de ola (H_s) y período de pico (T_p) dentro del puerto (olas de gravedad y onda larga estacionaria), velocidad (V_w) y dirección del viento



(Dir Vw). Para calcular el ajuste lineal multivariable, se empleó una combinación de estas variables ($H_s \cdot T_p$, H_s^2 , T_p^2 , $T_p \cdot H_s^2$, $T_p^2 \cdot H_s$, ...), observándose una clara relación entre los movimientos del buque y las variables H_s , H_s^2 y $H_s \cdot T_p$.

Finalmente, para cada uno de los movimientos y para cada uno de los buques, se construyeron funciones de ajuste lineal multivariable utilizando las mismas variables que en el caso de los factores de correlación.

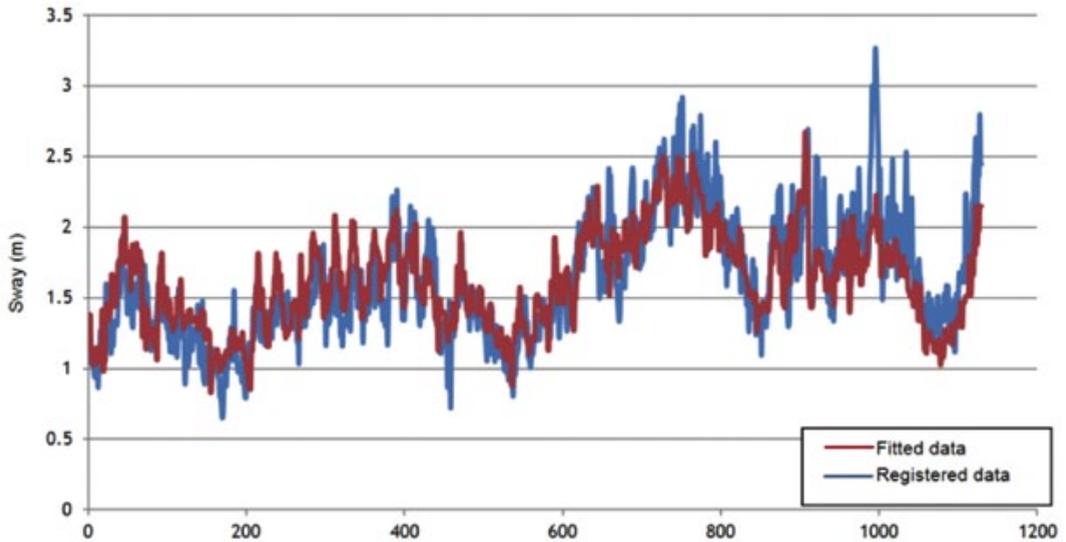


Figura 10. Comparación entre el ajuste lineal multivariable y los datos registrados. "Urania Mella".

Estas funciones lineales multivariables se pueden usar como un sistema de predicción para estimar los movimientos máximos esperados del buque como una función de las condiciones de viento y oleaje esperables. Así pues, a partir de las predicciones meteorológicas y de oleaje disponibles pueden establecerse las condiciones de operación de los diferentes buques según su sistema de carga (descargadores, grúas en tierra o a bordo, etc.) y, en su caso, modificar o reforzar el sistema de amarre.

4.3 Calibración del modelo Ship-Moorings

Durante la última etapa del proyecto se calibró el modelo numérico SHIP-MOORINGS (modelo dinámico de amarre en el dominio del tiempo desarrollado por Alkyon-Arcadis (Holanda) contra los datos registrados. Este modelo reproduce el comportamiento de un buque específico en un atraque bajo la acción combinada de viento, olas y corriente. El sistema resuelve las ecuaciones de movimiento del barco en 6 grados de libertad (vaivén, deriva, guiñada, arfada, cabeceo y balance) en el dominio del tiempo, sin limitaciones en las amplitudes de movimiento.



Para calibrar Ship-Moorings, se utilizaron los datos registrados en el “Urania Mella” y en el “BBC Vermont”. Alkyon-Arcadis generó los modelos matemáticos de los barcos “Urania Mella” y “BBC Vermont”. Los datos usados para construir el modelo del “Urania Mella” fueron el plano de formas del barco y curvas hidrostáticas contenidas en el libro de estabilidad, mientras que en el caso del “BBC Vermont” se usó un modelo matemático estándar para este tipo de buques.

La metodología usada para calibrar los datos consistió en la selección de siete escenarios definidos tras el análisis de los datos meteorológicos y los movimientos del “Urania Mella”. Esta selección de escenarios se hizo cubriendo el rango de alturas de ola, períodos de pico asociados y direcciones de viento medidas. Para comenzar las simulaciones usadas en la calibración se definieron dos alturas de ola para cada uno de los escenarios seleccionados. La primera altura de ola era superior a la altura de ola registrada, mientras que la segunda era inferior. También se definieron tres direcciones de la ola incidente en el buque.

A partir de las simulaciones llevadas a cabo y aplicando los criterios establecidos, se obtuvo una función de ajuste que proporciona la altura de ola a introducir en los modelos de Ship-Moorings, en función de la altura de ola registrada con el AWAC.

Al finalizar el primer conjunto de simulaciones, se seleccionaron tres escenarios adicionales para el “BBC Vermont” a fin de validar la calibración llevada a cabo con los datos del “Urania Mella”.

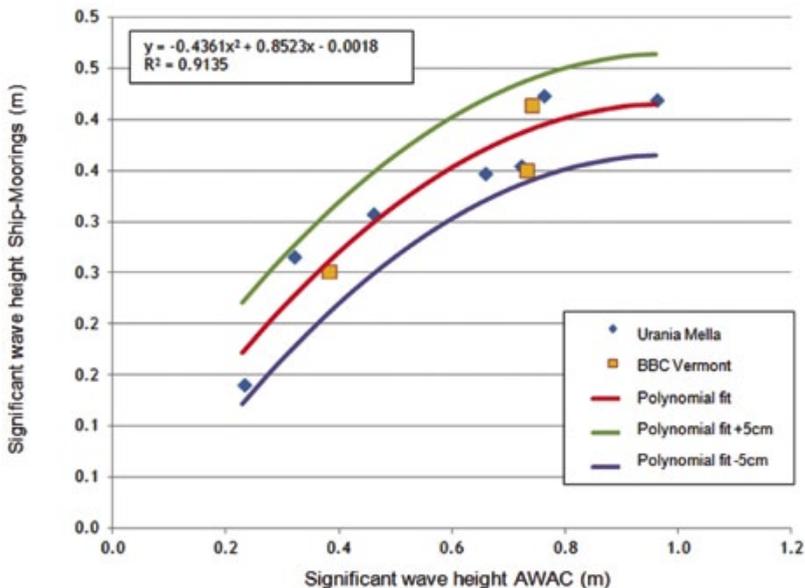


Figura 11: Calibración de la altura de ola.



RETOS DEL SIGLO XXI PARA LOS PUERTOS Y LAS COSTAS

Como resultado de la calibración realizada, se dispone de una herramienta numérica de predicción de la respuesta dinámica de los buques, útil para estimar de forma precisa los movimientos y cargas en condiciones de oleaje y viento diferentes de las registradas en el muelle, así como para evaluar la eficacia de eventuales cambios en el sistema de amarre o defensas. Igualmente, en combinación con modelos numéricos de oleaje y onda larga, pueden evaluarse las condiciones operativas esperables para configuraciones modificadas del puerto (nuevas obras de abrigo o atraque).

5. CONCLUSIONES

La conclusión más importante del trabajo presentado es la caracterización de las dinámicas marinas de la dársena interior del Puerto Exterior de Punta Langosteira mediante trabajo de campo y modelo numérico, y la determinación de movimientos, esfuerzos en amarres y desarrollo de modelo numérico Ship-Moorings en cuatro buques, con especial énfasis en el registro continuo durante 2 meses del Urania Mella.

Los resultados han permitido realizar un análisis integrado de la agitación portuaria (oleaje, marea, corrientes) desde el exterior hacia la zona de atraques, caracterizar fenómenos de reflexión del entorno y onda larga, y relacionarlos con el comportamiento del buque atracado (movimientos y tensiones en amarras).

De esta forma, la Autoridad Portuaria de A Coruña dispone ahora de una herramienta de gestión de la operatividad portuaria basada en la previsión meteorológica y la previsible respuesta en diferentes puntos de sus instalaciones portuarias en Punta Langosteira.

Por último, resaltar que todo el trabajo análisis fue realizado de forma previa a la construcción de la Segunda Fase del Contradique, cuya ejecución se espera en 2014 y 2015, y que aportará una mejora en la protección de la dársena y por tanto mayor operatividad al Puerto Exterior.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de esta comunicación agradecen a todo el personal de la Autoridad Portuaria de A Coruña las facilidades para el desarrollo de las campañas de medición, así como a las distintas tripulaciones de los buques instrumentados, los consignatarios de los mismos y los buzos que asistieron en las labores de instalación de sensores.



EL TERCER CARRIL

LA PENETRACIÓN FERROVIARIA HACIA EUROPA DE LOS PUERTOS ESPAÑOLES



Joan Borrás i Tous¹

1. ANTECEDENTES

La conexión ferroviaria con Europa ha constituido siempre una aspiración irrenunciable de los puertos españoles.

Si bien es cierto que se han modernizado mucho las instalaciones de transbordo de contenedores y las instalaciones de cambio de ancho para trenes de pasajeros, la verdad es que el hecho de la existencia de distintos anchos, acompañado de distinta tensión eléctrica de electrificación en catenaria para las locomotoras y del distinto sistema de señalización y seguridad utilizado en la explotación de la red ferroviaria, hace que en la actualidad la frontera, en el caso del ferrocarril, suponga una gran barrera que penaliza muy mucho el tráfico de mercancías por ferrocarril desde España hacia Europa y vice-versa, sobre todo si lo comparamos con la facilidad con la que se están moviendo desde hace muchos años composiciones ferroviarias de 100 TEU'S (750 m de longitud) actualmente entre Holanda, Alemania, Bélgica, Francia e Italia. Incluso entre Francia y Reino Unido también el Euro-tunnel ha aportado una gran facilidad de operaciones de intercambio de contenedores entre ambos países.

Esto hace que los puertos españoles del área Mediterránea, muy bien posicionados para atraer los tráficos con el Medio y Lejano Oriente no puedan aprovechar esta ventaja, debido en parte a todas las dificultades existentes para la conexión ferroviaria en el caso de las mercancías, respecto a los puertos competidores del Norte de Europa.

¹ Autoridad Portuaria de Tarragona



La construcción del AVE en ancho internacional UIC, llamado ahora ancho estándar europeo UIC, hasta la frontera francesa mediante la concesión de TPFERRO para el túnel de Le Perthus fue el primer gran paso facilitador de convertir esta aspiración en una realidad. Pero esta conexión ha tenido desde el principio dos fuertes inconvenientes:

- a) Las pendientes sólo son adecuadas al paso de mercancías en el tramo de Barcelona a la Frontera Francesa.
- b) No han quedado resueltos los problemas de electrificación (distinta tensión), de señalización y seguridad (distinto sistema) ni de los protocolos de explotación para locomotoras y maquinistas.

Además la mencionada conexión mediante AVE no ha sido operativa hasta después de más de DIEZ AÑOS DE LO QUE ESTABA PREVISTO. Y lo más grave, no ha estado nunca prevista una conexión ferroviaria directa y definitiva en ancho estándar UIC con los puertos, principales generadores de mercancías. Ni tampoco con los grandes centros de producción (fábricas de automóviles o polígonos petroquímicos importantes, para citar algún caso concreto).

A pesar de ello, el puerto de Barcelona ya está conectado desde hace más de dos años con ancho estándar UIC con Europa mediante una solución provisional, que se ha venido llamando la solución constructiva de tercer carril, hasta conectar con la línea de AVE BARCELONA-GIRONA-FRONTERA FRANCESA, en el tramo en el que ya se hizo la previsión de tráfico para mercancías y que además no tiene tanto tráfico de composiciones para pasajeros, como es el tramo de Barcelona a Madrid.

Sin embargo, esta solución provisional, que puede llegar a ser definitiva con el paso de los años, NO HA RESUELTO los graves inconvenientes de la electrificación, de la señalización-balizamiento y seguridad ni los protocolos de explotación locomotoras-maquinistas.

A partir de la puesta en servicio de esta solución constructiva provisional para Barcelona y con el paso efectivo de composiciones ferroviarias de mercancías todavía "a precario" al otro lado de la Frontera Francesa, desde Tarragona, tanto desde el Puerto como desde el Polígono Petroquímico se creó un lobby de presión para conseguir este tipo de conexión ferroviaria directa con Francia y con Europa para mercancías.



- Líneas electrificadas a 25.000 voltios.
- Ancho de vía UIC 1435 mm.
- Gálibo de carga UIC-C.
- Carga por eje 22,5 ÷ 25 toneladas.
- Posibilidad de trenes largos alcanzando los 1.500 metros y 3.600 ÷ 5000 toneladas. Vías de apartado y terminales adaptadas a trenes de 1.500 metros. De momento: 750m/1800-2000 toneladas.
- Pendiente máxima: 12 %, excepcionalmente 15 %.
- Circunvalaciones para mercancías en las grandes aglomeraciones urbanas.
- Disponibilidad de una red de terminales intermodales polivalentes y flexibles.
- Sistema ERTMS nivel 2 con banalización completa.
- Disponibilidad de horarios y de capacidad para la circulación de trenes de mercancías las 24 horas del día y 7 días por semana.
- Libre competencia.
- Armonización de las formalidades administrativas y de la legislación laboral.
- Costes competitivos y homogéneos para la utilización de las infraestructuras por parte de los operadores.

Fig. 1.

Paralelamente debemos reseñar la labor reivindicativa de este Gran Corredor Ferroviario Mediterráneo que desde hace más de diez años lleva a cabo FERRMED muy directamente con los gobiernos Español y Francés y también a nivel de toda la Unión Europea, habiéndose conseguido que el 19 de octubre de 2011 la Comisión Europea aprobara incluir el Corredor Mediterráneo dentro de las Grandes Redes de Transporte Ferroviario Europeo.

La coincidencia espacio-temporalmente de todos estos hechos, así como la presión de la Comunidad Valenciana encabezada por la fábrica de automóviles FORD y el hecho que las obras del corredor mediterráneo de pasajeros que resuelve la conexión BARCELONA-TARRAGONA-CASTELLON-VALENCIA-ALICANTE llevan ya un retraso de más de 15 AÑOS, existiendo en la actualidad todavía un tramo de vía única de 40 km entre Tarragona y Vandellós, provocaron la reacción del Ministerio de Fomento que decidió en Mayo de 2012 adoptar la alternativa de construcción de tercer carril como solución para la implantación del ancho estándar UIC en el corredor del Mediterráneo, desde Castellbisbal, en las inmediaciones de Barcelona, hasta Valencia y Almusafes en una primera Fase y continuar hasta Alicante y Murcia en una segunda Fase.



Fig. 2.

2. OPORTUNIDADES

El Puerto de Tarragona lleva más de cuatro años intentando seguir la estela del Puerto de Barcelona y contar a su vez con una conexión directa hasta el otro lado de la Frontera Francesa para mercancías, sin necesidad de transbordos ni de cambios de tren.

Igualmente el clúster petroquímico de Tarragona, que constituye uno de los principales centros de producción y de comercialización del Mediterráneo, está muy interesado en esta conexión, y dos importantes empresas como son BASF y BAYER también llevan mucho tiempo trabajando en desarrollar terminales ferroviarias conectadas con sus otros centros de producción situados en el centro y norte de Europa, en los que ya disponen de terminales ferroviarias intermodales, que están dando un magnífico servicio y un gran resultado, puesto que aumenta notablemente las potencialidades industriales de implementación y de relación entre fábricas de todo el mundo, completando las conexiones marítimas a gran escala que mantienen estas grandes empresas.

Fruto de las conversaciones mantenidas, el Puerto de Tarragona ya redactó un Proyecto de Conexión mediante tercer carril entre sus instalaciones y la Estación de San Vicenç de Calders, que también daba solución a las terminales existentes de las empresas químicas mencionadas. Este Proyecto se puso a disposición del Ministerio y se ha tenido en cuenta como antecedente para los proyectos finalmente redactados.

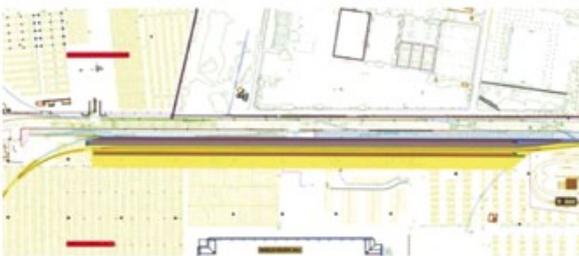


Fig. 3.

Paralelamente y a la vista del potencial de explotación de esta conexión ferroviaria que puede resumirse para Tarragona en una operativa para un tráfico inicial de dos (2) composiciones diarias de 100 TEU's cada una, con un retorno inicial del 40 %, lo que viene a significar un tráfico ferroviario con EUROPA de unos 70.000 TEU's, se ha redactado el Proyecto Constructivo de una Terminal Ferroviaria Intermodal de doble ancho con una capacidad de cuatro (4) vías de 750 m de longitud y el Proyecto Constructivo de Conexión ferroviaria y electrificación hasta vía principal desde cabecera de terminal, de manera que las locomotoras eléctricas puedan acceder y operar la terminal sin necesidad de movimientos innecesarios.



El Tercer Hilo
Pero con esto, no es suficiente



- Acceso directo a la red general.
- Servicio a terminales de contenedores (tráfico marítimo).
- Servicio a contenedores del entorno (tráfico terrestre).
- Composiciones de 750m. de longitud. (100Teu's).
- Capacidad máx.: 400.000 Teu's/año (4000 trenes/año).

Terminal Ferroviaria Intermodal con acceso ferroviario electrificado

Fig. 4.



3. REALIDADES.

El Ministerio de Fomento, a través de ADIF, ya tiene adjudicados 8 tramos del corredor del Mediterráneo con la implantación del ancho estándar UIC desde Castellbisbal hasta Valencia.

Los tramos que afectan al Puerto de Tarragona para poder disponer del tercer carril y por tanto del ancho estándar europeo UIC que ya están contratados son:

- Las Instalaciones de Seguridad y Comunicaciones desde Castellbisbal a Tarragona y Nudo de Vilaseca, UTE DIMETRONIC-BOMBARDIER
- Tramo Castellbisbal a Martorell, UTE FERROVIAL-GUINOVART
- Tramo Martorell a San Vicenç de Calders, UTE ACCIONA-COMSA
- Tramo San Vicenç a Tarragona y Nudo de Vilaseca, UTE VÍAS-OGN-ELECTREN

Todos estos proyectos suponen una inversión total de unos 400 M de euros, para unos 90 km de vía doble donde se implantará el tercer carril.

Ya en su día los kilómetros necesarios donde se implantó el tercer carril, aproximadamente 60 km de doble vía, que permitieron la conexión del puerto de Barcelona con el ancho UIC, supusieron una inversión de más de 350 M de euros.

Por su parte, el puerto de Tarragona ya ha construido una terminal de cuatro vías de más de 750 m en los dos anchos (tercer carril en vía hormigonada estuchada) y muy recientemente ha adjudicado su acceso electrificado hasta la red general a la UTE FCC-INFESA.

La inversión total realizada y prevista en infraestructura básica, sin contar para nada ningún tipo de maquinaria (Reach-Stackers, RTG neumáticos o grúas pórtico electrificadas), llevada a cabo por el Puerto de Tarragona en distintas actuaciones de terminal, acceso a vía principal y de acceso a muelles durante estos últimos años puede ascender a un importe total de 20 M de euros.

Las empresas químicas BASF y BAYER disponen ya de proyectos muy avanzados para disponer en breve de sendas terminales ferroviarias de recepción y expedición de mercancías.

En el caso de BAYER cabe destacar la disponibilidad de una pequeña terminal con tercer carril que permitirá atender composiciones de 500 m de longitud que ha supuesto una inversión de 3 M de euros y que también está a la espera de conectarse con la vía principal, a través de las vías de ancho ibérico existentes y que ya han sido tenidas en cuenta en el proyecto del Ministerio adjudicado del tramo San Vicenç a Tarragona y Nudo de Vilaseca.



En el caso de BASF se dispone ya de la autorización de ADIF para la conexión de su nueva terminal ferroviaria de nueva planta, cuyo Proyecto Constructivo en fase muy avanzada viene a representar otros 20 M de euros de inversión.

Aunque las obras de vías principales de acceso hasta Tarragona acumulan cierto retraso, a la espera de resolver y concretar al máximo todas las actuaciones necesarias para afectar mínimamente la explotación actual y poder mantener toda la operativa de pasajeros y mercancías actuales, podemos afirmar que técnicamente se está a la espera de resolver dos aspectos fundamentales de infraestructura:

- La utilización de placas en traviesas polivalentes
- La utilización de desvíos mixtos-mixtos en vías principales

En un ambiente positivo y favorable a la pronta resolución de estos aspectos puramente técnicos y a la espera de la dotación económica correspondiente podemos afirmar que la infraestructura quedará resuelta, si no en el 2015, en el 2016.



16 **Proyecto de Implantación del Ancho UIC en el Corredor Ferroviario Mediterráneo**

Fig. 5.

Con lo cual, a partir de este momento la gran asignatura pendiente será resolver la explotación de las redes de manera eficiente y solucionando los problemas de tensión de electrificación (loco-



REHABILITACIÓN DEL DIQUE-MUELLE DE DISA EN SALINETAS. GRAN CANARIA



**Jorge Alberto Cerezo Macías¹, Gonzalo Aivar Mateo¹,
Jaime Collar Guerra¹, Juan González Esteban¹**

INTRODUCCIÓN

El dique-muelle industrial de la Planta de Hidrocarburos de DISA en Salinetas fue construido en la década de los sesenta y en la actualidad continúa prestando servicio para el atraque y descarga de buques tanque de hasta 10.000 TPM.

La infraestructura se encuentra en el final de su vida útil y presenta ciertas patologías que se han acrecentado por los efectos de los temporales sufridos durante el invierno de 2014. En este contexto, DISA planteó la necesidad de realizar una rehabilitación global de la estructura para reparar los defectos detectados y prolongar su uso en condiciones de seguridad.

CARACTERÍSTICAS DE LA INFRAESTRUCTURA

Se trata de una estructura de gravedad ubicada al sur de la zona industrial de Salinetas. En ella pueden distinguirse cuatro partes diferenciadas:

- El frente expuesto; orientado al este.
- El extremo o zona del morro; orientado al sur.
- El frente de atraque; al oeste.
- El propio cuerpo del dique, entre ambos frentes.

¹ PROES Consultores, S.A..



Figura 1. Vista general de la infraestructura.

El frente expuesto está formado por un primer tramo en talud, con espaldón de mampostería hormigonada cimentada sobre vertido de escollera, de unos 110 m de longitud (tramo 1), y un tramo final de longitud cercana a los 68 m, en el que el espaldón se encuentra apoyado sobre un muro vertical de bloques de hormigón cimentado sobre banqueta de escollera (tramo 2). Estas secciones se encuentran protegidas por una capa de escollera que corona a la cota +4.00 m, excepto en la zona próxima al morro donde la protección de escollera se reduce. La tipología del muro frontal o morro del dique es análoga a la del último tramo del frente expuesto.

El frente de atraque está formado por un muro de bloques con juntas verticales continuas buscando una mejor adaptación de la estructura a eventuales asentamientos diferenciales. Las siguientes imágenes muestran las secciones tipo de los dos tramos.

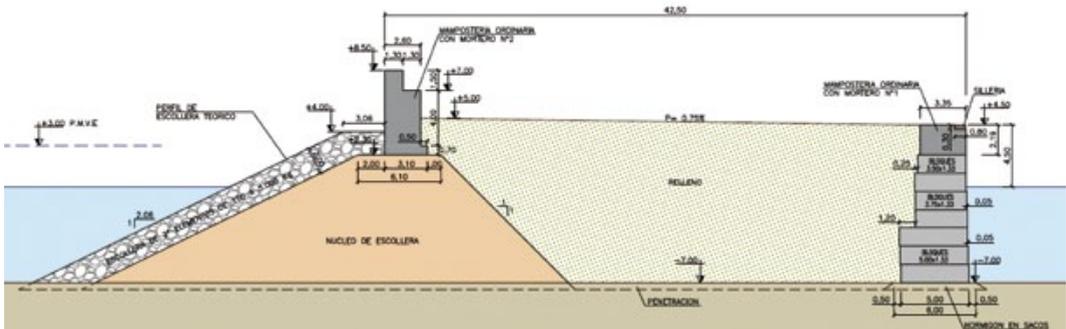


Figura 2. Sección tipo tramo 1 y frente de atraque

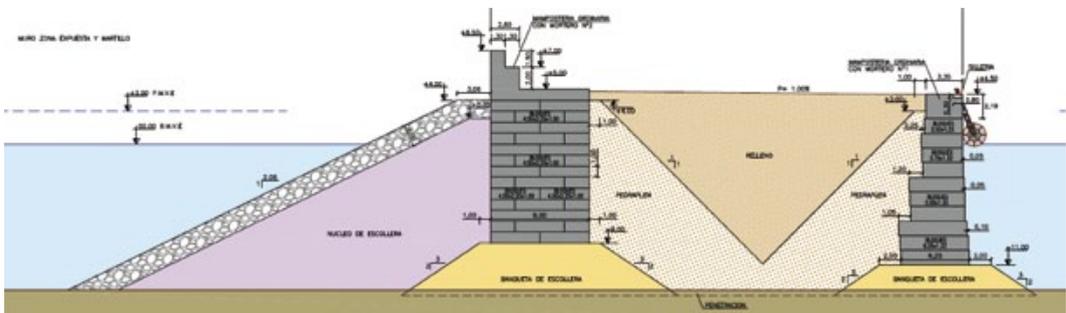


Figura 3. Sección tipo tramo 2 y frente de atraque.

DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS

La rehabilitación de este tipo de infraestructuras requiere de un procedimiento integral que abarca varias etapas:

- Recopilación y análisis de la información existente
- Inspección, detección y cuantificación de patologías de la infraestructura
- Diseño de actuaciones de rehabilitación

Recopilación de la información disponible

Dada la relativa antigüedad de la estructura, no existe mucha información disponible sobre el diseño y construcción del dique-muelle. La propiedad dispone del *Proyecto de Dique-Muelle en la Bahía de Salinetas* del año 1958 realizado por D. Ruperto González Negrín en el que se

- Deformación en planta de la arista del cantil.



Figura 5. Desalineación en el frente.

- Aberturas de juntas y fisuras en el frente de atraque y en la zona del morro.

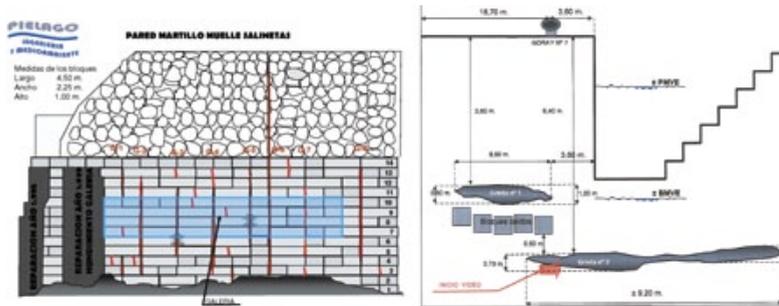


Figura 6. Esquema de grietas.

- Pérdida de la sección de escollera de protección del frente expuesto.



Figura 7. Déficit de escollera en el tramo final del frente expuesto.



La información se completó con una serie de trabajos de campo realizados por especialistas y supervisados por los mismos técnicos de PROES. Con el fin de conocer las características geotécnicas del terreno existente y del relleno del dique, se realizaron dos campañas geotécnicas en abril y septiembre de 2013. Se llevaron a cabo un total de 6 sondeos con extracción de muestras que fueron posteriormente ensayadas en laboratorio. Del análisis de los resultados obtenidos se pudieron extraer los parámetros geotécnicos de diseño. Además, en mayo de 2013 se realizó un levantamiento topográfico del dique y una nivelación de detalle de la zona de estudio.

Por último, el conocimiento del estado de la zona sumergida del muelle se completó con una inspección submarina específica realizada en septiembre de 2013 centrada en el estado de la alineación de atraque.

Temporal de enero de 2014

Durante la redacción del proyecto, a inicios de 2014, diferentes temporales azotaron la zona del muelle.



Figura 8. Temporal de enero de 2014.

Como consecuencia de este episodio, unos 50 metros de la capa de escollera de protección del frente expuesto resultaron dañados.

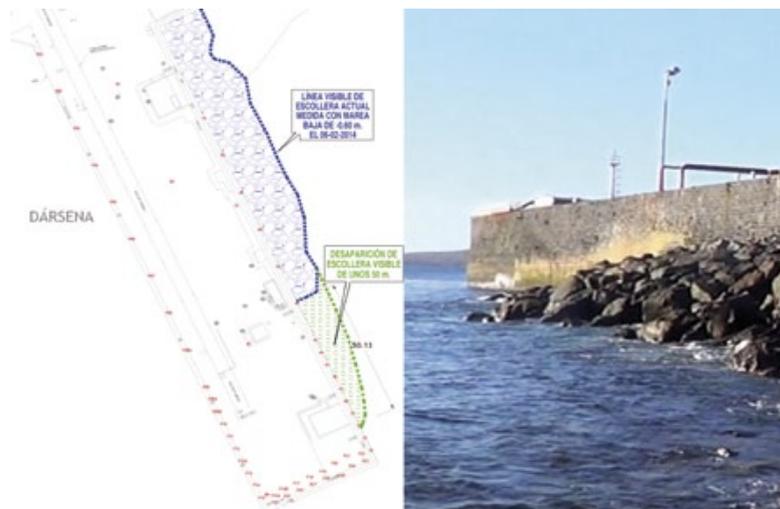


Figura 9. Vista en planta y vista general tras el temporal de enero de 2014.

Diseño de actuaciones de rehabilitación

En vista de las patologías detectadas y su posterior análisis, se concluyó que existían tres problemáticas diferentes que debían ser tratadas de manera independiente:

- Déficit de estabilidad del muelle
- Pérdida de protección de escollera
- Existencia de grietas en los paramentos

Partiendo de la información geotécnica obtenida, se realizaron modelos de elementos finitos de las distintas secciones del muelle con el fin de evaluar la estabilidad geotécnica de la estructura.

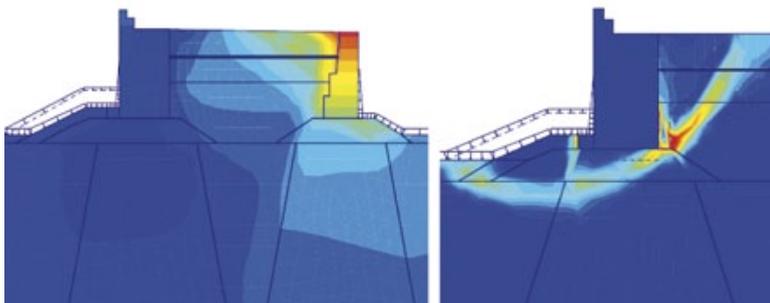


Figura 10. Modelos de PLAXIS de las distintas secciones del muelle en situación actual.

Se comprobó que existía un déficit de estabilidad en la sección extrema del frente de atraque y en la alineación del morro. En el caso del frente de atraque se observó que la capacidad portante del terreno bajo el muelle era deficiente. Para paliar dicho déficit, se planteó la ejecución de secciones de tres columnas de *jet-grouting* separadas dos metros entre sí. Además, para aliviar las presiones sobre el terreno se intercalaron, entre las secciones de *jet-grouting*, parejas de micropilotes, uno vertical y otro inclinado. El pilote frontal inclinado reparte el apoyo del muelle y por tanto funciona a compresión. El pilote trasero funciona como anclaje (tracción) y reduce la tendencia al vuelco del muelle.

Por otro lado, en el caso del morro, se observó un fallo global en la sección completa. La imagen del modelo permite diferenciar claramente un círculo de rotura que pasa por la zona trasera del muelle. Para mejorar la estabilidad de esta sección se optó por instalar un velo de columnas de *jet-grouting* en el trasdós que interceptara el círculo de deslizamiento. Al incrementar el rozamiento en dicho círculo se mejora el comportamiento de la sección frente a este modo de fallo.

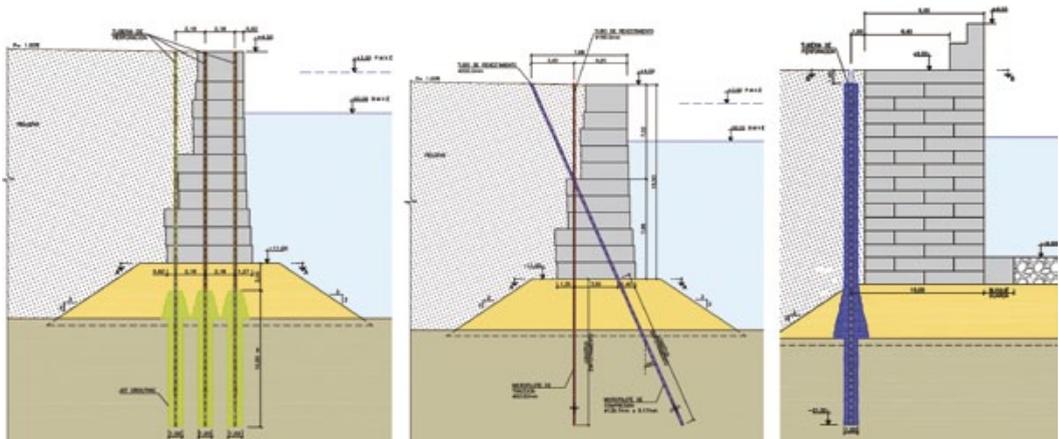


Figura 11. Definición de las actuaciones frente de atraque, izquierda y centro, y morro, derecha.

Con ayuda de los mismos modelos de elementos finitos se evaluó la estabilidad de las secciones una vez efectuadas las actuaciones verificando que esta se incrementaba entre un 10% y un 40%, obteniéndose de esta forma coeficientes de seguridad compatibles con los recogidos en la recomendación ROM 0.5-05.

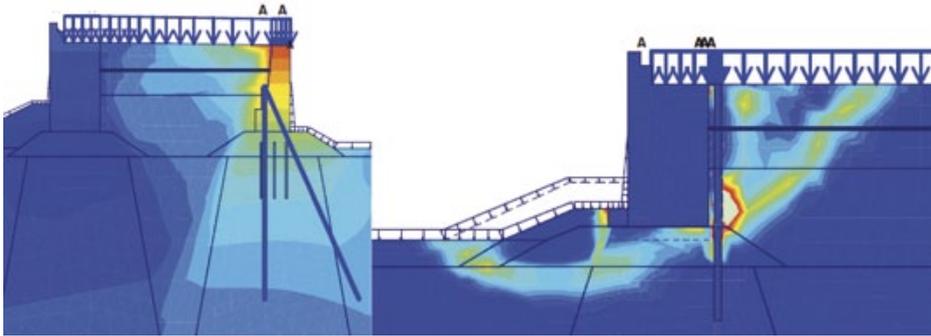


Figura 12. Modelos de PLAXIS de las distintas secciones del muelle en situación futura.

La distribución en planta de las distintas actuaciones se muestra en la siguiente imagen.



Figura 13. Vista en planta de las actuaciones.

Por otro lado, para averiguar el origen del daño de la escollera de protección del frente expuesto se analizó el diseño original de 1958, basado en la formulación de Iribarren (1938), contrastándolo con metodologías más actuales (Van Deer Mer, 1988). Se observó que, si bien el diseño original era formalmente correcto, el nivel de daño implícitamente asumido al emplear la formulación de Iribarren implicaba una determinada avería al final de la vida útil. En el caso de la estructura de Salinetas, con más de cincuenta años en servicio, ese daño se pone de manifiesto con el desplazamiento de un determinado volumen de material.

Partiendo de esto se redimensionó el sistema de protección rebajando el nivel de daño asumido, lo que condujo a una solución basada en un manto externo bicapa de bloques cúbicos de 10 toneladas sobre un manto secundario de escollera. El talud final de la sección es de 3/2.

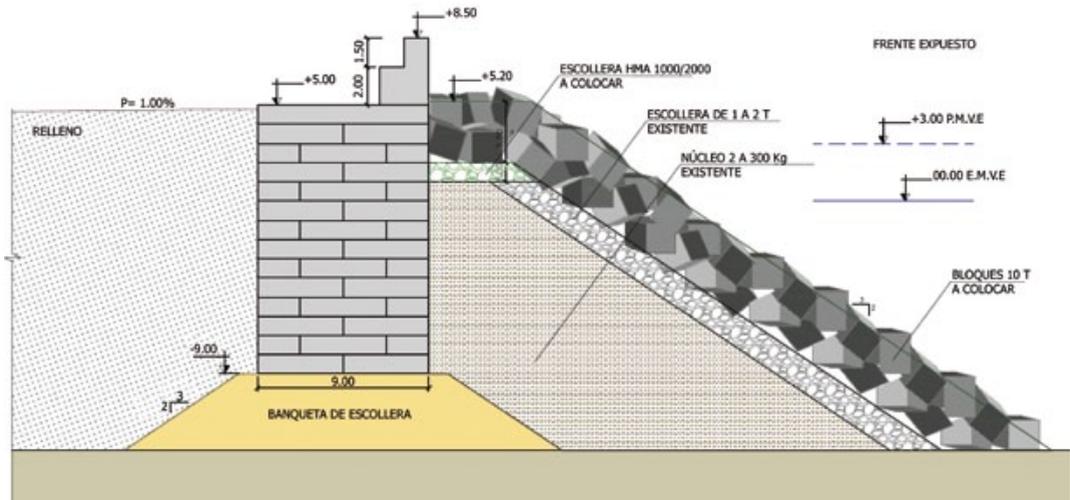


Figura 14. Protección del frente expuesto.

Por último, y una vez estabilizada y protegida la infraestructura, se procederá a la reparación superficial de las grietas detectadas en los paramentos por medio de inyecciones de mortero.

CONCLUSIONES

Con este trabajo se pone de manifiesto que un procedimiento integral de inspección, análisis, diagnóstico y definición de actuaciones incrementa la eficacia de la rehabilitación de infraestructuras permitiendo la prolongación de su vida útil más allá de los criterios definidos en el proyecto.



NUEVAS CALIDADES DE ACEROS EN TABLESTACAS METÁLICAS, RESISTENTES A LA CORROSIÓN EN AMBIENTE MARINO. INCREMENTO DE LA VIDA ÚTIL Y REDUCCIÓN DE LOS COSTES DE MANTENIMIENTO



João Martins¹

Andrea Barceló Martínez-Valero¹

INTRODUCCIÓN

Desde hace más de un siglo, se utilizan las tablestacas de acero en todo el mundo para la construcción de estructuras seguras y económicamente rentables, tanto permanentes como temporales. Infinidad de muelles, diques y rompeolas de los principales puertos europeos se han ejecutado con tablestacas de acero.

Una de las principales preocupaciones, tanto de los proyectistas y diseñadores, como de las autoridades portuarias ha sido, y todavía es, la durabilidad de las estructuras metálicas en el ambiente marino. La corrosión del acero es un fenómeno esperable y natural que ocurre siempre que el acero entra en contacto con agua. En cualquier caso, esta preocupación no ha impedido a promotores, constructores e ingenieros recurrir al acero en las infraestructuras portuarias.

Para garantizar la vida útil de una estructura de acero, se puede optar por diferentes métodos: diseñar considerando que a lo largo de dicha vida útil el acero sufrirá una pérdida de espesor, u optar por sistemas de protección como el recubrimiento con pintura o la protección catódica (ánodos de sacrificio).

A lo largo de las últimas décadas, la industria siderúrgica ha investigado diferentes opciones, cómo los aceros micro-aleados, que se comportan mejor frente a los diferentes ambientes y clases de exposición a los que normalmente están expuestos los muelles de una infraestructura portuaria. Aceros de varios grados se han sometido a ensayos a largo

¹ ArcelorMittal Tablestacas.

plazo en diferentes puertos. En un puerto de Gran Bretaña, unas probetas que permanecieron expuestas al ambiente marino durante más de 20 años han demostrado que la pérdida de espesor en acero del grado “AMLoCor™” se reduce de 3 a 5 veces respecto a un acero al carbono convencional, en función de la zona de exposición.

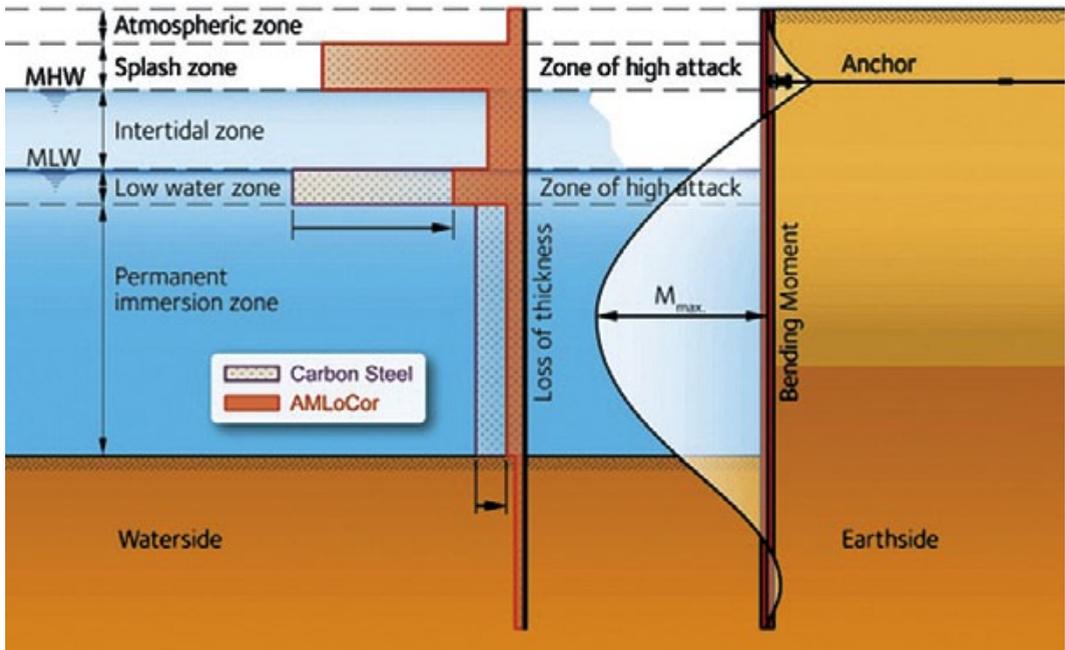


Comparación entre una probeta de acero AMLoCor (izquierda) y una probeta de acero al carbono convencional (derecha) tras 15 años de exposición al mismo ambiente marino.

VENTAJAS DE LAS CALIDADES DE ACERO RESISTENTES A LA CORROSIÓN

La corrosión es un fenómeno electromecánico natural que afecta a los diferentes metales y aleaciones metálicas como el acero. Consiste en la transformación del átomo de hierro dentro del acero, a su estado original como óxido de hierro (formando una capa de óxido). La corrosión es un tema muy amplio y complejo.

La principal ventaja de AMLoCor consiste en una considerable reducción de los ratios generales de corrosión (hipótesis: pérdida uniforme de espesor en la superficie) en la zona de bajamar (LWZ, siglas en inglés *Low Water Zone*) y en la zona sumergida o de inmersión permanente (PIZ, siglas en inglés *Permanent Immersion Zone*). Sin embargo, los proyectistas también deben considerar la corrosión local o picadura, que puede influir en los estados límite de servicio.



Los momentos flectores máximos, y por consiguiente, las tensiones máximas que experimenta la tablestaca de acero suelen producirse en una zona donde los ratios de corrosión son relativamente bajos: la zona sumergida, o la zona enterrada (la tablestaca está empotrada en el terreno). En ocasiones, la sección crítica que gobierna el diseño es la situada en la zona de bajamar, ya que a pesar de que inicialmente no sea en la que se experimentan las tensiones máximas, a largo plazo y debido a la mayor pérdida de espesor en la sección, se convierte en la sección crítica del diseño.

Aunque no se trate de un acero al carbono "estándar", como los normalmente utilizados en la construcción, AMLoCor se puede diseñar e instalar de acuerdo a lo establecido en las normas, procedimientos de diseño e instalación y directrices para tablestacas de acero, cómo son el EN 1993 Parte 5, EN 10248, EN 12063, EAU 2012, ROM, etc. En cualquier caso, las hipótesis de diseño y cálculo deben adaptarse para considerar la diferente pérdida de espesor. También es posible tener en cuenta, a la hora de diseñar, otros métodos de protección frente a la corrosión en las zonas donde el acero es menos efectivo, como el uso de pintura, vigas de coronación de hormigón, etc.

El análisis coste - beneficio de cualquier solución debe considerar la inversión total en la vida útil de la estructura, incluyendo los costes de mantenimiento. La sustitución de un acero al carbono convencional, sin proteger, por un acero resistente a la corrosión puede suponer un ahorro considerable en el volumen (o en las toneladas) de acero necesarias, siempre que la tasa de corrosión en la zona sumergida sea significativa. Otras consideraciones prácticas a tener en cuenta son la facilidad de transporte e instalación, así como



la velocidad de ejecución del muelle. Por ejemplo, la protección mediante pinturas puede dañarse durante el transporte y manipulación, por lo que después debería ser reparada in situ antes de la hinca, mientras que si se recurre al uso de un acero AMLoCor, este puede hincarse sin ningún tipo de protección superficial. De hecho, AMLoCor proporcionará en muchos casos, la solución más rentable a largo plazo.

Además, los primeros resultados confirmaron que el grado AMLoCor también protege al acero de la corrosión acelerada en la zona de bajamar (ALWC, siglas en inglés Accelerated Low Water Corrosion), íntimamente relacionada con la proliferación de materia biológica en el área de bajamar que acelera la ya de por sí natural corrosión.

CONSIDERACIONES TÉCNICAS

A los efectos del diseño, los datos sobre la pérdida de espesor (LoT, siglas en inglés Loss of Thickness) en aceros convencionales al carbono utilizados para tablestacas y pilotes (ver EN 10248: 1995) están disponibles en diferentes recomendaciones o normas (EAU 2004, EN 1993-5: 2007) o se basan en experiencias y ensayos locales. El comportamiento de los aceros AMLoCor se puede comparar al de un acero al carbono convencional mediante el Ratio de Impedimento a la Corrosión (CIR, siglas en inglés *Corrosion Impediment Ratio*):

$$CIR = \frac{LoT_{Steel}}{LoT_{AMLoCor}}, \text{ ó } LoT_{AMLoCor} = \frac{LoT_{Steel}}{CIR}$$

Los valores del CIR se pueden obtener de la siguiente tabla:

Zona	Bajamar	Sumergida	Salpicaduras
CIR	5	3	1

Con el objeto de comparar el comportamiento de los aceros AMLoCor y un acero convencional, se realizó un ensayo de hinca en condiciones muy adversas. Los resultados mostraron que no hay diferencias significativas entre el comportamiento de los dos tipos de aceros.

Tanto soldaduras, como los cálculos de comprobación de las mismas pueden hacerse de acuerdo a lo establecido en los códigos y normas habituales, siempre y cuando se utilice el material de relleno adecuado para la soldadura.



MANTENIMIENTO Y VIDA ÚTIL

De manera general, y aunque varía en función de cada país, se puede decir que la vida útil de un nuevo muelle, antes de que sea necesario realizar reparaciones mayores, varía entre los 30 y los 50 años. Las tablestacas de acero AMLoCor no necesitan de ninguna operación específica de mantenimiento durante dicho periodo, aunque puede ser recomendable una inspección regular sobre la pérdida de espesor de las tablestacas.

ENSAYOS A ESCALA REAL

A pesar de que los ensayos con probetas se han llevado a cabo durante más de dos décadas, la "longevidad" de los aceros AMLoCor se está verificando en proyectos a escala real en diferentes puertos: el muelle piloto se ejecutó en el puerto de Shoreham, en el Reino Unido (2010); una parte de un nuevo muelle en el puerto de Rotterdam, Holanda (2014), etc. El departamento de Investigación y Desarrollo de ArcelorMittal (ArcelorMittal R&D) ha desarrollado tanto un nuevo método como nuevo instrumental con el que medir, de forma mucho más precisa, la pérdida de espesor de las tablestacas utilizadas para la construcción de este muelle. Este nuevo protocolo de medida será llevado a cabo en cada ocasión, en las mismas tablestacas y en toda la longitud expuesta. Esta campaña de toma de muestras y medidas se realizará de forma anual durante un periodo de entre 5 y 10 años.



Imágenes de muelles ejecutados con tablestacas, en fase de construcción (izquierda), y ya finalizado (derecha).



CONCLUSIONES

La industria siderúrgica está desarrollando aceros con grados más resistentes a la corrosión, que cambiarán tanto el concepto de las condiciones de servicio de las estructuras metálicas, incrementando, por ejemplo, la vida útil de un muelle de tablestacas en un ambiente marino, cómo la confianza de constructores y proyectistas en soluciones de acero para condiciones de servicio tan adversas. Ensayos a escala real de estos nuevos aceros se están llevando a cabo en estos momentos en varios puertos alrededor del mundo.

La principal ventaja de las nuevas calidades de acero, como el grado “AMLoCor”, es la reducción significativa de la pérdida de espesor de la sección en la zona sumergida y la de bajamar, lo que conlleva, en la mayoría de los casos, una estructura más rentable y eficiente, casi sin necesidad de mantenimiento, realizando además la percepción de seguridad y fiabilidad de las estructuras en acero.

Uno de los principales objetivos de la industria siderúrgica es solucionar rápidamente los últimos detalles técnicos, de manera que las ventajas de estas nuevas calidades de acero, y de los perfiles producidos con ellas, permitan a proyectistas, ingeniarías y constructoras involucradas en el diseño y construcción de puertos, adoptar soluciones en acero con calidades resistentes a la corrosión rápidamente.



NUEVO PUERTO PESQUERO EN NOUADHIBOU, MAURITANIA

EL RETO DE LA INTERNACIONALIZACIÓN DE LA INGENIERÍA ESPAÑOLA



Eloy Pita Olalla¹, Mario Sánchez-Barriga Marín¹

1. PREÁMBULO: REFLEXIONES SOBRE LA INTERNACIONALIZACIÓN

Está claro que uno de los grandes retos del siglo XXI para la ingeniería española del sector portuario y costero es la internacionalización.

Por ello, en esta presentación vamos a reflexionar sobre las implicaciones de la internacionalización, a la par que describimos el Proyecto del nuevo Puerto pesquero de Nouadhibou (Mauritania).

Dentro del preámbulo de esta ponencia, queremos recoger todo lo que hemos aprendido en estos años de trabajo por todo el mundo, en los más diferentes entornos existentes.

¿Cómo puede sobrevivir una ingeniería española especialista en Puertos y Obras marinas cuando las inversiones en infraestructuras marítimas se reducen de manera radical en España?

Para triunfar en este mercado global, creemos que hay que cumplir con los siguientes requisitos:

- Dar un producto de calidad a un precio razonable.
- Hablar el mismo idioma que el cliente. Esto se traduce en dominar, al menos, inglés y francés, así como adaptarse a sus costumbres, ritmos y modo de comunicación. Es decir, mimetizarse.

¹ Ingeniería Creativa Pita, S.L. (INCREA).



- Adaptarnos a las necesidades de los demás: plazos, materiales, normativa, modo de construir y trabajar, etc.
- Respetar mucho el país donde trabajamos.

2. INTRODUCCIÓN AL PROYECTO DE NOUADHIBOU

La República Islámica de Mauritania dispone de uno de los caladeros de pesca más productivos del mundo. Sin embargo, la escasa dotación de infraestructuras del país ha sido históricamente un obstáculo para asegurar el aprovechamiento óptimo de este recurso.

Por ello, el Puerto Autónomo de Nouadhibou elaboró en 1999 un Plan Director se donde se deducía la necesidad de realizar la ampliación del Puerto pesquero.

La pesca es, junto con la actividad minera, la principal riqueza del país, estableciéndose en la rada y en el Puerto de Nouadhibou, único puerto pesquero en la costa mauritana.

En Diciembre de 2001 la República Islámica de Mauritania y España firmaron un acuerdo de cooperación financiera que tenía como objetivo, entre otros, fomentar los estudios de desarrollo de las infraestructuras del Puerto de Nouadhibou para la ampliación del Puerto de pesca, convocándose el pertinente concurso para la licitación del Estudio de viabilidad (o Anteproyecto) de la ampliación del Puerto, que fue ganado por una ingeniería española.

Tras el correspondiente Concurso, la empresa canaria Cororasa resultó adjudicataria de la construcción de dicha extensión del Puerto. Cororasa solicitó a la empresa Ingeniería Creativa Pita SL (INCREA) la redacción del correspondiente Proyecto Constructivo.

La Dirección de las Obras fue realizada por INECO en una primera fase y por ISDEFE en una segunda.

Este Proyecto, además de ser por su diseño una obra singular, constituye un claro ejemplo de internacionalización de la empresa de ingeniería en el siglo XXI.

3. EL ENCLAVE

La República de Mauritania está situada en el Oeste de África, tiene una superficie de 1.030.700 km² y más de 2 millones de habitantes. Su capital es Nouakchott. En la siguiente imagen vemos un plano del país, señalándose, con un círculo rojo, la ubicación de Nouadhibou, que es la segunda ciudad más grande del país.



Figura 1 Mapa de Mauritania. Situación de Nouadhibou.

En Nouadhibou se dan condiciones muy ventajosas para la actividad portuaria, como son el abrigo natural de los temporales exteriores, grandes profundidades en el cabo Blanco (que reducen los efectos de los grandes procesos litorales), gran espejo de agua y superficie terrestre disponible para actividades económicas. Únicamente se puede constatar, en contra, los pequeños oleajes internos de la bahía, molestos, más que peligrosos, para embarcaciones pequeñas.

En la costa occidental de África, entre el Atlas y el Golfo de Guinea, no existen más puntos con condiciones naturales idóneas para albergar un puerto salvo la bahía de Dakla en el Sáhara Occidental y Dakar en Senegal, al abrigo del cabo Verde.

La construcción de puertos artificiales en esta costa africana es factible y, de hecho, los temporales no son sus peores enemigos, sino los enormes procesos de dinámica litoral que se producen, especialmente los de dirección N-S, muy permanentes, apoyados por los vientos alisios y sus oleajes asociados. Esto obliga a grandes gastos de mantenimiento de calados mediante dragados periódicos, que comprometen y encarecen la operatividad del puerto. Se pueden poner muchos ejemplos de este fenómeno, pero basta referirse a los problemas del puerto de Nouakchott.



construido con pilotes. Además, las tablestacas no son una solución sencilla de ejecutar, ya que su hinca depende fuertemente de la naturaleza del terreno; realmente, resulta más simple la solución de gravedad. Sí es cierto que la prefabricación de las tablestacas permite facilitar las obras en un enclave tan complejo y con tanta falta de recursos materiales.

Las obras contemplan las siguientes actuaciones:

- La ampliación del muelle pesquero al sur del Puerto actual en una superficie de 122.000 m², con una longitud de muelle de tablestacas de 660 m, un calado de 8,00 m respecto de la BMVE (que se encuentra 60 cm sobre el 0 del Puerto), en la línea de atraque, menos en el primer tramo (el situado al norte) donde es de 6 m en BMVE.

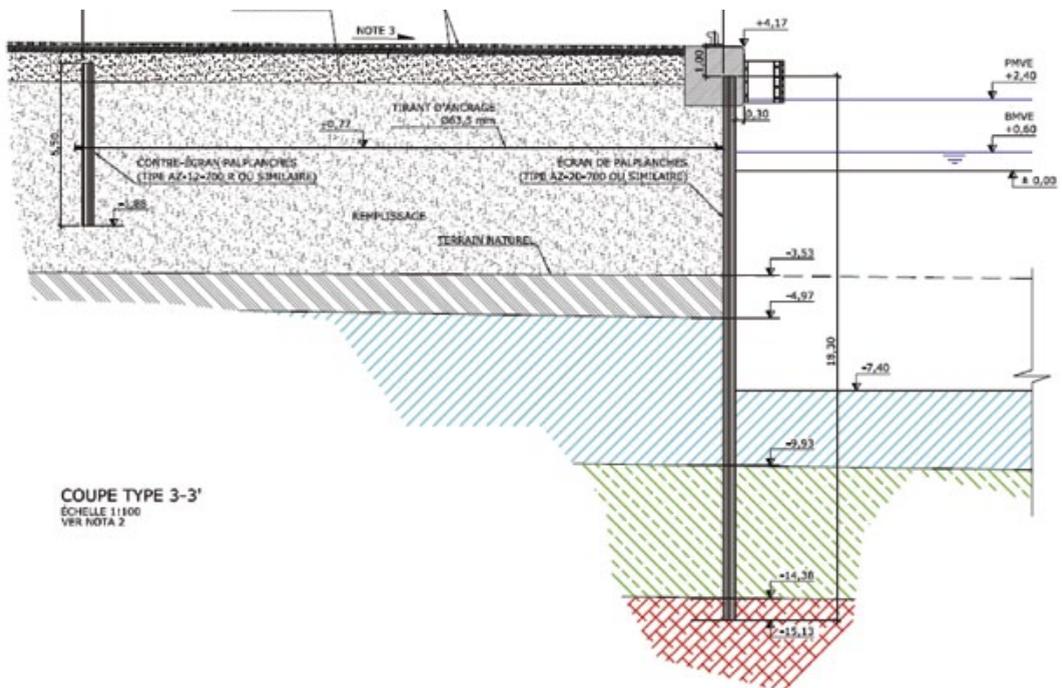


Figura 3: Sección tipo muelle principal.

Para completar los rellenos de la extensa superficie del muelle se utilizó gran número de maquinaria. Desde la destinada a sacar el material de la cantera (Bulldozer, excavadoras, palas cargadoras, etc), la destinada al transporte (con gran número de camiones fijos y articulados y dumper), hasta la destinada a la colocación y compactación del material (motoniiveladoras y compactadores). Sin olvidar los m³ de relleno desde la draga.

Para la hinca de tablestacas fue necesario realizar una serie de perforaciones previas, de tal manera que se lograra disminuir la resistencia del terreno a la hinca.



Imagen 1: Hinca de tablestacas.

Las tablestacas que forman el muelle están empotradas en su pie y ancladas en la parte superior a una pantalla de reacción, o contrapantalla, ejecutada en el relleno del muelle. Así, se hablará de dos tipos de tablestacas: las tablestacas principales, que forman el muelle, y las de reacción, en el trasdós. Todas las pantallas planteadas en este Proyecto son tipo AZ.

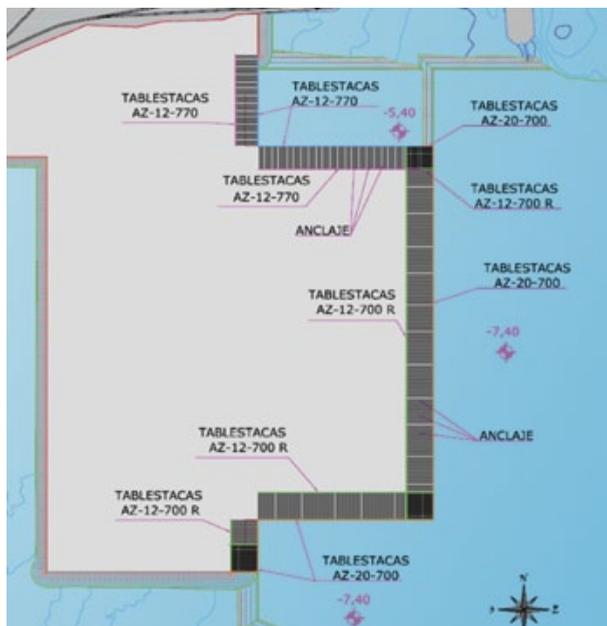


Figura 4: Tablestacas empleadas.



- Protección de la explanada con *escollera* en las zonas donde no se disponen tablestacas para conformar los muelles (principalmente al oeste y parte al sur).
- La creación de dos *rampas ro-ro* de 41,5 m de ancho para embarcaciones de más de 100 m de eslora. Están situadas al norte y al sur del nuevo muelle. Además, se dispone una longitud de *atraque convencional* de 297 m para 2 buques de 110 m de eslora.
- Se *draga* el fondo del mar hasta la cota $-7,40$ en el frente del muelle y en la zona de maniobra de las embarcaciones. El material procedente del dragado se empleará como relleno del muelle, complementando a los préstamos terrestres. La rampa ro-ro situada al norte, donde los calados son pequeños, se draga a la -5.40 conforme al Anteproyecto.



Imagen 2: Ejecución de dragado.

- Creación de superficie de muelle *pavimentada* con dos tipos de pavimentos de hormigón.
- Disposición de las obras de *abastecimiento* de agua al cantil del muelle
- Sistema completo de *drenaje* de la superficie pavimentada
- *Alumbrado* y dotación eléctrica de la zona.



- Colocación de los correspondientes elementos de *amarre y atraque*: Se colocaron en total 28 bolardos de 30 Tn de tiro y 24 defensas de 2,00 m de longitud y 1,5 m de diámetro exterior con una capacidad de absorción de 43,5 Tn y una reacción transmitida a la superestructura de 103 Tn.



Imagen 3: final de las obras.

5. SINGULARIDADES DE LA CONSTRUCCIÓN

En el proceso de internacionalización en el que se encuentran las empresas de ingeniería y construcción españolas, este es un ejemplo de ejecución de una obra en un entorno complicado, donde se lograron vencer serios problemas.

Como es de prever, la principal singularidad de la obra ha sido la falta prácticamente total de medios y personal especializado. Es de señalar que se produjeron durante las obras 35 envíos marítimos con maquinarias y materiales varios y 200 envíos aéreos.

En Mauritania, donde las infraestructuras son muy escasas, hubo que importar tanto la principal mano de obra como todos los medios y tecnología necesaria para la construcción, ya que la disponibilidad de mano de obra en el propio país era limitada; baste recordar que el 20% de la población vive con menos de \$1,25 dólares por día y una gran proporción de la población, especialmente las mujeres, es analfabeta.

Desde que a CORORASA se le adjudica la obra, la logística de la empresa se pone en movimiento con el envío de maquinaria y personal para la ejecución de los trabajos.



Imagen 4: Traslado de la maquinaria.

En todo momento se garantizó la seguridad de los empleados de la obra, así como la de los medios movilizados.

Todo movimiento de personal y medios era complicado. Los problemas de aduana fueron grandes, y el desplazamiento de personal hasta Nouadhibou se hacía laborioso, debiendo pasar los vuelos por Las Palmas y siendo necesario un visado.

6. PROBLEMAS SURGIDOS EN LA REDACCIÓN DEL PROYECTO Y LECCIONES APRENDIDAS

Es habitual, en la redacción de un Proyecto de ingeniería, encontrarse con diferentes dificultades que el ingeniero debe vencer. El objetivo de este apartado es resumir aquellos problemas que, habituales en los Proyectos y de fácil resolución en España, pueden ser complicados de soslayar en un entorno tan difícil como aquel en el que se desarrollaron las obras:

1. Trabajos de campo insuficientes: el Estudio de Viabilidad que sirvió de base para la licitación carecía de información que puede considerarse necesaria para un Proyecto de tablestacas. Por ejemplo, la información geotécnica era escasa, basándose sobretodo en una geofísica que sólo marcaba la existencia de roca. El peso en el presupuesto de las tablestacas era alto, por lo que, al comprobarse con información más amplia, que no existía esa roca a las cotas previstas, fueron necesarios muchos más metros cuadrados de tablestacas.



2. Proyecto con falta de detalle como base de licitación: licitar sobre un proyecto poco detallado tiene un riesgo alto en cualquier lugar, pero en obras en enclaves complicados, con financiación internacional rígida (en este caso española), puede hacer que la obra llegue a un punto muerto, donde los sobrecostos son inasumibles por todas las partes. Por ello, es importante hacer Proyectos con suficiente grado de detalle en fase de licitación para obras de esta tipología.
3. Datos de partida confusos: habitualmente en los Proyectos portuarios, se tiene claro aspectos tan fundamentales como son el cero de referencia, las mareas existentes, etc. En este caso fue muy complicado, por ejemplo, definir las mareas con respecto al cero de referencia del Puerto. Tras complejos estudios y comprobaciones de campo, se consiguió establecer dicha relación. Como consecuencia, se comprobó que no era necesario realizar un dragado tan profundo como se estimó en un principio, pues la bajamar estaba realmente 60 cm sobre el 0 del Puerto.
4. Plazos necesarios dilatados: cualquier actividad nueva, cambio en el diseño, problemática surgida o avería, hacía que los plazos se dilataran de manera importante.
5. Necesidades del cliente (el Puerto) poco realistas. Hay que señalar que, al poco tiempo de entrar en funcionamiento las infraestructuras diseñadas, parece necesaria realizar una ampliación.

7. CONCLUSIONES

Como conclusión más importante debemos destacar que la empresa española de ingeniería está preparada técnicamente para poder resolver los Proyectos marítimos en todo el mundo. Deben tenerse muy en cuenta, a la hora de desarrollar un Proyecto, las singularidades del entorno (cultura, medios, etc).



AUMENTO DEL CICLO DE VIDA DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN AMBIENTE MARINO ATACADAS POR CLORUROS



Pedro Hernández Esteve¹

1) DISEÑO DEL CICLO DE VIDA DE UNA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN ARMADO EN AMBIENTE MARINO

La vida útil nominal de una estructura se ha de definir en proyecto, conforme se indica en el artículo 5º de la instrucción EHE-08 aprobada por R. D. 1247/2008 de 18 de Julio.

La vida útil nominal mínima de las estructuras de hormigón armado, definida en la Tabla 5.1 del citado artículo, en el caso de obras marítimas se establece entre 15 y 50 años, en el caso de viviendas, oficinas, puentes de longitud inferior a 10 m y estructuras de repercusión económica baja o media se establece en 50 años, y en caso de puentes de mayor longitud y estructuras de ingeniería civil de repercusión económica alta se define un mínimo de 100 años.

Durante toda la vida útil, la estructura deberá ser resistente, estable y apta para el servicio y no superará los estados límite indicados en el artículo 8º.

La exposición de la estructura al ambiente, provoca cambios físicos y químicos en ella que pueden afectar al factor de seguridad contemplado en su diseño frente a los estados límite últimos y de servicio, para ello la Instrucción introduce el Estado límite de Durabilidad, de forma que se ha de verificar en fase de diseño que el tiempo necesario para que un agente agresivo produzca una degradación significativa en la estructura, es mayor que el valor de cálculo de la vida útil.

¹ Isocrón – MC S.L.



Como es conocido, para conseguir una durabilidad adecuada primero se define el tipo de ambiente o clase de exposición al que se exponen las estructuras para determinar el ataque físico y químico que van a sufrir. Las clases de exposición vienen definidas en la propia instrucción EHE 08 y a nivel Europeo en la Norma EN 206 Parte.

En las estructuras expuestas al ambiente marino la norma EHE 08 define una clase de exposición específica (Clase III) en lo que se refiere a la corrosión del acero por cloruros procedentes del agua de mar, esta Clase III (Clase XS según EN 206:1) se clasifica a su vez en la zona marina aérea (IIIa /XS1) que incluye estructuras situadas a menos de 5 km de la costa, la zona sumergida permanentemente (IIIb/XS2) y la zona de salpicadura y carrera de mareas (IIIc/XS3).

Igualmente en lo que se refiere al ataque químico que sufre el hormigón en contacto con agua de mar, la norma EHE 08 considera que está sometido a un ataque químico medio (Qb/XA2).

No se han de olvidar otras consideraciones a la hora de determinar la Clase de exposición, especialmente en zonas frías con heladas, en estructuras sometidas a erosión y en estructuras con ataques químicos específicos que en muchas ocasiones quedan en segundo plano y pueden provocar daños de forma muy rápida.

La correcta clasificación tiene como objetivo influir en las características de diseño, fabricación, ejecución y uso de las estructuras de hormigón, de forma que su ciclo de vida útil cumpla con el criterio de diseño e incluso lo supere, es preciso para ello conocer los fenómenos que reducen la vida de las estructuras de hormigón armado en ambiente marino para así poder controlarlas con un buen diseño, una fabricación del hormigón correcta, una puesta en obra adecuada y un mantenimiento durante su uso.

2) FENÓMENOS QUE REDUCEN LA VIDA DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

Las estructuras de hormigón armado ven reducidas sus características portantes cuando sufren daños físicos o químicos.

En el diseño de estructuras en ambiente marino se ha de contemplar toda la amplitud de exposición que indican la instrucción EHE 08 y la norma EN 206-1, concretamente la protección frente a daños físicos como abrasión, impacto, ciclos térmicos de dilatación y contracción, fuego, sobrecarga y ciclos de hielo-deshielo se ha de incluir en el diseño, especificando un hormigón capaz de soportarlos y contemplando su puesta en obra, curado e inspección, al igual que se han de contemplar ataques químicos, más allá de la reacción con el agua de mar cuando los elementos estén en contacto con otros productos como se da en terminales de carga de químicos, cubetos de contención, sistemas de



aguas residuales portuarios, emisarios y estructuras similares, diseñando las protecciones necesarias y los hormigones adecuados al ataque previsto.

Los fenómenos que principalmente reducen la vida de las estructuras de hormigón armado en ambiente marino, aparte de los anteriores, son por un lado la corrosión de la armadura debida a cloruros y carbonatación, y la corrosión del hormigón provocada por el agua marina. Conviene recordar que el agua marina contiene aproximadamente 20 g/litro de ión Cl^- , 2,7 g/litro de ión SO_4^{--} y 1,4 g/litro de ión Mg^{++} .

Corrosión del hormigón

La corrosión del hormigón ocurre cuando se da una reacción química entre las sales del agua marina y el cemento del hormigón.

Particularmente hay que destacar la reacción de los sulfatos marinos con el Hidróxido cálcico y el Aluminato tricálcico del cemento, que tiene como producto la Etringita que expande durante su cristalización, provocando la explosión de la matriz cementosa, agrietamiento y debilidad, de forma que incluso en ocasiones antes de perder su capacidad portante, permite el deterioro acelerado de la armadura al facilitar la penetración de agentes agresivos por las fisuras y roturas.

Los sulfatos marinos aparecen conjuntamente con el catión Magnesio, de forma que éste sustituye progresivamente al Calcio formando Hidróxido magnésico insoluble que baja la alcalinidad de la pasta de cemento.

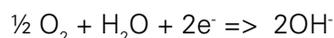
Corrosión de la armadura

El fenómeno de la corrosión de la armadura es normalmente la causa principal de daños en el hormigón, y en ambiente marino el fenómeno en sí puede darse por dos vías, dependiendo de si los cloruros han alcanzado o no el nivel del acero y de su concentración en la matriz cementosa.

En ausencia de Cloruros en contacto con la armadura, el fenómeno corrosivo es una reacción de Oxidación-Reducción en la que se oxida el hierro en puntos donde la irregularidad del acero lo permite, cediendo dos electrones y creando así un ánodo:



Estos dos electrones, bien por la armadura conductora o por el electrolito pueden moverse hacia un punto en el que haya oxígeno suficiente como para que se de la reacción de reducción creando un cátodo:





Posteriormente el ión Fe^{++} sufre una nueva oxidación, cediendo un nuevo electrón para convertirse en Fe^{+++} que difundido en la zona catódica, para lo que se requiere humedad y porosidad, reacciona dando un precipitado de óxido férrico poco soluble que provoca una expansión localizada alrededor de la armadura que rompe el hormigón.

Para que se de la oxidación es por tanto necesaria la presencia de agua, oxígeno y hierro en concentraciones suficientes.

Siguiendo la ecuación de Nernst, para una temperatura de $25^{\circ}C$, el potencial de la pila creada, y por tanto la velocidad de corrosión depende tanto del potencial estándar de la pila como de las concentraciones de reactivos y productos:

$$\Delta E = E^0 - (0,059/n) \log Q \quad \text{donde } Q = [C]^c[D]^d/[A]^a[B]^b$$

Para la reacción de oxidación reducción $aA + bB \Rightarrow cC + dD$ y E^0 el potencial a $25^{\circ}C$

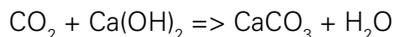
Como se ve Q es la relación de concentraciones entre productos y reactivos, dejando a un lado las concentraciones de los sólidos que se consideran constantes.

Cuando la armadura se encuentra embebida en hormigón nuevo, normalmente con un pH mayor de 12,5, la presencia de la alcalinidad de la pasta de cemento inhibe la reacción por presencia de hidroxilos, se dice que la armadura se encuentra pasivada.

Para que comience la oxidación, debe bien reducirse la alcalinidad o bien que existan otras especies químicas, como los Cloruros, que intervengan en la reacción, permitiendo que ocurra la oxidación incluso con valores de pH altos.

El proceso por el cual se reduce la alcalinidad es la carbonatación del hormigón, y la velocidad de avance de la misma depende de su permeabilidad a la difusión de las especies químicas que intervienen y por tanto de su porosidad.

La carbonatación es la reacción del Dióxido de carbono atmosférico con el Hidróxido de calcio de la pasta cementosa para producir Carbonato Cálcico, esta reacción se da en presencia de agua:



La literatura y la propia instrucción EHE08 divide este fenómeno en una etapa de iniciación, que sigue las leyes de difusión de Fick, modelizado mediante la ecuación (EHE 08, Anejo 9, 1.2.2):

$$t = (d/K_c)^2$$



En la que t es el periodo necesario para que se produzca la carbonatación a una distancia d de la superficie del hormigón, y K_c el coeficiente de carbonatación, que depende de la resistencia a compresión del hormigón, el ambiente, el tipo de cemento y el aire ocluido.

Y una etapa de propagación, que comienza cuando la armadura comienza a oxidarse y finaliza cuando la pérdida de sección de la misma o la fisuración del recubrimiento no son admisibles.

El avance de la carbonatación, depende de la presencia de Dióxido de carbono, la permeabilidad y porosidad del hormigón, la disponibilidad de Hidróxido cálcico y la presencia de humedad, ya que un hormigón saturado de agua no permite la difusión del gas carbónico fácilmente, y sin la presencia de agua tampoco se completa la reacción. La humedad relativa de 50%-70% se considera en la literatura la óptima para el avance del proceso de carbonatación.

Cuando además tenemos presencia de iones cloruro, como es el caso de las estructuras marinas sumergidas o en la zona de carrera de mareas, el ciclo de vida útil depende de la corrosión inducida por éstos en la armadura, aún cuando la alcalinidad del hormigón es alta, de hecho modifica el diagrama de equilibrio electroquímico E-pH (Diagrama de Pourbaix).

Los ensayos de laboratorio indican que cuando la relación de concentraciones (actividades) $[Cl^-]/[OH^-]$ supera 0,6 el ataque por cloruros a la armadura comienza, hay estudios (CSIC 1986) que demuestran que el umbral real se encuentra de hecho en el momento en el que las concentraciones se igualan: $[Cl^-]=[OH^-]$.

El tipo de corrosión inducida por cloruros se da en ánodos muy localizados y se provoca corrosión profunda en forma de "picadura" en lugar de oxidación generalizada como en el caso de la carbonatación, los productos de oxidación son diferentes y además dependen de la relación de concentración de los iones en la disolución de los poros del hormigón próximos a la armadura, dando productos solubles que no permiten apreciar normalmente el daño desde el exterior.

La penetración de los cloruros en el hormigón, siempre se da en fase acuosa, por lo que la permeabilidad al agua líquida determina la capacidad y velocidad de avance de los Cloruros dentro del hormigón. Este avance por difusión, sigue la ecuación:

$$t=(d/K_{Cl})^2$$

En la que siguiendo la EHE 08 el Coeficiente de penetración K_{Cl} tiene un valor de:

$$K_{Cl} = \alpha (12 D(t))^{1/2} (1 - ((C_{th} - C_b)/(C_s - C_b))^{1/2}) \quad \text{donde: } \alpha = 56157$$

$D(t)$ = Coeficiente de difusión de Cloruros a la edad t (cm^2/s)



C_{th} = Concentración crítica de cloruros como % en peso de cemento (0,6% en condiciones normales y 0,3% en armaduras activas pretensas)

C_s = Cloruros en superficie como % en peso de cemento (Tabla EHE 08 A.9.4)

C_b = Contenido de Cloruros del hormigón

$D(t) = D(t_0) (t_0/t)^n$ con $t_0 = 28$ días = 0,0767 años, $D(t_0)$ se puede leer de la tabla A.9.4 en función del tipo de cemento y la relación agua/cemento del hormigón, y n (factor de edad) se toma habitualmente como 0,5 aunque algunos autores dan valores desde 0,3 a 0,5 para cementos sin adiciones y de 0,6 a 0,8 para cementos con adiciones.

En el caso del ataque por Cloruros, un cierto contenido en Aluminato tricálcico resulta beneficioso para enlazar iones Cloruro para formar "Sal de Friedel" no expansiva, que inmoviliza una cantidad de cloruros retrasando en avance de los mismos.

Al igual que en el caso de la carbonatación, el período de iniciación finaliza cuando la concentración de Cloruros alcanza la concentración crítica a la altura de la armadura y comienza la oxidación en la fase denominada de propagación.

La fase de propagación se da a velocidad diferente en función de la clase de exposición, de forma que el tiempo de propagación es:

$$tp = (80 \text{ d}) / (\Phi V_{corr}) \text{ siendo}$$

d = espesor de recubrimiento (mm)

Φ = diámetro de armadura (mm)

V_{corr} = velocidad de corrosión en $\mu\text{m/año}$ según tabla A.9.5 de la EHE 08

Una vez calculados los tiempos de iniciación y propagación, el tiempo de vida útil es la suma de ambos, y debe ser mayor que el ciclo de vida útil de diseño.

3) AUMENTO DEL CICLO DE VIDA

a. Diseño

El diseño correcto del ciclo de vida de una estructura es la opción más económica de garantizar su durabilidad. Por un lado se ha de cumplir la estrategia de durabilidad contenida en la instrucción EHE 08 y en la EN 206, de forma que se justifiquen correctamente las clases de exposición de la estructura (EHE 08 Tabla 8.2.2 y 8.2.3 a y b) y se cumpla



el Capítulo VII de la misma instrucción EHE 08 en lo que se refiere a forma estructural, calidad de hormigón, máxima relación agua/cemento, recubrimiento de armaduras, control del valor máximo de abertura de fisura.

Y se ha de incluir en diseño la protección adicional necesaria frente a los ataques previstos al hormigón y a la armadura fundamentalmente en la zona de carrera de mareas.

Los materiales más adecuados para proteger a largo plazo son morteros cementosos especiales, cuya compatibilidad con el hormigón es absoluta en lo que se refiere a adherencia, permeabilidad y comportamiento mecánico, además de ser aplicados en capa gruesa de 8-15 mm dando así una protección duradera cuando se han formulado con baja porosidad (<5%) y con el menor coeficiente de migración de Cloruros posible ($0-5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$), el propio Anejo 9º de la instrucción EHE 08 permite calcular el recubrimiento adicional que aportan estos morteros de altas prestaciones.

Se pueden aplicar otros materiales con menor durabilidad como hidrofobantes, recubrimientos acrílicos y de resinas, que han de ser abiertos a la difusión del vapor de agua, y estar comprobados frente a la migración de cloruros, pero hay pocos materiales en el mercado que ofrezcan una compatibilidad y durabilidad similar a los morteros especiales.

En la fase de diseño conviene decidir ya las inspecciones necesarias en obra y los procedimientos de reparación en caso de incumplir los criterios de durabilidad.

En esta fase se puede incluso construir la estructura previendo su protección catódica activa o pasiva.

b. Construcción

La puesta en obra es tan importante como el diseño a la hora de garantizar la durabilidad, algo tan básico como una colocación espaciada de las armaduras, un hormigonado cuidado y un curado adecuado, son fundamentales para la vida útil de la estructura.

Es preciso además realizar ensayos que verifiquen aparte de las características mecánicas habituales:

- Recubrimientos de armadura en diversos puntos
- Permeabilidad al agua y penetración de agua
- Localización de fisuras de retracción, profundidad y anchura
- Coeficiente de migración de Cloruros a los 28 días



Con estos datos medidos, se han de tomar las necesarias acciones para garantizar el recubrimiento mínimo, especialmente utilizando morteros especiales o revestimientos adecuados, comprobados para impermeabilizar, evitar migración de cloruros y aportar recubrimiento adicional a largo plazo. inyectando las fisuras de dimensiones superiores las permitidas en zonas armadas, con materiales que rellenen eficazmente (viscosidades acordes con los tamaños de fisura p. ej. para 0,1 mm o menores, viscosidad de 100 mPa.s o menor y así proporcionalmente).

c. Explotación

Durante la explotación se ha de verificar el avance de carbonatación y migración de cloruros periódicamente, de forma que se pueda actuar antes de que se dañen las armaduras, un plan de inspección debe tener identificadas las zonas críticas en las que se prevé que comience el daño, conocer las características de hormigón y profundidades de recubrimiento y estimar el ciclo de vida útil e inspeccionar conforme se estime el avance.

Las inspecciones deben incluir el funcionamiento de revestimientos, especialmente los acrílicos, polímero-cementosos e hidrofobantes cuya durabilidad es menor y se han de reparar o reponer.

El resultado de la inspección debe determinar el avance de los agentes dañinos, las actuaciones de reparación o protección y la estimación de la próxima inspección.

d. Reparación

Las acciones de reparación se encuentran clasificadas en la norma EN 1504, para estructuras atacadas por cloruros hay varias opciones:

i. Eliminación del hormigón contaminado por Cloruros

La forma tradicional de reparar parcialmente es realizar un repicado del hormigón contaminado, proteger la armadura con un pasivante, en la medida de lo posible cementoso alcalino, y aplicación de un mortero estructural R4, sulforresistente y con coeficiente de migración de cloruros muy bajo ($< 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ si es posible), esta es la solución adecuada para recuperar las estructuras. Se ha de tener en cuenta no obstante que con reparaciones parciales podemos crear pilas de concentración y por tanto es muy recomendable realizar una protección superficial adicional con morteros de muy baja permeabilidad a los cloruros, y todo ello curarlo adecuadamente con yute y plástico o con agentes de curado específicos.

Si la penetración de Cloruros es muy alta, pero la estructura no está dañada, es mejor aplicar los procedimientos II o IV descritos más abajo.



ii. Protección catódica

La protección catódica puede ser activa o pasiva con ánodo de sacrificio, en la primera se precisa una fuente de electrones y una malla de distribución de corriente, habitualmente de Titano, que ha de ser embebida en morteros estructurales que cumplan la norma EN 12696, mientras que en el caso de protección pasiva, se constituyen ánodos de sacrificio de metales menos nobles que el acero de la armadura, como Aluminio y Zinc.

Los sistemas han evolucionado mucho desde sus inicios hace unos 40 años, y hoy existe una norma EN ISO 12696 "Protección catódica del acero en el hormigón" que las describe todas ellas.

Los últimos desarrollos en protección pasiva, basados en las patentes (Grillo-Werke AG) de proyección térmica por arco de Zinc, y protección superficial con resinas epoxi con imprimaciones de alta adherencia son los más económicos debido a que se basan en evitar tener que eliminar el hormigón contaminado, no precisan una fuente de corriente y están protegidos frente a la intemperie mediante recubrimientos especiales que aumentan la durabilidad más de 30 años en condiciones desfavorables.

iii. Protección superficial

La protección superficial se puede aplicar únicamente cuando no se han alcanzado valores críticos de cloruros dentro del hormigón, pero no sirve cuando el ataque ha comenzado a producirse o cuando existen fisuraciones de expansión de armaduras por oxidación.

Los sistemas de revestimiento no cementosos deben cumplir lo establecido en la norma EN 1504-2, y para realizar su función deben ser abiertos a la difusión del vapor de agua, con absorción capilar $< 0,01 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$, resistentes a los UV, impermeables a cloruros, aplicables en condiciones de humedad prevista en paramentos portuarios, endurecimiento y puesta en servicio rápido (aplicación entre mareas).

Los sistemas cementosos, que como hemos indicado son los más adecuados, deben ser sulforresistentes, con un coeficiente de migración de cloruros muy bajo ($< 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ si es posible), de alta resistencia mecánica y a la abrasión, de alta adherencia sobre hormigón, resistentes a la carbonatación.

iv. Realcalinización y extracción electroquímica de Cloruros

Son procesos electroquímicos en los que se aplica una corriente durante un tiempo prolongado desde 1 semana a varios meses en el caso de extracción de Cloruros, para expulsar los Cloruros que han alcanzado la armadura o bien para incrementar la concentración de iones hidroxilo a su alrededor para pasivar de nuevo la misma.



Ambos procesos utilizan mallas embebidas en una disolución con un electrolito, habitualmente de Carbonato sódico para la realcalinización y de hidróxido cálcico para la extracción de Cloruros.

Estos procesos son largos de aplicar y presentan además riesgos de causar fragilización por hidrógeno en aceros de alta resistencia, reacciones álcali-árido e incluso pérdida de adherencia de la armadura y el hormigón, por lo que se han de monitorizar y controlar adecuadamente con equipos y personal entrenado.

Normalmente no es una solución adecuada cuando la corrosión de las armaduras ha comenzado.

v. Recristalizadores superficiales e inhibidores migratorios

Los recristalizadores se basan en provocar una reacción química que al cristalizar rellena los poros del hormigón de forma superficial, son habitualmente silicatos o microcementos.

Los inhibidores migratorios son moléculas cuya función es alcanzar la armadura dentro del hormigón y pasivarla o bien hidrofugarla para evitar la corrosión, para ello deben moverse por la porosidad.

Estas soluciones sirven cuando el nivel de cloruros no es todavía crítico en el hormigón, aún así no siempre son de aplicación, especialmente cuando el hormigón a tratar no está seco o no se puede mantener protegido mientras dura la reacción de cristalización o la migración de los inhibidores, y además se ha de comprobar su compatibilidad con los cloruros presentes en hormigón y agua de mar.

Aquellos recristalizadores que además precisan una reacción con el hidróxido cálcico, no son efectivos en hormigones carbonatados o envejecidos y se debería en todo caso tomar testigos y verificar el cambio en las condiciones de migración de cloruros antes y después de la aplicación.

En cuanto a los inhibidores migratorios, precisan un hormigón poroso y permeable y por tanto hay que considerar que su eficacia dependerá de la porosidad del mismo y la facilidad de alcanzar la armadura, recomendándose igualmente realizar comprobaciones de profundidad de migración con el tiempo indicado por el fabricante.



SOSTENIBILIDAD CONSTRUCTIVA EN DESARROLLOS PORTUARIOS



Juan Ramón García Vizcaíno¹, Daan Rijks²,

Tiedo Vellinga³, Jamie Lescinski²

INTRODUCCIÓN

Los planteamientos sostenibles se están convirtiendo rápidamente en una norma para el desarrollo de proyectos, en lugar de ser una excepción. A lo largo de la última década, dentro de los proyectos de desarrollo portuario, ha tomado fuerza la tendencia a desplegar iniciativas que tienen como objetivo promover o desarrollar planteamientos sostenibles en las obras de infraestructura. La filosofía básica consiste en considerar la sostenibilidad y el “crecimiento verde” o “crecimiento limpio” los motores económicos principales. Aplicando este cambio de mentalidad al desarrollo y a la explotación portuaria, los “puertos verdes” tienen un futuro mejor y más sostenible que los puertos que gestionan su actividad luchando por cumplir las normativas vigentes y enfrentándose continuamente a la necesidad de defender sus permisos para operar (Ref. PIANC WG150).

En los desarrollos portuarios se ha producido una transformación muy clara de “sustituir a la naturaleza” hacia desarrollos portuarios “con la naturaleza”. Este giro exige un pensamiento proactivo y es la clave de la sostenibilidad en el desarrollo portuario. Está demostrado lo rentable que es promover la naturaleza en el desarrollo y la explotación de un puerto, tanto en lo que se refiere al apoyo de los distintos actores y grupos de interés, como a la eficacia del desarrollo.

¹ Boskalis Nederland BV Sucursal en España.

² Royal Boskalis Westminster nv, EcoShape.

³ Puerto de Rotterdam. Profesor TU Delft. Chairman WG150.



El ritmo del progreso se está acelerando de forma drástica; hay necesidad dar un paso adelante, desde la adopción de una serie de decisiones individuales hacia un planteamiento integrado.

En esta ponencia se expone de forma condensada el concepto de desarrollo portuario sostenible, sobre la base del informe PIANC WG150 "Puertos Sostenibles", el enfoque "Construir o Trabajar con la Naturaleza" y el concepto "Servicios del Ecosistema", respaldado por una serie de ejemplos que demuestran la aplicación práctica del concepto. Está enfocado a demostrar la necesidad de adoptar la filosofía de los "puertos verdes", y cómo hacerlo, y hace referencia a las mejores prácticas de "mitigación y adaptación al cambio climático", "cuestiones de respeto y sostenibilidad medioambiental" en puertos existentes y a su eficacia y potencial económico para ser utilizadas como ejemplos para otros puertos.

La ponencia pretende aumentar la conciencia sobre cuestiones de sostenibilidad en los puertos y plantear ideas y sugerencias para afrontar mejor el reto de alcanzar la sostenibilidad a través de soluciones prácticas.

En España existe un compromiso claro con la sostenibilidad que ha sido plasmado en la Ley de Puertos y a través de la iniciativa para implantar la "Guía para la Elaboración de Memorias de Sostenibilidad en el Sistema Portuario Español". De hecho, la guía también es un punto de referencia para otros países.

En los últimos años, las autoridades portuarias españolas han hecho un esfuerzo importante por fijar sus propios planteamientos sostenibles, elaborando estrategias sostenibles, participando activamente en organizaciones, como WPCI y ESPO, y distintos grupos de trabajo, como las iniciativas de PIANC, entre otros muchos. Este artículo también pretende alentar a los Puertos a redoblar sus esfuerzos por alcanzar un enfoque sostenible que entienda en profundidad sus entornos locales y los utilice en la resolución de sus problemas.

EL CONCEPTO DE DESARROLLO PORTUARIO SOSTENIBLE

Se va haciendo evidente la necesidad de un nuevo paradigma de crecimiento que promueva el desarrollo económico, cumpliendo mejor sus exigencias, y al mismo tiempo asegure la sostenibilidad climática y medioambiental. Este próximo paso es el camino hacia el "Crecimiento Verde". Mientras que las actividades económicas y la protección medioambiental se perciben de manera tradicional como dos dominios independientes con repercusiones opuestas entre sí, el crecimiento verde exige un giro conceptual que reconozca que ambas pueden hacerse realidad complementándose (Ref. PIANC WG150).

Los Puertos están empezado a planificar y gestionar así su explotación y expansión futura (crecimiento) a fin de compatibilizar el limitado o disminuido espacio ambiental con la mayor interacción entre puerto y ciudad. Si se consigue este equilibrio de una forma armónica



con las ciudades y la naturaleza colindantes, el crecimiento verde puede ser claramente identificado como un motor económico (Ref. PIANC WG150).

El concepto de desarrollo portuario sostenible que se describe en este artículo consta de diversos componentes clave que pueden aplicarse, no sólo al desarrollo sostenible de la explotación portuaria, sino también, a la ejecución de proyectos sostenibles de construcción/ampliación de puertos. Estos incluyen:

1. *Visión a largo plazo* con la que se pretende alcanzar una huella ecológica aceptable;
2. *Transparencia* en la participación de los *actores y grupos de interés* y en las estrategias de explotación y crecimiento aprobadas por éstos;
3. Cambio de la sostenibilidad como obligación legal a la *sostenibilidad como motor económico* (desarrollo económico y sostenible como factores complementarios). Nuevos modelos y actividades económicas en proceso de gestación;
4. *Intercambio activo de conocimientos* con otros puertos y actores o grupos de interés;
5. Búsqueda continua de la *innovación en los procesos y la tecnología*.

El Concepto de Desarrollo Portuario Sostenible no sólo cambia el papel de la autoridad portuaria, sino también la forma en que las operaciones se llevan a cabo. Bajo este concepto, el puerto se explota de forma proactiva y más allá de lo legislado, siendo guiado por una visión a largo plazo. De este modo, los puertos reconocen y utilizan su excepcional posición como puntos nodales o hubs en una red de transporte cuyas zonas industriales y empresariales añaden valor a los productos transportados.

La estrategia consiste en buscar el equilibrio armónico entre el desarrollo futuro del puerto con la región y el sistema natural. Aspectos importantes en la estrategia del Puerto Sostenible son:

- Eficacia y sostenibilidad como motores complementarios
- Enfoques proactivos claves en el diseño, la explotación y el mantenimiento
- Atraer pioneros, lo que a su vez atrae a colaboradores y prepara mejor al puerto para el futuro.

En los últimos años ha sido desarrollado el planteamiento o enfoque “Construir o Trabajar con la Naturaleza”. Este es un enfoque práctico que muy bien puede ser utilizado para dar forma a la estrategia de un puerto sostenible y trabajar para alcanzar sus objetivos, ya que utiliza el entorno local (social) como punto de partida y busca soluciones que aporten valor añadido a todos los actores y grupos de interés que intervienen.



EL ENFOQUE “CONSTRUIR CON LA NATURALEZA”

Este enfoque, desarrollado dentro del programa de investigación quinquenal entre múltiples actores “Construir con la Naturaleza” (BwN), es sinónimo de los planteamientos descritos en las filosofías “Trabajar con la Naturaleza” de PIANC e “Ingeniería con la Naturaleza” de USACE. Basados en las metodologías “learning by doing” (aprender haciendo) y “design thinking” (diseñar para pensar), utilizan el conocimiento del sistema físico y ecológico local como punto de partida para planificar, diseñar, ejecutar y explotar un (nuevo) desarrollo portuario. En la medida de lo posible, los procesos naturales son aprovechados para fortalecer el diseño y reducir los costes, mejorando al mismo tiempo los valores naturales del proyecto en su conjunto. La incorporación de este planteamiento a menudo se traduce en una mayor agilidad en el proceso de gestión de permisos debido a que se obtiene el apoyo de los actores y grupos de interés en fases iniciales y se reducen los costes globales, especialmente los de mantenimiento a largo plazo, al exigirse una actitud proactiva e integrada desde el inicio del proyecto.

Para el desarrollo de proyectos que utilicen el enfoque BwN, se han elaborado una serie de directrices (www.ecoshape.nl). La eficacia de BwN es máxima cuando se adopta en la fase de inicio del proyecto, cuando las ideas de desarrollo se encuentran en estado embrionario y existe un número menor de condicionantes; sin embargo, este planteamiento puede adoptarse en cualquier fase del proyecto. Al implantar el enfoque BwN, han de seguirse los cinco pasos siguientes para determinar las oportunidades BwN:

Paso 1. Conocer el sistema (físico, socioeconómico y gobernanza)

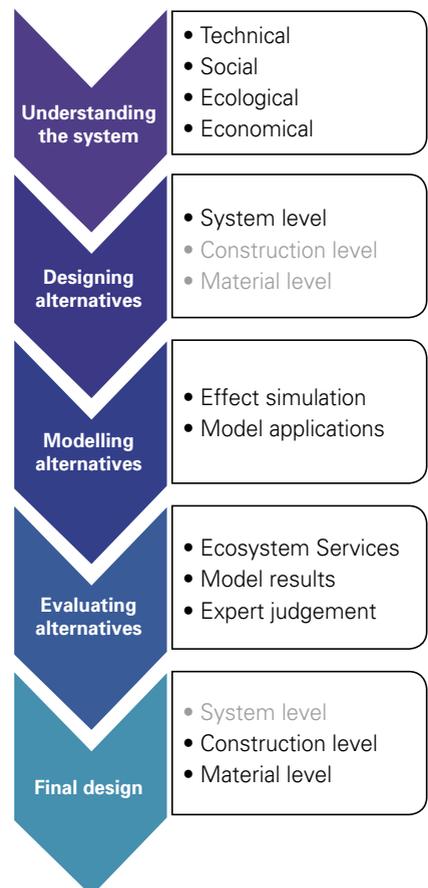
Paso 2. Identificar alternativas realistas

Paso 3. Evaluar la calidad de las alternativas y seleccionar una solución integral

Paso 4. Desarrollar las alternativas seleccionadas

Paso 5. Preparar la solución para su implantación en la siguiente fase del programa para su realización

Los capítulos que siguen a continuación describen diversos casos en los que el concepto y el enfoque han sido implementados.





EJEMPLO DE PROYECTOS DE CONSTRUCCION Y DESARROLLOS PORTUARIOS SOSTENIBLES

Existen una serie de desarrollos portuarios en los que ya se ha utilizado dicho planteamiento proactivo para lograr un proceso de desarrollo progresivo con el que se pretende el conocimiento de la naturaleza y la explotación portuaria sostenible a largo plazo. En el punto siguiente son presentados algunos ejemplos de desarrollo portuario sostenible. Estos ejemplos pueden servir de guía e incluso de inspiración a los responsables portuarios para afrontar mejor los retos del futuro. El listado de ejemplos prácticos que se facilita a continuación se ha recopilado a partir de los aspectos planteados en el informe PIANC WG150 Puertos Sostenibles, los resultados del programa de investigación Construir con la Naturaleza, y la experiencia del Puerto de Rotterdam y de Boskalis en proyectos recientes. Es importante destacar que se continúan desarrollando y ejecutando de forma periódica nuevos casos BwN, y que por ello los conocimientos acumulados, la experiencia y las lecciones aprendidas se continúan ampliando de forma constante. Estos ejemplos son importantes en el ámbito de las construcciones marítimas y dragados en los proyectos de desarrollo portuario. Para cada uno de ellos se presentan reto y solución práctica de desarrollo sostenible en un aspecto medioambiental o de política concreto, por ejemplo, la calidad del aire.

ASPECTO	FASE	LUGAR	PLANTEAMIENTO / MEDIDA SOSTENIBLE
Participación de los actores y grupos de interés	Inicio	Puerto de Melbourne, Australia	Intervención proactiva de los actores posibilitando la ejecución del proyecto
Gestión Sostenible de Recursos	Inicio y explotación	Puerto de Le Havre, Francia	Reutilización beneficiosa de materiales creando un hábitat para aves
Calidad del Agua Superficial y de los Sedimentos	Proyecto y construcción	Puerto de Khalifa, UAE	Utilización de diseño innovador y estrategias de gestión adaptativa para proteger el arrecife de coral próximo
Gestión de la Salud del Hábitat y de las Especies	Construcción	Terminal de Cruceros de Falmouth, Jamaica	Traslado ecológico de coral para permitir la ejecución del proyecto
Dragado y extracción	Construcción	Puerto de Rotterdam Maasvlakte II, Los Países Bajos	Diseño de fondos de extracción para estimular la rehabilitación ecológica
Calidad del aire	Explotación	Puerto de Rotterdam, Los Países Bajos	Proyecto piloto con combustible GTL para reducir las emisiones en la explotación



Participación de los actores y grupos de interés

El proyecto de profundización del canal de la Bahía de Port Phillip, para el Puerto de Melbourne, sufrió inicialmente la falta de apoyo de los actores y grupos de interés, en general, del apoyo social. La Bahía de Port Phillip tiene casi 2.000 kilómetros cuadrados de superficie, 264 kilómetros de línea de costa y en sus alrededores viven unos tres millones de personas. Alberga dos Parques Nacionales Marinos y humedales Ramsar, es hábitat de múltiples especies de peces, pequeños pingüinos, ballenas, delfines y focas, extensos campos de esponjas, diversas especies coralinas de aguas profundas y praderas marinas naturales y es una atractiva zona recreativa para la práctica de la natación, el buceo y la navegación.

En colaboración con el contratista desde Fases Iniciales (ECI), se adoptó un proceso de participación de los actores y grupos de interés, integrado y transparente, conduciendo a un planteamiento proactivo que tuviera en cuenta la naturaleza, lo que derivó en un mayor apoyo de los actores y grupos y una mayor transparencia del proyecto; traduciéndose, en último término, en una relación de gran colaboración entre el cliente y el contratista.

Una importante inversión en investigación científica fue puesta en marcha para poder ajustarse a un riguroso régimen de concesión de permisos para el proyecto. La experiencia práctica combinada con los conocimientos científicos resultó ser fundamental para la creación, el funcionamiento y la gestión del programa de seguimiento durante las obras de dragado.

Entre las medidas de participación de los actores y grupos de interés adoptadas antes, durante y después del proyecto están:

- La Creación de una Comité Asesor de los Actores y Grupos de Interés;
- El Nombramiento de un Presidente independiente;
- La Celebración de sesiones informativas a la comunidad, posibilitando un diálogo con intercambio real de opiniones en lugar de reuniones públicas en las que sólo habla quien propone;

Infrastructure Partnerships Australia
111 Phillip Street, Melbourne VIC 3000
PO Box 9999, Melbourne VIC 3000
Tel: +61 3 9600 2000 • Fax: +61 3 9600 2000
E: contact@infrastructure.org.au | www.infrastructure.org.au

INFRASTRUCTURE PARTNERSHIPS AUSTRALIA
www.infrastructure.org.au

MEDIA RELEASE
FOR IMMEDIATE RELEASE 11 March 2010
MELBOURNE CHANNEL DEEPENING AUSTRALIA'S INFRASTRUCTURE PROJECT OF THE YEAR



- Conceder a los actores y grupos de interés la posibilidad de reunirse con los expertos, incluido el contratista de las obras de dragado, elevando sus preguntas
- Comunicación periódica (presentaciones informativas, boletines impresos y electrónicos para mantener informados a los diversos grupos de los avances del proyecto y demostrar por qué el proyecto era bueno para la comunidad y la economía, mostrando que la profundización de canales mediante técnicas de dragado, es una actividad habitual y con una larga historia, que causaría un mínimo impacto en la Bahía teniendo en cuenta las medidas tomadas para proteger el medioambiente;
- Organizar programas para escolares para ampliar conocimientos sobre la Bahía y su entorno, y la necesidad de protección medioambiental
- Creación de una página web dedicada y una línea de información gratuita.

Esta activa participación garantizó un entendimiento mutuo entre el equipo de proyecto y los actores o grupos de interés, consiguiendo un giro radical, desde la oposición generalizada al proyecto al apoyo e incluso a la adjudicación del premio de reconocimiento como proyecto de infraestructura del año. La experiencia aprendida fue la necesidad de establecer protocolos de comunicación abiertos y transparentes para este complejo y exigente proyecto de dragado.

Gestión sostenible de los recursos

El puerto de Le Havre, según alcanzaba su límite de capacidad, puso en marcha el proyecto para una gran ampliación. Sin embargo, la comunidad planteó muchas preguntas sobre cuestiones medioambientales y económicas, a las que únicamente podía responderse introduciendo flexibilidad en el diseño y la ejecución de la obra. Los objetivos principales eran minimizar el impacto ecológico y maximizar la reutilización del material dragado. Se reutilizaron más de 26 millones de m³ de sedimento dragado en este proyecto. El material grueso se reutilizó en los cimientos del desarrollo portuario y el material arenoso fue utilizado como material de relleno, en lugar de tener que utilizar exclusivamente materiales traídos de fuentes externas.

Como compensación medioambiental, se incluyó en el proyecto la creación de una isla para aves en el estuario del río Sena, con materiales procedentes de dragado, configurada de tal manera, que tuviera un impacto mínimo en las corrientes. Fueron diseñados métodos de trabajo específicos, basados en la utilización de dragas succión descargando con mareas altas y equipos de movimiento de tierras para dar forma a la isla con mareas bajas, para reducir la turbidez.





Nada más finalizar la construcción de la isla (y aun durante su construcción), empezaron a anidar aves y alimentarse en las aguas poco profundas de la pequeña bahía que forma. El éxito de esta isla se valora en parte observando más de 60 especies diferentes. El proyecto de la isla para aves también recibió un Premio de Reconocimiento Trabajar con la Naturaleza de PIANC.

Partiendo de una planificación e ingeniería muy meditada al inicio del proyecto, basada en el debate público inicial, estudios científicos multidisciplinarios y programas de seguimiento, orientados a crear valor natural añadido y reducir costes de los dragados, este proyecto de ampliación portuaria no sólo logró minimizar el impacto medioambiental durante su construcción, sino que incluso se consiguió mejorar los valores medioambientales mientras se implantaba una infraestructura comercial. Reconociendo el valor del material dragado como recurso y utilizando con inteligencia las condiciones del entorno, es posible conseguir el desarrollo de la naturaleza y una infraestructura sostenible con un esfuerzo limitado.

Calidad de las aguas superficiales y del sedimento

Dentro del proyecto de Puerto Khalifa se desarrolló un gran puerto de nueva planta, mar adentro, en las proximidades al arrecife de coral más extenso del Golfo Árabe. La obra incluyó el dragado de un canal de acceso y una dársena, terrenos ganados al mar para construir una isla para el puerto y terrenos para muelles, la construcción de escolleras y una vía de acceso a la isla, así como un puente. Además, se construyeron un embarcadero y frentes de atraque para la manipulación de contenedores y una nueva fundición de aluminio. Se dragaron en total 44 millones de metros cúbicos de material, a lo largo de cuatro años y medio, desde octubre de 2007.



Se impusieron normas medioambientales muy rigurosas durante el proyecto. Existe una zona de 194 km² donde habitan 17 especies de coral, esponjas, praderas marinas y cientos de especies de peces, cuyo límite oeste está justo al este de la zona de la obra de ampliación del puerto (parte derecha de la foto superior). La zona de obra también está próxima a las tomas de agua de mar de la planta desaladora ADEA, principal productor de agua potable de Abu Dhabi. La protección de ambas zonas, en caso de exceso de sedimentos en suspensión, fue de vital importancia para la ejecución de las obras de dragado y de



relleno. Así pues, al inicio del proyecto fueron identificadas numerosas actividades de seguimiento y de atenuación, basadas en el conocimiento del medio natural, con el fin de asegurar la máxima protección ambiental:

- Instalación de 15 estaciones de vigilancia en torno a la zona de obra, transmitiendo mediciones en tiempo real de turbidez, oleaje, corrientes, niveles de agua y condiciones atmosféricas, las 24 horas del día;
- Presencia de un embarcación de monitorización dedicada, las 24 horas, a realizar continuamente mediciones in situ;
- Toma diaria de muestras de agua como medida adicional de las concentraciones de sedimentos en suspensión y la turbidez;
- Inspecciones periódicas del arrecife de coral mediante inmersiones;
- Continuos levantamientos batimétricos para vigilar cambios en el nivel del fondo marino; y
- Modelación numérica avanzada (en tiempo-real) para predecir la turbidez y las concentraciones de sedimentos en suspensión en torno a las zonas de trabajo, como evaluación previa así como para pronósticos. La información fue utilizada para programar y ejecutar los trabajos (movimientos de la draga) minimizando la posibilidad de impactos medioambientales por sedimentos y turbidez.

Debido a que el contenido de finos en el material para relleno era superior al esperado, el método de trabajo inicialmente proyectado, con una sofisticada pontona de descarga, no dio los resultados deseados. El método de trabajo fue adaptado, pasando a eliminarse los finos con dragas de inyección, así como con una draga de succión de poco calado (foto). Esta adaptación fue clave para cumplir los criterios de calidad y rendimiento exigidos.





En 2010, el cliente, la entidad Abu Dhabi Ports Company (ADPC), recibió el Premio de Protección Medioambiental por la protección del arrecife de coral en el diseño y la construcción del Puerto Khalifa. Una lección fundamental aprendida en este proyecto es la potencia que tiene el uso de estrategias de gestión adaptables. En este proyecto, las adaptaciones operativas durante la ejecución permitieron que se realizaran obras marítimas sin causar ningún daño al arrecife de coral próximo. Las adaptaciones realizadas se identificaron a través de la extensa campaña de seguimiento de la turbidez basada en receptores.

Gestión del hábitat y las especies

La Terminal de Cruceros de Falmouth, promovido por la Autoridad Portuaria de Jamaica y Royal Caribbean, fue diseñada para recibir a los buques de crucero más grandes del mundo. El proyecto se inició en 2009, una vez concedidos los permisos y las licencias correspondientes por la Agencia Nacional de Planificación y Medio Ambiente (NEPA), y finalizó en julio de 2010.



La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) llevada a cabo en 2007 apuntaba que, además de arrecifes de coral, manglares y praderas marinas, la zona de obra albergaba adicionalmente una gran diversidad de recursos marinos sensibles, incluidas estrellas de mar, esponjas, langostas, erizos de mar, caracolas y fitoplancton bioluminiscente (playas brillantes).

En la EIA se identificaron los siguientes posibles impactos del proyecto:

- Pérdida de hábitat y diversidad, incluso cobertura de coral, hábitat de peces, praderas marinas y plancton bioluminiscente; y
- Aumento de los niveles de turbidez y sedimentación

Los permisos y las licencias medioambientales para la construcción del terminal, concedidas por NEPA, se condicionaron al cumplimiento de una serie de estrictos requisitos en materia ambiental centrados fundamentalmente en la protección de corales, praderas marinas y fauna benthónica en la huella de dragado. De acuerdo con las preocupaciones de NEPA, se elaboró un Plan de Gestión Ambiental a gran escala para preservar los recursos



biológicos y permitir al proyecto ser realizado de una manera sostenible y responsable. Una vez más, un riguroso conocimiento del sistema natural al inicio de los trabajos fue esencial. El Plan incluía un proyecto de reubicación de coral a gran escala (foto superior), que supuso el traslado de prácticamente 150.000 colonias de coral a arrecifes próximos, así como erizos de mar, pepinos de mar, cangrejos ermitaños, caracolas, estrellas de mar y langostas.

En 2011, los resultados previos indicaron que podía contabilizarse el 86% de las colonias de coral reubicadas en 2009, con una mortalidad total en el entorno del 4% de las colonias monitorizadas (Kenny et al., 2012).



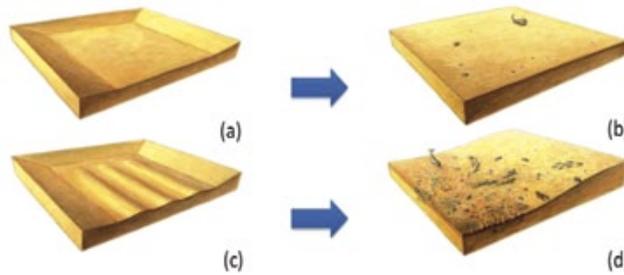
La naturaleza proactiva en la planificación y en las fases iniciales de ejecución de la obra para proteger los hábitats sensibles en la zona de la obra y en su entorno, permitió que las actividades del proyecto contaran con el respaldo de la comunidad, que fueran respetuosas con el medio ambiente y que se alcanzaran la totalidad de objetivos del proyecto.

La colaboración, desde una fase inicial, entre contratista/clientes, científicos y reguladores, fue esencial, así como una continua actualización de los métodos de trabajo, basándose en el conocimiento ecológico, para la mejora de la calidad y la eficiencia del proyecto.

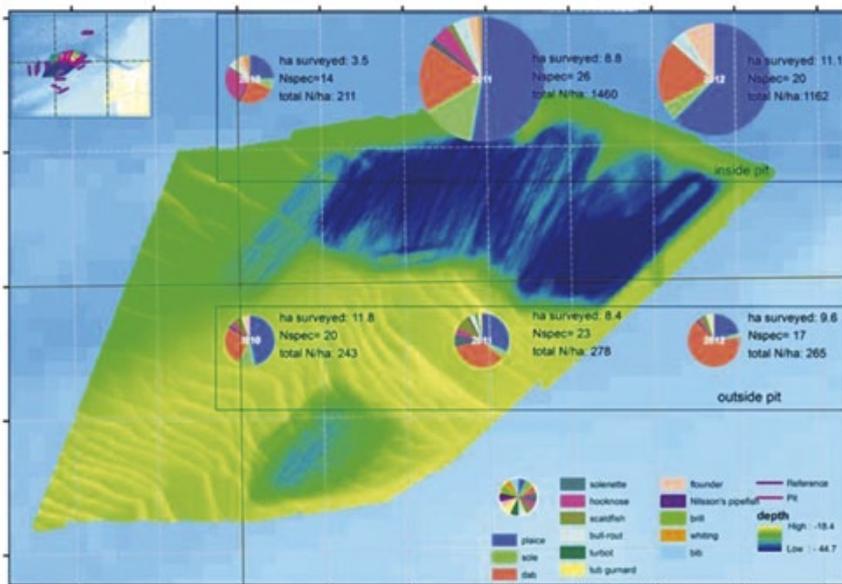
Obras de dragado y extracción

Es habitual que los proyectos de desarrollo portuario necesiten actividades de dragado. Tradicionalmente, se considera que los lugares de extracción llevan asociado un impacto negativo en el medioambiente local. Sin embargo, al aplicar el enfoque "Construir con la Naturaleza", los lugares de extracción son considerados simplemente como una alteración de la morfología del fondo marino y al hacerlo así proporcionan oportunidades únicas de creación de nuevos entornos ecológicos en estos lugares. La nueva configuración física se traduce en aguas más profundas, corrientes diferentes y, también en ocasiones, sedimentos de características diferentes. Con ello, se ofrecen condiciones para desarrollar un nuevo ecosistema o refugio (santuario) para determinadas especies de peces.

Este potencial se ha probado en un proyecto piloto a escala real en un lugar de extracción en el Mar del Norte. En los fondos del lugar de extracción se modeló el lecho marino con formas previamente diseñadas. El diseño, inspirado en las ondas de arena que se producen en los fondos de la zona, buscaba crear gradientes máximos de profundidad de agua y velocidades de corriente, y por tanto sedimentos en el fondo. Se tuvo en cuenta que las pendientes y profundidades creadas no propiciarán un agotamiento del oxígeno en el emplazamiento, dando como resultado un entorno diverso para una variedad de hábitats ecológicos (Ref. Rijks y otros).



La impresión artística (superior) resume este concepto: en analogía a las formas naturales de los fondos marinos naturales, la hipótesis que subyace en las zonas de extracción diseñadas (c) es estimular la (re)colonización y promover una biodiversidad y productividad mayor (d) una vez finalizados los trabajos de dragado; a diferencia de las zonas de extracción de lecho plano (a), que proporcionan un hábitat ecológico pobre (b) después del dragado.





Esta segunda figura muestra la batimetría de la zona de extracción en 2010, a la que se ha superpuesto la composición y densidad media de las especies de peces en el lugar de extracción y la zona estudiada en 2010, 2011 y 2012. En ella podemos apreciar una barra de arena en la zona noroeste y otra en la zona sur del lugar de extracción. Los datos obtenidos sobre las especies de peces monitorizadas muestran un aumento en la densidad de peces demersales, que puede atribuirse a la presencia, en sí, de un lugar de extracción de arena profundizado, además de los beneficios adicionales debidos a la realización de las formas en el lecho marino dentro del emplazamiento.

Los resultados del proyecto piloto demostraron que si las zonas de dragado y/o los lugares de extracción son objeto de diseño de acuerdo con la morfología natural local del lecho marino, y se tienen en cuenta parámetros ecológicos en el diseño de la forma de los fondos, éstos pueden ser beneficiosos para la ecología local, la biodiversidad y/o la biomasa, y por lo tanto aumentar el valor natural del desarrollo en su conjunto.

Calidad del aire

Uno de los problemas principales derivados de las ampliaciones portuarias radica en la calidad del aire. Habitualmente, un aumento de tamaño del puerto supone un aumento de las emisiones. Para contrarrestar este efecto, pueden adoptarse una serie de medidas en tierra pero también en el mar. Una de ellas es la utilización de combustibles GTL (Gas a Líquido) en embarcaciones de servicio portuario, en lugar de utilizar combustibles marítimos convencionales.

En el Puerto de Rotterdam, se ha puesto en marcha un proyecto piloto en el que el remolcador 'SMIT Elbe' está siendo alimentado con combustible GTL, un combustible nuevo y más limpio, para demostrar que son factibles las reducciones en las emisiones de barcos (sin SOx, NOx reducido y -PM). Además, se trata de demostrar que el GTL puede ser utilizado en motores diesel convencionales sin necesidad de introducir modificaciones. Esta reducción es especialmente bien acogida en zonas de tanta aglomeración como el puerto de Rotterdam, donde el remolcador SMIT Elbe opera el 100% de su tiempo.





A la espera de resultados de seguimiento definitivos, los resultados preliminares indican que las emisiones se reducen sensiblemente. Adicionalmente, la tripulación ha confirmado que el rendimiento del remolcador es el mismo, incluso parece haber mejorado en algún aspecto, especialmente en lo que se refiere a PM durante los aumentos bruscos de potencia.

El proyecto piloto está demostrando que puede simplemente adaptarse el tipo de combustible sin tener que cambiar los motores y que es posible reducir los valores de emisión existentes dentro del área portuaria, permitiendo probablemente una mayor actividad portuaria en su globalidad.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

No existe desarrollo sin interconexión y no existe red de interconexión global sin Puertos. Por su posición de privilegio en la cadena, las Autoridades Portuarias tienen una oportunidad única de promover y catalizar la puesta en marcha y la consolidación de la necesaria transición. Algunos Puertos ya están siendo pioneros en el viaje global hacia la Sostenibilidad.

La aceptación y adopción de planteamientos proactivos en los que actividades económicas y protección medioambiental están alineadas y se complementan, por ejemplo mediante la aplicación de la filosofía "Construir o Trabajar con la Naturaleza", puede ayudar a conseguir que el desarrollo portuario sostenible sea realmente viable y efectivo.

Este artículo propone una serie de componentes clave y pasos a seguir para alcanzar el desarrollo sostenible en la construcción y explotación, incluyendo una serie de casos prácticos.

REFERENCIAS

Este artículo es traducción de su original: "Sustainable Approach to Port Development Construction"

EcoShape: "Construir con la Naturaleza: Pensar, actuar e interactuar de forma diferente", 2012

KENNY, I., A. KRAMER, P. W. KELLY, Y T. BURBURY, del XII simposio internacional sobre arrecifes de coral, Cairns, Australia, 9-13 de julio de 2012, 20A Recuperación de arrecifes de corales.

Informe PIANC WG150 'Puertos Sostenibles', 2014.

RIJKS D.C., DE JONG M.F., BAPTIST M.J., AARNINKHOF S.G.J.: "Aprovechamiento de Todo el Potencial de las Obras de Dragado: Lugares de Extracción Enriquecidos Ecológicamente", PIANC, 2014.



DRAGADO DEL PUERTO DE MAÓ



Autores:

**Juan Carlos Plaza Plaza¹, Antonio Ginard López¹,
Enric Massutí Sureda², Eladio Santaella Álvarez³**

Coautores:

**Cesare A. Mosca⁴, Javier Martín Fernández⁵,
Omar Inglese Carreras⁵, Raúl González Gallero⁵**

INTRODUCCIÓN

Breve historia del puerto de Maó

El puerto de Maó, el segundo puerto natural más grande de Europa, tiene una longitud de casi seis kilómetros desde la bocana hasta la Colársega. Fue fundado por uno de los generales cartagineses y hermano de Aníbal, Magón, que le daba su nombre y una vez que anexado por los romanos, lo llamaron Portus Magonis. Pasó a manos de los romanos y, con la caída del Imperio Romano, lo ocuparon vándalos y bizantinos. Luego sufrió frecuentes ataques de los normandos y musulmanes, hasta que finalmente, en el año 903, fue conquistado y anexionado al Califato de Córdoba. En 1287 lo conquistó el rey Alfonso III de Aragón. Posteriormente, en 1535, sufrió un gran saqueo por parte de los corsarios de Barbarroja. Pasado bajo el control de los británicos en 1708 durante la Guerra de Sucesión Española, pasó a ser durante setenta años una base naval británica y un centro comercial y de contrabando de primer orden en el Mediterráneo. Actualmente se encuentra dentro de la red de Puertos del Estado.

¹ Autoridad Portuaria de Baleares.

² Centro Oceanográfico de Baleares. Instituto Español de Oceanografía.

³ Instituto Español de Oceanografía.

⁴ IDOM Ingeniería y Consultoría, S.A.

⁵ Mediterráneo Servicios Marinos, S.L.



Descripción de la actuación prevista en el proyecto

En el mes de octubre de 2007, finalizaron las obras de Ampliación y Mejora de los Muelles del Cos Nou en el Puerto de Maó. Una vez finalizadas estas obras, se pretendía realizar un dragado que permitiera disponer en la alineación de levante y en la alineación de poniente del Cos Nou de unos calados mínimos de 8 m y 9 m respectivamente. Además, era necesario llevar a cabo una limpieza del fondo marino en el interior del puerto, en la zona comprendida entre los muelles del Cos Nou y las proximidades de Isla Pinto. En esta zona existe acumulación de materiales sueltos depositados en el fondo, y provenientes en su mayoría de las aportaciones periódicas del torrente de la Colársega y de los aliviaderos del colector unitario de aguas pluviales y residuales del Ayuntamiento de Maó, que desembocan en diferentes puntos del Puerto, y están disminuyendo el calado disponible que precisan los buques que operan en el puerto de Maó.

El proyecto contemplaba el dragado de un volumen de material del orden de 200.000 m³, que permitía conseguir un calado de -10 m. en la dársena y en los muelles en los que se realizan operaciones comerciales del puerto de Maó. Sobre el material a dragar se realizaron todos los estudios técnicos previos necesarios, según lo estipulado en las "Recomendaciones para la Gestión del Material Dragado en los Puertos Españoles" (RGMD) del CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Ministerio de Fomento), las cuales, en el momento de tramitación de las obras, eran el único documento oficial, y de referencia en el Sistema Portuario Español para la materia.

ASPECTOS AMBIENTALES DE LA OBRA

Tramitación ambiental de la obra

El análisis químico y granulométrico de los materiales a dragar concluyó que la clasificación de dicho material pertenece a la CATEGORIA II (según las RGMD del CEDEX), que corresponde a materiales con concentraciones moderadas de contaminantes, los cuales pueden ser vertidos al mar de forma controlada.

En cumplimiento de lo establecido en los puntos 18, 21 y 22 de las RGMD, y con el fin de gestionar y controlar el vertido al mar de los materiales procedentes del dragado, se realizó el "Estudio del punto de vertido y de sus condiciones para la gestión de productos de dragado del Puerto de Mahón", y se redactó el documento "Plan de Seguimiento y Vigilancia Ambiental". Cabe señalar que el punto de vertido seleccionado, ya fue aprobado y autorizado como punto de vertido en anteriores dragados llevados a cabo en el Puerto de Maó, y se encuentra situado fuera del Puerto de Maó, en aguas exteriores y dentro de las 12 millas de distancia que delimitan el mar territorial.



Una vez se dispuso de todos los estudios técnicos (redactados entre los años 2008 y 2012) se procedió a iniciar el proceso de tramitación ambiental del proyecto, sobre el cual cabe destacar los siguientes hitos:

- 7 de febrero de 2012. Petición de informes a las administraciones competentes en la materia de dragado (y vertido) en los puertos españoles de interés general, según lo especificado en la normativa vigente, y en concreto en el Art. 64 del Texto Refundido de la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante aprobado por RDL 2/2011. Las administraciones consultadas fueron:
 - Dirección General de Recursos Pesqueros y Acuicultura. MAGRAMA.
 - D.G. de *Medi Natural, Educació Ambiental i Canvi Climàtic*. Conselleria d'Agricultura, Medi Ambient i Territori (CAMAT)
 - D.G. de *Medi Rural y Marí* (Conselleria d'Agricultura, Medi Ambient i Territori)
 - D.G. *d'Ordenació del Territori. Servei de Costes i Litoral* (CAMAT)
 - Demarcación de Costas en Illes Balears. MAGRAMA.
 - Instituto Español de Oceanografía (IEO).
- 1 de Octubre de 2012. Se solicitó informe de dragado y autorización de vertido a la Capitanía Marítima, adjuntando todos los estudios realizados y los informes favorables de todas las distintas administraciones competentes consultadas.
- 2 de Noviembre de 2012. Recepción de la Autorización del Vertido, con prescripciones, por parte de Capitanía Marítima. Una vez se dispuso de la autorización por parte de la Capitanía Marítima, el pasado 7 de marzo de 2013 se produjo la adjudicación de las obras a la empresa SACYR.
- 26 de marzo de 2013 se comunicó a la Autoridad Portuaria de Baleares (APB) la notificación del DECRETO, por parte del Fiscal Superior en Illes Balears, de suspensión del proyecto de dragado, a raíz de las denuncias sobre el proyecto que realizó al entidad ecologista GOB-MENORCA.
- 10 de octubre de 2013, se comunicó a APB, el DECRETO DEL FISCAL SUPERIOR de fecha 7 de octubre de 2013, relativo a la Diligencia de Investigación penal nº 20/13, sobre el Proyecto en el que acuerda el ARCHIVO de las diligencias por no ser los hechos denunciados constitutivos de infracción penal, y en el que se indica que se tenga en consideración el informe de la Unidad Técnica de la Fiscalía Coordinadora de Medio Ambiente y Urbanismo. El citado informe concluye que "Por las razones expuestas es



absolutamente necesario que antes de tomar la decisión sobre el lugar del depósito del material dragado se estudie en profundidad la potencial afección que pueda generarse sobre el ecosistema por los metales que se pudieran aportar, sugiriendo que este estudio lo lleve a cabo el I.E.O. en coordinación con la Unidad Técnica de esta Fiscalía, destacando que este estudio debe llevarse a cabo a la mayor brevedad posible”.

Para cumplir con lo indicado en el informe de la Unidad Técnica de la Fiscalía, y tras la coordinación pertinente con dicha Unidad Técnica de la Fiscalía, se solicitó con fecha 6 de noviembre de 2013 al Instituto Español de Oceanografía, que participe en el Proyecto del “asunto” mediante la revisión y el control del Plan de Vigilancia Ambiental de las obras de dragado en el puerto de Maó. La APB firmó un contrato con el Instituto Español de Oceanografía (I.E.O.) para la realización de los trabajos descritos anteriormente, cuya validez se establece entre el 18 de enero y el 31 de diciembre de 2014.

Nuevamente, esta vez con fecha 6 de febrero de 2014, se produjo la autorización, con prescripciones, por parte de la Capitanía Marítima para la realización del vertido de 200.000 m³ de material de dragado de CATEGORIA II, procedente del interior del puerto de Maó, en el punto de vertido seleccionado.

Eliminación a vertedero terrestre de la parte más contaminada de los lodos de dragado

Aunque la APB disponía de las pertinentes autorizaciones, debido a las inquietudes que manifestaron las instituciones y la sociedad menorquina sobre el vertido al mar de una parte de los materiales de dragado, la APB decidió llevar a vertedero terrestre la parte más contaminada de estos materiales. De los 200.000 m³ de material a dragar, unos 29.000 m³ se decidió que fueran depositados en vertedero terrestre. Estos materiales, están catalogados como “Lodos de drenaje distintos de los especificados en el código 170505” (código 17 05 06), según el Catálogo Europeo de Residuos (CER), y deben ser tratados antes de su depósito en vertedero para, por un lado, reducir el volumen total de sedimentos a depositar y, por otro lado, alcanzar los valores límites de aceptación de los residuos en los vertederos de residuos no peligrosos establecidos por la Orden AAA/661/2013.

Los resultados de los análisis realizados sobre las muestras deshidratadas, indicaron que todos los parámetros cumplen los criterios para vertederos de residuos no peligrosos. En consecuencia, se realizaron los trámites para su aceptación en el vertedero terrestre de, *Es Milà II*, en la isla de Menorca.

Plan de Vigilancia Ambiental

El “Plan de Vigilancia Ambiental (PVA) de las obras de dragado del Puerto de Mahón y posterior vertido al mar del material dragado”, fue elaborado a principios de 2013 por la empresa CBBA (Centre Balear de Biologia Aplicada), en cumplimiento de las Reco-



mendaciones del CEDEX. Es un documento técnico para incorporar a la Dirección de Obra del proyecto, con una estructura cronológica para facilitar su coordinación, seguimiento y cumplimiento. Su finalidad es establecer un sistema de medidas protectoras y correctoras durante la obra, con el fin de: (i) garantizar que los niveles de impacto no superen las evaluaciones de las hipótesis previas; (ii) medir el grado de ajuste entre los impactos previstos y los reales; (iii) definir, en su caso, medidas adicionales; (iv) seguir el grado de comportamiento de las variables ambientales a corto, medio y largo plazo; (v) reaccionar oportunamente frente a impactos inesperados; y (vi) corregir los impactos residuales. El PVA proponía las actuaciones previstas en relación al medioambiente durante la adecuación del proyecto. La caracterización previa de los sedimentos a dragar había puesto de manifiesto la existencia de niveles muy altos de metales pesados, que en algunos puntos llegaban a categoría III del CEDEX para el mercurio. Había que tener en cuenta, también, la existencia en zonas próximas al dragado y vertido del material, de áreas de interés ambiental, de baño, marisqueo, acuicultura y caladeros tradicionales de pesca.

Para atender la solicitud de la Autoridad Portuaria de Baleares (APB), de revisión y control de este PVA y estudio de la potencial afección del vertido al mar de los materiales procedentes del dragado sobre los ecosistemas marinos, el Instituto Español de Oceanografía (IEO) configuró un equipo de expertos en contaminación, hidrografía, cartografía del fondo marino y hábitats bentónicos vulnerables. El 16 Diciembre 2013 se elaboró el primer informe, con las siguientes recomendaciones al proyecto de dragado:

- Gestionar de forma diferente, preferentemente en tierra, los sedimentos de las sub-áreas más contaminadas por metales pesados, que superaban los niveles II de las Recomendaciones del CEDEX, para reducir la toxicidad del vertido al mar.
- Elaborar un mapa geostrófico de corrientes marinas al Este de Menorca, y fondear un perfilador *Doppler* en el área de vertido, para obtener en tiempo real información sobre las corrientes a lo largo de la columna de agua, durante los trabajos de dragado y vertido. Ello permitirá verificar los modelos hidrodinámicos y trasladar a corrientes marinas las condiciones para el vertido, impuestas por el Capitán Marítimo, hasta el momento basadas en el viento.
- Incorporar nuevos parámetros al PVA, como los contaminantes orgánicos u órganometálicos (PCBs, PAHs y TBT), presentes en sedimentos portuarios.
- Ampliar la caracterización del medio marino en el punto de vertido y área adyacente, por lo que respecta a contaminantes en agua, sedimentos, organismos bio-indicadores (p.ej. el molusco *gasterópodo Stramonita haemastoma*) y especies pesqueras de interés comercial.
- Cartografiar el fondo marino en el punto de vertido y área adyacente, y sus biocenosis bentónicas.



- Mejorar la caracterización del estado de las praderas de *Posidonia oceanica* próximas al vertido e incluir el molusco bivalvo *Pinna nobilis*, especie endémica del Mediterráneo y protegida.
- Evaluar el estado fisiológico y citológico en mejillones (*Mytilus galloprovincialis*) del puerto de Maó con bio-marcadores de estrés general (tiempos de supervivencia en condiciones aéreas: SoS; estabilidad de la membrana lisosomal: LMS) y estimar el efecto biológico Imposex en *S. haemastoma*.

Entre Enero y Marzo 2014, diversos grupos de investigación del IEO realizaron las siguientes campañas científicas, para caracterizar el medio marino en el punto de vertido y áreas adyacentes. En estas actividades colaboraron técnicos del CBBA y el Institut Mediterrani d'Estudis Avançats y pescadores locales.

- A bordo del B/O *Socib* se recopilaron datos de temperatura, conductividad (salinidad), presión, oxígeno disuelto, PH, fluorescencia y turbidez, con una batisonda CTD SBE-911 en 54 estaciones, en las que también se tomaron muestras de agua superficial con botellas hidrográficas, para la determinación de contaminantes disueltos ($<0.22 \mu\text{m}$), y se realizaron 7 estaciones con draga Box corer, de recogida de muestras para la determinación de contaminantes en sedimento superficial, distribuidas a lo largo del puerto de Maó y su área de influencia y en el punto de vertido.
- A bordo del B/O *Francisco de Paula Navarro* se cartografió el fondo marino con ecosonda multi-haz y sísmica de reflexión profunda (178.71 millas náuticas navegadas y 5958.80 Ha cartografiadas, con una cobertura del 100%) y se tomaron muestras con draga y patín epi-bentónico (30 y 37 estaciones, respectivamente), del sedimento y mega-bentos de fondos blandos.
- Con escafandra autónoma se estudiaron las praderas de *Posidonia oceanica* (densidad a 10 y 20 m de profundidad, límite inferior y contaminantes) y el bivalvo *P. nobilis* (densidad, supervivencia y epifitismo) en 7 localidades litorales, distribuidas entre La Mola y la Isla del Aire (8 km de costa), al norte y sur del puerto de Maó, respectivamente, en las que también se tomaron muestras de sedimento, para análisis granulométrico y perfiles de CTD a lo largo de la columna de agua, de las variables oceanográficas antes mencionadas.
- Se obtuvieron ejemplares de mejillón en dos estaciones de miticultura del puerto de Maó y de *S. haemastoma* en 3 localidades litorales al norte y sur del Puerto, para la determinación de contaminantes y los bio-marcadores SoS y LMS.
- Para evaluar posibles riesgos derivados del consumo de productos de la pesca, en los caladeros al Este-Sur y Oeste-Suroeste de Menorca, donde opera la flota de Maó y Ciutadella, respectivamente, se recogieron muestras de tres especies objetivo de la pesquería de artes menores y arrastre de la Isla: salmonete *Mullus surmuletus*, cabracho *Scorpanea scrofa* y rape *Lophius piscatorius*.



RETOS DEL SIGLO XXI PARA LOS PUERTOS Y LAS COSTAS

El análisis de datos y muestras se ha realizado siguiendo los protocolos aplicados en los proyectos de investigación y programas de seguimiento científico del medio marino, que desarrolla en IEO y que periódicamente se someten a controles de calidad y ejercicios de inter-calibración. De los resultados obtenidos se extraen las siguientes conclusiones:

- El punto de vertido está situado en una zona de escaso relieve (pendiente media 0.79°) y un fondo marino bastante homogéneo, previamente impactado por el vertido de obras de dragado anteriores, en el que también se detectaron marcas de artes de arrastre (Fig. 1). La concavidad del fondo en el punto de vertido es adecuada para el confinamiento blando de los sedimentos dragados. El punto de vertido mostró una diversidad y densidad de mega-bentos menor a las de otras áreas próximas estudiadas (Canal de Menorca). Las algas rojas calcáreas fueron el grupo más importante en términos de biomasa, en especial *Lithothamnion corallioides*, *Phymatolithon calcareum* y *Spongites fruticulosus*, que conforman el maërl. Sus densidades máximas se detectaron al sur-suroeste del área, mientras la zona de vertido presentó sus valores mínimos (Fig. 1).
- Los modelos de corrientes geostroóficas al Este de Menorca, mostraron velocidades de hasta 50 cm/s (~ 1 nudo) y una importante actividad meso-escalar, de dirección e intensidad variable, que puede llegar a enmascarar el patrón estable de corriente en dirección Norte a Sur.
- Las praderas de *Posidonia oceanica* estudiadas mostraron densidades de haces similares a las de otras áreas de Menorca, como Cala Sant Esteve y Addaia, a excepción del puerto de Maó, con densidades menores (Fig. 2). Las densidades de *Pinna nobilis* fueron superiores a las estimadas en Mallorca (Cala d'Or) e inferiores a las del Parque Nacional Marítimo-Terrestre de Cabrera (Fig. 2).
- Las aguas al este de Menorca mostraron concentraciones de metales traza (Ag, Cd, Co, Cu, Fe, Mo, Ni, Pb, V y Zn) típicas de áreas costeras y abiertas del Mediterráneo. Los valores mayores se registraron en estaciones más cercanas a la costa, si bien en todos los casos los niveles se encuentran en los rangos ambientales típicos de aguas no afectados por procesos de contaminación.
- Los hidrocarburos aromáticos en sedimentos sólo mostraron concentraciones de benzo-a-antraceno y benzo(g,h,i)perileno que pueden provocar efectos tóxicos en organismos, en las estaciones más interiores del puerto de Maó, mientras que las concentraciones detectadas en el resto de estaciones fueron inferiores a los criterios de referencia (convenios OSPAR y Barcelona). En los compuestos órgano-clorados analizados (pesticidas y PCBs), sólo se superaron los criterios eco-toxicológicos para PCBs en los sedimentos del interior del Puerto. En los sedimentos del punto de vertido también se detectaron niveles de PCBs próximos al criterio ambiental, que podrían tener su origen en vertidos de dragados anteriores (Fig. 3). Por lo que respecta a los metales pesados, sus concentraciones en sedimentos fueron claramente superiores en las estaciones más interiores del puerto de Maó.

- Los niveles de metales pesados cuantificados en mejillones de bateas del puerto de Maó fueron muy inferiores al límite legal permitido para el consumo humano para el Hg, Cd y Pb, y en el caso de los contaminantes orgánicos fueron también inferiores a los criterios de referencia. Sin embargo, los biomarcadores analizados SoS y LMS mostraron valores inferiores a los criterios de valoración ambiental establecidos en esta especie, lo que indica niveles de estrés citológico y fisiológico muy altos, potencialmente asociados a una baja calidad ambiental química del agua, aunque no se pueden descartar otros factores no considerados en el estudio, como infecciones en los organismos.
- En las tres especies de interés comercial estudiadas, las concentraciones de Pb y Cd fueron muy inferiores a los límites máximos permitidos para consumo humano, mientras que dos ejemplares de salmonete (14% de las muestras), capturados por la flota de Ciutadella, sobrepasaron ligeramente el límite de Pb permitido. Para Hg, dos ejemplares de rape (18% de las muestras) de gran talla (~70 cm), capturados por la flota de Maó, sobrepasaron el contenido máximo permitido, mientras que las concentraciones en cabracho y salmonete fueron muy inferiores. Ver Tabla 1.

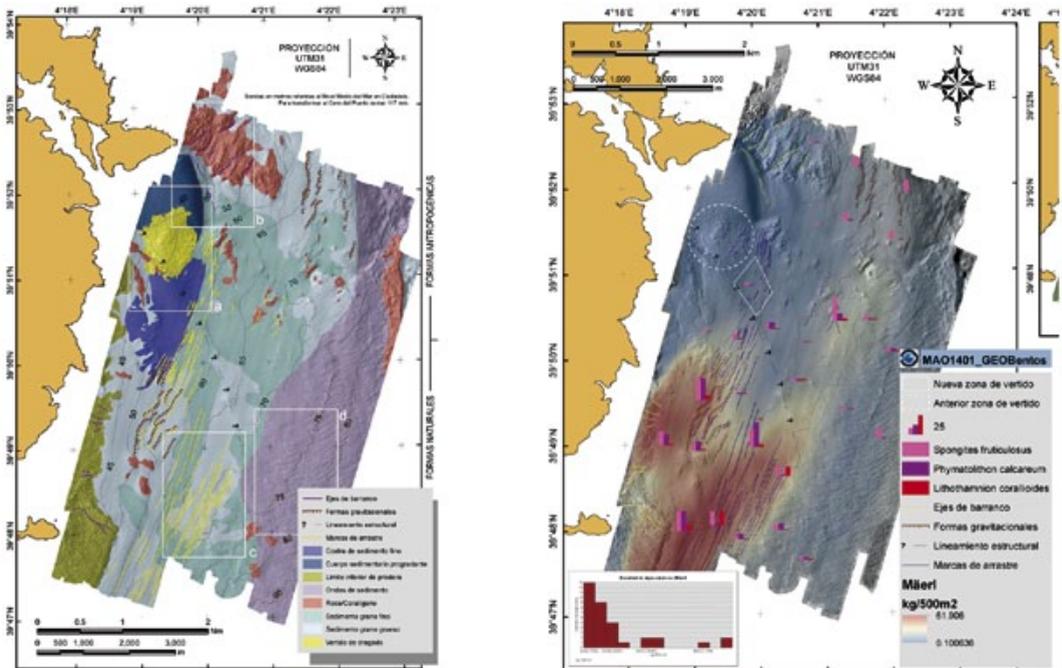


Figura 1.- Mapa morfológico del cartografiado del punto de vertido y área adyacente con ecosonda multi-haz y sísmica de reflexión profunda (izquierda), y densidad de algas rojas calcáreas formadoras de los fondos de maërl, estimadas con patin epi-bentónico en el punto de vertido y área adyacente (derecha).

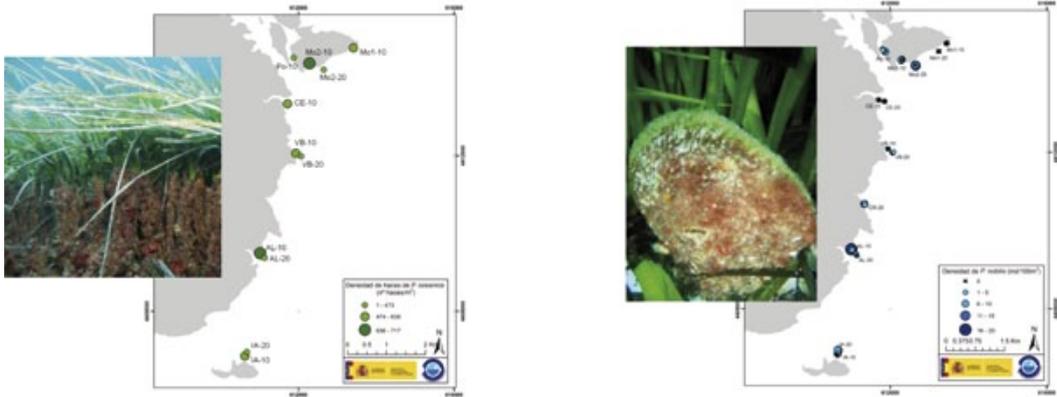


Figura 2.- Densidad de haces de *Posidonia oceanica* (izquierda) y de *Pinna nobilis* (derecha) en la zona litoral entre La Mola y la Isla del Aire, adyacente al punto de vertido.

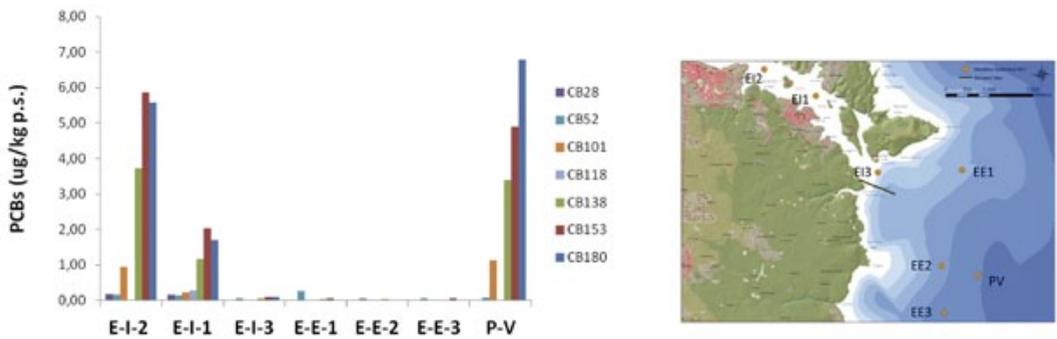


Figura 3.- Concentraciones de los 7 PCBs ICES ($\mu\text{g}/\text{kg ps}$), determinadas en sedimentos del canal del puerto de Maó, punto de vertido y área adyacente (ver mapa).



Área	Muestra	Talla (cm)	Peso (g)	As	Cd	Cu	Hg	Pb	Zn
Maó	LPISC M1	71.7	3600	20.3	0.001	0.118	1.88	0.011	4.10
	LPISC M2	72.0	4850	20.7	0.001	0.110	0.702	< LD	3.23
	LPISC M3	45.2	1202	7.75	< LD	0.130	0.800	< LD	3.31
	LPISC M4	68.6	4143	44.3	0.001	0.152	1.63	< LD	3.79
	LPISC M5	47.2	1564	7.19	< LD	0.134	0.189	< LD	3.62
	LPISC M6	54.2	1787	5.26	0.004	0.155	0.439	< LD	3.16
Ciutadella	LPISC C1	48.5	1275	8.06	0.002	0.115	0.106	< LD	3.71
	LPISC C2	56.0	2359	8.16	0.002	0.100	0.884	< LD	3.15
	LPISC C3	67.3	3201	8.83	< LD	0.066	0.885	< LD	2.75
	LPISC C4	47.7	1195	8.54	< LD	0.092	0.245	0.012	3.53
	LPISC C5	69.8	4371	12.6	0.002	0.099	0.773	0.025	3.34

Tabla 1.- Concentraciones de metales pesados (mg/kg ph), determinados en ejemplares de rape (*Lophius piscatorius*) capturados por la flota pesquera de Menorca. Se resalta el valor de las muestras que sobrepasaron el contenido máximo permitido.

ASPECTOS ARQUEOLÓGICOS DE LA OBRA

Antecedentes

El puerto de Mahón y su entorno fueron declarados B.I.C. (R.I.) - 53 - 0000355 – 00000 (fecha incoación 23 – 10 – 1981; fecha declaración 12 – 02- 1996), como conjunto histórico y arqueológico. De acuerdo con el Decreto 14/2011, de 25 de febrero, por el cual se aprueba el Reglamento de intervenciones arqueológicas y paleontológicas de las Islas Baleares, para poder llevar a cabo cualquier remoción de tierras es necesario solicitar autorización al órgano competente del Consell Insular de Menorca (CIM), realizar una valoración previa de la posible afección al patrimonio histórico así como desarrollar un control arqueológico durante la realización de las obras.



Estudios previos

Con el fin de determinar el posible impacto del dragado en el conjunto histórico arqueológico del Puerto de Mahón, se realizaron campañas de prospección geofísica, una completa investigación documental, prospecciones visuales mediante buceadores arqueólogos y sondeos arqueológicos submarinos.



Figura 4. Cartografía del puerto de Maó de 1781. MCU. Archivo General de Simancas.

Estos estudios previos permitieron dividir el área a dragar en tres zonas bien diferenciadas. La “Zona 1” fue aquella en la que se habían realizado dragados anteriormente. La “Zona 2” correspondía con áreas que no habían sido dragadas previamente, pero en las que no se habían detectado elementos arqueológicos. Por último, aquella zona en la que los estudios previos determinaron la existencia de gran cantidad de material arqueológico, fue denominada “Zona 3”.

En comunicación con la APB, el CIM aprobó una metodología de seguimiento que garantizase la protección del patrimonio arqueológico, mediante una gestión diferenciada de cada una de las tres zonas en las que se había dividido la zona a dragar del puerto tras los estudios previos, evitando en la medida de lo posible grandes retrasos en los plazos de obra. Dicho seguimiento fue encargado a la empresa Mediterráneo Servicios Marinos S.L. (en adelante MSM).

DESARROLLO DE LOS TRABAJOS DURANTE LA EJECUCIÓN DEL DRAGADO

El contrato para los trabajos de dragado tuvo su inicio el 15 de febrero de 2014, y desde entonces se aplicaron estrictamente los controles y los umbrales operacionales que exigía el Plan de Vigilancia Ambiental. Todos los resultados de las campañas de seguimiento del PVA se mostraron de forma abierta en la página web www.dragadopuertodemaos.es.

De forma efectiva, las obras de dragado comenzaron la semana del 3 de marzo de 2014, realizándose primeramente las tareas de instalación de las barreras anti-turbidez para la protección de las mejilloneras más cercanas a las zonas de dragado. La semana siguiente se realizó el perfilado del Muelle de Pasajeros. Posteriormente se comenzó con los trabajos de control arqueológico, y con el dragado general. En la obra se adscribieron los siguientes equipos de dragado:

- La draga Neptun Khan es una draga gánguil que ha sido empleada para los trabajos de dragado arqueológico, para los trabajos de disposición a tierra de los materiales más contaminados, y también para los trabajos de dragado general; la capacidad de su cántara es de unos 200 m³ (Fig.5).



Figura 5. Dragado Neptun Khan.



Figura 6. Dragado Von Rocks.

- La draga dipper Von Rocks, auxiliada por el remolcador GPS Battler y los gánguiles Paul y John, que no son autopropulsados, y tienen una capacidad de carga aproximada de 500 m³. (Fig.6).
- La draga gánguil Antignano es una draga gánguil con una capacidad de cántara de 650 m³. (Fig. 7).



Figura 7. Dragado Antignano.



Fig. 8. Operaciones de extendido y secado de los lodos.



El día 12 de julio de 2014 finalizaron las obras de dragado, que cumplieron con los objetivos previstos de mantener la seguridad en las maniobras de los buques, y aumentar la capacidad operativa del puerto de Maó, obteniendo unos calados de -10 m. en toda la dársena y los muelles del puerto de Maó. En total se dragaron aproximadamente unos 200.000 m³, de los cuales unos 20.000 m³ se depositaron en tierra (Fig.8). Previamente a la deposición de los materiales en vertedero terrestre se realizó un secado de los mismos.

En cuanto al desarrollo de los trabajos de seguimiento arqueológico cabe comentar que, la zona 1, de bajo interés arqueológico por haber sido dragada con anterioridad, se asignó a las dragas Von Rocks y Antignano, a las que se asignó un equipo rotativo de arqueólogos a bordo, encargado de realizar una inspección del material extraído 24h al día. La zona 2, no dragada anteriormente, se asignó a la embarcación Neptun Khan, que realizó 154 sondeos en cuadrículas de 20mx20m mediante cazadas con cuchara bivalva, con el fin de documentar la estratigrafía de la zona y detectar la posible presencia de elementos arqueológicos en estado primario. Todo el material de cada uno de los sondeos fue cribado a través de un enrejado de 10x10 cm colocado sobre la cántara y de este modo recuperar la mayor cantidad posible de objetos de carácter patrimonial. Una vez realizados los sondeos y posteriores inmersiones de inspección, la zona 2 fue liberada para su dragado sin criba pero con vigilancia arqueológica a bordo 24 h al día. Por último la zona 3, zona en la que había aparecido gran cantidad de material arqueológico, fue dragada totalmente por la draga Neptun Khan equipada con la criba de 10x10cm, sobre la cántara (Fig.9).



Fig 9. Control arqueológico mediante cribado.



Fig.10. Piezas etiquetadas y embolsadas para inventariar.

El material arqueológico extraído se fue depositando en contenedores con agua de mar habilitados para ello. Simultáneamente a los trabajos en draga un arqueólogo se encargó de fotografiar, dibujar e inventariar el material (Fig.10). Se acordó con el CIM el traslado de parte del material a las instalaciones de experimentación con agua de mar de MSM, para su estabilización, consolidación y estudio.

Se recuperaron un total de 5.000 piezas. De ellas, 2500 piezas se devolvieron al mar en determinadas condiciones de acuerdo con las indicaciones del CIM por no poseer interés museístico, científico o patrimonial. Las otras 2500 piezas se encuentran en proceso de estabilización química en las instalaciones de MSM SL para su posterior depósito en el Museo de Mahón.

Los trabajos de seguimiento arqueológico han permitido delimitar la zona de fondeadero de interés patrimonial del puerto de Mahón, así como su evolución a lo largo de la Historia. Gracias a los mapas de dispersión de los materiales arqueológicos documentados podremos delimitar las zonas de uso puerto y su interacción con el núcleo urbano desde la Antigüedad hasta época contemporánea. Los materiales recuperados nos permiten vislumbrar un arco cronológico que va desde el S. IV. a.C. hasta la actualidad. Destacan cerámicas de importación italianas de época renacentista, porcelanas chinas y lozas inglesas de época victoriana. Los objetos recuperados aportan pruebas que van más allá de la documentación escrita sobre las dinámicas comerciales y ocupacionales del puerto y la ciudad de Mahón; nos permiten escribir la historia del puerto desde la materialidad. Los resultados de estas investigaciones se plasmarán en un volumen de difusión científica, lo que además de servir de base para futuras intervenciones y clasificaciones, pondrá en valor todo el esfuerzo económico y laboral invertido durante las labores de seguimiento del dragado del puerto de Mahón.

El Plan de Vigilancia Ambiental se desarrolló sin incidencias reseñables. Es necesario mencionar que para asegurar que la deposición de los vertidos se realizaba en lugares del fondo marino con nula afección ambiental se instaló un correntímetro en el Punto de Vertido que permitía ver en tiempo real la intensidad y magnitud de las corrientes marinas (Fig. 11). Para el seguimiento del PVA se creó una Comisión formada por técnicos pertenecientes a la APB, el IEO, 3 Direcciones Generales de la CAIB (Pesca, Salud-Consumo, y Costas-Litoral), y a las empresas consultoras IDOM y CBBA. Dicha Comisión se encargó de tomar las decisiones que se pudieran plantear durante el desarrollo de las obras.



Figura 11. Boya de medición de las condiciones marinas y meteorológicas, instalada en el Punto de Vertido.



GRUPO DE TRABAJO ASPECTOS POSITIVOS DEL DRAGADO: “INNOVACIÓN MEDIOAMBIENTAL DEL PLAN DE MANTENIMIENTO DE DRAGADO EN EL PUERTO DE LISBOA ”.



Alberto del Pino Rivera¹, Teresa Sá Pereira², Rita Ramos²

**Grupo de trabajo del comité técnico de gestión de la costa:
Aspectos positivos del dragado**

LISBOA: PUERTO Y ENTORNO NATURAL

El Puerto de Lisboa está situado en uno de los estuarios más importantes de la Península Ibérica. Su importancia procede no únicamente de sus dimensiones pero también de sus condiciones medioambientales, sociales y demográficas.

La gran diversidad morfológica del estuario del río Tajo es origen de una considerable diversidad de hábitats y especies. Gran parte del estuario y en consecuencia del área perteneciente a la jurisdicción de las autoridades portuarias se encuentra protegida por diversos estados de protección:

- A nivel nacional, como área protegida de la Reserva Natural del río Tajo.
- A nivel europeo, espacio protegido por la Red Natura 2000.
- A nivel internacional, lugar incluido en la lista Ramsar de espacios protegidos.

El contexto medioambiental del puerto implica una atención especial hacia el desarrollo sostenible. En este sentido, el puerto de Lisboa :

¹ Dravosa.

² Autoridad Portuaria de Lisboa.



- Contribuye a la defensa del medio ambiente en todas sus actividades portuarias.
- Defiende una política de actuación dirigida a la mejora y respecto del medio ambiente en todas sus inversiones y adquisición de nuevo material.
- Fija objetivos concretos en relación al medio ambiente así como metas para alcanzar estos objetivos.
- Emplea métodos internos destinados a promover un uso racional de los recursos existentes y minimizar ruidos y emisiones en el puerto y todas las zonas marítimas y urbanas adyacentes.
- Promueve el reciclaje en todas las actuaciones portuarias.
- Se compromete en la reducción del impacto medioambiental derivado del transporte terrestre y marítimo.



Fig. 1. Estuario del Río Tajo.

LISBOA: PUERTO Y ENTORNO SOCIAL

El área de influencia del Puerto de Lisboa se prolonga al interior a regiones del centro de Portugal, Lisboa, el Valle del Tajo, Alentejo y Algarve, así como regiones del país vecino: Extremadura y Andalucía, incluso considerando otras redes relacionadas con el transporte podría extenderse a Castilla la Mancha y Madrid.



El área de jurisdicción del Puerto incluye 11 municipios en ambos lados del estuario del río Tajo, incluyendo la ciudad de Lisboa.

La estratégica política y dirección territorial está organizada en tres ámbitos (nacional, regional y municipal) dentro de un marco de continuada interacción coordinada. En este contexto y en consideración a la actividad portuaria y el área territorial del Puerto de Lisboa, tres pilares son fundamentales: colaborar, comunicar y contribuir con la sociedad.

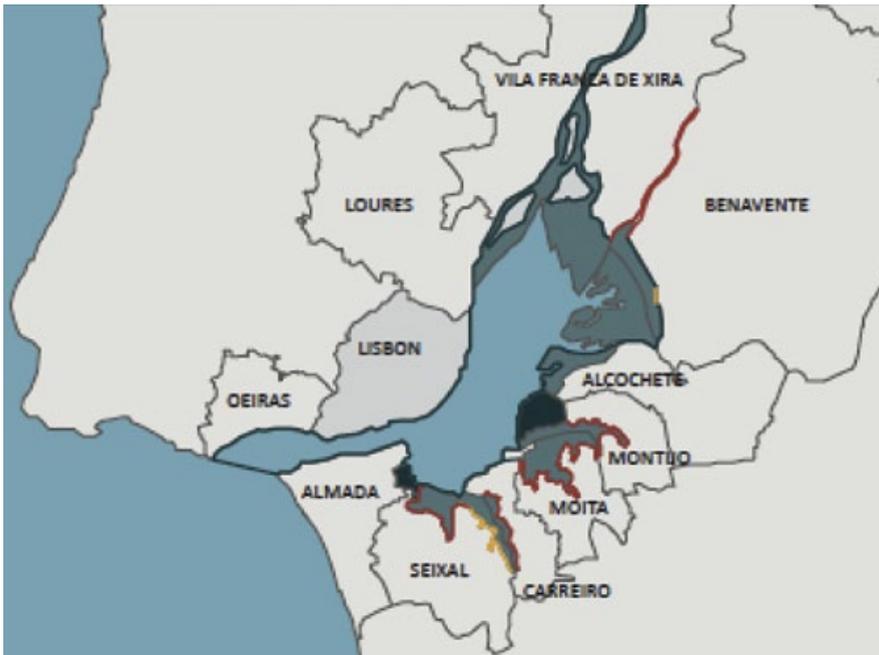


Fig.2. Jurisdicción del Puerto de Lisboa y distritos vecinos.



Fig.3 Entorno social y atracciones turísticas relacionadas con el Puerto de Lisboa.

PLAN INNOVADOR DE DRAGADO EN UN ENTORNO MEDIOAMBIENTAL SENSIBLE (2010-2015)

En el ámbito de las obligaciones derivadas de la adaptación a la legislación portuguesa de la Directiva Marco del Agua, las Autoridades del Puerto de Lisboa (Administração do Porto de Lisbon, APL) prepararon su plan de mantenimiento de dragado en un horizonte de 5 años (2010-2015) con el que pretendían obtener los permisos medioambientales necesarios para realizar las obras de dragado que aseguren la operatividad del puerto, evitando así en la medida de lo posible los tiempos derivados de los trámites y procedimientos administrativos.

El Plan recoge estas condiciones y formaliza un programa que debe ser enviado a las autoridades medioambientales para su aprobación. El Plan de Gestión del Estuario del Río Tajo (POETejo) también tomó en cuenta este plan revelando su innovador concepto.

El plan contiene el marco biofísico, social y económico del Puerto de Lisboa, detallando sus características geográficas en relación a todos los aspectos medioambientales, accesos marítimos y desarrollo así como situación económica, legal y administrativa.

En primer lugar identifica las estructuras portuarias existentes, el sistema de accesos marítimos, incluidos los canales de entrada y navegación del Estuario, proporcionando una detallada situación y clasificación de todas las zonas objeto de dragado. Además establece los calendarios y estimación de los volúmenes de dragado en cada área.

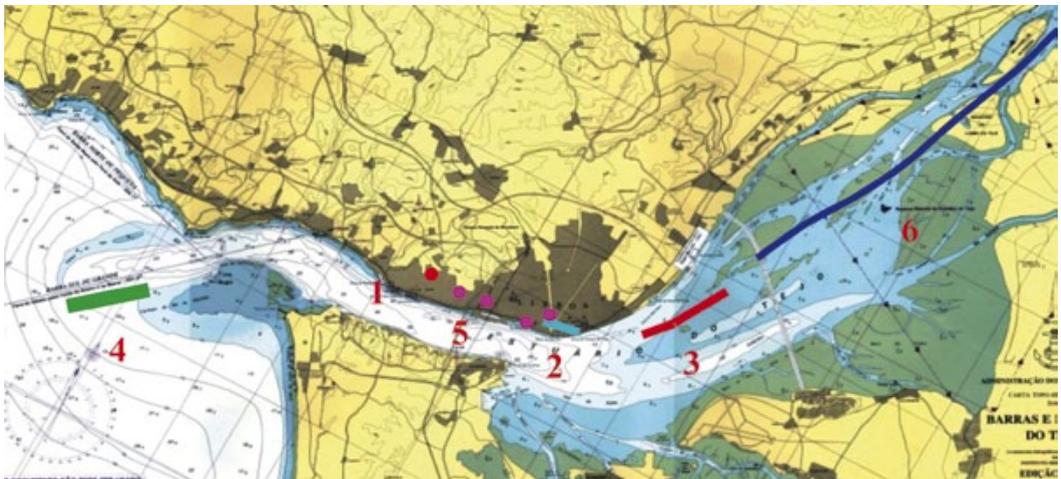


Fig.4. Zonas de dragado de mantenimiento.



	Area	Area of action (ha)	Annual volume (m ³)	Levels (zh) (m)	Number of annual interventions
1	VTS	2,	30,000	-4.0	1
2	Alcântara area	16	200,000	Between -5 and -15.5	from 3 to 4
3	Santa Apolónia area	29	450,000	Between -7.3 and -11.5	from 3 to 4
4	Entrance bar channel	Variable	250,000	-17.5	1
5	Marine	32	100,000	Between -4 and -8.3	1
6	Cala das Barcas	10	50,000	-3.5	1
Total		89	1,080,000		

Tabla 1. Calendario y estimación de los volúmenes de dragado.

El plan también detalla los procedimientos de dragado establecidos por la APL y la inmersión de sedimentos en especial lo relacionado con la comprobación de la posición correcta de la draga y depósito de sedimentos, así como los volúmenes dragados. Detalla los métodos usados por la APL con ejemplos concretos donde describen los tipos de dragas utilizadas, formas de dragado y estimación de presupuestos.

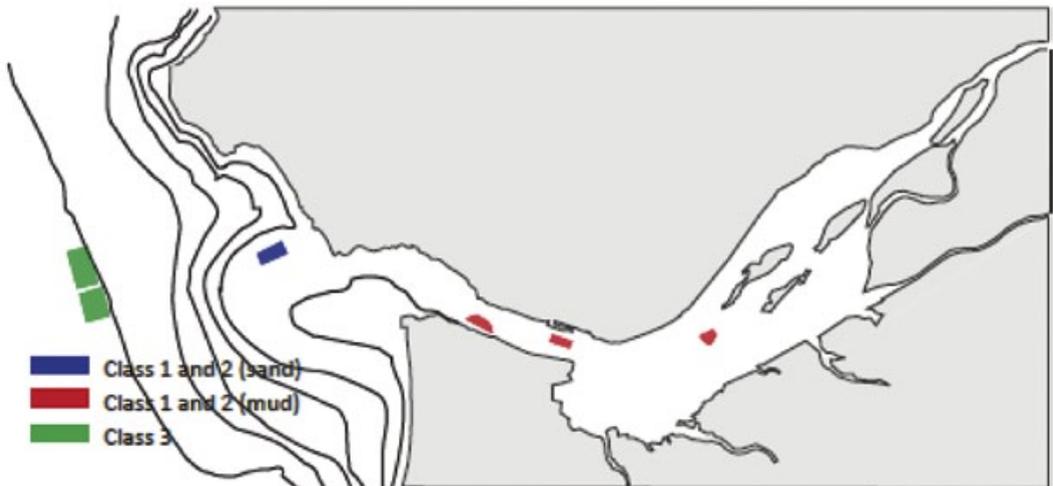


Fig.5. Zonas de inmersión de sedimentos.

En relación a la inmersión de sedimentos, fue necesario considerar que los sedimentos inmersos en el Estuario eran desplazados por las corrientes marinas antes de alcanzar el suelo del Estuario. El depósito del material no solo dependía del lugar donde era depositado sino también de las mareas. Por ello, el método que fue usado y descrito en el plan consistió en la estimación de las áreas donde el material dragado debía ser depositado como función de la situación de las mareas en el momento del depósito y su velocidad.

Esta estimación fue realizada en base a modelos matemáticos que hicieron posible el cálculo de la posición individual de las partículas de los sedimentos. Simultáneamente se dividió el estuario en tres áreas con diferentes características en relación con el depósito de sedimentos. Un análisis estadístico de las áreas donde se planeaba arrojar los sedimentos hizo posible comparar su idoneidad.

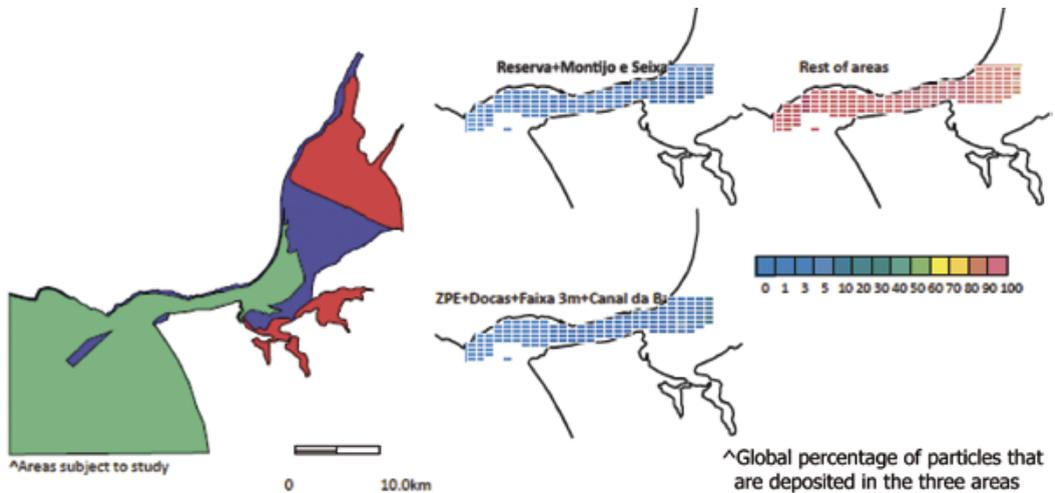


Fig.6. Clasificación del estuario en relación al depósito de sedimentos.

El plan incluye todos los temas relacionados y que afectan al medio ambiente durante el proceso de dragado, describiendo la situación existente y presentando las acciones realizadas por la APL y tareas de monitorización realizadas en las zonas de dragado y de inmersión de sedimentos. También incluye un programa prioritario para la exhaustiva clasificación de los sedimentos, diferenciando aquellos procedentes de áreas no contaminadas de los que presentan algún tipo de contaminación y describe la forma contractual y estimación de costos.



Fig.7. Entorno Puerto de Lisboa.

La aprobación del plan por parte de las autoridades medioambientales en un espacio de tiempo récord de ocho meses constituyó un elemento clave para realizar por parte de la APL las tareas de mantenimiento y dragado por un lado en un entorno de extrema complejidad medioambiental y social, y por otro en zonas donde son necesarias las tareas de mantenimiento y las áreas a dragar presentan gran irregularidad.

UN EJEMPLO DE COOPERACIÓN CON EL ENTORNO: CAIS DO SODRÉ

Cais do Sodré recibió su nombre de la palabra “cais” que en portugués significa puerto y “Sodré”, el apellido de una familia portuguesa del siglo XVII dedicada a negocios relacionados con el mar. El área fue reconstruida tras el terremoto de 1755 y actualmente es una de las zonas de moda de la capital portuguesa, con numerosos bares, clubs y bonitas tiendas de pescadores. Además Cais do Sodré es una importante terminal: dos ferrys unen Lisboa con Cacilhas (Almada), estación de autobuses y contiene una de las estaciones de metro más importantes de la ciudad. Casi 65000 visitantes pasan por Cais do Sodré cada día.

Después de tres años, un antiguo “cacilheiro”, el Trafaria Praia ha regresado a Cais do Sodré y al Tajo. El Trafaria Praia, ahora obra de arte de la artista Joana Vasconcelos, transportó once millones de pasajeros durante cincuenta años, conectando la ciudad de Lisboa con el margen sur del río Tajo y es ahora una importante atracción turística que la ciudad ofrece a sus visitantes.



Fig.8. Tareas de dragado en Cais do Sodré y retorno del Trafaria Praia.

El dragado no fue solo la respuesta a un problema técnico sino también un modo de promover el turismo, conectar el puerto con la ciudad de Lisboa y recuperar un hermoso fragmento de la memoria colectiva.

El puerto de Lisboa ha visto reconocida la innovación planteada en su plan de mantenimiento de dragado, al quedar preseleccionado, junto a los puertos de Koper, Marsella, Huelva y Rotterdam , por el jurado de ESPO AWARD 2014 . En una edición que premia al proyecto portuario europeo más innovador en materia medio ambiental.



NUEVOS RETOS EN LA GESTIÓN DEL MATERIAL DRAGADO: LAS NUEVAS DIRECTRICES DE DRAGADO



José Sierra Antiñolo¹

1. ¿POR QUÉ Y CÓMO UNAS NUEVAS DIRECTRICES?

Porque después de 20 años ya iba siendo hora, así de sencillo. Realmente no existía ninguna razón legal, ni presión ambientalista, para elaborar una nueva norma sobre la gestión de los materiales dragados. Sin embargo, Puertos del Estado, promotor de las primeras *Recomendaciones para la Gestión del Material de Dragado en los Puertos Españoles* (RGMD) elaboradas por el CEDEX en 1994, consciente de los avances científicos y normativos producidos desde entonces, en 2006 volvió a encargar al CEDEX un estudio de base para la revisión de las RGMD, con objeto de elaborar posteriormente una versión actualizada de las mismas. Este trabajo previo se entregó a finales de 2008. Dada la complejidad del documento, las reuniones entre CEDEX y Puertos del Estado para publicar la versión actualizada, se dilataron tanto en el tiempo que dieron lugar a la publicación de dos leyes, las cuales propiciaron la entrada de nuevos actores. La primera de ellas, la Ley 41/2010, de Protección del Medio Marino, habilita al Gobierno para aprobar directrices comunes a todas las estrategias marinas en aspectos tales como los vertidos al mar (Art. 4(2)). Ello propició que en 2011 el Director General para la Sostenibilidad de la Costa y del Mar dirigiera un escrito al Presidente de PdE para la creación de un grupo de trabajo liderado por esa D.G., cuyo cometido sería el de elaborar unas nuevas directrices de dragado. Posteriormente, en julio de 2011, se aprobó la actual ley de residuos que daba un nuevo tratamiento a los materiales de dragado con respecto a la anterior ley de residuos de 1998.

¹ Puertos del Estado.



Partiendo del documento elaborado en 2008 por el CEDEX para Puertos del Estado, y de los distintos documentos surgidos de las reuniones CEDEX-PdE, la DG de Costas elaboró un documento de trabajo y convocó a la Comisión Interministerial de Estrategias Marinas (CIEM) para su presentación y discusión, dando como resultado la creación de un grupo de trabajo formado por la DG de Costas, la SDG de Residuos, el Instituto Español de Oceanografía (IEO), el CEDEX y PdE. Dicho grupo presentó en un proyecto de Directrices de Dragado que fue aprobado por la CIEM abril de este año con el título “*Directrices para la gestión del material de dragado y su reubicación en aguas del dominio público marítimo terrestre*” (DGMD). Sin embargo, dado lo novedoso de estas nuevas Directrices, se acordó en el seno de la CIEM que no se les daría rango normativo (probablemente como Real Decreto) hasta pasado un período de prueba, durante el cual se ajustarían y clarificarían los aspectos de las directrices que fuesen mejorables. Pasado este período transitorio, las directrices se remitirían al BOE.

Las Directrices de dragado aprobadas por la CIEM, finalmente lideradas conjuntamente por la DG de Costas y por PdE, recogen los aspectos ambientales de las operaciones de dragado y de vertido, y están dirigidas únicamente a los dragados cuyo objeto sea la eliminación de sedimentos² dentro del dominio público marítimo terrestre.

2. MATERIALES DE DRAGADO & RESIDUOS

Un residuo es una sustancia u objeto cuyo poseedor deseche o tenga que desechar. Así un residuo va desde una colilla hasta el humo de las fábricas, pasando por animales muertos no sacrificados. De esta forma, los materiales procedentes de dragado cuyo objeto sea la eliminación de sedimentos son, definitiva y absolutamente, residuos, estén o no contaminados. Esto es así al menos desde los años 70, década en la que se publicó la anterior Directiva de residuos (1975) y nacieron ciertos Convenios Internacionales (CI) para el vertido deliberado al mar de desechos desde buques y aeronaves (1972). Sin embargo, y de ahí puede venir la confusión, tanto en las Directivas europeas como en los CI, los materiales de dragado han gozado de una atención particular vistas sus especiales características. Respecto a la norma de residuos, la anterior Ley 10/1998 de residuos, que incorporó las últimas modificaciones de la Directiva del 75, dejaba fuera de su ámbito de aplicación a “*Los vertidos desde buques y aeronaves al mar regulados por los tratados internacionales de los que España sea parte*”. Por su parte, los CI de los que España es parte (Londres, OSPAR y Barcelona) han tratado a los materiales dragados de una forma distinta que al resto de desechos vertidos, de modo que todos estos CI han elaborado unas Directrices específicas para regular el vertido de los dragados. El de OSPAR acaba de publicar en junio las nuevas *Directrices para la Gestión del Material Dragado en el Mar* (Acuerdo 2014-06).

² También incluyen los dragados realizados en el interior de las aguas portuarias abrigadas (Zona I) cuya finalidad sea extraer materiales de relleno. El resto de dragados para extracción de arenas, es decir, fuera de las aguas abrigadas, ya sea para rellenos o para alimentación de playas se registrarán por unas nuevas directrices específicas.



La nueva Directiva de Residuos de 2008 (2008/98/CE), que deroga la del 75, fue incorporada al derecho interno con la Ley 22/2011. El Art. 2(3) excluye de su ámbito de aplicación a “los sedimentos reubicados en el interior de las aguas superficiales a efectos de gestión de las aguas y de las vías navegables, de prevención de las inundaciones o de mitigación de los efectos de las inundaciones y de las sequías, o de creación de nuevas superficies de terreno, si se demuestra que dichos sedimentos son no peligrosos”. Esta nueva definición rompe con los CI dado que éstos no definen explícitamente lo que se entiende por sedimento peligroso (o no peligroso), cosa que sí hace, y hacía desde 1975, la norma de residuos. Según la actual ley de residuos, un sedimento es peligroso si cumple alguna de las 15 características (códigos H) establecidas en su anejo III. Por su parte, los CI sólo establecen si un sedimento está contaminado a efectos de su vertido al mar. El largo título de las nuevas Directrices dejan entrever su vocación de resolver la incertidumbre de la legislación de residuos. Desde este punto de vista las Directrices resultan novedosas en relación con los instrumentos que se han desarrollado hasta ahora en otros países de la Unión Europea, afectados al igual que España por la indefinición conceptual del término “sedimento no peligroso”. El tratamiento de este tema en otros países europeos va desde considerar al material dragado como residuo sometido a los ensayos de caracterización establecidos en la Directiva de residuos (códigos H del Anejo III) hasta considerar que la Directiva de residuos no les resulta de aplicación en caso de no gestionarse en tierra y, por tanto, su caracterización puede realizarse mediante los análisis o ensayos derivados de los CI.

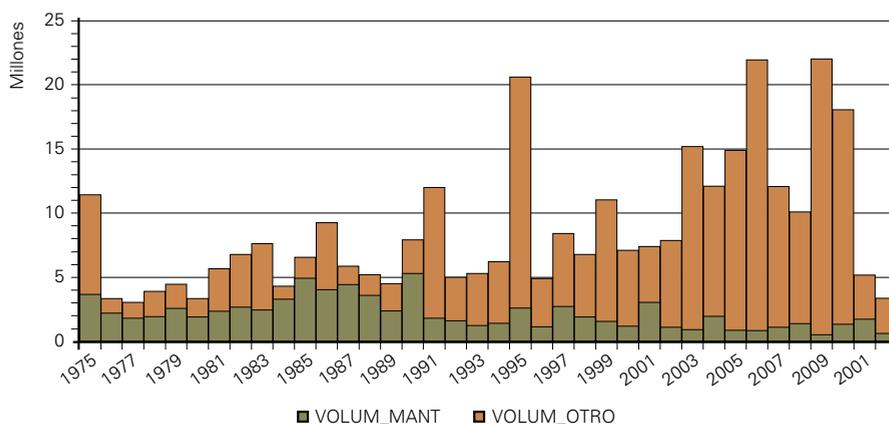


Figura 1. Volumen dragado en los puertos del sistema portuario español, realizados en la serie histórica 1975-2011. Fuente: Actualización del Inventario de dragados. CEDEX, 2012.

3. PRINCIPALES NOVEDADES DE LAS NUEVAS DIRECTRICES

Las Recomendaciones del CEDEX regulaban únicamente el vertido al mar de los materiales de dragado, de acuerdo con los CI que la inspiraron. Las nuevas Directrices regulan, además, la operación de dragado, cubriendo así el espectro de las posibles afecciones al

medio ambiente causados por este tipo de obras. Sin embargo siguen sin contemplar el vertido en tierra. Este punto no tiene una solución fácil por cuanto la Ley 22/2011 de residuos únicamente excluye los dragados que se viertan en aguas superficiales. No obstante, podría existir una vía de escape si se acude a la normativa sobre vertederos de residuos (Directiva 1999/31/CE), la cual excluye de su ámbito de aplicación al depósito de materiales de dragado no peligrosos a lo largo de pequeñas vías de navegación de las cuales se hayan extraído.

Otro cambio importante es el que ha sufrido el esquema general para la clasificación y gestión del material a dragar. En las RGMD de 1994, existían tres clases de materiales: los de Categoría I (limpios); Categoría II (moderadamente contaminados); y Categoría III (contaminados). En las nuevas Directrices, básicamente hay dos tipos de materiales; los que se pueden verter al mar y los que no se pueden verter sin técnica de gestión (categorías A-B y C, respectivamente), es decir, desaparece la Categoría II con todo lo que ello significa. También aparece una tercera categoría y es la de los sedimentos peligrosos. En las dos figuras siguientes se aprecia la diferencia entre ambos esquemas.

Otros cambios no menos importantes se refieren a los pormenores del procedimiento, tales como la toma de muestras, los ensayos químicos y biológicos y las zonas de vertido, cuestiones que se explican en los apartados siguientes. Además, las nuevas directrices se han complementado con un total de seis anejos, en los que se detallan los protocolos y procedimientos necesarios para realizar de forma homogénea la toma de muestras, los ensayos químicos y biológicos y los estudios de campo pertinentes

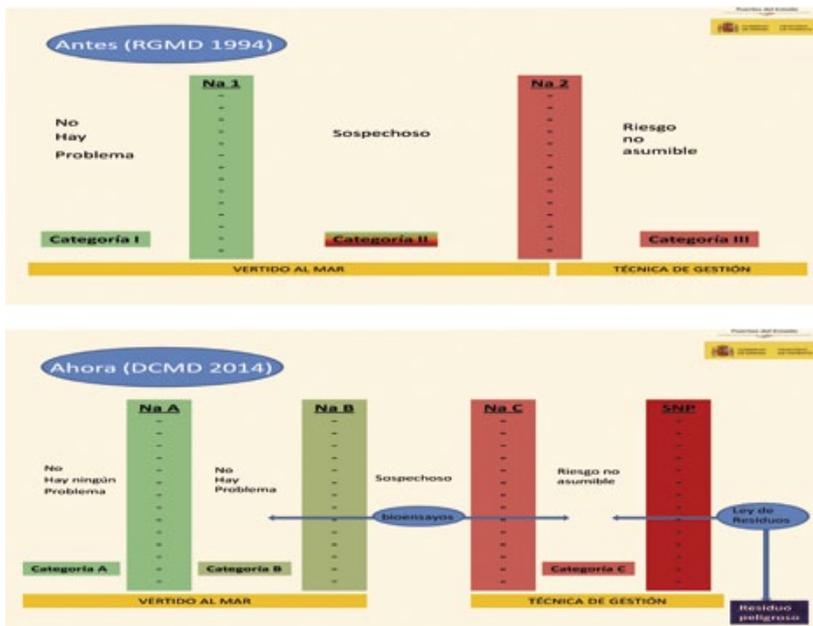


Figura 2. Croquis de los esquemas de caracterización de las Recomendaciones y de las Directrices.



4. TOMA DE MUESTRAS

Por término medio se calcula que las muestras necesarias para la caracterización del dragado de una dársena estándar han aumentado un 50%. Esto se debe a que ha aumentado considerablemente el número mínimo de muestras por longitud de muelle (muestras tipo M). Se debe fijar una estación de muestreo por cada 100 metros de muelle, la cual representa al sedimento hasta una distancia de 50 metros del cantil. En el resto de la dársena, se aplica la misma expresión de las antiguas Recomendaciones, que derivaba de lo exigido por OSPAR, aún vigente (muestras tipo G). Lo que ocurre es que dicha expresión, al ser exponencial, implica que cuanto mayor es la superficie a dragar menor es la densidad de muestras por unidad de superficie. En otras palabras, en el dragado de una dársena, antes se aplicaba, para toda ella, la expresión $S/25\sqrt{S}$, mientras que ahora se fijan unas muestras por longitud de muelle, se descuenta la superficie representada por esas muestras, y sobre el resto de la superficie de la dársena se aplica la citada expresión, dando como resultado un mayor número de muestras. Por el contrario, si nuestro puerto está ubicado en estuario, con un largo canal de acceso, las muestras necesarias se reducen un tercio de las que sería preciso si fuera una dársena, es decir, $1/3$ de $S/25\sqrt{S}$ (Muestras tipo C). Además de todo esto, ahora es necesario aplicar la expresión $S/25\sqrt{S}$ de forma independiente a cada una de las zonas, lo que aumenta el número total de muestras, debido a lo que hemos comentado de la densidad de muestras. Por último, si tenemos una zona que no se puede catalogar exactamente en ninguna de las categorías anteriores (M, G ó C) se muestrea como si fuera tipo G.

Otros cambios menos importantes se refieren a las muestras en profundidad (testigos) y a la composición de muestras. Las nuevas Directrices obligan a tomar $1/3$ del número total de muestras obtenidas según el método explicado en el párrafo anterior. Por contra, los testigos se dividirán en tramos de 50 centímetros, cuando antes se dividían en tramos de 25. Las Directrices han restringido la composición o mezcla de muestras, cuyo objeto es reducir el número de ensayos químicos o biológicos, estableciendo, además de los requisitos ya existentes, que solo se pueden componer muestras del mismo tipo (M, G ó C) y que las estaciones de muestreo estén sometidas a condiciones hidrodinámicas similares, lo cual cobra relevancia en largos canales de acceso.

5. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Para empezar, los distintos análisis deben realizarse sobre la fracción inferior a 2 mm; antes se hacía sobre la inferior a 63 micras. Esto supone una ventaja y un inconveniente. La ventaja es que se reducen considerablemente las manipulaciones de las muestras durante el tamizado, lo que asegura mayor homogeneidad en los resultados obtenidos por diferentes operadores de laboratorio. El inconveniente es que se pierde homogeneidad en los resultados analíticos obtenidos en series de muestras de granulometrías muy dife-



rentes (por ejemplo, limos y arenas gruesas), debido a que las muestras no se normalizan, por ejemplo, en función de su granulometría (existen otras normalizaciones de tipo geoquímico). Dicha normalización, propugnada por OSPAR, consiste en corregir el grado de contaminación de las influencias de la variabilidad natural en la composición de los sedimentos (mineralogía, granulometría y materia orgánica). La normalización granulométrica se fundamenta en el llamado "efecto de partícula" fenómeno que indica que la contaminación se asocia a la fracción fina del sedimento ($>63\mu$). En las nuevas Directrices se ha optado por minimizar los errores en la manipulación de muestras, antes que en normalizar, cosa que hacen casi todos los países del entorno OSPAR que han tomado como sedimento tipo la fracción inferior a 2 mm.

Si los materiales no están exentos de caracterización, según criterios similares a los ya conocidos, deben someterse a una caracterización preliminar. Mediante este chequeo se comprueba que si los materiales a dragar puede suponer peligro para el mar o no. Los requisitos que deben cumplir los sedimentos para que no haga falta realizar más ensayos químicos o biológicos son muy estrictos:

- 1° Estar alejados de fuentes de contaminación presentes o pasadas.
- 2° Estar compuestos mayoritariamente por arenas o gravas: deben contener menos del 10% de materiales que pasen por el tamiz de 63 micras.
- 3° El Carbono orgánico total debe ser inferior al 2%
- 4° El Test previo de toxicidad (TPT), que se hace con bacterias luminiscentes, debe indicar una CE_{50} superior a 2.000 mg/l.

Las nuevas Directrices incorporan los nuevos parámetros químicos introducidos por OSPAR. Además de los 7 metales pesados y de los policlorobifenilos (PBC), hay que analizar el arsénico (As), aunque éste ya se hacía de forma casi rutinaria, los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) y los compuestos de tributil estaño (TBT). También se introducen los aceites minerales bajo la denominación de hidrocarburos con entre 10 y 40 átomos de carbono ($H_{c10-c40}$). La necesidad de determinar los aceites viene derivada de la norma de residuos, la cual establece una concentración de 2.500 mg/kg para que no sean considerados residuos(sedimentos) peligrosos. Asimismo, las nuevas Directrices modifican los niveles de acción que todos conocemos. Dicha modificación obedece a criterios estrictamente científicos, ya que están basados en estudios de campo sobre concentraciones de fondo (o naturales) y en amplios estudios causa-efecto de sedimentos contaminados a nivel mundial. Uno de los más extendidos son los umbrales ERL (rango de efectos bajo) y ERM (rango de efectos medio). El ERL es la concentración a la cual empiezan, estadísticamente, a aparecer efectos subletales. Sobre estos estudios se han elaborado los actuales niveles de acción. En la tabla siguiente se ofrecen las concentraciones límite de los distintos parámetros.



RETOS DEL SIGLO XXI PARA LOS PUERTOS Y LAS COSTAS

NIVELES DE ACCIÓN Y UMBRALES

NIVELES DE ACCIÓN				UMBRALES PARA LA CONSIDERACIÓN DE SEDIMENTO NO PELIGROSO	
PARÁMETRO	N.A.A (Nivel de Acción A)	N.A.B (Nivel de Acción B)	N.A.C (Nivel de Acción C)	PARÁMETRO	Concentración
Hg (mg/kg)	0,35	0,71	2,84	Hg (mg/kg)	17
Cd (mg/kg)	1,20	2,40	9,60	Cd (mg/kg)	72
Pb (mg/kg)	80	218	600	Pb (mg/kg) ⁽¹⁾	2500
Cu (mg/kg)	70	168	675	Cu (mg/kg) ⁽²⁾	2500
Zn (mg/kg)	205	410	1640	Zn (mg/kg) ⁽³⁾	2500
Cr (mg/kg)	140	340	1000	Cr (VI) (mg/kg) ⁽¹⁾	1000
Ni (mg/kg)	30	63	234	Ni (mg/kg) ⁽¹⁾	1000
As (mg/kg)	35	70	280	As (mg/kg) ⁽¹⁾	1000
Σ 7 PCBs (mg/kg) ⁽³⁾	0,05	0,18	0,54	Σ 7 PCBs (mg/kg) ⁽²⁾	4,0
Σ 9 HAPs (mg/kg) ⁽²⁾	1,88	3,76	18,80	Σ 9 HAPs (mg/kg) ⁽²⁾	110
TBT ⁽³⁾ (mg Sn/kg)	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-1,0	TBT (mg Sn/kg) ⁽⁴⁾	1,2
				Hidrocarburos C10-C40 (mg/kg) ⁽¹⁾	2500 ⁽⁵⁾

(1) Basados en las concentraciones de la Orden MAM 304/2002 y normativa asociada
 (2) Suma de los congéneres IUPAC números 28, 52, 101, 118, 138, 153 y 180.
 (3) Suma de los nueve recomendados por OSPAR (Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(ghi)perileno, Benzo(a)pireno, Criseno, Fluoranteno, Indeno(1,2,3-cd)pireno, Pireno y Fenantreno)
 (4) TBT y sus productos de degradación (DBT y MBT)
 (5) Valor provisional

Limites vertido al mar
 SIN bioensayos CON bioensayos (-)

Comparando los antiguos niveles de acción II de la Recomendaciones con los niveles de acción C de la Directrices (Ambos niveles restringen el vertido libre al mar), se observa que el cadmio y los PCB han elevado sus concentraciones considerablemente, así como el cobre, mientras que el zinc y en menor medida el níquel, las han bajado, lo que significa que será más complicado verter sedimentos con zinc o níquel al mar. No obstante, no se pueden hacer comparaciones estrictamente hablando, ya que antes las concentraciones estaban referidas a la fracción inferior a 63 micras y ahora lo están a la inferior a 2 mm. En cuanto a los umbrales de sedimento no peligroso hay que decir que están extraídos de la norma de residuos, concretamente del anejo II de la Orden MAM/304/2002. De esta forma se puede llegar a comprender algo mejor que para el cromo coincidan el nivel de acción C y el umbral de sedimento peligroso. Lo que quizás más sorprenda es la rebaja en la concentración del zinc. En efecto, en las antiguas Recomendaciones el nivel de acción 2 era de 3.000mg/kg, mientras que ahora se considera sedimento peligroso es decir, la peor categoría que puede tener un sedimento, a partir de 2.500mg/kg ¿Significa esto que la vida marina, y la salud humana, estaban corriendo un grave peligro? Rotundamente, no. El zinc no es un metal pesado especialmente peligroso. La ley de residuos, y su normativa asociada, establecen umbrales bastante altos para los compuestos más perjudiciales de este metal, del orden del 20% en peso (200 gramos por kilo). Lo que ocurre es que el zinc (y otros metales) está catalogado como ecotóxico para la fauna acuática. El problema es que la norma de residuos no define a qué concentraciones empieza a ser ecotóxico en el agua. Dado que estas Directrices deben cumplir escrupulosamente con la ley de residuos para poder aplicarse a los sedimentos marinos sin necesidad de aplicarles la ley de residuos (compleja, engorrosa y pensada para residuos industriales de composición constante), se llegó al compromiso de que se aplicara un umbral restrictivo cuando la sustancia fuese



ecotóxica para la fauna acuática. La única norma que se encontró que relacionaba concentración con ecotoxicidad acuática fue la alemana, la cual establecía un umbral, bastante del lado de la seguridad, fijado en 2.500 mg/kg para cualquier sustancia que fuese ecotóxica. Por eso tanto el cromo como el zinc tienen ese umbral en las Directrices, para no considerarlo peligroso, cuando es bien sabido que los compuestos de cromo, especialmente los del cromo VI, son muchísimo más tóxicos que los del zinc.

Una novedad importante de estas nuevas Directrices, que supone un verdadero reto, es la incorporación de bioensayos a las muestras de sedimento que estén situadas entre dos umbrales o niveles de acción, concretamente entre el B y el C. Los bioensayos no son más que sencillas pruebas de toxicidad aguda sobre organismos marinos, lo que se consigue poniendo en contacto el sedimento con el animal en cuestión. Esto que parece simple conlleva muchas incertidumbres, principalmente por la poca experiencia que se tiene al respecto. En primer lugar ¿Qué organismos elegir para el ensayo? Después de probar con diversos grupos taxonómicos, se optó por los anfípodos *Ampelisca brevicornis* y *Corophium sp.* y por los ensayos de embriogénesis-crecimiento larvario de erizos (*Paracentrotus lividus*), ya que los realizados sobre peces y moluscos se mostraron muy poco sensibles a las concentraciones de contaminantes habituales de nuestros puertos, es decir, no se morían. En segundo lugar ¿Qué mortandad se elige como punto final? Generalmente, los ensayos de toxicidad al uso utilizan el 50%, ya sea como n° de muertes (CL_{50}) o de efectos subletales (EC_{50}). En el caso de los sedimentos se optó por un porcentaje de muertes, o de efectos, más restrictivo, del 30%, es decir, si mueren más del 30% de los organismos ensayados el sedimento se considera perjudicial. Por último hay que preguntarse si este tipo de ensayos son reproducibles y qué error tienen. Antes de llegar a esta metodología, el CEDEX y la Universidad de Cádiz, ensayaron diversos organismos y porcentajes de muertes que cotejaron con distintos tipos de sedimentos de diferentes concentraciones de metales pesados y otros contaminantes orgánicos. Los resultados se publicaron con el título “*Investigación sobre bioensayos para la caracterización del material dragado. CEDEX, 2009*”. El análisis de dicho trabajo muestra que los sedimentos muy contaminados resultan ser tóxicos en la mayoría de los bioensayos y al contrario, pero en concentraciones moderadas de contaminantes presentan resultados bastante dispersos. Así mismo, indica que los bioensayos más sensibles son los de embriogénesis de erizo, seguido por el de toxicidad de *Corophium sp.*

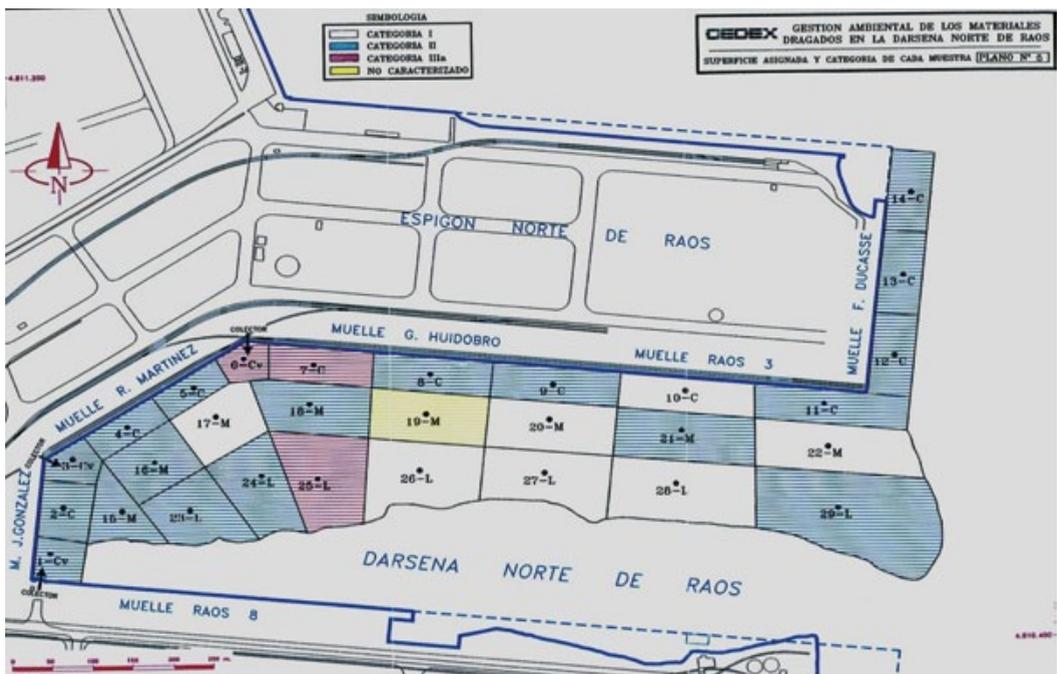
El período de chequeo de las nuevas Directrices definirán mejor las incertidumbres de los bioensayos, análisis que por otra parte y con los escasos conocimientos actuales sobre las interacciones agua \leftrightarrow sedimento \leftrightarrow biota, se presumen como imprescindibles para asegurar que un sedimento no es nocivo para el medio ambiente, en este caso, marino. Esto es así porque los intentos de establecer relaciones entre concentración y efectos biológicos han sido ineficaces, al menos por la vía de la biodisponibilidad de tales contaminantes, o por la vía de los coeficientes de reparto del contaminante entre el agua y el sedimento.

La validez de las caracterizaciones es de 4 años para dragados de primer establecimiento, incluidos los de aumento de calado. Para los dragados de mantenimiento de calados dicho plazo puede prorrogarse por otros 4 años más.



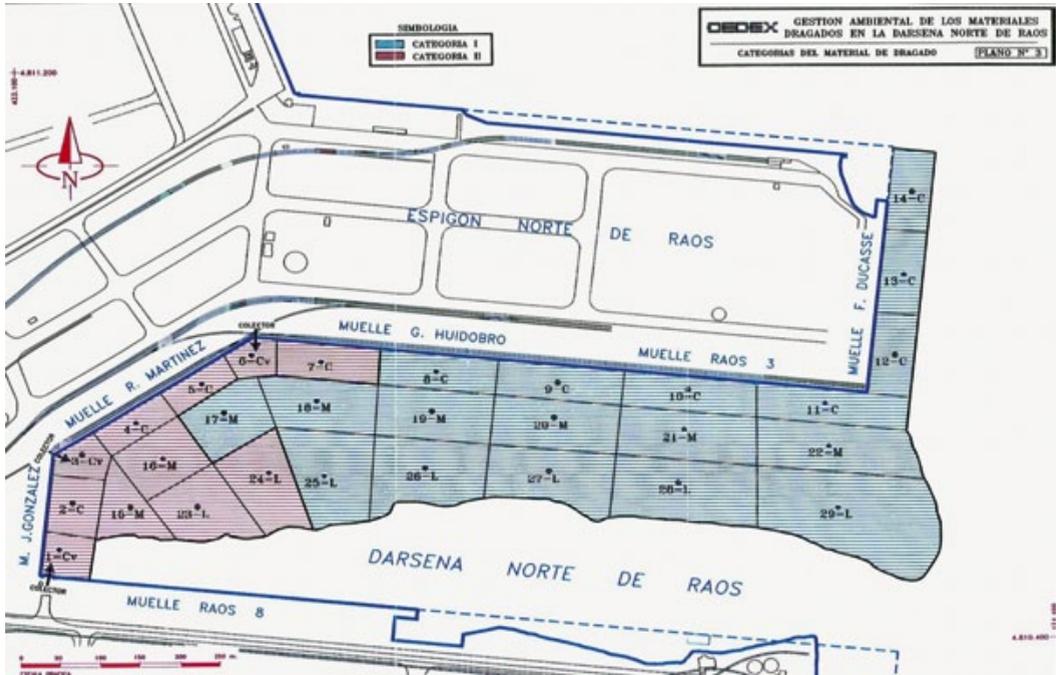
6. CONCENTRACIONES MEDIAS

Es este un aspecto nada banal, pues la desaparición del cálculo de las concentraciones medias ponderadas complicará la ejecución de la obra de dragado. Antes se aplicaba el siguiente criterio: dado que los equipos de dragado, sobre todo los de succión, trabajan sobre grandes áreas en cada ciclo de llenado de la cántara, los materiales se mezclarán en ella dando como resultado un grado de contaminación que será la media de la concentración de cada una de las estaciones de muestreo dragadas en ese ciclo. Si esa cántara, o gánguil, vierte en un punto concreto del mar, todos los vertidos realizados en ese punto se mezclarán, dando como resultado un grado de contaminación del material vertido que será la media de las concentraciones de los sedimentos vertidos por la cántara. Partiendo de ésta razonable premisa, se aplicó un método de cálculo que predijese qué categoría obtendríamos mezclando tales o cuales materiales. Dicho método, basado en las medias ponderadas, es el que aparece en el punto 14.4 de las antiguas Recomendaciones, que tantos dolores de cabeza a dado a los consultores por lo complejo de su aplicación, aunque una vez aprendido no daba mayor problema. Las figuras siguientes son bastante ilustrativas de ese procedimiento. En la primera, figuran las categorías de sedimentos (en código de colores) conforme salen del laboratorio de análisis. Se comprende que es muy difícil para un dragador dragar selectivamente cada una de las parcelas.





En la figura de abajo, se ha aplicado el método de cálculo de las concentraciones medias ponderadas, obteniéndose ya sólo dos categorías agrupadas en dos zonas (roja y azul) más fáciles de dragar en continuo. Los sedimentos de cada una de estas zonas se vertieron en dos áreas marinas previa obtención del permiso correspondiente.



Las nuevas Directrices no contemplan de forma tan abierta la mezcla de materiales dragados en la zona de vertido. Únicamente se permite obtener concentraciones medias de estaciones contiguas, de manera que se puedan obtener superficies de dragado cuyos materiales sean menos laboriosos de dragar.

7. CATEGORÍAS DE SEDIMENTOS Y ZONAS DE VERTIDO AL MAR

Antes existían tres categorías delimitadas por dos niveles de acción. Ahora hay tres niveles de acción y, a efectos prácticos, dos categorías de materiales. Esta paradoja se resuelve con la figura 2. Resumidamente, En las nuevas Directrices la categoría II desaparece por cuanto suponía una indefinición en la nocividad de un sedimento. Esta disyuntiva se resuelve aplicando bioensayos: si esos sedimentos comprendidos "entre niveles de acción" dan resultados negativos en los bioensayos, los sedimentos se clasifican como no perjudiciales para el medio marino; si dan positivo, se clasifican como potencialmente nocivos y no se pueden verter al mar sin más. Cabe preguntarse por qué OSPAR y el resto



de CI no han propuesto un solo nivel de acción y no dos, como actualmente hacen. Con un solo nivel de acción que delimite lo que es perjudicial de lo que no lo es, no harían falta bioensayos ni más pruebas. Pero para lograr certidumbre con un solo umbral, es preciso conocer a fondo las relaciones entre la concentración de contaminantes y sus efectos biológicos, cuestión no resuelta aún, y sin visos de resolverse, así que es más sensato dejar “un margen” entre la concentración que sabemos que es estadísticamente perjudicial y la que no lo es. Esta forma de actuar es propia de los CI, pero no de otras normas que solo incluyen en sus listas un solo umbral (residuos, vertidos, etc.).

Así pues, las nuevas Directrices establecen las siguientes categorías:

- A) Materiales muy limpios, que pueden verterse al mar
- B) Materiales limpios, que pueden verterse al mar con ciertas restricciones.
- C) Materiales contaminados, que únicamente pueden verterse (depositarse) al mar utilizando alguna técnica de gestión que los aisle de la biota.

Una vez estudiados “de veras” los usos productivos y solamente si no los hay, o el destinatario de los mismos no llega a un acuerdo con el promotor del dragado, podrán verterse (o depositarse) en la siguientes zonas:

- *Zonas restringidas* (solo para materiales de categoría A): Las que estén a una profundidad inferior a 25 metros, estén cubiertas por alguna figura de protección, incluida una banda de seguridad de dos millas, y en la banda de seguridad de dos millas de las zonas de alto valor ecológico (denominadas zonas de exclusión).
- *Zonas no restringidas* (para materiales de categoría B y técnica de gestión de los de categoría C): resto del mar.
- *Zonas de exclusión* (no se puede verter ningún material): son aquellas en las que no está permitido ningún vertido ni colocación de dragados por su alto valor ecológico, estén protegidas o no.

Para terminar, las nuevas zonas de vertido deben elegirse tras rigurosos estudios de campo realizados conforme los artículos 29 a 35 y el anejo III. La validez de estas zonas es de cinco años, o un vertido de un millón de metros cúbicos. Las zonas tradicionales de vertido que aún cuenten con autorización, se podrán seguir utilizando con preferencia a otras nuevas, previo estudio que valore los efectos ambientales de los vertidos ya realizados.



VULNERABILIDAD DEL SISTEMA PORTUARIO DE TITULARIDAD ESTATAL ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO (PRIMERA FASE)



**Enrique Alvarez Fanjul¹, Alberto Compte², Damià Gomis³,
Ernesto Rodríguez⁴, Equipos de Vanimedat II y Escenarios**

1. INTRODUCCIÓN

La presente ponencia muestra los resultados resumidos de la primera fase de un estudio sobre el impacto del cambio climático en el Sistema Portuario de Titularidad Estatal. En esta fase se ha analizado la vulnerabilidad del sistema portuario ante el clima presente y se han realizado predicciones regionalizadas de las variables fundamentales del cambio climático. En la segunda fase, actualmente en preparación, se pretende estudiar de forma detallada los impactos del cambio climático en el Sistema Portuario.

Para obtener estos escenarios ha contado con los datos proporcionados por Puertos del Estado e IMEDEA, quien – en colaboración con la AEMET - han realizado hasta la fecha una serie de simulaciones con las que se han reproducido las características climáticas del mar Mediterráneo y del sector del océano Atlántico que baña las costas españolas durante la segunda mitad del siglo XX y han obtenido proyecciones de su evolución a lo largo del siglo XXI bajo distintos escenarios de cambio climático. Estos trabajos se han desarrollado en el marco de los proyectos ESCENARIOS (financiado por AEMET) y Vanimedat I y II (financiados por el Plan Nacional de I+D).

¹ Puertos del Estado.

² CEDEX.

³ IMEDEA

⁴ AEMET

2 VULNERABILIDAD ACTUAL DEL SISTEMA PORTUARIO DE TITULARIDAD ESTATAL

La información sobre cuáles son los impactos asociados a eventos climáticos que en la actualidad tienen mayor incidencia en la explotación portuaria se ha recopilado por medio de un *cuestionario ad hoc* diseñado por Puertos del Estado y remitido a las Autoridades Portuarias. En el cuestionario se ha distinguido entre impactos causados por oleaje (oleaje en la bocana y exterior, rebase, agitación interior), por nivel del mar (inundaciones, escasez por nivel bajo del mar, onda larga producida por oleaje), por viento, por lluvia y por temperatura, entre otras causas. De un total de 27 Autoridades Portuarias, 24 han respondido al cuestionario. La figura 1 muestra cuál es el porcentaje de ellas que, en respuesta al cuestionario, han indicado que tienen problemas de operativa portuaria causados por alguna variable climática.

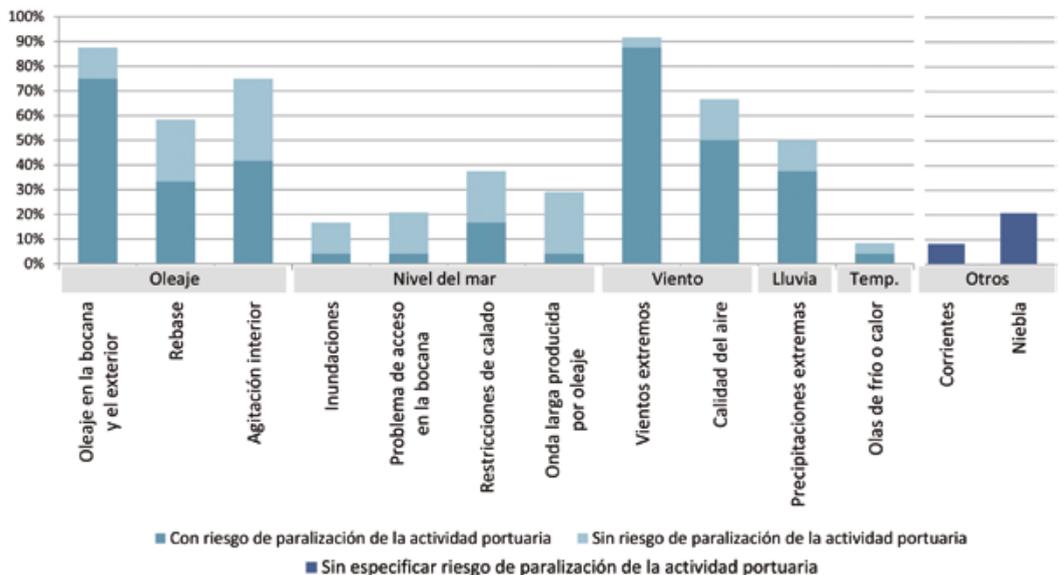


Figura 1: Porcentaje de Autoridades Portuarias con problemas de operativa portuaria por variables relacionadas con el clima.

La figura 1 evidencia que una mayoría de Autoridades Portuarias percibe el viento y el oleaje (por mar de viento o por mar de fondo) como los fenómenos meteorológicos que más inciden actualmente en la operativa de sus puertos, con riesgo además de paralizar la actividad portuaria en la mayor parte de ellos. Las precipitaciones extremas causan también problemas en cerca de la mitad de puertos, aunque con menor riesgo de paralización de la actividad. El riesgo de pérdida de vidas por fenómenos climáticos es en general reducido, siendo los vientos extremos, los rebases y el oleaje en la bocana y exterior del puerto los fenómenos que preocupan a un mayor número de Autoridades Portuarias.



De las respuestas al cuestionario no se desprende que las variables climáticas afecten de forma diferenciada a la operativa del puerto en función de la fachada marítima en la que se éste se encuentra.

2.1 Vulnerabilidad frente al oleaje

Las respuestas al cuestionario ponen de manifiesto que un oleaje excesivo en la bocana puede dificultar la maniobrabilidad de los buques y suponer una limitación en su acceso y salida. También puede limitar la toma de remolque o condicionar su operación (en el puerto de Melilla, por ejemplo, el riesgo que conlleva realizar las maniobras de entrada con la única ayuda de un remolcador de 1800CV es lo suficientemente alto para denegar la entrada a puerto). En el caso de mar de fondo, el oleaje puede reducir la sonda en el canal de entrada, restringiendo el paso a buques de gran calado (caso de Huelva, por ejemplo).

En bastantes puertos, el fuerte oleaje puede llegar a impedir el embarque/desembarque de practicaje, sea parcialmente (por ejemplo, en el puerto de El Ferrol, para algunos gaseros y carboneros de gran porte) o totalmente, lo que en la práctica supone la suspensión del servicio y la consiguiente paralización del puerto (el canal de navegación de entrada al Puerto de Castellón tiene tres alineaciones debido a la existencia de la isla pantalán de la petrolera BP, por lo que en la bocana los buques están expuestos lateralmente al efecto de los temporales y los prácticos no siempre están dispuestos a embarcar en el exterior, teniéndose que cerrar el puerto por este motivo).

Un oleaje excesivo en el exterior del puerto puede además imposibilitar el fondeo de buques o hacer inoperativos algunos muelles exteriores (caso de Bilbao, donde se paraliza las maniobras de buques en algunos pantalanés de la zona industrial del puerto cuando se registra un oleaje exterior con altura de ola significativa superior a 3 metros). También puede interrumpir algunos servicios marítimos de corta distancia (caso del servicio regular de transporte de viajeros a través del Estrecho de Gibraltar entre Algeciras y el norte de África).

En lo que concierne a fenómenos de rebase, éstos causan problemas esporádicos en la operación portuaria en alrededor la mitad de puertos españoles. En buena parte de las ocasiones suele ser suficiente interrumpir el paso de vehículos y de personas en las zonas más expuestas con objeto de evitar daños. En un menor número de casos, el rebase puede reducir la actividad portuaria en determinados muelles, al afectar a instalaciones portuarias, provocar el cierre operativo de algunos atraques o impedir la movilidad por los viales de dique y contradique. El hecho de que un dique sea rebasado con cierta frecuencia no implica necesariamente que sea un problema, siempre que se haya tenido en cuenta en su diseño (por ejemplo, en el puerto de A Coruña, el rebase del dique comienza para temporales de ola significativa de 9-10 metros, correspondientes a un periodo de retorno de 2,5 a 5 años).

La agitación interior también incide en un número considerable de puertos. Según sea su magnitud, la agitación interior puede dificultar la navegación en el acceso a muelles (en mayor medida a las embarcaciones menores), complicar el amarre de ciertas embarca-



ciones (en el puerto de El Ferrol, por ejemplo, la experiencia operativa de estos últimos años ha demostrado que, con ocasión de temporales duros, se ven afectadas las descargas de graneles sólidos, siendo necesario el uso de remolcadores que empujen al buque contra las defensas para evitar la rotura de amarras), dificultar la operativa en atraques de taludes interiores (caso del atraque 34B del Muelle de la Energía en el puerto de Barcelona, de la operación de buques ro-ro en el muelle 13 del puerto de Alicante con dirección de oleaje sur, o del embarque en buques de pasaje conectados con pasarelas mecánicas en el puerto de Málaga), o entorpecer las operaciones de carga y descarga en pantalanés interiores (por ejemplo, de los buques tanque en los pantalanés de la refinería de CEPSA en Algeciras). En el caso de Vigo, provoca problemas puntuales en el tráfico de ría de pasajeros.

2.2 Vulnerabilidad por el nivel del mar

Contrariamente a lo que sucede con el oleaje, la vulnerabilidad actual de los puertos españoles por el nivel del mar es ciertamente limitada, y no viene tanto determinada por la subida del mismo como por las situaciones de falta de calado que eventualmente éste provoca en algunos puertos. Ello se traduce en problemas concretos de acceso de algunos buques a muelles con calados ajustados, en una necesidad de mayores volúmenes de dragado de mantenimiento (en particular, después de temporales), o en ciertas restricciones de acceso en situación de bajamar en el caso de algunos puertos de la vertiente atlántica. Las inundaciones por efecto de la subida del nivel del mar se dan excepcionalmente y en un número muy reducido de muelles portuarios. Los problemas ocasionados por las oscilaciones del nivel del mar en caso de rissagas –fenómeno meteorológico que se da típicamente en ciertas áreas del mediterráneo– son también excepcionales, sin llegar a paralizar la actividad portuaria en ninguno de los puertos de ámbito estatal.

Los problemas de operativa portuaria causados por fenómenos de ondas largas producidas por oleaje se dan en alrededor de un tercio de los puertos, aunque con muy escasa frecuencia en general y con una limitada incidencia. Entre sus afecciones se citan el movimiento de buques atracados en dársenas interiores, la rotura de amarras, o inundaciones y daños en pantalanés y alguna estructura.

2.3 Vulnerabilidad frente a vientos extremos

Los vientos extremos limitan ocasionalmente el acceso de determinados tipos de buques al puerto (por ejemplo, en el caso de El Ferrol, los gaseros son especialmente sensibles al viento en su paso por el canal de entrada) y sus maniobras de atraque y desatraque en pantalanés (caso de la zona industrial del puerto de Bilbao, si se registra un viento superior a 25/35 nudos de componente norte/sur respectivamente). Excepcionalmente, pueden llegar a poner en riesgo la permanencia segura de los buques amarrados y/o fondeados. Cuando los esfuerzos sobre los cabos de las amarras son muy altos, puede ser necesario reforzarlos e incluso utilizar algún remolcador de apoyo en caso de buques grandes con mucha superficie expuesta al viento.



Dos buques varados en la playa de El Saler, al garrar mientras estaban en el fondeadero de Valencia, a causa de fuerte viento del NE de 60 nudos y la fuerte marejada (28 Septiembre 2012).

Los vientos extremos también dificultan la operativa de carga y descarga de determinadas mercancías. En el caso de contenedores, pueden obligar a paralizar el servicio de grúas portuarias o a limitar la altura de su apilamiento. En el caso del puerto de Cartagena, se llega a parar las operaciones de carga y descarga de graneles líquidos en las zonas más expuestas. En el puerto de Melilla, la realización de las operaciones lo-lo pueden quedar detenidas por riesgo de accidente. Con todo, los problemas más frecuentes en el sistema portuario español provienen de la incidencia que tiene la manipulación de graneles pulverulentos (cereales, haba de soja, etc.) en el aumento de partículas sólidas en suspensión y en el empeoramiento de la calidad del aire, que afectan a operadores portuarios adyacentes y a áreas urbanas próximas; esta afección puede conllevar la paralización de las operaciones en caso de superación de límites legales, riesgo de dispersión de alérgenos, o en situaciones de especial sensibilización de la población afectada.

Al margen de todo ello, los vientos fuertes también ocasionan daños en edificaciones del recinto portuario.

2.4. Vulnerabilidad por precipitaciones extremas

Como consecuencia de las precipitaciones extremas, algunos puertos pueden tener problemas de visibilidad para la maniobrabilidad de los buques, así como inundaciones en viales interiores y terminales, incluso en los accesos al puerto. En caso de precipitaciones muy intensas, es necesario paralizar las operaciones de carga/descarga de graneles sólidos, o limitar algunas operaciones en otras terminales. También puede darse algún fallo eléctrico como consecuencia de la intrusión de agua. En el puerto de Cádiz, las precipitaciones extremas conllevan el arrastre de sedimentos al río Guadalete, provocando problemas de navegación. En el caso concreto del puerto de Valencia, grandes precipitaciones pueden obligar a liberar el atraque frente a la desembocadura del río Turia para facilitar la evacuación de las aguas. Los puertos mediterráneos son especialmente sensibles



a los fenómenos de la gota fría, que se producen típicamente a finales de verano e inicio del otoño. En los puertos de la vertiente atlántica, las inundaciones provocadas por las precipitaciones intensas pueden verse agravadas al combinarse con mareas vivas altas.

Como consecuencia de las lluvias intensas, se producen también vertidos en las dársenas interiores del puerto por rebose de la red de saneamiento de la ciudad (caso de Málaga o Ceuta), con la afección consiguiente a la calidad del agua.

2.5 Vulnerabilidad por otros fenómenos

De acuerdo con las respuestas de las Autoridades Portuarias al cuestionario remitido por Puertos del Estado, la niebla intensa, las corrientes marinas, el calor extremo o las tormentas eléctricas son fenómenos que actualmente causan problemas en un número muy reducido de puertos españoles.

La niebla intensa provoca falta de visión y peligro de alcance en la operativa de los buques, lo que puede llegar a determinar el cierre del puerto (en el puerto de Avilés, por ejemplo, hasta 5 veces al año).

Las corrientes marinas exteriores llegan a dificultar las maniobras de aproximación en el acceso a la bocana sur del puerto de Barcelona y las operaciones de atraque en los muelles exteriores del puerto de Algeciras. Además, tienen incidencia en la calidad del agua, al dispersar los vertidos de los buques y los sedimentos de dragado durante las operaciones de extracción, transporte y deposición.

Las tormentas eléctricas pueden afectar a los sistemas de comunicación del puerto y la operativa de descarga de determinadas mercancías, como el gas natural licuado. Por su parte, las olas de calor pueden incidir en la descarga de buques frigoríficos.

3 PREVISIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

3.1 El viento

De manera general, no se proyectan cambios significativos en la intensidad del viento en superficie hasta final de siglo. Del análisis de los datos regionalizados disponibles se desprende que – en el promedio de toda la península Ibérica - existe una tendencia de los vientos a ser menos del oeste y más del este, a ser más del sur y menos del norte, y – en general - a la disminución de la velocidad del viento y de la racha máxima, excepto en verano (en el que la tendencia es al aumento, aunque de forma moderada, especialmente en zonas de Galicia y valle del Ebro) y durante episodios intensos de tipo convectivo. El análisis de tendencias medias y extremales del viento en el litoral durante la segunda mitad del siglo XX es coherente con estas predicciones.



3.2 Oleaje

Todas las simulaciones de oleaje en las costas españolas para distintos escenarios relativos al siglo XXI muestran variaciones moderadas de altura significativa, tanto para el Mediterráneo Occidental como para el Atlántico. Por lo general, en estas zonas costeras, las tendencias son ligeramente negativas y en el umbral de ser estadísticamente significativas.

La tabla 1 muestra, para el escenario A1B, estimaciones por zona costera de las variaciones de oleaje medio y extremo para el siglo XXI con respecto al XX. Las simulaciones han sido realizadas con el modelo de generación y propagación de oleaje WAM forzado con vientos procedentes de 4 modelos atmosféricos distintos, a fin de analizar la robustez de los resultados.

Las mayores variaciones se pueden encontrar en la cornisa Cantábrica, con tendencias ligeramente negativas tanto en valor medio como en extremos. En el Mediterráneo, las diferencias entre los modelos que mayores y menores cambios muestran en la costa son del mismo orden de magnitud que los valores absolutos de dichos cambios.

	Mar Cantábrico	Fachada atlántica	Golfo de Cádiz	Islas Canarias	Mar de Alborán	Costa de Almería y Blanca	Mar Catalano-Balear (Península)	Islas Baleares
Variación de valor medio	Max: -7,3 Min: -2,2	Max: -7,3 Min: -3,6	Max: -3,3 Min: -0,4	Max: -3,6 Min: -0,7	Max: +3,7 Min: -1,1	Max: -3,7 Min: +1,5	Max: -3,0 Min: -0,7	Max: -6,9 Min: -3,6
Variación de percentil 95	Max: -23,3 Min: -0,3	Max: -11,4 Min: -2,4	Max: -11,7 Min: +0,9	Max: -5,4 Min: +0,6	Max: +8,1 Min: -0,7	Max: -11,4 Min: +2,4	Max: -8,7 Min: +0,1	Max: -11,6 Min: -5,1

Tabla 1: Variaciones, en cm, del oleaje medio y extremal del siglo XXI con respecto al siglo XX para el escenario A1B y cuatro forzamientos atmosféricos diferentes (ECHAM, Hadley-Low, Hadley-Ref y Hadley-High). Se muestran, para cada zona costera, los valores referidos al máximo y mínimo cambio con respecto a la simulación de control, que es equivalente al clima del siglo XX. Los periodos considerados son 2070 a 2100 (escenarios) y 1970 a 2000 (control).

Resultados de otras simulaciones, forzadas con vientos del modelo atmosférico Arpege y bajo escenarios diferentes (B1, A1B y A2), ofrecen resultados similares, mostrando tendencias ligeramente negativas en las costas, y más importantes en el centro de la cuenca occidental Mediterránea y en invierno (ver figura 2). La máxima variación de Hs que proyectan las simulaciones para finales del siglo XXI en algún lugar del dominio es del orden de -40 cm respecto al valor actual (en la zona central del dominio, en invierno y bajo el escenario A2). Las tendencias en los valores medios anuales, incluso en esa zona central alejada de la costa, son más moderadas: se mantienen por debajo de -20 cm respecto al valor actual para el escenario A2, por debajo de -10 cm para el escenario A1B y no son significativos para el escenario B1.

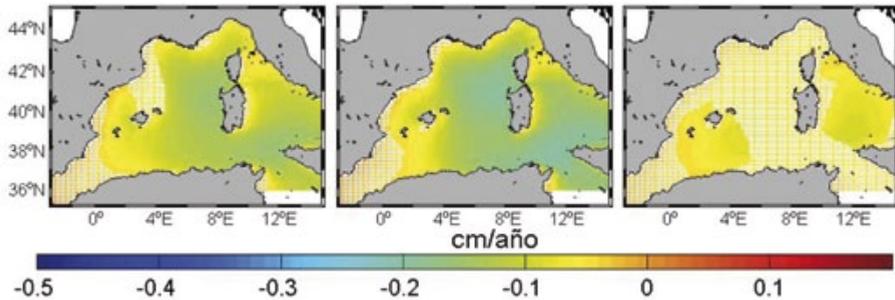


Figura 2: Tendencias totales de Hs media (cm/año) para el siglo XXI obtenidas a partir del modelo WAM forzado con ARPEGE bajo los escenarios de emisiones B1, A1B y A2. Las zonas difuminadas corresponden a tendencias no significativas al nivel de confianza del 95%.

3.3 Temperatura del mar en superficie

Las simulaciones numéricas, realizadas con modelos tridimensionales regionalizados de alta resolución, anidados a modelos globales, muestran un considerable incremento de la temperatura superficial del mar a lo largo del siglo XXI, tanto en la cuenca Mediterránea como en la región del Atlántico que comprende las aguas de que van desde el golfo de Vizcaya hasta las Islas Canarias.

Hasta el 2050 y para el escenario A1B, las tendencias en superficie se estiman entre +0.017 y +0.024 °C/año para el conjunto del Mediterráneo. En las aguas Atlánticas cercanas a la Península Ibérica se registra un incremento de temperatura similar (+0.017 a +0.021 °C/año). La figura 3 muestra la evolución de las anomalías de temperatura superficial media en el Mediterráneo a lo largo del siglo XXI para los escenarios B1, A1B y A2. Los incrementos son importantes y, a partir de 2050, los valores de los distintos escenarios se distancian, siendo el A2 el que mayor calentamiento superficial muestra.

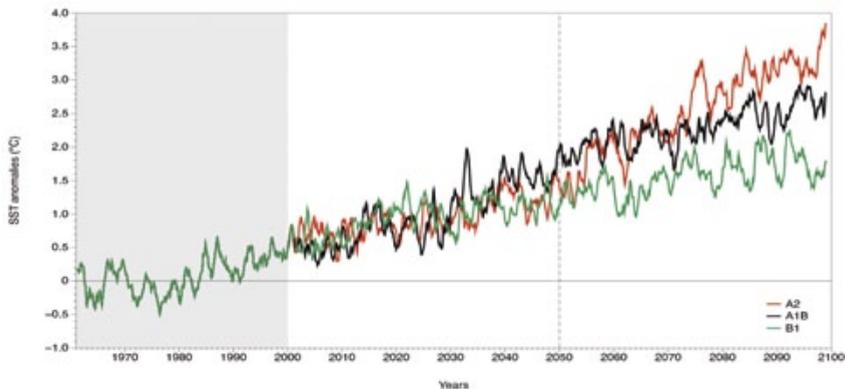


Figura 3 Promedio de las anomalías de la temperatura superficial en la cuenca Mediterránea respecto al promedio mensual del período de control 1961-1990, a partir de simulaciones baroclínicas tridimensionales a 1/8° para los escenarios A2, A1B y B1.



RETOS DEL SIGLO XXI PARA LOS PUERTOS Y LAS COSTAS

Esta clara tendencia positiva se mantiene al analizar los resultados más cercanos a la costa (ver tabla 2), a excepción de los relativos a la fachada atlántica de la Península Ibérica, donde las simulaciones, disponibles solamente hasta 2050, muestran para algunos forzamientos tendencias negativas.

	Mar Cantábrico	Fachada atlántica	Golfo de Cádiz	Islas Canarias	Alborán y costa de Almería	Mar Catalano-Baleares y Baleares
Variación de valor medio	Max: +0,9°C Min: +0,4°C	Max: +0,5°C Min: +0,1°C	Max: +0,8° Min: +0,3°	Max: +1,0°C Min: +0,3°C	Max: +0,6°C Min: +0,6°C	Max: +0,9°C Min: +0,5°C
Variación de percentil 95	Max: +0,9°C Min: +0,9°C	Max: +0,5°C Min: +0,3°C	Max: +1,5°C Min: +0,8°C	Max: +1,1°C Min: +0,6°C	Max: +1,3°C Min: +0,6°C	Max: +1,5°C Min: +1,1°C

Tabla 2: Variaciones de la temperatura superficial en la primera mitad del siglo XXI con respecto al siglo XX para el escenario A1B y dos forzamientos atmosféricos diferentes (ECHAM y Hadley-Low). Para cada zona costera se muestran el máximo y mínimo cambio con respecto a la simulación de control, que es equivalente al clima del siglo XX. Los periodos considerados son 2020 a 2050 (escenarios) y 1970 a 2000 (control).

3.4 Salinidad en superficie

Los resultados de los estudios basados en simulaciones numéricas muestran un alto grado de incertidumbre con respecto a la evolución de esta variable. Los cambios previstos en el balance de evaporación menos precipitación producirían un incremento de salinidad en toda la región, sobre todo en la cuenca Mediterránea. Sin embargo, en las escalas temporales asociadas al cambio climático, la evolución de esta variable viene determinada también por los valores de la salinidad en el Atlántico oriental. Las aguas superficiales de este océano penetran en el Mediterráneo a través del Estrecho de Gibraltar y condicionan el contenido de sal en la capa superficial de la cuenca.

La alta variabilidad encontrada en las simulaciones se debe a que los modelos globales describen de forma muy distinta el proceso de deshielo y el consiguiente transporte de aguas menos salinas a latitudes bajas. Es conveniente remarcar que, de todos los fenómenos asociados al cambio climático, el del deshielo es uno de los que mayor incertidumbre tiene asociada. Esto hace que los modelos globales generen soluciones muy dispares en la evolución de la salinidad en el Atlántico oriental, lo que afecta a los modelos regionales a través de las condiciones de contorno, haciendo imposible, en el estado actual de conocimientos, dar una estimación estadísticamente significativa de la evolución de esta variable en la zona de estudio.



3.5 Nivel del mar (nivel medio)

La subida del nivel medio del mar en una zona costera determinada se calcula como la suma de tres contribuciones distintas:

- Componente estérica: variación de volumen debida a cambios en la temperatura (dilatación) y en la salinidad (aumento de masa) de la columna de agua.
- Componente barótropa: cambios debidos las modificaciones en el régimen medio de vientos y presiones atmosféricas en una zona.
- Componente eustática: aumento debido a las variaciones de la masa total de agua en los océanos. Es inducida, principalmente, por el deshielo de los glaciares y de las masas polares ubicadas sobre tierra.

En este trabajo se han estudiado las dos primeras componentes para las costas españolas a través de modelos numéricos regionalizados. Los resultados de la tercera provienen de modelos globales (IPCC).

La evolución de la componente estérica en el escenario A1B para la primera mitad del siglo XXI ha sido calculada por medio del modelo de circulación NEMO, con una resolución de $1/12^\circ$ y usando datos atmosféricos regionalizados de los modelos globales ECHAM y Hadley-low. Los resultados muestran una evolución similar en todas las costas españolas (Mediterráneo y Atlántico). La previsión de aumento a 50 años se sitúa entre 6 cm (Hadley-low) y 9 cm (ECHAM). Para este mismo escenario, se ha calculado la componente barótropa mediante el modelo HAMSOM, resultando ser despreciable frente a las otras componentes. La mayor contribución para ese horizonte temporal proviene de la componente eustática. Teniendo en cuenta la horquilla de valores que los modelos globales asocian a esta variable, el nivel medio total para el escenario A1B registraría, en 2050, un incremento en las costas españolas entre 17 y 35 cm con respecto al año 2000.

Adicionalmente, para el Mediterráneo, se ha realizado otro estudio basado en el escenario A2 y cubriendo todo el siglo XXI. Para ello, se empleó un modelo regionalizado de circulación, con una resolución de $1/8^\circ$ y forzamientos provenientes del modelo atmosférico Arpege (MeteoFrance). La componente estérica obtenida así obtenida para el año 2050 es de 10 cm, algo superior a la de ECHAM y HADLEY low en el Mediterráneo, como cabría esperar de un escenario de emisiones más elevadas. Para el año 2100, el valor de esta componente aumenta hasta 35 cm. Por lo tanto, la previsión resultante de la simulación no muestra una subida constante del nivel del mar, sino progresivamente acelerada, especialmente durante la segunda mitad del siglo XXI (ver figura 4).

Respecto a la componente barótropa, las proyecciones obtenidas con el modelo HAMSOM bajo este escenario ratifican de nuevo y para todo el siglo XXI, la importancia menor de la contribución de esa componente al nivel medio del mar (su contribución a los extremos se analiza en la próxima sección).



Si se añade la componente eustática derivada de las estimaciones del IPCC, las proyecciones de aumento de nivel del mar a finales del siglo XXI, para este escenario y simulación, van desde 47 a 81 cm de media en la cuenca Mediterránea.

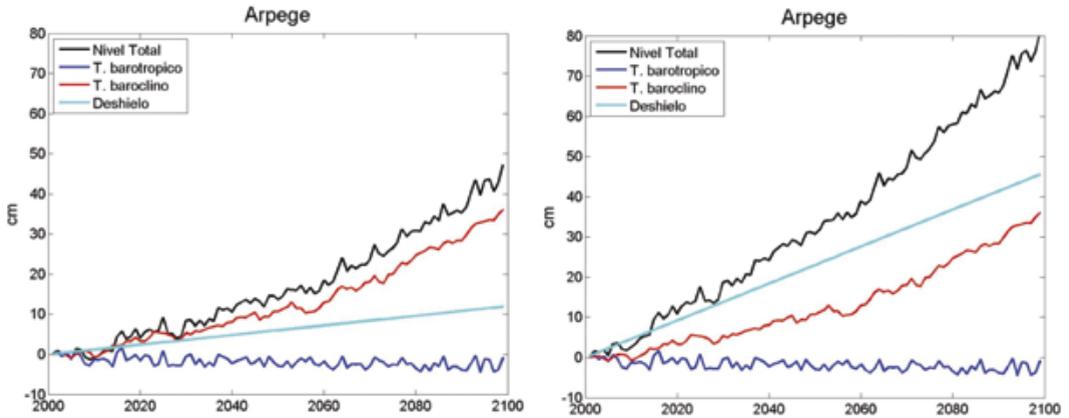


Figura 4: promedios anuales de nivel del mar total y de cada uno de sus componentes para el modelo ARPEGE, bajo el escenario de emisiones A2, en el dominio Mediterráneo y para el periodo 2000-2100. En el panel de la izquierda se ha considerado una tasa de deshielo lineal de 1.2 mm/año (valor medio del IPCC AR4); en el panel de la derecha se ha considerado una tasa de 4.6 mm/año (estima más reciente).

3.6 Nivel del mar (variaciones por temporal)

Tanto el viento, por medio del arrastre de las masas de agua, como la presión atmosférica, a través del efecto de barómetro invertido, provocan cambios en el nivel del mar que pueden durar de unas pocas horas a unos días. Estas variaciones reciben el nombre de residuo meteorológico, y pueden ser positivas o negativas. La magnitud máxima del fenómeno en las costas españolas es del orden de 60 o 70 centímetros, cuando se trata de sobre-elevaciones, y de 40 a 50 cm cuando se trata de residuos negativos. Este fenómeno puede producir inundaciones, potenciar el efecto del oleaje en las infraestructuras al cambiar el punto de rotura del mismo, o crear problemas al paso de los buques a través de bocanas someras.

Los resultados de las simulaciones numéricas para el escenario A1B, realizadas con el modelo HAMSOM, forzado con cuatro conjuntos atmosféricos distintos, muestran una ligera tendencia hacia la disminución de la magnitud del fenómeno, pero ésta no es significativa, ni a 50 ni a 100 años vista (ver tabla 3). El rango de variabilidad entre los modelos es del mismo orden de magnitud que las variaciones en sí.



	Mar Cantábrico	Fachada atlántica	Golfo de Cádiz	Mar de Alborán	Costa de Almería y Blanca	Mar Catalano-Baleár (península)	Islas Baleares
Variación de percentil 95 a 50 años (A1B)	Max: -0,9 cm Min: +0,5 cm	Max: -1,8 cm Min: +1,2 cm	Max: -1,4 cm Min: +0,5 cm	Max: -1,2 cm Min: +0,8 cm	Max: -1,2 cm Min: +0,5 cm	Max: -1,3 cm Min: -0,1 cm	Max: -1,0 cm Min: +0,0 cm
Variación de percentil 95 a 100 años (A1B)	Max: -2,9 cm Min: +0,0 cm	Max: -3,6 cm Min: +1,2 cm	Max: -1,9 cm Min: +1,3 cm	Max: -2,4 cm Min: +1,5 cm	Max: -2,8 cm Min: +0,9 cm	Max: -3,6 cm Min: -0,6 cm	Max: -3,2 cm Min: -0,3 cm

Tabla 3: Variaciones, en cm, del percentil 95 de los valores de residuo meteorológico con respecto al siglo XX para el escenario A1B y cuatro forzamientos atmosféricos diferentes (ECHAM, Hadley-Low, Hadley-Ref y Hadley-High). Se muestran, para cada zona costera, los valores referidos al máximo y mínimo cambio con respecto a la simulación de control, que es equivalente al clima del siglo XX.

Resultados de un estudio adicional para los escenarios A2, A1B y B1 (modelo HAMSOM forzado por vientos procedentes de ARPEGE) muestran resultados similares, con tendencias que por lo general apuntan a una leve disminución del fenómeno, pero con una variabilidad alta que depende tanto del escenario escogido como, sobre todo, de la metodología utilizada para el cálculo de extremos. Todos los resultados muestran variaciones moderadas, a excepción del escenario más pesimista de emisiones, el A2. Para éste, cuando el cálculo extremal se realiza considerando un periodo de 40 años (de 2060 a 2100), sí se obtienen importantes cambios en los extremos, con incrementos del orden de 5-15 cm en la mayor parte del Mediterráneo y Golfo de Vizcaya. Sin embargo, este resultado es de dudosa representatividad estadística, puesto que es sensible al método de ajuste.

3.7 Corrientes

La evolución de las corrientes en el escenario A1B para la primera mitad del siglo XXI ha sido calculada por medio del modelo de circulación NEMO, con una resolución de $1/12^\circ$ y usando datos atmosféricos regionalizados de los modelos globales ECHAM y Hadley-low. Los resultados no muestran cambios estadísticamente significativos en el Mediterráneo. En el Atlántico, sin embargo, ambas simulaciones muestran aumentos en la velocidad de las corrientes que recorren la fachada atlántica de la península Ibérica de Norte a Sur. Dicho cambio está probablemente asociado a cambios en el régimen de afloramiento (ver figura 5).

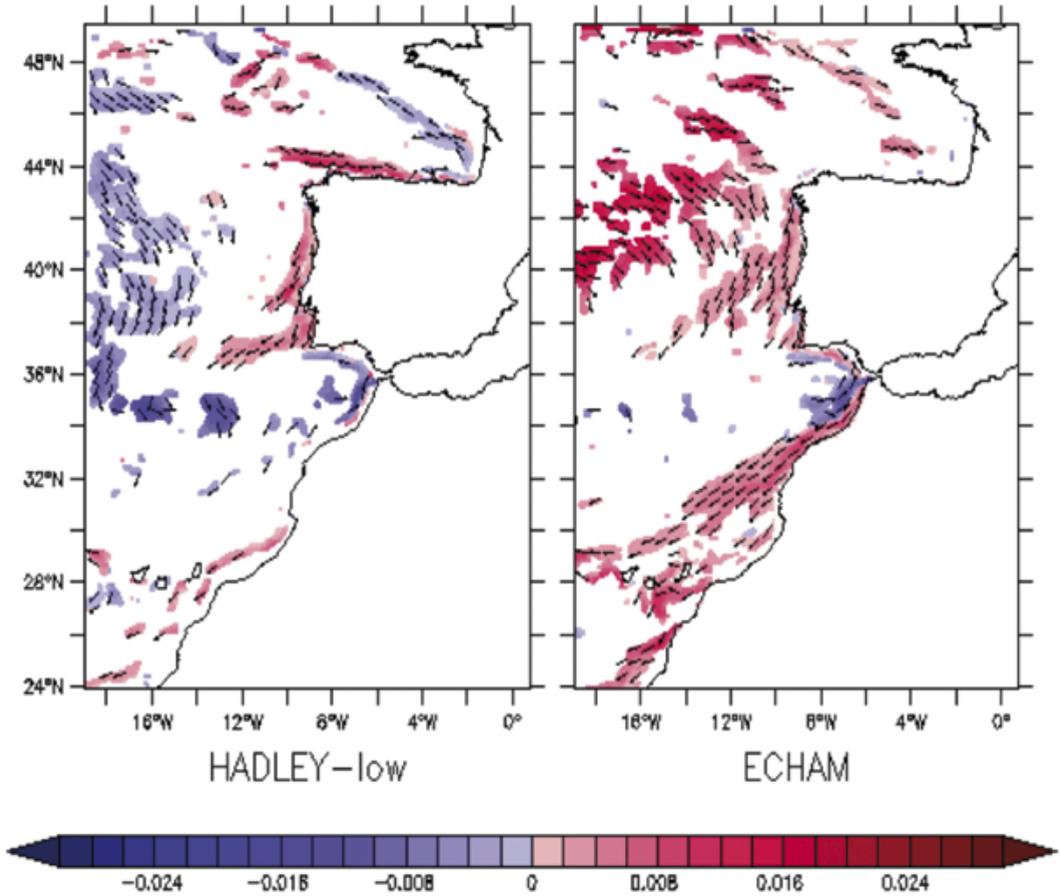


Figura 5: Tendencias del módulo de la corriente superficial (en m/s/década) calculadas para el periodo 2001-2050 a partir de las proyecciones forzadas con HADLEY-low y ECHAM. Las zonas blanqueadas corresponden a tendencias no significativas al 95% de nivel de confianza.



4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Del presente estudio se desprende que:

- Se prevén considerables aumentos de temperatura superficial del mar, especialmente en el Mediterráneo
- Los efectos de los temporales en el nivel del mar (residuos meteorológicos) no sufren un aumento
- Se prevé un aumento notable del nivel medio del mar.
- Los resultados de oleaje para el Mediterráneo y el Atlántico muestran por lo general una reducción del régimen medio. En alguna zona puede darse un aumento de los extremos, pero dentro del rango de incertidumbre.

También cabe señalar las siguientes dudas e incertidumbres:

- Evolución de la salinidad dependiente de modelos globales
- La evolución del nivel total depende de la tasa de deshielo
- Se necesita realizar un mayor número de escenarios regionalizados para mejorar la estima de la incertidumbre

En la segunda fase de este trabajo se pretenden minimizar estas incertidumbres y estudiar el impacto del cambio climático sobre las vulnerabilidades detectadas.



HERRAMIENTAS DE OCEANOGRAFÍA OPERACIONAL APLICADAS A LA PREVISIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE VERTIDOS ACCIDENTALES EN EL ÁMBITO PORTUARIO DE BILBAO



**Jorge Arce¹, Manuel González², Alberto Ojanguren¹,
Almudena Fontán², Luis Ferrer²**

RESUMEN

La simulación numérica permite disponer de información altamente fiable de las condiciones meteorológicas a un plazo de 48 a 96 horas en el litoral español. El desarrollo de sistemas de monitorización y predicción de las condiciones oceánicas, si bien durante largo tiempo ha estado notablemente retrasado respecto a los sistemas atmosféricos, en la última década ha tenido un notable avance, permitiendo sistemas de información y herramientas de apoyo a la gestión de operaciones rutinarias y, también, de eventualidades accidentales en el ámbito portuario.

En esta comunicación se presenta el sistema operacional de predicción de corrientes marinas y de evolución de vertidos desarrollado para el puerto de Bilbao. Con este sistema operacional, se dispone de predicciones horarias de las corrientes marinas en la zona de competencia de la Autoridad Portuaria de Bilbao (APB). Estas corrientes son debidas al efecto de las condiciones meteorológicas y de la marea astronómica. El módulo hidrodinámico, que emplea técnicas de modelado numérico mediante Elementos Finitos, una vez calibrado con diferentes campañas de medida y con la información de estaciones de medida en tiempo real, permite disponer diariamente de información fiable de las corrientes marinas (tanto en superficie como en la columna).

¹ Autoridad Portuaria de Bilbao.

² AZTI-Tecnalia.



Estas previsiones de corrientes marinas son utilizadas para alimentar a un modelo numérico de simulación del comportamiento de vertidos. Este modelo dispone de una interfaz gráfica desarrollada conjuntamente por la APB y AZTI-Tecnalia, y se encuentra a disposición del personal responsable de la seguridad y medio ambiente portuarios. Sus datos de entrada principales, además de las corrientes marinas, son el instante y la localización en que se haya producido el vertido, el tipo de sustancia vertida y su volumen. Mediante su uso puede anticiparse la extensión de la mancha en las siguientes horas al vertido. Este sistema permite analizar situaciones pasadas o eventualidades hipotéticas, tal y como es utilizado de forma habitual por la APB. Además, contribuye a dar respuesta a las exigencias de organización y planificación de los recursos de lucha contra la contaminación de los Planes Interiores según el Real Decreto 1695/2012 de 21 de diciembre, por el que se aprueba el Sistema Nacional de Respuesta ante la Contaminación Marina.

INTRODUCCIÓN

En las últimas tres décadas, la oceanografía ha experimentado un avance muy notable. Este hecho se ha debido al desarrollo de nuevas tecnologías y de métodos de muestreo y análisis, pero también al debate del cambio climático y los problemas relacionados con el agotamiento de los recursos marinos, la degradación de las regiones costeras y la intensificación del tráfico marítimo.

Los últimos avances en oceanografía, tanto científicos como tecnológicos, plantean un nuevo reto a la comunidad de científicos marinos: el de la Oceanografía Operacional (Parrilla Barrera, 2001), definida por Fischer et al. (1999) como toda aquella actividad que comprende las medidas y muestreos hechos en los océanos, mares y atmósfera, su difusión e interpretación, todo ello de un modo rutinario, con el fin de:

- suministrar una predicción continua de las futuras condiciones del mar con la mayor antelación;
- dar la descripción más precisa con un fin utilitario, del estado actual del mar; y,
- reunir datos climáticos a largo plazo para describir estados pasados y elaborar series de tiempo que muestren las tendencias y cambios.

Si bien la perspectiva científica estaba firmemente arraigada, no cabe duda que en el golfo de Vizcaya en general, y en la costa española en particular, el evento del Prestige (noviembre de 2002) supuso un antes y un después en la aplicación de los conceptos de la Oceanografía Operacional (Ferrer et al., 2013). El procedimiento que sigue la Oceanografía Operacional es el de la transmisión de datos observados de forma continua a centros de cálculo donde se procesan mediante modelos numéricos de previsión. Los resultados de estos modelos se usan para generar productos secundarios con aplicaciones especí-



ficas en ámbitos más locales. La necesidad de desarrollar estos servicios locales surge de los requerimientos de la legislación actual, fomentando el desarrollo de herramientas de gestión portuaria. Tal es el caso de la previsión de la deriva de hidrocarburos en los planes interiores marítimos: Real Decreto 1695/2012 de 21 de diciembre, por el que se aprueba el Sistema Nacional de Respuesta ante la Contaminación Marina.

A continuación, se describe el esquema de suministro de predicciones de corrientes marinas en el entorno portuario de Bilbao (Figura 1) y el modelo de predicción del comportamiento de eventuales vertidos de hidrocarburos al mar. El área de estudio abarca toda la zona de competencia de la APB, la cual se extiende desde la Zona II hasta el límite de la marea en la ría de Bilbao.

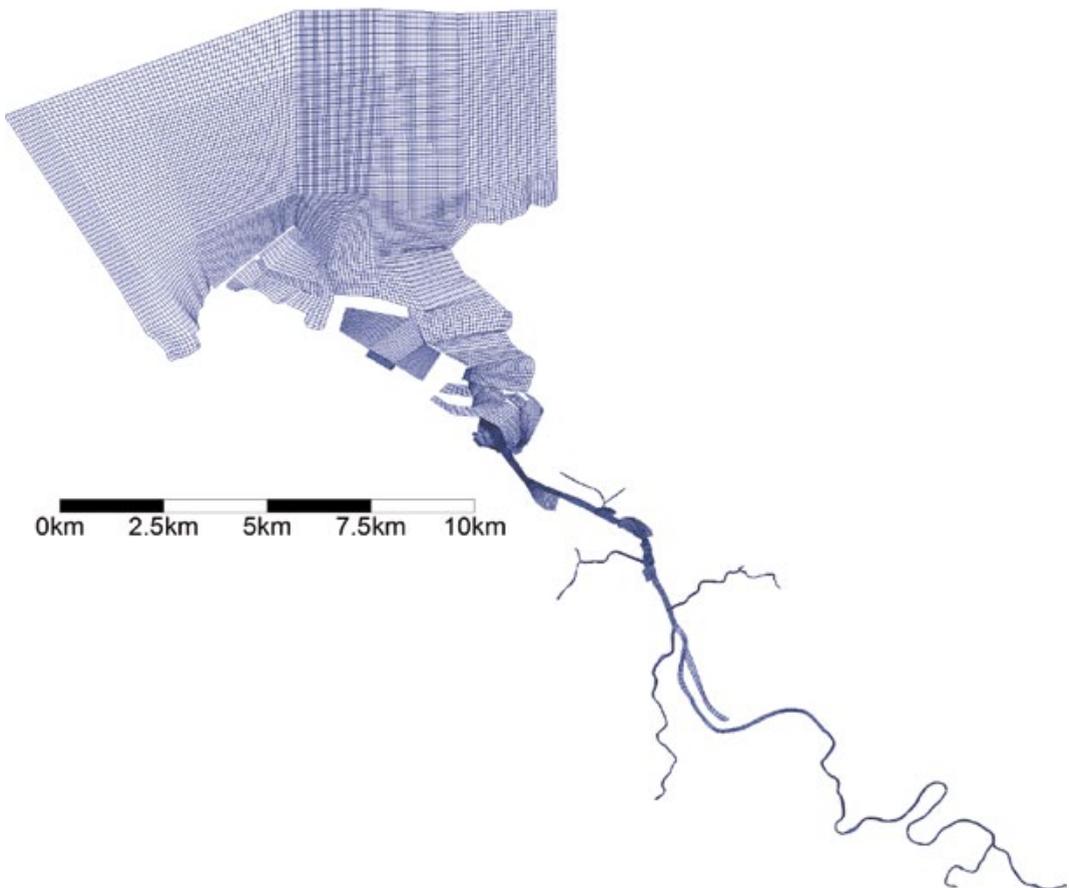


Figura 1. Zona de estudio y malla numérica utilizada en las simulaciones del puerto de Bilbao.

MODELADO DE LA CIRCULACIÓN MARINA

El sistema desarrollado combina la modelización meteorológica, y de corrientes marinas e hidrografía, a diferentes escalas, junto con otros aspectos como el tratamiento, análisis y representación de datos. El fin último es la obtención de aplicaciones concretas para el golfo de Vizcaya y la costa vasca. El sistema está compuesto por diferentes módulos altamente interrelacionados y se implementa a diferentes resoluciones contemplando las escalas global, regional y local.

El primer componente es el módulo meteorológico, encargado de proporcionar una caracterización adecuada de las condiciones atmosféricas y los forzamientos necesarios para el funcionamiento del resto de módulos a diferentes resoluciones. Para las escalas regional y local, se trabaja mediante el anidamiento de diferentes mallas del modelo de mesoescala MM5, utilizando los datos del modelo GFS (Global Forecast System) para la escala global. El módulo de circulación es el responsable de caracterizar adecuadamente las condiciones marinas a escala regional (43,20- 45°N, 5,30-1,10°W, Figura 2), con una resolución media horizontal de 2,2 km y con 32 niveles sigma en profundidad. Estas condiciones marinas a escala regional son utilizadas en los contornos del modelo local del Puerto de Bilbao. Este módulo está basado en el modelo ROMS (Shchepetkin, y McWilliams, 2005), desarrollado por la Universidad de Rutgers, y trabaja con los forzamientos generados por el módulo meteorológico, proporcionando información sobre las corrientes marinas, y la temperatura y salinidad del agua de mar.

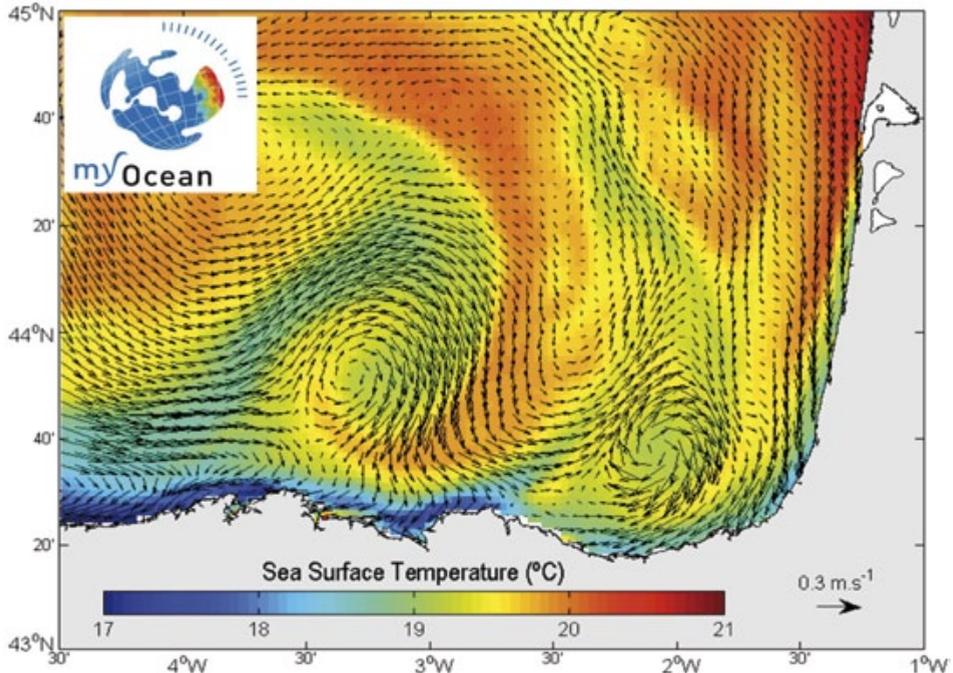


Figura 2. Zona de estudio de la simulación oceanográfica regional (Pelegrí et al., 2012).



En las simulaciones numéricas, se asume que la corriente total puede dividirse en la contribución de la marea astronómica y el resto de origen no astronómico (viento, caudal fluvial, presión atmosférica, circulación global, etc.). La ventaja de esta asunción es que permite el uso de un modelo armónico (notablemente más sencillo, González et al., 1995) para la descripción de las corrientes mareales, el cual ha sido calibrado y validado ampliamente en la zona (González et al., 2004) y que en la actualidad emplea 8 armónicos para la descripción de la marea. Con los resultados del modelo armónico es posible reconstruir la contribución de la marea astronómica a las corrientes marinas en la zona de estudio en cualquier instante.

En la Figura 3 pueden verse las amplitudes de las elipses de marea de las dos ondas más importantes en el Puerto de Bilbao: la onda semidiurna lunar principal (M2) y la semidiurna solar principal (S2).

La contribución a las corrientes marinas del viento y del caudal fluvial se realiza mediante el modelo ECADIS (Espino, 1994). Este modelo resuelve tridimensionalmente la corriente producida por el viento sobre la superficie del mar, así como el efecto del aporte fluvial y de las corrientes de escala regional evaluadas mediante el modelo ROMS en la zona sureste del golfo de Vizcaya (Figura 2).

Los resultados del modelado numérico de las corrientes superficiales (y en breve para las corrientes verticalmente promediadas en la columna de agua) en el Puerto de Bilbao se ponen a disposición de la APB a través de un servicio ftp. De este modo, la APB recibe de forma diaria la previsión de corrientes horaria para las 96 horas siguientes (Figura 4).

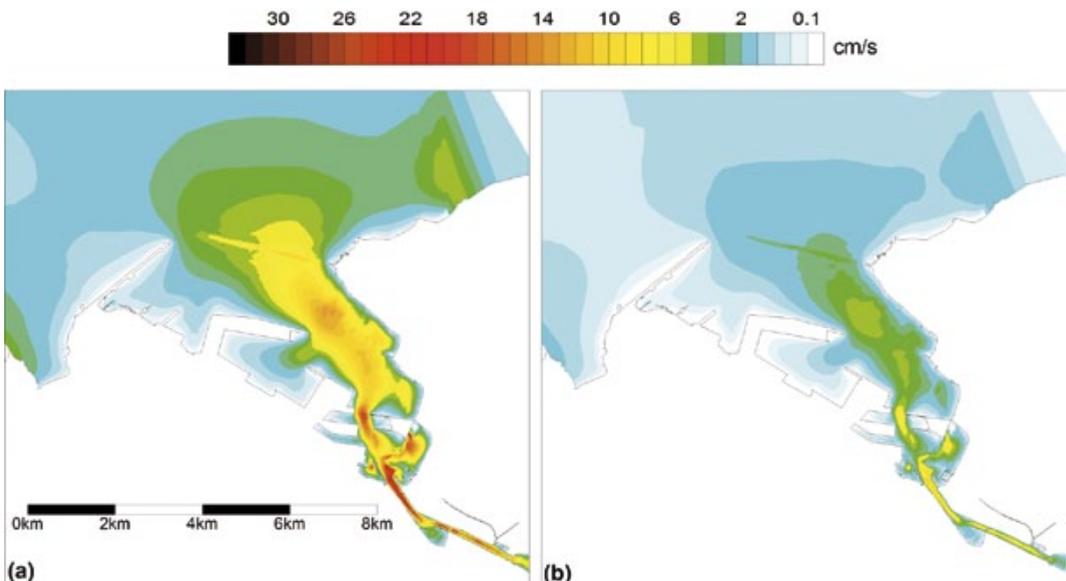


Figura 3. Semieje mayor de la elipse de marea de la onda M2 (a) y de la onda S2 (b) en el Puerto de Bilbao.

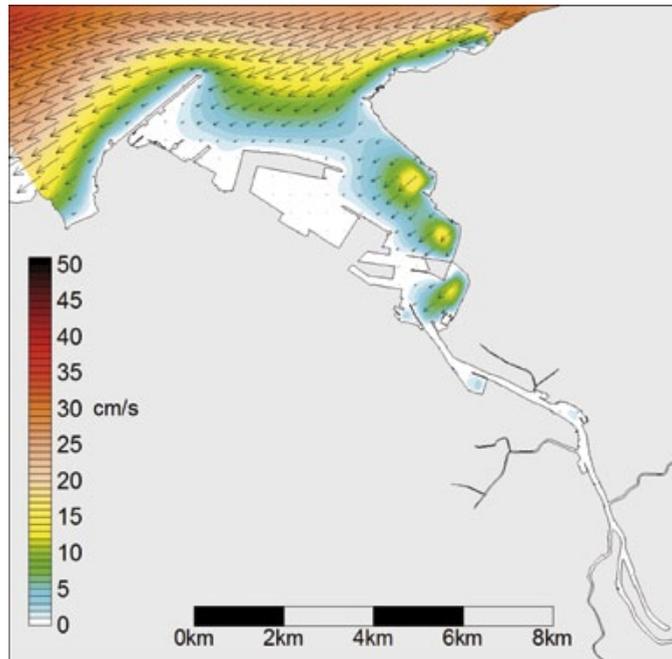


Figura 4. Previsión de corrientes superficiales en el Puerto de Bilbao para el 15 de agosto de 2014 a las 16:00 h (GMT).

MODELADO DE LA DISPERSIÓN DE VERTIDOS

La finalidad última de las previsiones de corrientes marinas es permitir al usuario emplearlas para estudiar el comportamiento y dispersión de posibles vertidos dentro de la zona de estudio. Para ello, se ha desarrollado una herramienta específica de simulación de vertidos de hidrocarburos que, a partir de las previsiones océano-meteorológicas y de la información sobre la sustancia vertida, calcula la dispersión del vertido (González et al., 2000) así como la variación de sus propiedades fisicoquímicas: emulsión, evaporación, viscosidad y densidad (Comerma, 2004). El modelo numérico utiliza una aproximación lagrangiana para simular el desplazamiento de los vertidos bajo el efecto de las corrientes marinas.

Este modelo numérico está instalado en un equipo informático de la APB, en el Centro de Control de Emergencias. Desde este equipo, se actualizan de forma diaria los campos horarios de previsión de las corrientes marinas y, mediante la interfaz gráfica, se introducen la localización y el volumen del vertido (con lo que se calcula la extensión inicial del vertido debida al esparcimiento, Comerma, 2004), el tipo de hidrocarburo (que define sus propiedades fisicoquímicas y su evolución) y el instante en que se ha producido el vertido (para emplear los campos de corrientes marinas adecuados).



Un ejemplo de la herramienta de acceso a las corrientes marinas y de la interfaz para la realización de las simulaciones de vertidos de hidrocarburos puede verse en la Figura 5.

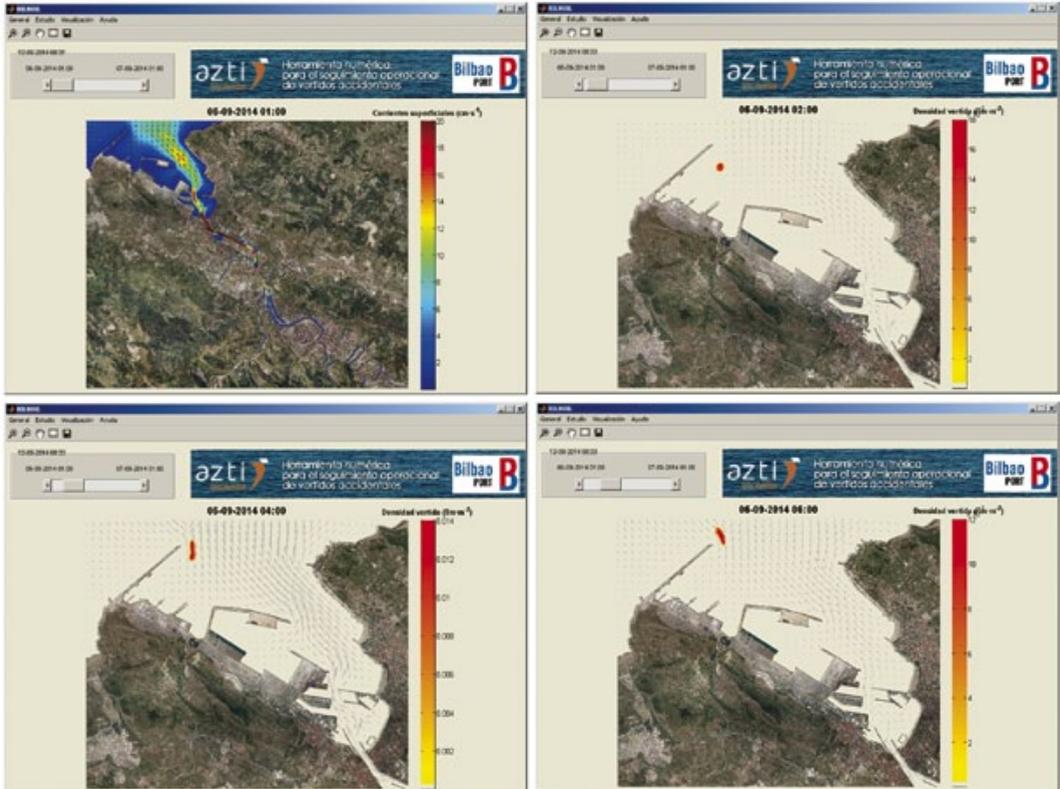


Figura 5. Imagen de la previsión de corrientes marinas en el Puerto de Bilbao el 6 de septiembre de 2014 a las 01:00 h (imagen superior izquierda) y posición de un vertido hipotético en el abra exterior del Puerto de Bilbao el 6 de septiembre de 2014 a las 02:00 h (imagen superior derecha), a las 04:00 h (imagen inferior izquierda) y a las 06:00 h (imagen inferior derecha).

INTEGRACIÓN EN EL PLAN INTERIOR MARÍTIMO DEL PUERTO DE BILBAO

Además de permitir realizar predicciones en situación de afrontar las consecuencias de un accidente o simulaciones preventivas en caso de entrada o manejo en las instalaciones portuarias de cualquier tipo de buque o sustancia, también permite integrar los resultados de las simulaciones partiendo del análisis estadístico de las fases y amplitudes de la marea astronómica, la probabilidad de ocurrencia de los escenarios de viento y los puntos de eventual vertido, así como la características y cantidades de las sustancias manejadas.

En el caso de la APB se han considerado 984 combinaciones posibles de marea y viento: 24 situaciones de marea, 3 amplitudes, (mareas muertas, medias y vivas), y 8 fases de la marea astronómica. En cuanto al viento se han considerado 5 velocidades medias del viento procedentes de 8 direcciones y además se ha considerado un escenario de calmas. Para cada uno de los 37 puntos de eventual vertido se han analizado diferentes tipos de sustancias (hidrocarburos y productos que se disuelvan en la columna de agua). En la Figura 6 se muestra la probabilidad conjunta de afección al dominio de estudio de un vertido que, eventualmente se produzca en uno de los puntos de manejo de sustancias situado en el interior de la ría de Bilbao, en la imagen (a) se muestran los resultados para un vertido de una sustancia que flote, y en la imagen (b) el caso de una sustancia que se disuelva en la columna de agua.

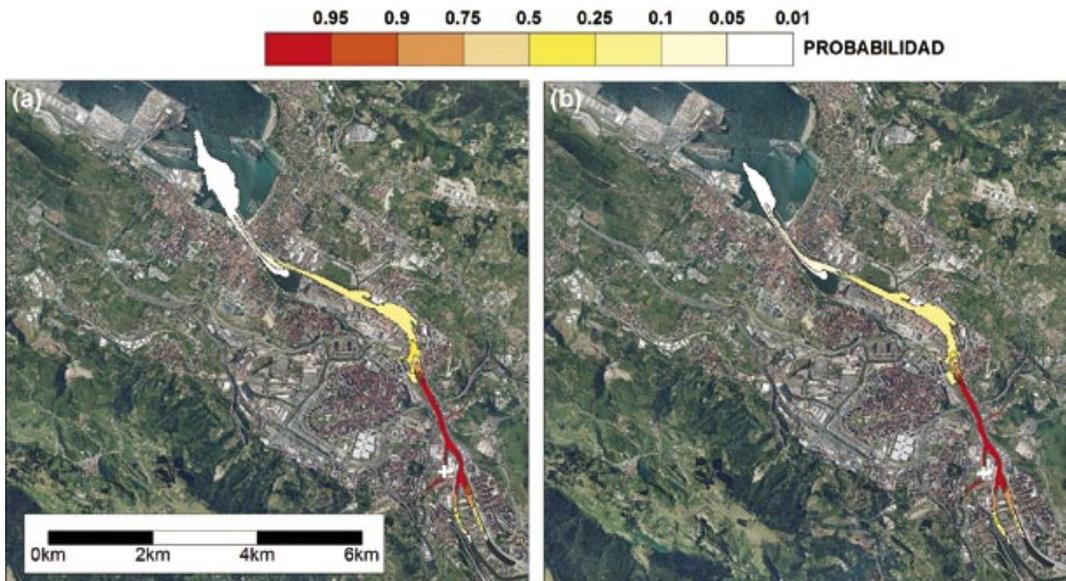


Figura 6. Distribución de la probabilidad de afección de un vertido que se produjera en el interior de la ría de Bilbao (cruz de color blanco). En la imagen (a) se muestran los resultados obtenidos para sustancias flotantes (hidrocarburo) y en la imagen (b) el caso de una sustancia que se disuelva en la columna de agua.



REFERENCIAS

- COMERMA, E. 2004. Modelado numérico de la deriva y envejecimiento de los hidrocarburos vertidos al mar: aplicación operacional en la lucha contra las mareas negras. Tesis Doctoral, UPC.
- ESPINO, M., 1994. Estabilización de la Superficie Libre en la Solución de Ecuaciones Shallow-Water por Elementos Finitos. Aplicaciones Oceanográficas. PhD. Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- FERRER, L., M. GARCÍA-SOTILLO, A. DEL CAMPO, E. ÁLVAREZ-FANJUL, M. COLOMINAS, Y. SAGARMINAGA, A. RUBIO, P. LIRIA, M. GONZÁLEZ, J. MADER. Modelado hidrodinámico de alta resolución en el sureste del golfo de Vizcaya: la evolución de Myocean a Mycoast. XII Jornadas Españolas de Puertos y Costas. Cartagena, 7 y 8 de mayo de 2013.
- FISCHER, J., FLEMMING, N., HOLT, M.R., ROGERS, J., 1999. A profile of operational oceanography. Euro-GOOS Secretariat.
- GONZÁLEZ, M., GARCÍA, M.A., ESPINO, M., SÁNCHEZ-ARCILLA, A., 1995. Un modelo numérico en Elementos Finitos para la corriente inducida por la marea. Aplicaciones al Estrecho de Gibraltar. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol. 11, no 3, 383-400.
- GONZÁLEZ, M., ESPINO, M., COMERMA, E., GYSSELS, P., HERNÁEZ, M., URIARTE, A., GARCÍA M.A., 2000. A numerical tool for hydrocarbon pollution forecasting in the autonomous port of Bilbao. Oil&hydrocarbons Spills II, C.A. Brebbia & G.R. Rodríguez. (Eds.), WIT Press, Las Palmas de Gran Canaria, 95-104.
- GONZÁLEZ, M., URIARTE, A., FONTÁN, A., MADER, J., GYSSELS, P., 2004. Oceanography and Marine Environment of the Basque Country, Chapter 6: Marine Dynamics, Á. Borja & M. Collins (Eds.), Elsevier Oceanography Series 70.
- PARRILLA BARRERA, G., 2001. Oceanografía operacional: un nuevo reto. Física de la Tierra, 13, 167-179.
- PELEGRÍ, J.L., ÁLVAREZ-FANJUL, E., ESPINO, M., FONT, J., PARRILLA, G., SÁNCHEZ-ARCILLA, A., 2012. Crucial times for Spanish physical oceanography. Scientia Marina, 76S1, Special Volume "Advances in Spanish Physical Oceanography", Espino, M., Font, J., Pelegrí, J.L., Sánchez-Arcilla, A. (Eds.), 11-28.
- SHCHEPETKIN, A.F., McWILLIAMS, J.C., 2005. The regional oceanic modelling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. Ocean Modelling, 9, 347-404.



DISEÑO DE LOS MUELLES DEL ESPIGÓN CENTRAL DE LA AMPLIACIÓN DEL PUERTO DE BILBAO EN EL ABRA EXTERIOR



J. García Morales¹, M. J. Hernández Uriarte¹

1. ANTECEDENTES

El Proyecto de Espigón Central constituye la última gran actuación portuaria de las enmarcadas dentro del ámbito de las obras de Ampliación del Puerto de Bilbao en el Abra Exterior, obras que vienen desarrollándose desde principios de los años 90.

En este contexto, en el año 1990 se redactó el Proyecto de Ampliación, ejecutándose en una primera fase (1991-1998) las obras para la creación de una gran dársena exterior abrigada por el Dique de Zierbena y el Contradique de Santurtzi. Asimismo el alcance de este proyecto incluía la implantación del Muelle A-1.

Desde entonces, las expectativas favorables de aumento de mercancías unidas a la necesidad de ampliar las superficies portuarias en el Abra asociada al abandono de las zonas portuarias aguas arriba de la Ría por motivos urbanísticos, impulsaron el desarrollo de fases sucesivas de ampliación del puerto en el Abra Exterior. De esta manera, se acometieron las obras del Muelle A-2 (1999-2003), Muelle A-3 (2002-2004), Muelle AZ-1 (2003-2005), Muelle AZ-3 (2007-2010) y Muelle AZ-2 (2008-2011).

¹ Autoridad Portuaria de Bilbao.

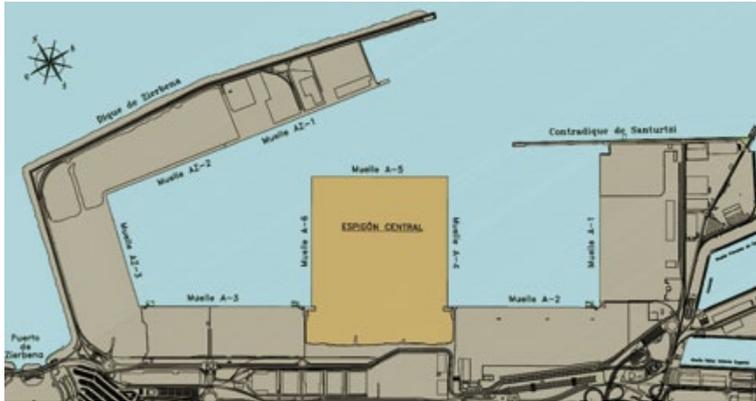


Figura 1. Dársena de la Ampliación con los muelles ejecutados (en gris) y el futuro Espigón Central.

Culminando esta ampliación, el Plan Director de Infraestructuras del Puerto contempla la implantación de un espigón entre los Muelles A-2 y A-3 destinado a mercancías contenerizadas.

Las previsiones de tráfico de contenedores recogidas en el Plan Director reflejan un importante incremento de las mismas a corto-medio plazo debido, fundamentalmente, a la progresiva tendencia a la contenerización de la mercancía general y a la implantación de nuevas terminales logísticas ferroviarias vinculadas al puerto que provocarán un aumento de su hinterland. En base a este escenario, se establece como fecha horizonte para la puesta en servicio del Espigón Central el año 2019.

El espigón estará formado por los denominados Muelles A-4 y A-6, paralelos entre sí, de 665 m de longitud y el Muelle A-5, perpendicular a los anteriores, de 694 m, generando una explanada asociada de unos 600.000 m².

Sus elevadas dimensiones así como su ubicación en medio de una dársena con todos los muelles en explotación hacen necesario que, además de los habituales cálculos estructurales, se requieran estudios específicos que permitan definir su configuración en planta y su sección tipo de tal forma que se eliminen o, al menos, minimicen las afecciones a las condiciones operativas de los muelles próximos.

2. CONFIGURACIÓN EN PLANTA

Agitación

Se ensayaron en modelo numérico de agitación una terna de soluciones del Espigón Central con forma rectangular, con una anchura fija de 700 m entre los Muelles A-2 y A-3 y longitud variable de 600 m, 650 m y 700 m.

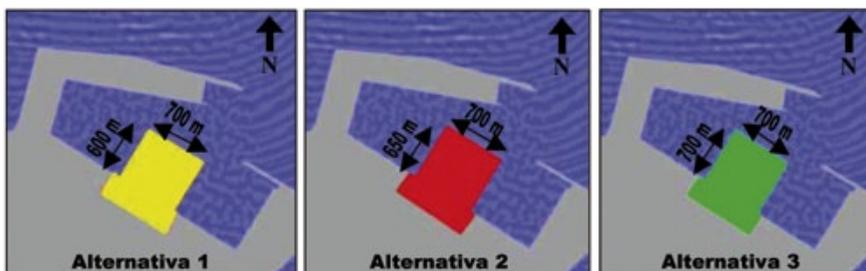


Figura 2. Disposición en planta de las Alternativas 1, 2 y 3 (forma rectangular).

Además, se consideraron otras tres alternativas en forma de trapecio, achaflanando el Muelle A-4, tal y como se muestra en la siguiente figura.

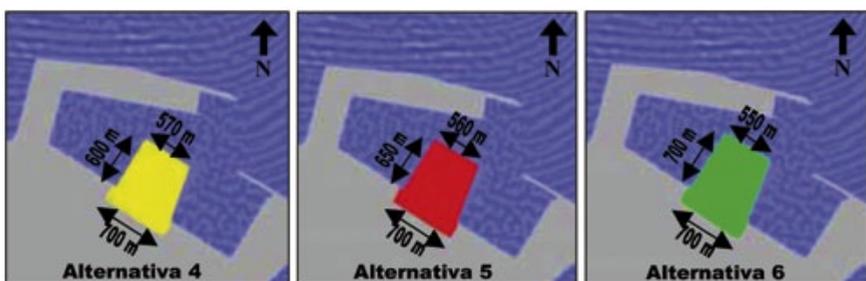


Figura 3. Disposición en planta de las Alternativas 4, 5 y 6 (forma trapecial).

Se reprodujo el comportamiento de estas 6 soluciones constructivas con tipología de muelle vertical, suponiendo una reflexión total (100%). Adicionalmente, se ensayó para la Alternativa 3 un muelle parcialmente disipativo con una reflexión impuesta del 80%. Además se analizó la situación actual sin Espigón Central.

Las características de los oleajes de ensayo se indican en la siguiente tabla.

SECTOR ALTA MAR		AMPLITUD	DIRECCION EN MODELO	T(s)
NW	1	303,75°-326,25°	N-33-W	11
				15
NNW	2	326,25°-348,75°	N-18-W	9
				13
N	3	348,75°-11,25°	N-7-E	7
				11

Tabla 1. Oleajes de ensayo.



Los ensayos de agitación se efectuaron empleando el modelo elíptico MDSL, desarrollado en el CEDEX, el cual reproduce los procesos de asomeramiento, refracción-difracción y reflexión en todo el rango de profundidades.

Del análisis de los resultados se obtienen las siguientes conclusiones:

- El cambio de la disposición en planta del espigón pasando de forma rectangular a trapecio modifica la reflexión de energía en el interior de la dársena, reduciéndose ligeramente los niveles de agitación. Esta reducción tan poco significativa de la agitación unida a la pérdida de superficie de explanada que conlleva este cambio motivó el descarte definitivo de las soluciones en forma de trapecio.
- Dada la orientación de la dársena con relación al oleaje exterior, la contribución a la agitación interior de los oleajes del NNW es la más significativa, siendo los de componente NW los de mayor probabilidad de presentación y los de dirección N los que menores niveles de agitación producen tanto en la situación actual sin Espigón Central como en las alternativas consideradas.
- Se aprecia un ligero aumento de los niveles de agitación al pasar de la Alternativa 1 a la Alternativa 2. La prolongación adicional de 50 m (Alternativa 3) mantiene prácticamente el comportamiento de la agitación de la Alternativa 2.
- El efecto de considerar todos los paramentos del nuevo muelle parcialmente disipativos (Alternativa 3) parece que mejora notablemente los índices de agitación en toda la zona abrigada.
- Los oleajes del NNW de penetración directa y con mayor contribución a la agitación interior, pierden entidad en términos de índice de excedencia, siendo los oleajes procedentes del sector NW los que, por su severidad y frecuencia relativa, más contribuyen al total de tiempo no operativo. La contribución de los oleajes del N a la parada operativa es muy poco significativa.

Maniobras de buques

Posteriormente se evaluó la suficiencia o no de los espacios navegables resultantes en el interior de la dársena para cada una de las 3 alternativas seleccionadas en base a las necesidades de explotación portuaria de los distintos muelles.

Para ello la empresa SIPORT21 analizó las maniobras de los buques de cálculo mediante el empleo del modelo de autopiloto SHIPMA. Este modelo reprodujo el comportamiento de los buques de cálculo (Tabla 2) durante la ejecución de las maniobras de acceso o salida del puerto, sometido a la acción de los agentes ambientales (Tabla 3) y auxiliado por hélices de maniobra y/o remolcadores, en su caso.



Muelle	Nº de atraques por muelle	Buque	Eslora (m)	Manga (m)	G.T.
A-1/A-2	2	Portacontenedores	250-260	32,2	37.000
A-3/AZ-3	2	Mercancía General	200	30	30.000
A-4/A-5/A-6	2	Portacontenedores	215-218	32,2	25.000
AZ-1/AZ-2	2	Granelero	225	32,2	40.000

Tabla 2. Buques de cálculo según muelle de atraque.

VIENTO		OLEAJE			CORRIENTE
Dirección	Intensidad	Dirección	Hs (m)	Tp (s)	
S	20 nudos	N40W	2	12	Llenante
NW					

Tabla 3. Agentes ambientales considerados.

Sin embargo, este modelo no tiene en cuenta los errores de posicionamiento, tiempos de respuesta sobre los mismos, imprecisión de las señalizaciones y balizamientos, resguardos necesarios para evitar efectos de succión, márgenes de seguridad, etc. Estos factores fueron, por tanto, considerados de acuerdo a los criterios de la ROM 3.1-99 "Proyecto de la Configuración Marítima de Puertos; Canales de Acceso y Áreas de Flotación" y los resguardos así calculados fueron añadidos a la envolvente resultante del modelo.

De los resultados obtenidos, se concluye que el espacio navegable disponible en la Alternativa 3 (700 m x 700 m) resulta suficiente para las condiciones hidrodinámicas simuladas y los buques de cálculo considerados.

No obstante lo anterior y en vista de la tendencia al aumento de tamaño de los nuevos buques, especialmente de los Portacontenedores, se consideró oportuno reevaluar el estudio de maniobras con buques de mayor envergadura tipo Post-Panamax.

En este caso, el espacio navegable de la Alternativa 3 resulta muy ajustado para garantizar un acceso seguro y eficiente de buques tipo Post-Panamax. Los problemas de disponibilidad de espacio se producen en algunas maniobras entre la esquina NW del Espigón Central y el Muelle AZ-1. En la Fig. 4 (izda) se puede observar un ejemplo en el que el margen de seguridad de la maniobra invade la mencionada esquina. Dicha afección desaparece completamente al considerar la Alternativa 2 (Fig. 4 dcha).

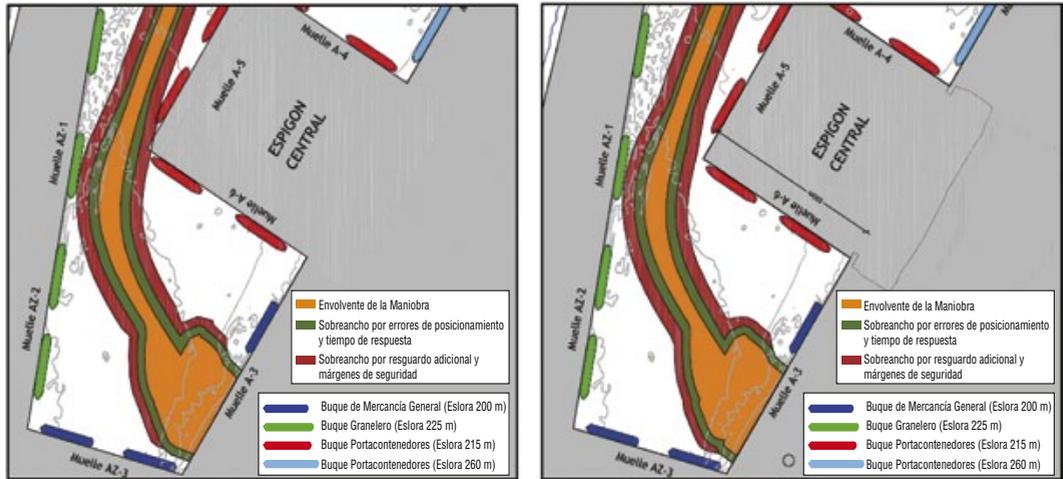


Figura 4. Gráficos de espacios navegables en maniobra de entrada de Buque Post-Panamax al Muelle A-3 para la Alternativa 3 (izda) y Alternativa 2 (dcha).

Se concluye, por tanto, que la Alternativa 2 (700 m x 650 m) resulta ser la más adecuada para garantizar los espacios navegables recomendados en la ROM 3.1-99, así como una maniobra segura para el caso futurible de operación con buques de gran envergadura tipo Post-Panamax, dando lugar a una estructura portuaria mucho más versátil y funcional. Por todo esto se seleccionó dicha alternativa.

Onda larga

Otro fenómeno que hubo que estudiar fue el de resonancia en dársenas portuarias por efecto de ondas de gran periodo. Se encargó al CEDEX un estudio en modelo numérico con el objeto de determinar los periodos propios de oscilación de la dársena, tanto en su configuración actual como en la futura, cuando ésta sea dividida en dos subdársenas por el Espigón Central.

Adicionalmente se completó este estudio con una campaña de medidas de oscilación y ondas largas en la dársena mediante la instalación de dos sensores, uno en la esquina Muelle A-1/Muelle A-2 y el otro en la esquina Muelle A-3/Muelle AZ-3, que acreditó la capacidad del modelo para reproducir la energía de infragravedad asociada a los grupos de ola.

La configuración actual del puerto reproduce, con los tres niveles de marea, movimientos periódicos entre los muelles A-1 y AZ-3 de $L/2$ y L (1° y 2° armónico transversal respectivamente), siendo L la longitud de onda del periodo excitador. Los periodos de oscilación asociados, que dependen del nivel de marea, son 292 s y 177 s en Bajamar, 285 s y 170 s en Nivel Medio y 279 s y 164 s en Pleamar. Con la construcción del Espigón Central estas oscilaciones desaparecen. En las dos nuevas dársenas generadas no se detecta la aparición de nuevas resonancias de entidad.



En la configuración actual la zona de agua comprendida entre el trasdós del contradique y el Muelle A-2 presenta, para los tres niveles de marea, un movimiento periódico de $L/2$ (1° armónico transversal) en la banda centrada en los 100 s. La implantación del Espigón Central produce un cierto aumento de la energía de infragravedad asociado a dicho periodo.



Figura 5. Periodos de oscilación detectados en el modelo numérico para la configuración sin Espigón Central (izda) y con Espigón Central (dcha).

3. SECCIÓN TIPO

A la vista de los resultados obtenidos en el estudio de agitación mencionado anteriormente, la adopción de una sección estructural de muelle parcialmente disipativo parecía mejorar notablemente los índices de agitación en toda la zona abrigada. En consecuencia, se analizaron con la ayuda de Berenguer Ingenieros una serie de alternativas de sección tipo encaminadas precisamente a disipar parte de la energía del oleaje incidente.

En primer lugar, se planteó el empleo de cajones prefabricados colocados a tizón de forma alternada con zonas en talud. La plataforma entre cajones contiguos estaría conformada por vigas o losas armadas.

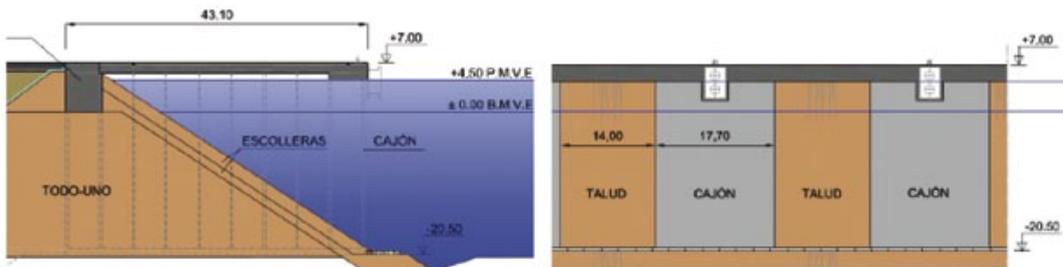


Figura 6. Sección transversal (izda) y alzado (dcha) de la Alternativa 1.

El efecto amortiguador reside en el comportamiento de cada abertura entre cajones como una cámara de gran anchura rellena a su vez de escollera con un talud de suave pendiente en su zona activa.

Por otro lado, se planteó una segunda alternativa basada en la formación de un muro continuo con cajones antirreflejantes dotados de una cámara de anchura equivalente a varias de sus celdas interiores.

La estructura interior de las cámaras puede ser diversa así como las dimensiones y número de aberturas por celda.

La profundidad de la solera de las cámaras interiores debe establecer un compromiso entre la funcionalidad y la factibilidad constructiva. En teoría, cuanto más desarrollo vertical tenga la ventana de la cámara de atenuación mayor será su eficacia. Sin embargo, en diversos ensayos se ha comprobado que no existe una relación lineal y que aún en los casos en que el labio inferior de la ventana se sitúa a escasa distancia por debajo del nivel medio del agua, se consiguen grados de eficacia relevantes. Por otro lado, la ejecución de las ventanas suele suponer una dificultad importante en el proceso de ejecución de la obra, que generalmente se incrementa con la profundidad de su labio inferior.

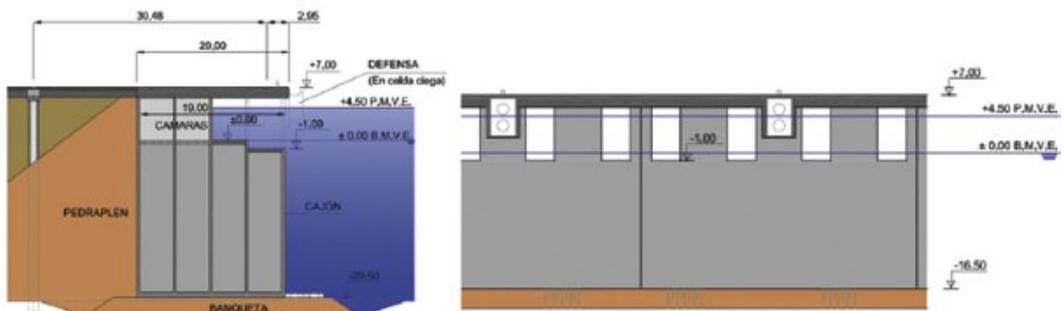


Figura 7. Sección transversal (izda) y alzado (dcha) de la Alternativa 2.

En cuanto a la anchura de la cámara se propone extenderla a toda la manga del cajón, y por lo tanto, a todas sus celdas interiores. En base al conocimiento del estado del arte en lo que a cajones antirreflejantes se refiere, un muelle de este tipo podría alcanzar fácilmente unos coeficientes de reflexión comprendidos entre el 40% y el 65%.

Sin embargo, la asignación de un porcentaje de reflexión total (100%) a un muro de muelle, aunque sea completamente vertical, resulta excesivamente pesimista. De los ensayos realizados en modelo sobre estructuras de paramento vertical cimentadas a profundidades de un orden de magnitud inferior a la semi-longitud de las olas incidentes, se deducen coeficientes de reflexión comprendidos entre el 85% y el 95%.



Siendo conscientes, por tanto, de que en la realidad el coeficiente de reflexión no será del 100%, se encargó al CEDEX la realización de un nuevo estudio de agitación que evaluara los efectos de la disposición de muelles con cierta disipación de energía correspondiente a reflexiones del 95%, 80% y 60%.

Este estudio de agitación se realizó con el modelo numérico MIKE21, modelo no lineal que considera las ecuaciones extendidas de módulo de onda corta de Boussinesq.

Del estudio se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La construcción del Espigón Central reduce en todos los casos estudiados los niveles de agitación actuales de los atraques de la zona Oeste de la dársena. Para los atraques de la zona Este de la dársena la influencia de la nueva obra es poco significativa.
- La comparación de los efectos de las tres soluciones estudiadas con muelles parcialmente disipativos (reflexiones del 95%, 80% y 60%) muestra que los niveles de agitación resultantes son en los tres casos prácticamente iguales en las zonas situadas en la dársena Oeste y con diferencias poco apreciables en las zonas de atraque actuales de la dársena Este. Para el resto de zonas de atraque situadas en la nueva obra, las máximas diferencias se producen en el atraque más oriental del testero, ubicado justo en frente de la bocana.
- Teniendo en cuenta el tiempo máximo de parada operativa admitido en la ROM 3.1-99 de 200 horas al año y el umbral límite de altura de ola ($H_s, u=0,5$ m) todas las alternativas planteadas resultan aceptables.
- La comparación de los niveles de agitación resultantes al considerar muelles con una reflexión del 95% respecto al caso de muelles totalmente reflejantes (reflexión del 100%), siendo los primeros significativamente menores, pone de relieve la importancia que tiene la consideración de una leve disipación de energía en zonas abrigadas con estructuras verticales enfrentadas.

A la vista de estos resultados, se optó finalmente por diseñar el muelle con una tipología de paramento vertical convencional conformado por cajones multicelulares de hormigón armado en toda su longitud.

4. VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN EN MODELO FÍSICO

Culminando los estudios en modelo numérico citados anteriormente, se procedió al estudio de la solución seleccionada mediante modelo físico a escala reducida.

Se encargó al CEDEX la realización de ensayos en modelo físico de agitación, ondas largas y barcos atracados con la configuración actual y futura para analizar el comportamiento hidrodinámico de la dársena y la operatividad de sus atraques, contrastando así los resultados de los modelos numéricos.

El modelo físico tridimensional se construyó en la nave de ensayos del CEPYC a escala 1:115, la cual garantiza una buena representatividad de los resultados obtenidos ya que cumple con las recomendaciones extraídas de otros estudios similares, los cuales recomiendan para ensayos de ondas largas en instalaciones portuarias una escala comprendida entre 1:50 y 1:150 y para los ensayos de buques atracados entre 1:80 y 1:150.

En cuanto a la agitación, se comprueba que en la configuración con el Espigón Central se produce un ligero incremento de la agitación, principalmente en la zona próxima al quiebro entre el Muelle A-1 y el Muelle A-2, zona ya de por sí propensa a este efecto en la situación actual sin Espigón Central.

En lo referente a los ensayos de onda larga, en la configuración actual destacan dos modos de oscilación de la dársena. Uno de ellos en sentido longitudinal (Muelle A-1/Muelle AZ-3), con un periodo que oscila entre 263 s (Pleamar) y 290 s (Bajamar) y el otro, se produce entre el extremo Este del Muelle A-2 y el morro del dique de abrigo, con un periodo comprendido entre 95 s (Pleamar) y 103 s (Bajamar). Dichos periodos son coincidentes con los obtenidos en el modelo numérico.



Figura 8. Periodos de oscilación detectados en el modelo físico para la configuración sin Espigón Central (izda) y con Espigón Central (dcha).

La construcción del Espigón Central hace que las oscilaciones longitudinales desaparezcan, manteniéndose el modo de oscilación entre el extremo Este del Muelle A-2 y el morro del dique, con un periodo entre 93 s (Pleamar) y 102 s (Bajamar).

El factor de amplificación entre la energía generada y la existente en los puntos de medida indica que las amplificaciones verticales producidas en los nodos y las horizontales en los antinodos no son de intensidad suficiente para provocar serios problemas de seguridad en los buques atracados en las zonas más desfavorables.

En lo que respecta a los ensayos de barcos atracados, se analizó el comportamiento de 6 buques situados en las zonas de amarre donde se preveían los peores comportamientos, a tenor de los resultados de los estudios previos. Tal y como se observa en el siguiente figura los dos Graneleros de 206 m y 267 m se situaron en el Muelle AZ-1 y AZ-2, respectivamente, y los cuatro Portacontenedores, dos de 211 m, uno de 251 m y uno de 276 m en los Muelles A-4, A-5, A-1 y A-2, respectivamente.



Figura 9. Ensayo de buques atracados en modelo físico con el Espigón Central.

Mediante extrapolación de los datos se estimó el índice de inoperatividad de cada atraque, conforme a los movimientos límite indicados por el PIANC, 1995.

Este índice de inoperatividad se define como el tiempo en un año medio en el que se supera, al menos una vez en el periodo de 1 hora de operación de carga/descarga, los valores máximos admisibles de los movimientos del buque lo que, evidentemente, no supone la interrupción de la operación durante ese tiempo, sino una disminución del rendimiento en algún momento de cada jornada.

Los dos buques Graneleros (Muelles AZ-1 y AZ-2) y el Portacontenedores 251 (Muelle A-1) presentan unos índices de inoperatividad nulos en la situación actual. Con la construcción del Espigón Central estos valores se mantienen nulos. Asimismo, el Portacontenedores 211 ubicado en el Muelle A-4 de la nueva obra muestra una inoperatividad nula.

Los casos más desfavorables con la implantación de la nueva obra los constituyen el Portacontenedores 276 (Muelle A-2) y el Portacontenedores 211 (Muelle A-5) que presentan valores de inoperatividad de 364 horas/año y 632 horas/año, respectivamente. Este buque presenta los mayores índices de inoperatividad por ser el más expuesto al oleaje entrante por la bocana.

Teniendo en cuenta el criterio definido por el PIANC para el caso del 50% de eficiencia, las inoperatividades señaladas desaparecen hasta ser cero en las dos situaciones anteriores, lo que garantiza que la operación de carga/descarga de buques en estos dos atraques, en el peor de los casos, no será objeto de parada sino de una cierta reducción en el rendimiento de la misma.

Resulta especialmente llamativa la obtención de índices de inoperatividad considerablemente mayores si éstos son calculados siguiendo el criterio de la ROM 2.0-11, en vez del PIANC. Esto se debe a que los movimientos límites admisibles por la ROM son más restrictivos que los del PIANC.

Por último, cabe señalar que se ha ensayado una tercera configuración de la dársena consistente en considerar el Espigón Central conjuntamente con una prolongación del Muelle AZ-1 de 228 m hacia la bocana. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que la realización de esta actuación complementaria conllevaría una mejora general de la operatividad de los buques en todos los atraques considerados y, particularmente, en los más afectados.

5. CARACTERÍSTICAS MÁS RELEVANTES DEL PROYECTO

La presente actuación generará un total de 2.023 metros de cantil de nuevo muelle formado mediante el fondeo de 43 cajones de 46,12 m de eslora, 17,16 m de manga en fuste y 24 m de puntal. Todos los cajones quedarán fondeados a -21 m, excepto los dos de arranque que lo harán a -20 m, por ser ésta la cota de cimentación de los Muelles A-2 y A-3. Los cajones se apoyarán sobre una banqueta de escollera de 2 m de espesor para lo cual será necesario efectuar un dragado previo en la zona de cimentación de los mismos.

La superficie de explanadas de muelle generada será de unos 600.000 m², para lo cual se requerirán algo menos de 20 Mm³ de material de relleno general procedente principalmente del dragado previsto en la Zona II de aguas exteriores portuarias.

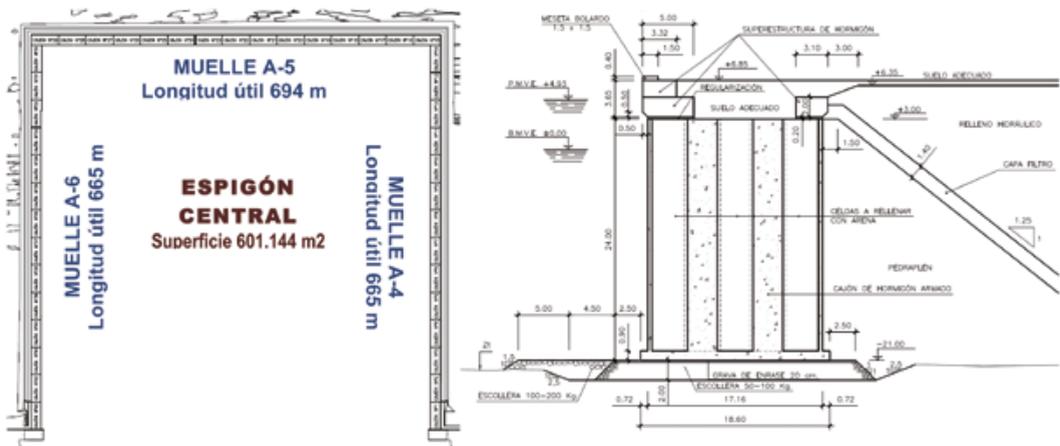


Figura 10. Planta General (izda) y Sección Tipo de proyecto (dcha).

El resto de materiales de relleno procederán de cantera y consistirán básicamente en pedraplén y capa de filtro para trasdosar los cajones, material todo-uno para las motas interiores de confinamiento y suelo adecuado para la terminación de explanadas.

La superestructura del muelle estará constituida por unos macizos de hormigón en masa y hormigón armado en zona de bolardos.



6. CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTOS GEOTÉCNICOS

Se llevó a cabo una Campaña de Reconocimientos Geotécnicos específica empleando una pontona que consistió en la realización de 5 sondeos y 5 ensayos de penetración estática CPTU. Estos trabajos se completaron con ensayos de penetración dinámica SPT y tomas de muestras para su análisis en laboratorio.

A la vista de los resultados se pudo establecer una columna estratigráfica representativa compuesta por los siguientes niveles (de menor a mayor profundidad):

- Arena principalmente fina, con contenido de finos en pequeña proporción (inferior al 15%) y cuyo espesor varía desde apenas un par de metros cerca de la línea de costa hasta unos 26 m en la zona del testero del futuro espigón. Constituye el estrato predominante de los depósitos de estuario.
- Limo-arcilla de baja plasticidad que presenta espesores en general decimétricos detectados dentro de los depósitos de estuario.
- Nivel granular compuesto de grava con algo de arena y limo de compacidad densa con espesores variables desde cero hasta 15 metros.
- Suelo residual compuesto por limo de baja plasticidad de consistencia firme que aparece en zonas puntuales sobre el sustrato rocoso.
- Sustrato rocoso formado por lutita gris, generalmente de tipo margoso, algo fracturada y meteorizada.

Se detectó la presencia en superficie de una capa de limos poco consolidados de unos 50 cm de espesor que será dragada antes de disponer la banqueta de cimentación.

En base a los resultados obtenidos, se definieron los parámetros geotécnicos de los diferentes materiales del terreno y se calculó para las condiciones de carga previstas la estabilidad del muelle frente a los modos de fallo característicos (deslizamiento, vuelco rígido, hundimiento, vuelco plástico y estabilidad global), conforme a la metodología recogida en la ROM 0.5-05 y ROM 2.0-11. También se evaluaron los coeficientes de seguridad mediante herramientas más precisas de modelización numérica, que permitieron estimar los movimientos esperados.

7. CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES

En julio de 2011 se sometió el Proyecto a procedimiento de decisión de Evaluación de Impacto Ambiental, conforme al entonces vigente texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos aprobado por Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero, por enmarcarse dicho proyecto dentro del Anexo II (epígrafe k del grupo 9).

Debido a que dicho proyecto estaba sujeto a evaluación individualizada de impacto ambiental conforme a la ley autonómica, quedó finalmente enmarcado en el grupo 9 epígrafe d del Anexo I: “todos los proyectos incluidos en el Anexo II cuando sea exigida la Evaluación de Impacto Ambiental por la normativa autonómica”, obligando a someter el Proyecto a Evaluación de Impacto Ambiental.

De esta manera, se redactó el preceptivo Estudio de Impacto Ambiental y se sometió el expediente a Información Pública para finalmente conseguir la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) con fecha de resolución el 17 de abril de 2013.

Algunas de las condiciones más destacadas establecidas por la DIA son:

- Control y seguimiento de la calidad del agua.
- Control y seguimiento de la calidad del aire y niveles de ruido.
- Control y seguimiento de las comunidades macrobentónicas de sustrato blando.
- Control y seguimiento específico de la pluma de turbidez.
- Disposición de un sistema de despliegue rápido de barreras de contención de hidrocarburos y cortinas antiturbidez en caso de ser necesario.
- Ejecución de los dos recintos situados a ambos lados del que acogerá los materiales del dragado de cimentación (representado en la figura de la derecha) con carácter previo al inicio del vertido de los citados materiales. Se garantizará el rebose del recinto central a los laterales. De este modo, se prolongarán los recorridos de las partículas en suspensión facilitando la decantación de las partículas más finas.
- Ejecución del dragado de cimentación sin rebose en draga.
- Disposición pública de todos los documentos e informes de seguimiento realizados a través de la página web de la Autoridad Portuaria de Bilbao.

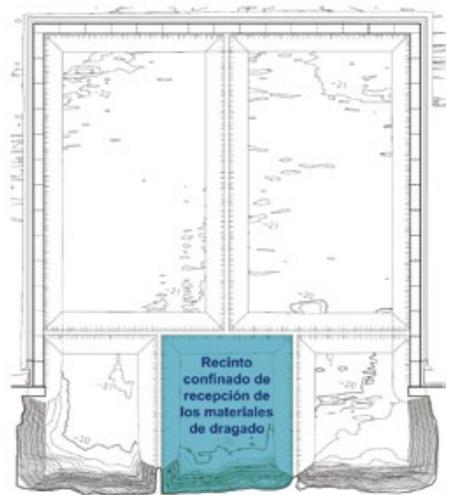


Figura 11. Planta de recintos confinados.

En lo relativo a la obtención y gestión del material de relleno hidráulico procedente del dragado, se redactó el correspondiente Proyecto de Extracción y se sometió de forma independiente a procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental, obteniendo su propia resolución favorable con fecha 17 de abril de 2013.



PLAN DE PROTECCIÓN Y DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA COSTA DE FLANDES. HORIZONTE 2100



Jeroen Gheysens¹

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos siglos, la costa flamenca se ha erosionado y desplazado en dirección Este. De una zona amplia y arenosa con islas (que significaban una protección natural y flexible) la costa se ha convertido en una línea fina y rígida que actualmente se debe proteger a través de diques. De ser un paisaje natural la costa ha pasado a ser un área densamente urbanizada. De esta forma, la calidad de la zona costera y del interior se ve afectada.

El desarrollo y el aumento de población ha conllevado la ampliación de los puertos, la profundización de los canales y la utilización de zonas de valor ecológico. De este modo, se ha perdido parte de la fortificación marina natural, compuesta de una franja de arena de playas y dunas, por lo que ha sido necesario fortalecerla en muchos lugares mediante diques y/o rompeolas, sin tener en cuenta el carácter dinámico de la arena. Este cambio hacia una protección rígida ha implicado que actualmente muchas estructuras no cumplan con los niveles de seguridad deseados junto a una continua erosión de las playas.

El cambio climático supondrá un incremento del nivel del mar de unos 60 cm en 2100, existiendo incertidumbre sobre esta cifra, pudiendo incluso ser el doble. Por otro lado, también se incrementará la altura de ola asociada a tormentas extremas. Por lo tanto la prioridad es enfrentar el reto que constituye la SEGURIDAD a corto y a largo plazo.

Esta problemática ha adquirido un carácter urgente y por eso se hace necesaria una intervención a corto plazo junto a un plan global a largo plazo que debe iniciarse AHORA!

¹ Dredging International NV.



LA ESTRATEGIA

Una buena estrategia para la protección y desarrollo de la costa exige una visión a largo plazo. En la visión de Vlaamse Baaien, el objetivo es mejorar lo que ya existe con creatividad y espíritu empresarial a través de nuevas oportunidades. Mediante la creación de una costa amplia y de material blando podemos devolver espacio a la naturaleza y a las personas, haciendo que la costa flamenca sea de nuevo atractiva al mismo tiempo que se restaura la seguridad.

La visión de Vlaamse Baaien para la costa flamenca se puede materializar en 10 proyectos distintos. Algunos de ellos son urgentes y se pueden desarrollar a corto plazo mientras que otros sólo son asequibles y realistas a largo plazo. En cada intervención o proyecto deben prevalecer los siguientes criterios:

1. Seguro:

La seguridad de las costas y sus usuarios es la primera prioridad. Basándose en los escenarios del IPCC, Vlaamse Baaien supone un incremento del nivel del mar de 30 cm hasta el 2050 y 60 cm hasta 2100, junto con fuertes tormentas. La aportación de mucha arena a las playas y dunas constituirá una defensa flexible y estable en la que será la propia naturaleza la que se auto regule. Una protección blanda allí donde se pueda y sólo estructuras rígidas donde sea necesario. El desafío es el desarrollo de medidas adecuadas con un carácter sostenible y una visión coherente a largo plazo.

2. Natural:

Durante el último siglo se ha urbanizado mucho la costa flamenca. En comparación con las zonas costeras limítrofes en Francia y los Países Bajos, las zonas ecológicas de la costa flamenca no presentan ningún formato. La creación de un espacio para el sistema de dunas y playas ofrece la posibilidad de mejorar el paisaje y crear zonas ecológicas más grandes, a la vez de asegurar la seguridad costera.



3. *Atractivo:*

La costa flamenca es un importante destino turístico con gran valor económico. Un paisaje natural con más y mejores disposiciones tales como puertos para yates o complejos para (eco)-turismo puede incrementar el encanto de la costa a largo plazo.

4. *Sostenible:*

El mar del Norte puede ser en el futuro una fuente importante para la generación de energía renovable. A día de hoy el mar del Norte ya se utiliza para la obtención de energía eólica. El número de parques eólicos marinos podría incrementarse significativamente. Además se podrán desarrollar otras fuentes de energía sostenible en el mar en el futuro.

5. *Desarrollado:*

Los puertos de Zeebrugge y Oostende son muy importantes y suponen una gran contribución a la economía. Para asegurar esta posición económica en el futuro será necesario disponer de espacio para el crecimiento. Este crecimiento debe poder adaptarse al marco natural y sostenible de un nuevo paisaje costero.

LOS PROYECTOS

Como ya se ha indicado, la garantía de la seguridad es el principal problema a resolver. Una vez que esto se ha logrado, hay lugar entonces para el desarrollo económico, que puede concretarse en:

- Expansión de Zeebrugge
- Concepto de Puertos Cerrados
- Visión para Oostende
- Turismo/Gastronomía
- Pesca

Las oportunidades para la generación de energía sostenible procedente del mar son muy grandes:

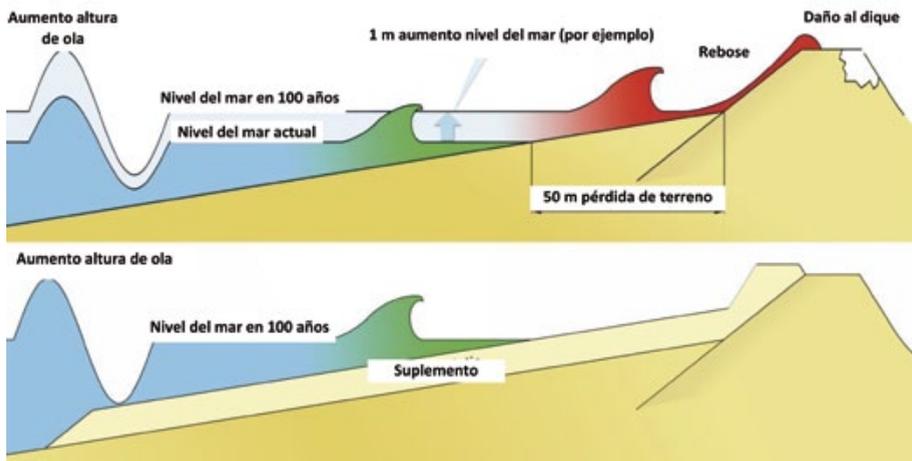
- Molinos Eólicos
- Energía Mareomotriz
- Ósmosis



PROYECTO 0: PROTECCIÓN COSTERA

La idea principal es recrear las playas y dunas existentes mediante la aportación de arena, consiguiendo así una protección flexible en la que la naturaleza se auto regulará. Para esto debe considerarse un temporal de retorno de 1.000 años.

De esta forma se crea un mantenimiento sostenible de la seguridad a la vez que se crean espacios naturales, espacios recreativos y posibilidades de utilización de la parte alta de las playas.



PROYECTOS 1 + 2: PROTECCIÓN COSTERA: ELEVACIÓN DE BANCOS DE ARENA EXISTENTES. ISLAS PARA LA NATURALEZA MARINA

Una de las actuaciones a llevar a cabo es la elevación de los bancos de arena existentes frente a la costa mediante la aportación de arena. Algunos de ellos afloran a superficie en bajamar (como las llanuras mareales de Schelde y Broersbank) mientras que otros permanecen por debajo del nivel de la bajamar. Estos bancos suponen una forma natural de disipación de energía, reduciéndose notablemente el oleaje al pasar sobre ellos.



La elevación de estos bancos puede materializarse hasta crear islas. De esta forma se crean espacios naturales que pueden reforzar el hábitat de diversas especies animales y también pueden crearse espacios dedicados al turismo.



PROYECTO 3: PUERTO DE ZEEBRUGGE, CERRAMIENTO DEL ESTUARIO

En una visión a largo plazo el puerto de Zeebrugge puede crecer hasta el Scheurpas. De esta forma se puede aumentar exponencialmente el tráfico de contenedores de aguas profundas. Esto es una gran ventaja dada la posición de Zeebrugge en el área portuaria flamenca.



PROYECTO 4: PLAYA KNOKKE-HEIST / ZWIN

El desarrollo de la playa de Knokke-Heist hacia el este, adosado al puerto, supondría oportunidades de desarrollo para Knokke. Además se crearía un puerto deportivo y una reserva natural en la Bahía de Heist.





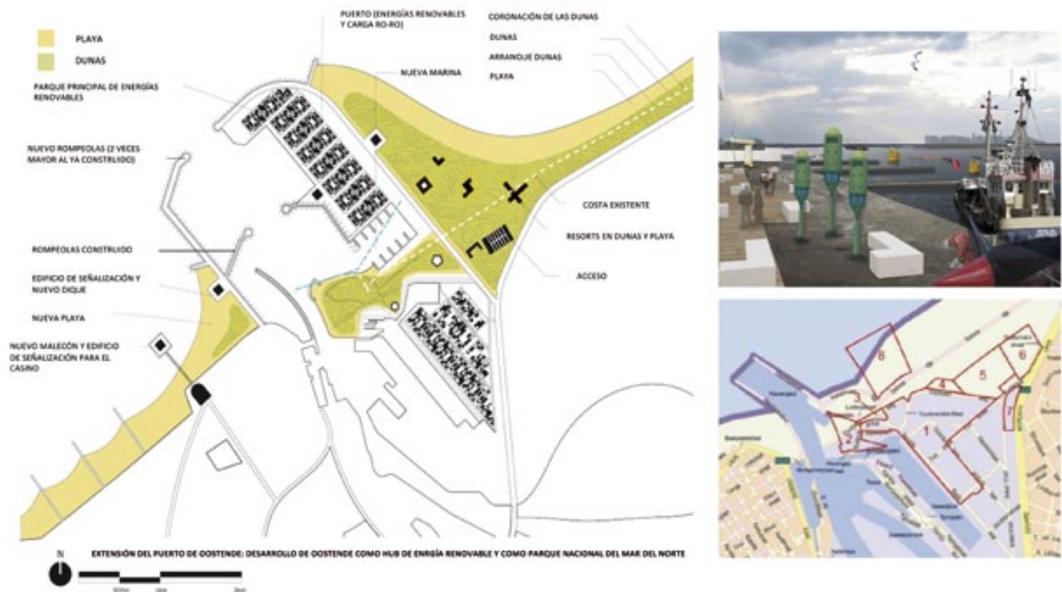
PROYECTO 5 + 6: PUERTO DEPORTIVO DE BLANKENBERGE

La expansión de Zeebrugge por el oeste hasta Blankenberge supondría una nueva entrada al puerto que evitaría sedimentación. Junto a la ampliación del puerto deportivo, a largo plazo también puede generarse una nueva área residencial. Adicionalmente este proyecto también mejora el flujo de sedimentos en toda la zona.



PROYECTO 7: OOSTENDE COMO PUERTO VERDE

El puerto de Oostende puede constituirse como un puerto de servicios offshore para dar cobertura y apoyo logístico y operacional a las energías renovables que ya se están obteniendo del mar y cuyo crecimiento y desarrollo futuro están asegurados.





PROYECTO 8: CENTRO DE DEPORTES ACUÁTICOS EN NIEUWPOORT

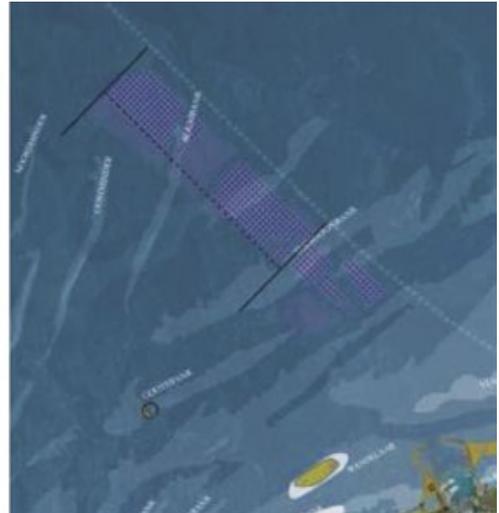
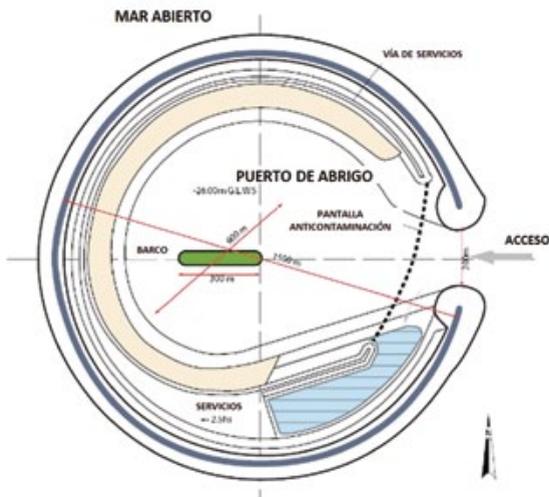
El puerto deportivo de Nieuwpoort es actualmente un referente para la navegación recreativa en todo el Mar del norte. Este hecho puede consolidarse potenciando la infraestructura para deportes acuáticos y desarrollando el puerto hacia el exterior.



PROYECTO 9 + 10: ISLA MULTIFUNCIÓNAL: PUERTO PARA SERVICIOS OFFSHORE Y GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE PROCEDENTE DEL MAR

La creación de una isla multifuncional cercana a la costa supondría la posibilidad de centralizar en ella un puerto que cumpliera las siguientes funciones:

- Base para servicios offshore.
- Puerto de abrigo ante temporales.
- Puerto de transbordo de carga.
- La isla en sí misma podría generar energía renovable.
- También podría suponer la creación de zonas naturales para el desove de especies de peces.



Generación de energía renovable procedente del mar en el Mar del Norte:

- Molinos Eólicos.
- Mareomotriz.
- Otras posibilidades.

EL COSTE Y LOS RENDIMIENTOS

La financiación de un proyecto de esta magnitud puede realizarse a través de una colaboración público privada en la que ambas partes puedan jugar un papel importante. Dada la flexibilidad y alcance de esta visión a largo plazo, pueden alcanzarse ahorros significativos por ejemplo reutilizando la arena que se draga en una zona para rellenar otra.

Vlaamse Baaien significa también rendimientos a través de la creación de trabajo y el desarrollo económico. La continua construcción del sector de puertos, la industria marina, las compensaciones a la naturaleza, el turismo y la recreación significan nuevas posibilidades de expansión para la economía en la costa. El bienestar y la calidad de vida que se garantizan a través de la seguridad, la naturaleza y el atractivo de los proyectos implican un valor añadido que no excluye una suma dineraria fruto de dichos proyectos.

El valor real y los rendimientos yacen en el desarrollo de un paisaje con agua y arena que constituya un marco seguro para un entorno de vida sano y agradable, un paisaje que ofrezca espacio para una nueva naturaleza, de modo que, por ejemplo, en el futuro, la foca vuelva tener un espacio vital frente a la costa flamenca.



CONCLUSIÓN

El nuevo paisaje costero es un marco seguro y sostenible que se puede adaptar a las necesidades en constante cambio. El desarrollo de una política integrada es el núcleo de esta visión: la transformación de la estrecha costa actual de constitución rígida en una costa ancha y de material blando, con dunas, bancos de arena e islas, un paisaje costero en el que la seguridad, la naturalidad, el encanto, la sostenibilidad y el desarrollo económico queden vinculados de forma indisoluble.



SUMINISTRO DE GNL COMO COMBUSTIBLE A BUQUES



Ignacio Sanchidrián Vidal¹, José Manuel García Muiña¹,

INTRODUCCIÓN

Debido fundamentalmente a las modificaciones en la regulación que limita las emisiones procedentes de los combustibles marítimos en busca de una mayor sostenibilidad del transporte marítimo, los precios de los hidrocarburos convencionales y las mejoras tecnológicas en la cadena de valor del Gas Natural Licuado (GNL), se ha generado un creciente interés en realizar estudios para analizar la viabilidad de desarrollar servicios e instalaciones para el suministro de GNL a buques en los puertos españoles.

PROES ha desarrollado a lo largo de los últimos dos ejercicios numerosos trabajos de esta naturaleza para las empresas más relevantes del sector de la energía, para las principales Autoridades Portuarias así como para diferentes Entes Públicos y otras partes relacionadas con el sector marítimo, del transporte y de la construcción naval interesadas en la promoción de esta forma más eficiente y respetuosa con el entorno de energía primaria.

DESCRIPCIÓN DE LOS ESTUDIOS

En general, todos los estudios orientados a analizar la viabilidad de la implantación de un servicio de suministro de GNL a buques parten de un contexto global que demanda el desarrollo de tecnologías más sostenibles desde el punto de vista económico y, principalmente, medioambiental, ajustándose a las exigencias de las normativas internacionales, que son cada vez más restrictivas.

¹ PROES Consultores S.A.



Además, el descubrimiento de fuentes no convencionales, como el shale gas y las mejoras tecnológicas en la cadena de valor del GNL (exploración y producción, licuefacción, transporte, regasificación y almacenamiento), permiten suponer que en el futuro podría existir un mercado de GNL muy competitivo y diverso. En particular, siendo el transporte marítimo una de las industrias con mayores emisiones contaminantes a la atmósfera, el gas natural (y, más concretamente, el GNL) se perfila como una solución idónea para enfrentarse a la demanda energética del mercado actual. Los objetivos que habitualmente impulsan la implantación del GNL como combustible marino son:

- La consolidación del sistema de abastecimiento de gas natural y el desarrollo de la competitividad de este combustible en el mercado (preocupación que fundamentalmente atañe a las administraciones responsables de garantizar el desarrollo sostenible y la eficiencia en el transporte, en el marco de las Estrategias Energéticas que cada Administración impulsa).
- La implementación del sistema de suministro de GNL en una localización concreta (puerto), mejorando así su posicionamiento en los mercados internacionales e impulsando las actividades comerciales relacionadas con el tráfico marítimo y otros usos. En este sentido, se realizan por su especial trascendencia estudios precisos para la estimación de la demanda presente y futura.
- El desarrollo del servicio de suministro que favorecería el potenciamiento de las instalaciones de almacenamiento de GNL en el mercado, debido a una diversificación del uso del GNL importado, dado el relativamente bajo nivel de utilización de estas instalaciones en el momento actual de merma de la demanda energética como consecuencia de la situación de estancamiento económico.
- La impulsión del GNL como generador de una intensa actividad económica en la transformación de barcos y en la construcción de otros nuevos, con posibilidades de potenciar la industria naval.

Adicionalmente, y en función de las condiciones de cada localización, el GNL se estudia como una opción viable para los siguientes usos:

- Alimentación con GNL de las flotas de transporte terrestre (camiones, trenes, etc.) para la entrada/ salida de la mercancía del puerto.
- Suministro de GNL para la maquinaria de manipulación de mercancías en las terminales (carretilas, cabezas tractoras, grúas, camiones, etc.).
- GNL como combustible para la industria portuaria auxiliar (remolcadores portuarios, embarcaciones auxiliares, etc.).
- Suministro de GNL para flotas cautivas (autobuses urbanos, camiones para la recogida de RSU, etc.).
- Suministro eléctrico a buques a partir del gas natural.



RETOS DEL SIGLO XXI PARA LOS PUERTOS Y LAS COSTAS

Para desarrollar los estudios, se parte habitualmente de la disponibilidad de GNL no contratado y se evalúan las ventajas medioambientales y económicas de su implementación analizando los diferentes mercados geográficos y los precios de referencia que sean de aplicación en cada caso.

Como primer paso antes de abordar el estudio de los aspectos técnicos que influyen en la viabilidad de un proyecto, se precisa realizar una estimación de la demanda. Los diferentes factores a contabilizar son numerosos, siendo sin embargo, los fundamentales dos en los que se concentra la parte principal del peso para la toma de decisiones: un adecuado análisis del tráfico (actual y futuro contemplando volumen y tipo del mismo), así como de la previsible renovación de flota (volumen y calendario), contemplando, en función de los tipos de tráfico, la posibilidad de sustitución de la flota frente a las probabilidades de remotorización de la misma. En este sentido, es fundamental analizar el tráfico, conociendo en profundidad la naturaleza de las rutas y de las líneas más significativas que las cubren. Es importante destacar que este análisis de la demanda no debe necesariamente circunscribirse a un puerto determinado (en principio, el dotado de planta de almacenamiento de GNL), sino que hay que llevar a cabo estudios más ambiciosos, tratando de identificar la demanda potencial en un determinado arco costero alrededor del punto principal de suministro. Esto es especialmente factible desde el momento en que una de las formas de suministro que más flexibilidad ofrece es el suministro mediante buques de tamaño en el rango entre 2.000 y 18.000 m³ de capacidad de GNL, que el sector ha venido a denominar “*small scale LNG*”.

Uno de los elementos más trascendentes de cara a la implantación de un nuevo sistema de suministro de combustible es el análisis de las posibilidades de financiación, aspecto que se trata evaluando la posibilidad de inscribir el proyecto en alguno de los tipos financiables. Analizados los aspectos geográficos y económicos, se desciende a la evaluación de los aspectos técnicos entre los que destacan los náuticos (accesibilidad, agitación de la/s dársena/s en las que se prestará el servicios, aspectos logísticos y de tancaje para garantizar la capacidad del suministro), compatibilidad de equipos industriales y de transferencia de GNL, seguridad y riesgos, etc.

Por lo anteriormente expuesto, y por el hecho inevitable de que el suministro se ha de producir necesariamente a un buque, cobra mucha importancia el adecuado análisis de las condiciones de clima marítimo y de las operaciones náuticas asociadas al suministro, sea desde buques o por medios basados en tierra. Así, estudios de maniobras para garantizar el acceso a una flota suficientemente amplia de buques receptores, así como el adecuado comportamiento de los buques suministradores, estudios de comportamiento de buque amarrado para analizar el comportamiento y los límites operacionales en la transferencia del combustible, etc., se han identificado como absolutamente necesarios para asegurar la viabilidad en condiciones de seguridad y competitividad aceptables para el mercado.

Para analizar la viabilidad de desarrollar servicios e instalaciones para el bunkering de GNL se evalúan, entre otros, los volúmenes de los buques de suministro, de los tanques en tierra, el número y tamaño de las cisternas rodadas, etc., presentándose en forma matricial ponderada, o DAFO, los resultados de la evaluación.

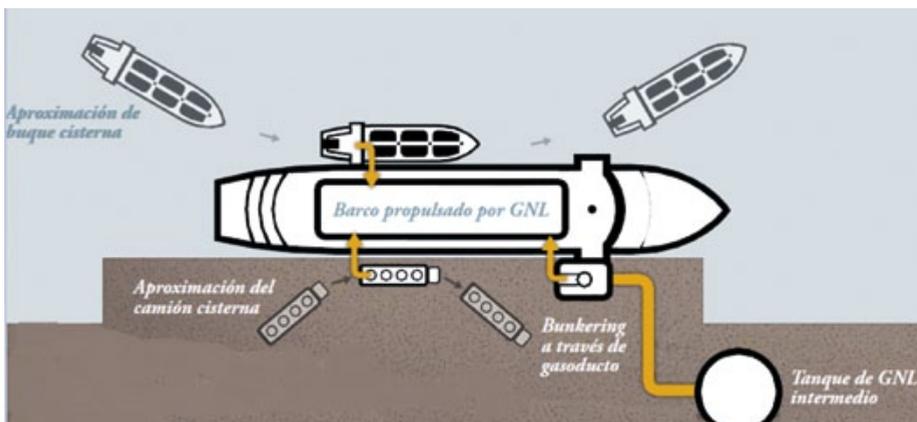


Igualmente, el sector ha identificado la necesidad de protocolizar y normar el proceso de transferencia del GNL como combustible de uso marítimo. Existen muy pocos códigos de buenas prácticas de referencia que todavía suscitan el interés de lo recientemente publicado y sin duda originarán debate según se vayan consolidando, o no, algunas de sus recomendaciones, fundamentalmente en materia de seguridad. En cualquier caso, sí queda patentemente recogida en los mismos la necesidad de desarrollar estudios de riesgos integrales (náuticos, de proceso, etc.) para identificar los peligros asociados al uso del GNL y proponer las medidas de mitigación que procedan, haciendo cotidiana la prestación del servicios de suministro. Parece oportuno reseñar que la industria del GNL ha sido hasta la fecha una de las más seguras del sector de la energía, sin duda por los elevados estándares de seguridad. No obstante, se atisba que los procedimientos que se aplican en las actuales instalaciones a gran escala parecerían desmesurados y poco prácticos para la transferencia de GNL a escalas mucho menores, como correspondería al caso de bunkering de GNL.

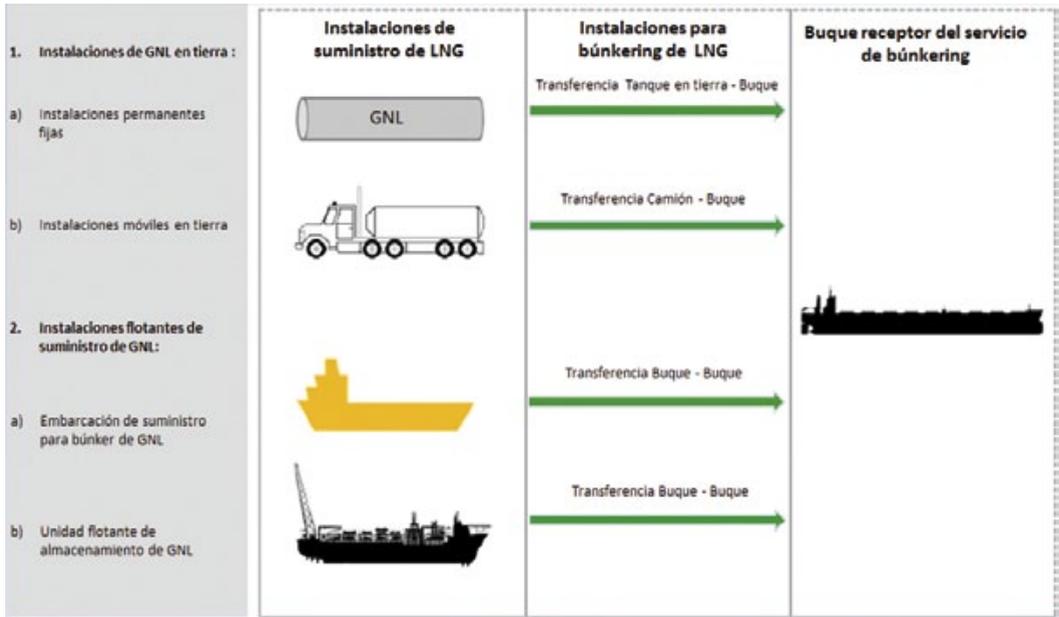
TIPOLOGÍA DE SOLUCIONES DE SUMINISTRO

Para finalizar este repaso de la aplicabilidad del GNL como combustible marítimo, merecería la pena describir tres de las soluciones más viables que parecen contemplarse en su desarrollo. Es importante destacar que no todas las alternativas tienen el mismo rango de aplicabilidad. Las alternativas que se han considerado en los estudios realizados hasta la fecha contemplan las siguientes modalidades:

- Ship to Ship (STS).
- Truck to Ship (TTS).
- Tank via Pipeline to Ship (TPS).



Alternativas para servicio de bunkering.



Sistema de bunkering de GNL.

Ship-to-Ship (STS) - Buque a buque

En el caso de un servicio de suministro tipo STS, el suministro del buque propulsado por GNL se realiza mediante una embarcación especialmente diseñada para esa operación, cuya capacidad parece debiera oscilar entre 1.000 m³ y 10.000 m³. Se suele diferenciar entre LNG *bunker vessels*, con capacidades de suministro entre 1.000 m³ y 10.000 m³, y LNG *feder vessels*, con capacidades entre 10.000 m³ y 20.000 m³.

El servicio de suministro por embarcación es un sistema muy flexible, ya que permite abastecer cualquier tipo de buque en distintos puntos del puerto, y está particularmente indicado para buques de mayor tamaño (buques Ro-Ro, graneleros, cruceros, pesqueros y petroleros de gran tamaño), en cuanto ofrece tasas de transferencia y volúmenes de carga elevados. Asimismo, el servicio de suministro por embarcación permitiría la optimización de la escala de estos buques, que podrían aprovechar los tiempos de carga y descarga de mercancías o pasajeros para aprovisionarse de combustible.

Evidentemente, será necesario proveer en el puerto unas instalaciones especiales para el abastecimiento de la misma embarcación para suministro. Es recomendable que el atraque del buque de suministro para su recarga de combustible se ubique lo más próximo posible a los tanques de almacenamiento de GNL. Adicionalmente, se podrá diferenciar entre un atraque dedicado exclusivamente a la operación de la embarcación o un atraque compartido con otros usos. En este último caso, la embarcación ocupará el área identificada sólo durante la fase de



recarga, y podrá permanecer la mayor parte del tiempo en una zona distinta del área de suministro de combustible, más fácil de identificar en el interior del puerto, ya que para el amarre de la embarcación no se prevén restricciones especiales, aparte de garantizar una serie de requerimientos de carácter marítimo-náutico (disponibilidad de espacio, calado mínimo, etc.). Esto implica que no se requerirá de un muelle únicamente dedicado al suministro de GNL, siempre y cuando la operación sea compatible con el resto de actividades previstas en el muelle.

Existen algunas restricciones asociadas al sistema de suministro STS, como el espacio disponible para realizar las maniobras requeridas y los tiempos de maniobra empleados, que tendrán que ser lo suficientemente ajustados para no limitar la eficiencia del suministro. También las condiciones climáticas podrían reducir la versatilidad de la operación, pudiendo tener cierto impacto, tanto durante las maniobras de aproximación de la embarcación al buque propulsado por GNL, como en la fase de suministro (con buques abarloados). Por lo tanto, en el caso en el que el sistema de suministro buque a buque se identifique como el más conveniente desde el punto de vista técnico y económico, el comportamiento del conjunto buque-buque de suministro (abarloados) tendrá que ser objeto de un análisis más detallado, para validar la viabilidad del servicio.

Otra limitación del suministro de GNL mediante embarcación es el CAPEX asociado a la embarcación para *bunkering*, las infraestructuras adicionales (en caso de requerirse en función del atraque decidido) para habilitar las áreas existentes en el puerto para el nuevo uso, o los equipos náuticos (ganchos de escape rápido, bolardos, defensas, etc) e industriales (tuberías para el transporte del GNL, brazos de carga, pasarela de acceso a buques, etc.).



Embarcación para sistema de bunkering STS.

Truck to Ship (TTS) – Camión a buque

El repostaje se realiza a través de camiones cisterna, con una capacidad de entre 40 y 80 m³, dependiendo del tipo de tanque empleado. Las mayores ventajas de este sistema de suministro son su bajo coste y flexibilidad en cuanto a ubicación del suministro: en principio, cualquier zona de atraque dotada de acceso vehicular sería accesible, siempre y cuando se disponga de una cierta facilidad de circulación en el puerto.



Como requisito fundamental para la implantación del sistema, se ha de garantizar la compatibilidad entre los volúmenes de GNL a suministrar y la demanda futura de combustible. Para evaluar la idoneidad de esta solución de suministro, se tendría que simular el funcionamiento real del puerto y tener en cuenta lo siguiente:

- Estimar el volumen total de búnker previsto.
- Estimar el tiempo de carga de un camión cisterna.
- Cuantificar el número de camiones / viajes necesarios para el suministro.
- Estimar los tiempos de desplazamiento desde el punto de carga hasta la zona de suministro.
- Cuantificar el tiempo necesario para el abastecimiento de GNL, ya que, ocupando el camión de suministro parte del muelle destinado a la carga y descarga de mercancías, el suministro limitaría el desarrollo de otras actividades que requieren el uso del muelle.



Sistema de carga de camiones cisterna TTS.

Siendo el tiempo medio necesario para llenar un camión cisterna de entre 30 y 60 minutos, el suministro de tipo TTS está indicado para atender pedidos pequeños, en el caso de buques receptores que requieren bajos volúmenes de GNL (100-200 m³). De este modo, es el sistema que resulta más apropiado para el suministro a ferries de pequeño tamaño, buques pesqueros, embarcaciones auxiliares y remolcadores.

En el caso de tener que atender pedidos más importantes de GNL, el sistema de suministro TTS no se considera adecuado, ya que se tendría que incrementar la permanencia del buque en el atraque por exigencias logísticas, comprometiendo la eficiencia del servicio. Además, el tiempo de plancha del buque en el puerto no puede ser aprovechado convenientemente como en el caso de suministro mediante embarcación: el suministro de GNL desde camión cisterna tiene lugar en el mismo muelle de atraque del buque a abastecer, incompatibilizando el repostaje de combustible con otras operaciones "paralelas", como la carga / descarga de materiales, vehículos y pasajeros.



LNG Tank via Pipeline to Ship (TPS) –Tanque a buque

La alternativa TPS para suministro permite diseños a medida con altos ratios de carga, reduciendo los tiempos de suministro. En este sentido, es un sistema flexible en cuanto al tamaño de buques a abastecer, ya que puede diseñarse en función de los requerimientos del puerto para atender pedidos de distinto volumen. Además, es un servicio flexible en cuanto a disponibilidad, no dependiendo de un medio marítimo o terrestre que transporte GNL y de los tiempos de maniobra del vehículo / buque suministrador de combustible.

La TPS es la solución más adecuada para dar servicio a barcos de línea que lleguen al puerto con cierta frecuencia, que requieran de poco tiempo para maniobrar y necesiten pequeños volúmenes de GNL (ferries de pequeño tamaño, remolcadores, embarcaciones auxiliares, barcos de pesca, etc.). De hecho, para que un buque pueda beneficiarse del servicio de suministro en una zona en el interior del puerto, la operación tiene que tener un impacto razonable en términos de tiempos de espera, tiempos de maniobra y costes asociados (idealmente, sin necesidad de práctico ni remolcadores). Sin embargo, no es un sistema flexible en cuanto a su ubicación en el puerto, siendo un servicio que sólo se podrá suministrar en una zona del puerto definida para este uso especial. De esta forma, la implementación de un servicio de suministro de GNL basado en el concepto TPS requiere identificar un área en el puerto que no esté concesionada, especialmente dedicada a este tipo de servicio, y que ofrezca el espacio necesario para la creación de un atraque polivalente. Además, siguiendo un criterio de optimización de costes, y para reducir al mínimo la longitud de las líneas para la transferencia del combustible el atraque, se tendrá que ubicar lo más cerca posible de los tanques de almacenamiento de GNL. En el caso de suministro de GNL en una zona más alejada, se podría analizar la viabilidad económica de instalar un tanque intermedio, que se abastecería mediante camiones cisterna. Por otro lado, se deben contemplar los espacios y servidumbres afectos al gestor técnico del gas en el trazado de las líneas antedichas.



Tanque intermedio de GNL.



CONCLUSIONES

Hasta la fecha los estudios realizados han permitido restringir los diferentes modos de prestar el servicio (STS, TTS, TPS) a cada uno de los casos y usos viables técnica, logística y económicamente, habiéndose desarrollado una variada casuística de implantación. La metodología empleada para este tipo de estudios se desarrolla en función de las exigencias y condiciones específicas de cada puerto, llevando a cabo un análisis de las posibles alternativas capaces de cubrir la demanda estimada en base a criterios de distinta naturaleza (requerimientos espaciales, operatividad del servicio, disponibilidad de infraestructuras, costes asociados, normativa aplicable, etc.).

Se reconoce la necesidad de que los diferentes estándares de aplicación y recomendaciones que deban regir estas actividades de suministro a buques maduren, ajustando los requerimientos a los nuevos escenarios, que fundamentalmente reducen los volúmenes de GNL involucrados así como las tasas de transferencia, siendo los riesgos consecuentemente reducidos por mor de la reducción en las consecuencias.



PROYECTO NEREIDAS. REDUCCIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO EN LOS PUERTOS: UN RETO COMÚN EUROPEO



Pilar Parra Serrano¹

INTRODUCCIÓN

Según los diversos estudios realizados en los últimos años, la comunidad científica coincide, y ofrece cifras realmente alarmantes, sobre el incremento de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, que aceleran el cambio climático. Entre las actividades causantes del incremento del efecto invernadero y el cambio climático se encuentran las producidas por el tráfico marítimo.

Desde el punto de vista de las emisiones de gases de efecto invernadero, es la navegación marítima el modo de transporte más respetuoso con el medio ambiente. No obstante, se calcula que las emisiones de los buques aumentarán de aquí a 2050, entre un 150% y un 200%. Por lo tanto, es el momento de tomar medidas para reducir la contaminación producida por los puertos, sin obviar que el transporte marítimo es indispensable para la economía global.

El 90% del comercio exterior de la Unión Europea y el 40% del comercio entre los estados miembros se canalizan a través de vías marítimas. Cada año pasan por los puertos europeos más de 3.700 toneladas de carga y la tendencia es ascendente. Si a esto le añadimos los más de 400 millones de pasajeros que anualmente utilizan las instalaciones portuarias, es imprescindible mantener una política coherente en la Unión Europea, tanto en materia de transporte marítimo como de desarrollo de políticas medioambientales.

¹ Autoridad Portuaria de Melilla.



El Mediterráneo es especialmente vulnerable a las repercusiones asociadas a la navegación debido al elevado número de rutas marítimas. Como consecuencia del alto nivel de actividad, los puertos están modificando el ecosistema marino y producen una grave pérdida de biodiversidad.

Consciente de esta situación, la Unión Europea, mediante la Agencia Ejecutiva de Innovación y Redes (INEA), se ha planteado como uno de sus objetivos principales reducir las emisiones de CO₂ un 60%, de aquí al año 2050.

El proyecto Nereidas 2012-EU-92177, aprobado por decisión C(2013) 9151 de la Comisión Europea en el ámbito de las Redes Transeuropeas de Transporte, trata de responder a este objetivo planteando una serie de herramientas de última tecnología, innovadoras y dirigidas a mitigar los efectos derivados de la actividad portuaria sobre la biodiversidad marina.

ELECCIÓN DEL PUERTO DE MELILLA

El Puerto de Melilla, debido a su singularidad geográfica en el Mediterráneo, ha sido desde su constitución un motor de desarrollo para la economía melillense. Ostenta la calificación de Puerto de Interés General del Estado, tanto por su localización geoestratégica como por la necesidad de garantizar el abastecimiento de la Ciudad Autónoma de Melilla, con un tráfico en el año 2013 aproximadamente de un millón de toneladas de mercancías y 800.000 pasajeros.

El Puerto de Melilla se encuentra enclavado en la Ciudad Vieja de Melilla, que limita dos zonas claramente definidas en el litoral de la Ciudad Autónoma. Hacia el norte se encuentra la costa acantilada, y siguiendo la línea del litoral, hacia el sur, se encuentra la zona formada por tres playas arenosas delimitadas por el Dique Sur con el Puerto de Beni-Enzar (Nador - Marruecos).

El progresivo equipamiento del Puerto de Nador y su conexión a la red ferroviaria nacional lo convierten en un puerto cada vez más avanzado, lo cual supone una amenaza a la que el Puerto de Melilla debe hacer frente.

Por tanto, el futuro pasa, entre otros aspectos, por ser capaz de adaptarse con éxito a esta realidad. Para ello, el Puerto de Melilla ha optado por apostar por los aspectos diferenciadores de su competencia más cercana, entre ellos: la necesaria competitividad en costes; la eficiencia y fiabilidad en la prestación de los servicios portuarios y comerciales; la seguridad de las instalaciones, con la aprobación del Plan de Protección del Puerto y la apuesta por una política de respeto medioambiental.

Su Sistema Integrado de Gestión Ambiental y Seguridad y Salud en el Trabajo obtuvo la certificación conforme a las normas internacionales ISO 14001 y OHSAS 18001, el cual ha sido implantado para promover y asegurar el cumplimiento de las políticas ambientales como apoyo a la cadena logística sostenible.



El Puerto de Melilla asume su compromiso con el medio ambiente con una óptima gestión de los residuos MARPOL, con un control constante de la calidad del suelo y las aguas, llevando un control de vertidos (PICCMA), así como haber iniciado el estudio del nivel de conciliación del proyecto de ampliación con la presencia de la especie *Patella ferruginea*, endémica en su entorno y en peligro de extinción, a fin de minimizar su incidencia en el medio ambiente.

En materia ambiental cabe también mencionar la implantación del proyecto “Puerto verde”, pionero en el Sistema Portuario Estatal, por el que se suministra energía eléctrica desde tierra a buques atracados, evitando de este modo los impactos ambientales debido a las emisiones de gases contaminantes y las molestias ocasionadas a los ciudadanos por el funcionamiento de sus motores secundarios.

En todo caso, actualmente el proyecto prioritario en materia medioambiental es el Proyecto Nereidas, liderado por la Autoridad Portuaria de Melilla y de vital importancia en los próximos años, tanto para el desarrollo sostenible del Puerto de Melilla como para el resto de puertos de la Red Transeuropea de Transporte que apliquen los objetivos que se obtengan a través del mismo.

DESARROLLO DEL PROYECTO NEREIDAS

El proyecto Nereidas tiene por objeto crear una herramienta de normalización para la aplicación de medidas preventivas y compensatorias dirigidas a mitigar los efectos medioambientales relacionados con el transporte y las actividades portuarias.

El Proyecto Nereidas proporcionará las soluciones adecuadas para reducir al mínimo las emisiones de CO₂ producidos por la actividad portuaria, así como reducir su afección sobre la biodiversidad y los costes externos en los puertos de la zona mediterránea. Asimismo, Nereidas pretende crear las bases para reducir al mínimo el posible impacto ambiental de las infraestructuras portuarias, tales como la ampliación de un puerto comercial.



Este proyecto europeo también pretende crear una zona de captura de dióxido de carbono con su correspondiente almacenamiento geológico, a partir de la búsqueda de un entorno apropiado para almacenar hasta siete millones de toneladas de CO₂ en el año 2020 y hasta 160 millones en el año 2030. Estas cifras supondrían una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de hasta el 20%.

El objetivo final del proyecto europeo Nereidas pasa por establecer un código de buenas prácticas que sea aplicable al resto de puertos mediterráneos.

Otros puertos del Mediterráneo podrán beneficiarse de Nereidas como una herramienta para desarrollar sus propios proyectos de infraestructuras, así como de ayuda en su transformación para reducir las emisiones de carbono.

Si los resultados de la acción son positivos darán lugar a un puerto más respetuoso con el medio ambiente y, por otra parte, la acción allanará el camino para nuevas inversiones en infraestructuras portuarias, centradas en la mejora de la huella de carbono de este tipo de instalaciones y su efecto sobre la flora y la fauna.

OBJETIVOS:

El objetivo general de este proyecto es establecer un protocolo de buenas prácticas y crear unas guías para su posterior aplicación en otros puertos del Mediterráneo, mediante:

- La aplicación de técnicas de restauración ambientales para disminuir los impactos ambientales de los puertos: pasos hacia una nueva certificación.
- El impulso de la economía mediante el fortalecimiento del medio ambiente y el crecimiento sostenible.

A través de la aplicación del objetivo general, se podrán obtener los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar soluciones para la aprobación de planes y programas de infraestructuras de los puertos.
- Reducir las emisiones de CO₂ procedentes de las actividades portuarias.
- Desarrollar procedimientos para amortiguar el impacto del transporte en las especies biológicas locales.
- Crear infraestructuras biorgánicas.
- Adaptar las infraestructuras portuarias para atender y cumplir con la Estrategia Europa 2020.



- Establecer y utilizar grupos de interés con el fin de obtener su contribución y supervisión.
- Involucrar a Autoridades Portuarias y a Entidades Privadas en el desarrollo de las soluciones propuestas.
- Crear certificaciones específicas para medidas compensatorias y preventivas de las actividades portuarias.
- Evaluar cómo se comportan los datos obtenidos en el Puerto de Melilla.

La Autoridad Portuaria de Melilla está liderando el proyecto Nereidas, que cuenta con otros cuatro socios más: C&C Medioambiente, CIMNE, Universidad de Murcia y ATISAE; cada uno de los socios aportará sus conocimientos en las áreas en las que son expertos y con una colaboración estrecha se trabajará conjuntamente en aras a alcanzar los objetivos marcados.

Para conseguir los objetivos, el proyecto Nereidas se divide en seis actividades interrelacionadas entre sí:

1. Análisis del impacto ambiental del puerto

Mediante esta actividad se han determinado los distintos componentes que constituyen riesgos para los ecosistemas en las zonas asociadas a los puertos, sus efectos sobre el cambio climático y la pérdida de biodiversidad, y se ha establecido un marco conceptual para la gestión de riesgos de los ecosistemas, teniendo en cuenta la legislación vigente, que ayude a programar medidas para minimizar las emisiones de CO₂ y la reducción de la biodiversidad en los puertos del Mediterráneo. Esto ha llevado a establecer un marco detallado de la gestión de riesgos de los ecosistemas.

Las fuentes principales de emisiones de CO₂ en los puertos pueden ser directas (por ejemplo, la combustión de combustibles fósiles como la gasolina) o indirectas (por ejemplo, el uso de electricidad). Existe también un sumidero natural de carbono que acumula y almacena algunos compuestos químicos que contienen carbono por un período indefinido (retención de carbono). Un ejemplo de sumidero de CO₂ es el lecho vegetal marino, que produce una media de 38 Toneladas de biomasa en peso seco por hectárea, u otros organismos acuáticos que extraen Ca₂CO₃ para formar conchas y esqueletos mediante procesos complejos (como el plancton, los corales, las algas coralinas y los invertebrados).

Esto nos ha dado información sobre el porcentaje de destrucción (sumideros) o de generación (fuentes) de gases de efecto invernadero y de los efectos observados en los ecosistemas.



La base de datos resultante se utilizará en la concepción del protocolo normalizado, ya que proporcionará los parámetros pertinentes que se emitirán mediante los sensores y el sistema de alerta rápida.

En particular, se han determinado las principales fuentes de emisión de la actividad portuaria de Melilla y se ha procedido al cálculo de la huella de carbono de dichas actividades. Para poder evaluar los impactos asociados se ha realizado un estudio exhaustivo de las principales especies con figuras de protección presentes en las aguas y escollera del puerto y se ha creado una base de datos de especies que se utilizará en la concepción del protocolo normalizado.

Para poder controlar las emisiones de CO₂ portuarias se han seleccionado una serie de parámetros característicos de las aguas de Melilla que se analizarán a través de sensores colocados en dos boyas diseñadas específicamente para el Proyecto Nereidas. Estos parámetros son los siguientes: pH, turbidez, salinidad (a través de la conductividad) y Oxígeno disuelto.





2. Primera fase de estudio: propuesta de posibles soluciones para reducir la contaminación ocasionada por los transportes y las actividades portuarias en el ecosistema mediterráneo

El objetivo de la actividad es la selección de las mejores soluciones para que los puertos sean eficientes y respetuosos con el medio ambiente, en relación con algunos de los riesgos detectados en el apartado anterior.

Para ello, se ha seleccionado, como la opción más adecuada, la reducción de CO₂ protegiendo y regenerando comunidades marinas que capturen este gas. La captura biológica puede hacerse por medio de plantas terrestres o la biota de los océanos, utilizando una estructura biológica que fijará la planta en un primer paso y que posteriormente la incorporará al mar.

Las tecnologías relativas a los sumideros naturales implican el cultivo innovador de planctones y esquejes, la adaptación de estructuras biológicas y físicas reducirá la erosión marina ayudando a fijar los propágulos al suelo. Una red de monitoreo de CO₂ será parte de los prototipos que se desarrollarán.

3. Fase piloto: preparación e implementación de los prototipos

Construcción y despliegue de los prototipos de Nereidas, que demostrarán la eficacia de las soluciones seleccionadas que tienen como objetivo minimizar los riesgos que las actividades portuarias causan en los ecosistemas.

Con el fin de generar organismos adaptados captadores de CO₂ en zonas portuarias, en la actividad 2 del proyecto se han seleccionado las siguientes especies:

- *Cymodocea nodosa*: es una especie de fanerógama marina que pertenece a la familia Cymodoceaceae. Se encuentran sobre fondos arenosos, desde un par de metros en las orillas hasta unos 10 metros en las zonas costeras arenosas.

Además de estabilizar el sustrato con su sistema radicular, esta fanerógama sirve como soporte para una gran cantidad de algas filamentosas e invertebrados, que se instalan sobre sus hojas, y como lugar de desarrollo de una gran cantidad de alevines y juveniles de peces propios de los fondos rocosos, que encuentran aquí un ambiente propicio, con abundancia de alimento y sin los depredadores de las zonas rocosas.

En el mapa siguiente se recogen las áreas previstas de plantación del alga *Cymodocea nodosa*. Las superficies de plantación previstas son las siguientes:

- 20 m² en la zona de sembrado N° 1
- 10 m² en la zona de sembrado N° 3



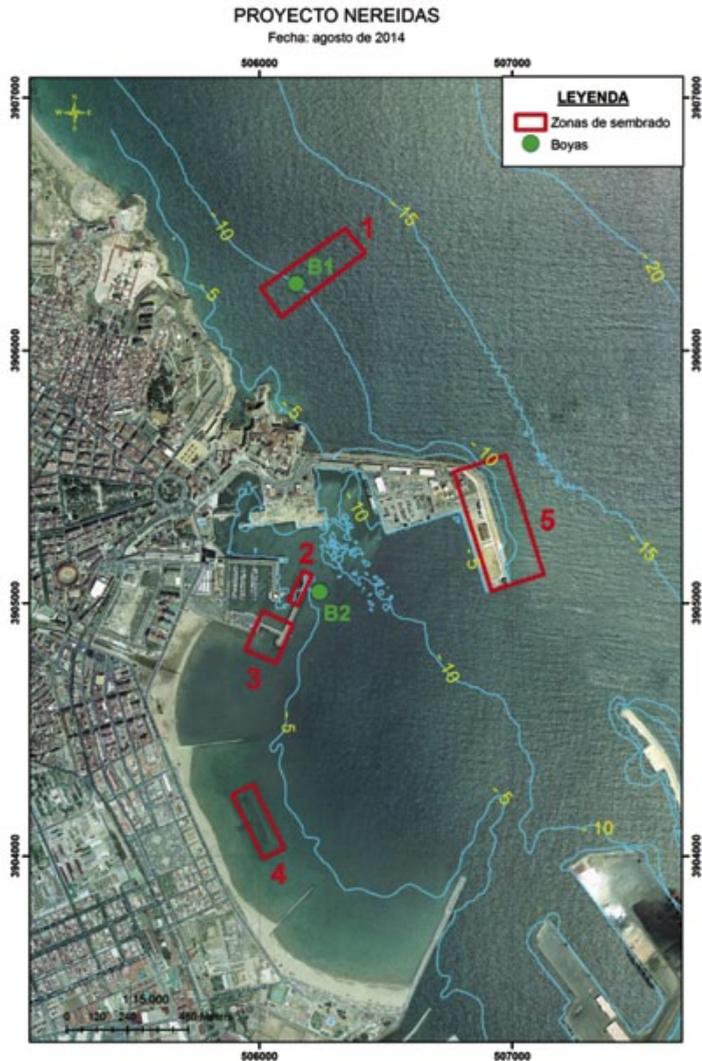
- 10 m² en la zona de sembrado N° 4



- *Corallina elongata*: del género de algas rojas con esqueletos calcáreos duros pertenece a la familia Corallinaceae. Son plantas ramificadas erectas con articulaciones que se encuentran en rocas y grietas, en lugares batidos por las olas, y en charcas de marea con humedad abundante.

La superficie a cubrir con *Corallina elongata* es de 50 m² por cada zona de recolonización seleccionada. En el mapa corresponde con las zonas 2, 3 y 5. Actualmente esta especie se ha renombrado con el nombre de *Ellisolandia elongata*.

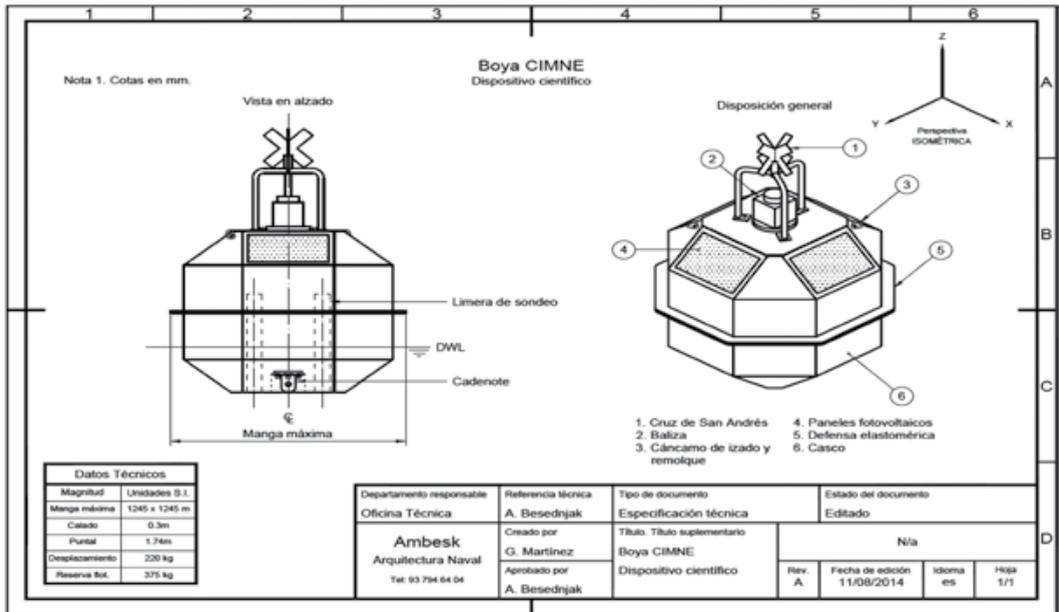
- *Patella ferruginea*, es un gasterópodo marino endémico del Mediterráneo occidental en peligro de extinción y que cuenta con una Estrategia Nacional de Conservación. Las actuaciones contempladas con esta especie consisten en la traslocación de 50 ejemplares de juveniles con sustrato a la zona 5 del plano adjunto.



Las tecnologías relativas a los sumideros naturales implican el cultivo innovador de planctones. Para ello se ha procedido a la recogida de semillas de *Cymodocea nodosa* en áreas del Mediterráneo, para su posterior cultivo en laboratorio. Además se han elaborado estructuras biodegradables adaptadas a las características de esta especie y las características del fondo marino del Puerto de Melilla, las cuales reducirán la erosión marina y ayudarán a fijar los propágulos al suelo.

En el caso de *Corallina elongata* se han diseñado prototipos de estructuras que faciliten la adhesión de dichas algas a las escolleras portuarias. Esta alga ha sido seleccionada por su alta capacidad de actuación como sumidero de CO₂.

El control de los parámetros ambientales es clave para entender las condiciones de vida de las especies que integran estas estructuras biológicas. Con la información obtenida a través de la monitorización en tiempo real del análisis de muestras de agua, el sistema de alerta temprana puede advertir que una situación de peligro se está produciendo. En el plano anterior se representan las zonas de actuación de plantación de algas y de colocación de boyas.



Los sensores controlarán los niveles de contaminación y el sistema de alerta rápida (SAR) proporcionará la información procedente de ellos y la combinará con la base de datos. Será una herramienta para determinar los riesgos de contaminación que entrañen las actividades portuarias y para señalar los avances de la acción.

Tanto la red de seguimiento como el SAR serán necesarios para realizar la evaluación del ciclo de vida y para el sistema medioambiental del puerto (a desarrollar en la actividad 4)

4. Segunda fase de estudio: hacia la certificación y la adaptación de los métodos en los puertos

Se diseñará un protocolo con el fin de definir una nueva certificación ambiental adecuada para los puertos del Mediterráneo. Este protocolo será de utilidad para los puertos que deseen ampliar sus infraestructuras y que tienen la intención de simplificar sus actividades en un entorno de baja emisión de carbono. Esta certificación se obtendrá con arreglo a la metodología de cálculo de la huella de carbono y el ciclo de vida de la biodiversidad.



El paso hacia la nueva certificación estará preparado para las empresas de certificación marítima y medioambiental que integrarán el grupo de partes interesadas. Se celebrarán varias reuniones para redactar el protocolo medioambiental del puerto, la autoevaluación de cada puerto y la posterior certificación. Se elaborarán los requisitos específicos para la acreditación de los verificadores del protocolo del puerto.

5. Diseminación y comunicación

La difusión de los resultados del proyecto Nereidas consistirá en difundir información sobre el proyecto a través de talleres, exposiciones públicas y sectoriales y una página web (<http://nereidas-tech.eu>), que garantizarán que las partes interesadas participen activamente en el proyecto.

Adicionalmente se elaborará un mapa de stakeholders y un estudio de los efectos económicos del proyecto.

6. Gestión de proyectos

La estrategia de gestión se encargará de la ejecución, funcionamiento, coordinación y ejecución, de la entrega de los resultados y la comunicación entre los beneficiarios y la Comisión Europea. Se llevarán a cabo las acciones apropiadas para asegurar el éxito y la ejecución de los proyectos. Se contará con el apoyo de todos los socios.

El presupuesto total de este proyecto es de 1.822.000 €, cofinanciado en un 50% por la Agencia Ejecutiva de Innovación y Redes (INEA), cuyo plazo de realización es de 24 meses, estando previsto su finalización en diciembre de 2015.

CONCLUSIONES

Melilla, ha sido designada por la Comisión Europea como el lugar de desarrollo del proyecto Nereidas, mediante la decisión C(2013) 9151, en el ámbito de las Redes Transeuropeas de Transporte

Por un lado, la calidad del agua, temperatura, salinidad, corrientes marinas y biodiversidad son similares a las de otros puertos del Mediterráneo. Además, en términos de tráfico, el Puerto de Melilla es utilizado por una diversidad de buques (ro-pax, transbordadores, ro-ro, graneleros, buques de crucero, portacontenedores y yates), y en él se realizan todo tipo de operaciones y de carga y descarga de diversos tipos de mercancías (granel sólido, carga heterogénea, líquidos a granel, contenedores), lo que permite extrapolar los resultados de esta acción a otros puertos del Mediterráneo.



Otro aspecto importante es la necesaria interacción entre el puerto y la ciudad. En una ciudad de apenas 13 Km² se produce una total integración entre la actividad portuaria y la de sus ciudadanos, donde apenas existe una barrera física de limitación entre ambos.



El proyecto Nereidas se basa en los objetivos de la Agencia Ejecutiva de Innovación y Redes (INEA), que pretende alcanzar una reducción del 60% de las emisiones de CO₂ de aquí al año 2050.

El objetivo final será establecer una guía de buenas prácticas aplicable a todos los puertos del Mediterráneo que se quieran beneficiar de esta herramienta para sus proyectos de desarrollo de infraestructuras, mediante nuevas herramientas de última tecnología, innovadoras y dispuestas para su uso, con los protocolos de verificación elaborados y sus estudios económicos de rentabilidad, generando valor añadido medioambiental al desarrollo de dichos proyectos constructivos.



GUÍA DE GESTIÓN ENERGÉTICA EN PUERTOS



**O. Serrano Hidalgo¹, I. Rodríguez Arévalo¹,
S. Blanco Monge², P. Bañón Serrano²**

1. INTRODUCCIÓN

La preocupación por el medio ambiente es cada vez mayor en todas las esferas, jugando en este sentido la Comisión Europea un papel impulsor de políticas e iniciativas en materia de protección ambiental y gestión de la energía. A modo de ejemplo, la Estrategia Europa 2020 para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador, establece ciertos objetivos cuantificables materia de energía y cambio climático hasta el 2020, como son la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero al menos un 20%, aumento del porcentaje de las fuentes de energía renovable en el consumo final de energía hasta el 20%, y aumento del 20% de la eficacia en el uso final de la energía.

Un análisis de las memorias de sostenibilidad presentadas por las Autoridades Portuarias pone de relieve un insuficiente control de los consumos energéticos, evidenciándose la necesidad de impulsar estrategias consolidadas en la gestión y optimización de la energía.

Puertos del Estado, en su labor de promoción de la investigación y desarrollo tecnológico en materia de la actividad portuaria, impulsó la elaboración de la *Guía de Gestión Energética en Puertos, proporcionando un conjunto de recomendaciones a seguir en los Puertos de Interés General* para mejorar su desempeño energético.

¹ Puertos del Estado.

² Ingeniera de Sistemas, Isdefe.



La guía, concebida como una herramienta práctica y concisa, proporciona tanto un esquema de diagnóstico como un catálogo de buenas prácticas que permiten mejorar el desempeño energético de las Autoridades Portuarias en las siguientes vertientes:

- a) Monitorización y seguimiento de la demanda, para identificar los patrones de consumo energético y facilitando por consiguiente la reducción de sus costes.
- b) Optimización de la gestión económico-administrativa de la energía, proponiendo esquemas ventajosos de contratación y orientando el comportamiento de los operadores hacia un mejor desempeño energético.
- c) Mejora de la eficiencia de instalaciones y equipos para optimizar sus rendimientos y reducir sus consumos de energía.
- d) Impulso de la generación de energía mediante fuentes renovables, para mejorar la seguridad en el abastecimiento y reducir la dependencia energética.

2. ALCANCE DE LOS TRABAJOS

El documento se estructura en cinco capítulos, cuyo contenido a título resumido es el siguiente:

1. Introducción, objetivos, alcance y metodología. Resume el contexto comercial y normativo que justifica el impulso de estrategias de eficiencia energética, así como la metodología seguida.
2. Caracterización del modelo energético. Proporciona un diagnóstico de situación, el estado actual del sistema portuario español en esta materia. Se acompaña de listas de verificación que permiten realizar un autodiagnóstico e identificar posibles líneas de mejora.
3. Estrategias de mejora del desempeño energético. Conjunto de recomendaciones y buenas prácticas que permiten avanzar en las líneas de mejora evidenciadas tras el proceso de diagnóstico previo.
4. Caso Piloto: Puerto de Tarragona. Se proporciona un ejemplo de aplicación de la guía en cuanto a metodología de análisis de la situación actual en una Autoridad Portuaria, e identificación de oportunidades de mejora de su desempeño energético.
5. Tendencias de futuro. Prospectiva general sobre nuevas tecnologías como Cold Ironing, GNL y biocombustibles, analizando los requisitos necesarios para su implantación en el sistema portuario español, su aceptación en el sector, experiencias de éxito, etc.



La metodología seguida para realizar la caracterización del modelo energético del sistema portuario se basa en tres herramientas principalmente. La primera, un Grupo de Trabajo liderado por la Subdirección de Innovación Tecnológica, Seguridad y Sostenibilidad de Puertos del Estado y conformado por 10 Autoridades Portuarias que participaron voluntariamente en el proyecto (representando el 36% de las Autoridades Portuarias del sistema portuario de interés general). Además hicieron falta cuestionarios, reuniones, llamadas de teléfono y correos electrónicos para recopilar toda la información y datos de partida. Por último, se desarrolló una plataforma web con el fin de facilitar la fluidez del grupo de trabajo, como punto de encuentro para compartir documentos, normativas, eventos y foros de discusión. Se planteó esta solución para salvar la distancia física entre los participantes en el proyecto.

Finalmente si nos centramos en los datos específicos facilitados por estas Autoridades Portuarias, tan sólo se contó con información completa de 7 puertos pero abarcando todas las tipologías de terminales portuarias: de contenedores como en Algeciras, polivalentes como en Alicante y Gijón, de pasajeros en Palma de Mallorca, graneles líquidos en Cartagena y Tarragona, ro-ro en Vigo. Por tanto la base de partida se consideró adecuada para el desarrollo de los trabajos.

3. CARACTERIZACIÓN DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO

Una vez analizados los datos sobre instalaciones y consumos energéticos recopilados, se pudo constatar que la estructura de la demanda, es decir, los consumos demandados por cada instalación, no son conocidos por la mayor parte de las Autoridades Portuarias. Esto se debe a que no se suelen utilizar sistemas de monitorización y control de la energía, por lo que no existe la posibilidad de identificar el potencial de ahorro de las instalaciones.

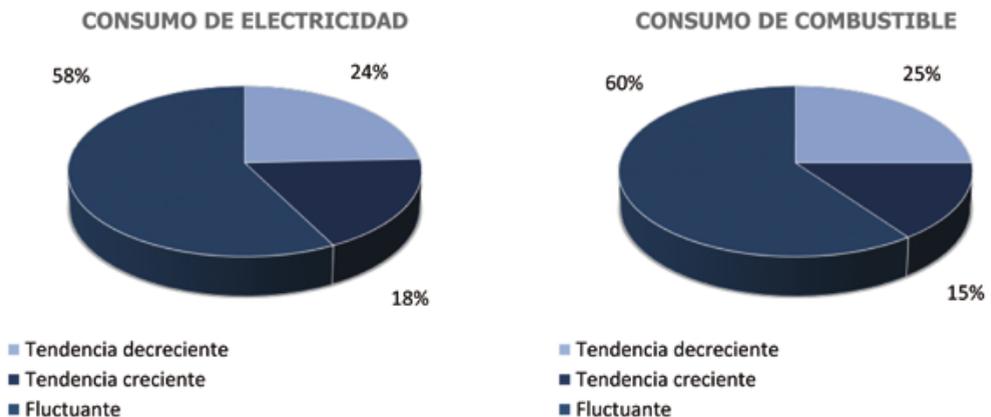


Figura 1. Tendencia en consumo de electricidad y combustible de las Autoridades Portuarias (Fuente: Memorias de Sostenibilidad, Puertos del Estado).

También se pudo comprobar que las tendencias en el consumo de la energía no son estables, aunque este dato, extraído de las Memorias de Sostenibilidad elaboradas anualmente por Puertos del Estado, puede simplemente significar que los indicadores utilizados no son los adecuados. Un indicador por unidad de producción aportaría una información más interesante, como el ratio energético por unidad de superficie y tonelada movida o pasajero, o incluso el porcentaje de consumo controlado.

En cuanto a la gestión económico-administrativa de la energía las tarifas de compra de energía están entre 0,113 y 0,160 €/kWh. Existen diferencias relevantes, lo cual evidencia un punto de optimización en los esquemas de contratación energética.

Por otro lado es común encontrarse Autoridades Portuarias que son propietarias de sus propias redes de distribución eléctrica, teniendo que asumir los costes de mantenimiento y redistribución de la energía a los operadores del puerto. Las que optan por ceder sus redes a empresas distribuidoras privadas encuentran dificultades tanto técnicas, en cuanto a las características de la red, como jurídicas, como son la negación de éstas a firmar convenios de resarcimiento y abonar derechos de servidumbre.

En general las inversiones que se realizan en instalaciones de energías renovables son escasas. Entre todas ellas destacan las mejoras de los sistemas de alumbrado exterior, debido a que se rentabilizan en un corto periodo de tiempo y permiten obtener ahorros rápidos.

Si nos centramos en las instalaciones de las Autoridades Portuarias, en general los sistemas de alumbrado exterior se han identificado como uno de los puntos con mayor potencial de ahorro. Predomina la instalación de lámparas de vapor de sodio, que podrían ser más eficientes con equipos de encendido electrónicos y sistemas de control centralizado. Otra alternativa, ésta más costosa, consiste en sustituir estas luminarias por otras de tipo LED que proporcionan ahorros de hasta un 70%.

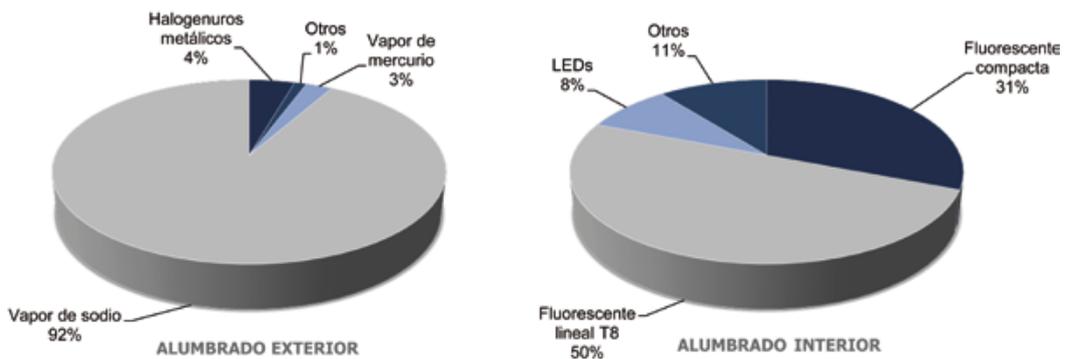


Figura 2. Sistemas de alumbrado exterior e interior instalados en las Autoridades Portuarias (Fuente: Elaboración propia).



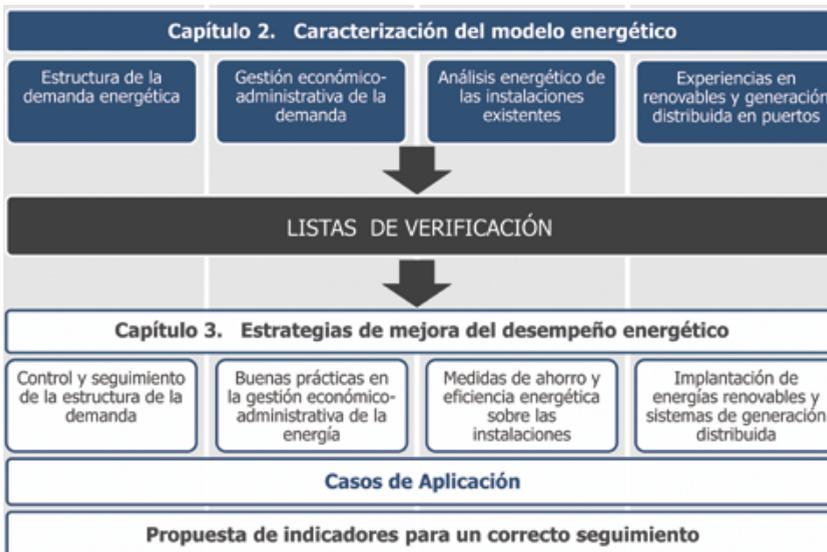
En los sistemas de alumbrado interior suelen utilizarse fluorescentes lineales tipo T8, habiendo modelos con menor consumo como los T5 o los LED.

La conclusión fundamental que se puede extraer de este diagnóstico de situación es que la gestión energética no tiene la suficiente consideración en los Planes de Empresa de las Autoridades Portuarias. Se debería incluir una estrategia energética en todos sus aspectos, analizando el estado real de su desempeño energético como línea de partida, elaborando una política y planificación energética, estableciendo objetivos y compromisos en cuanto a ahorros energéticos, identificando los recursos necesarios, los indicadores adecuados para realizar seguimientos periódicos, etc. La introducción de la reducción de costes energéticos como objetivo estratégico es fundamental para mejorar el desempeño energético.

Algunas Autoridades Portuarias tienen excelentes iniciativas a este respecto, como las que se describirán más adelante, pero suelen actuar sin una planificación y organización previas. Se hace necesaria la sistematización de todo el proceso.

4. ESTRATEGIAS DE MEJORA DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO

La *Guía de Gestión Energética en Puertos* permite a las Autoridades Portuarias realizar un diagnóstico previo para identificar su potencial de ahorro en todos los aspectos, facilitando a continuación soluciones y estrategias específicas que dan respuesta a las oportunidades de mejora identificadas.



*Figura 3. Estructura de la Guía de Gestión Energética en Puertos
(Fuente: Elaboración propia).*



Al final de cada apartado del capítulo 2 se incluye una lista de verificación, a modo de check-list, que permite a las Autoridades Portuarias verificar el estado de su desempeño energético. Sirve de diagnóstico para identificar su potencial de ahorro.

En los apartados correspondientes del capítulo 3 se describen las estrategias de mejora que dan respuesta a las oportunidades de mejora identificadas. Adicionalmente, al final de cada apartado del capítulo 3 se incluye una propuesta de indicadores que puede ayudar a las Autoridades Portuarias a realizar un seguimiento de las estrategias de mejora una vez implantadas, así como algunos casos de aplicación que sirven para ejemplificar el contenido de la guía con experiencias de éxito. Dado que el contenido de la guía es extenso en cuanto a las estrategias de mejora, este artículo se centrará en los mencionados casos de aplicación.

4.1. Sistemas de monitorización y control. Caso de aplicación: Puerto de Cartagena

El primer paso realizar una adecuada gestión energética consiste en conocer los consumos reales de los sistemas o equipos más demandantes. Por tanto se han de implantar sistemas de control y seguimiento, como ha hecho la Autoridad Portuaria de Cartagena en toda su red eléctrica y red de distribución de agua. Este sistema de control de consumos fue diseñado e instalado por el Departamento de Conservación, y permite controlar el consumo de la red de agua y de las instalaciones eléctricas de esta Autoridad Portuaria.

El sistema está estructurado en tres módulos funcionales:

- Captura de datos en tiempo real mediante analizadores de redes con comunicaciones ModBus, instalados en los siguientes puntos:
 - Cuadros principales de distribución de baja tensión (14 equipos).
 - Cuadros secundarios de distribución (7 equipos).
 - Sistemas de alumbrado (11 equipos).
 - Sistemas de climatización (1 equipo).
 - Edificios de la Autoridad Portuaria (5 equipos).
 - Baterías automáticas de condensadores (6 equipos).
 - Puntos de suministro a terceros (65 equipos).
 - Otras instalaciones de la Autoridad Portuaria (23 equipos).



RETOS DEL SIGLO XXI PARA LOS PUERTOS Y LAS COSTAS

- Transmisión de datos. Todos los datos recogidos por los distintos sistemas se transmiten a través de protocolo Ethernet usando la red de fibra óptica de la Autoridad Portuaria, instalando pasarelas ModBus-Ethernet para conectar directamente los analizadores de redes.
- Presentación de datos mediante software SCADA. El sistema informático muestra los datos mediante tecnología GIS y proporciona las siguientes funciones:
 - Trabajo en red si se instala en un servidor, tanto para la comunicación con los equipos instalados como para permitir el acceso a diferentes personas o puestos de trabajo.
 - Configuración de parámetros en los equipos instalados.
 - Configuración de pantallas de datos, informes, gráficos, alarmas, etc.
 - Seguridad del sistema para que los usuarios puedan consultar la base de datos sin alterar la información de la misma.

La captura de datos se realiza cada 15 minutos y la información es almacenada en la base de datos. Utilizando el histórico de registros es posible estudiar los patrones de consumo de las instalaciones, verificar el funcionamiento de los sistemas de alumbrado y baterías de condensadores, localizar acometidas eléctricas no controladas y seleccionar acciones correctoras adecuadas para cada problema. El sistema permite así mismo contrastar el resultado de las acciones implantadas para mejorar la eficiencia de las instalaciones.

4.2. Gestión económico-administrativa de la energía. Caso de aplicación: Puerto de Tarragona

En ocasiones una iniciativa tan simple como la revisión de las facturas eléctricas y la renegociación de los contratos de suministro eléctrico para adaptarlos a las características de la instalación puede aportar ahorros inmediatos. En este caso el consumo eléctrico no se reduce pero sí sus costes asociados.

Es posible adaptar la tarifa de acceso, la potencia contratada o incluso el modelo de contratación. También se pueden evitar las penalizaciones por exceder la potencia contratada configurando alarmas en el sistema de control, o compensar la energía reactiva instalando baterías de condensadores.

Actualmente el Gobierno está promocionando la contratación de servicios energéticos a través de ESEs (Empresas de Servicios Energéticos). Este modelo es muy flexible y se puede utilizar para la contratación del suministro energético, gestión de la energía, mantenimiento y mejora de las redes eléctricas, implantación de medidas de eficiencia energética, etc. La Autoridad Portuaria de Tarragona es una de las pocas que ha optado por este modelo.



Han conseguido mejorar sus instalaciones, rapidez de actuación en caso de avería y han simplificado su gestión económico-administrativa al integrar toda la gestión en un único interlocutor. En este caso la duración del contrato es de 4 años prorrogable otros 4, e incluye las siguientes prestaciones:

1. Gestión energética. Negociación, contratación, gestión y venta a terceros de suministros energéticos, manteniendo la Autoridad Portuaria la titularidad de los contratos. La ESE realiza los abonos correspondientes a la compañía suministradora, la lectura de contadores y emisión de facturas a terceros.
2. Mantenimiento de estaciones transformadoras, alumbrado exterior y edificios de oficinas, incluyendo materiales y consumibles de importe inferior a 30 € unitarios y sustituciones no masivas de lámparas.
3. Garantía total, se fija un importe máximo anual destinado a mantenimiento o actuaciones de mejora que se facturan una vez acometidos los trabajos.
4. Obras de mejora y renovación, con un importe máximo de inversión anual a ejecutar por la ESE en actuaciones que sean propuestas por esta y aprobadas por la Autoridad Portuaria, que se abonan una vez ejecutadas las mismas.
5. Inversiones en ahorro energético, propuestas por la ESE y ejecutadas previa aprobación de la Autoridad Portuaria. Estas inversiones se recuperan a través de los ahorros energéticos que conllevan.

4.3. Medidas de ahorro y eficiencia energética en instalaciones.

Caso de aplicación: Puerto de Alicante

Como se ha mencionado con anterioridad es posible conseguir importantes ahorros con la mejora de las instalaciones de alumbrado exterior, siendo este tipo de instalación una de las identificadas con mayor potencial de ahorro. Pero estas mejoras no solo consisten en sustituir las luminarias por otras más eficientes, sino en utilizar sistemas de control, temporizadores, detectores de presencia, fotocélulas, etc. que permiten reducir el consumo de la instalación entre un 15 y un 30%.

Como ejemplo la Autoridad Portuaria de Alicante ha implementado un sistema de telegestión mediante SCADA que facilita el apagado y encendido selectivo de puntos de luz de las torres de proyectores, adecuando en cada momento el nivel de iluminación del puerto a sus necesidades operativas de una forma sencilla y eficaz.

Las torres de alumbrado de las explanadas tienen una altura de 30 m y están equipadas de 12 proyectores de vapor de sodio de alta presión, con una potencia unitaria de 1.000 W. Mediante el sistema de control instalado se pueden establecer cuatro regímenes de funcionamiento, bien programados previamente o bien activados de forma manual desde el puesto de control.



- 100%: Doce proyectores encendidos.
- 66%: Ocho proyectores encendidos.
- 33%: Cuatro proyectores encendidos.
- 0%: Todos los proyectores apagados.



Figura 4. Modos de funcionamiento de la torres de alumbrado: 100% - 66% - 33%
(Fuente: Autoridad Portuaria de Alicante).

El modo de funcionamiento al 33% se denomina “eficiente” y es activado por las noches cuando las explanadas no se encuentran en condiciones de operación.

El sistema de control utiliza contactores comunicables vía Mod-Bus TCP. Cada contactor gestiona un grupo de cuatro luminarias, siendo necesarios por tanto tres contactores para gobernar los 12 proyectores de cada torre. Además el sistema de control sigue una estrategia de encendido que alterna los diferentes contactores de una torre para equilibrar el número de horas de funcionamiento de dichas luminarias, con lo que se alarga la vida útil de las mismas.

Las acciones sobre los contactores se realizan desde un módulo de gestión del encendido que permite visualizar, sobre un mapa, el estado de cada torre. Este módulo de gestión permite además programar los niveles automáticos de iluminación para cada torre de alumbrado en franjas horarias semanales.

Asimismo se puede modificar manualmente el estado de cada grupo de 4 proyectores si así lo requiere la operativa del puerto, forzando el estado de los proyectores y seleccionando el nivel de iluminación deseado.

El sistema dispone de unos contadores de tiempo de funcionamiento de los diferentes controladores (es decir, contactor, torre y muelle). Esto permite visualizar informes sobre



las horas de funcionamiento y modo de funcionamiento por elementos: contactor, torre de alumbrado o muelle. También es posible inicializar el valor de estos contadores a cero en cualquier momento, permitiendo así realizar una nueva contabilidad de funcionamiento en un periodo.

Con la implantación de este sistema de telegestión, una de las medidas contemplada en el Plan de Eficiencia Energética 2010-2014 de la Autoridad Portuaria, se han conseguido unos ahorros del 56% sobre el consumo inicial de este sistema de iluminación.

4.4. Tendencias de futuro en generación distribuida

Para finalizar, el último capítulo de la *Guía de Gestión Energética en Puertos* incluye una breve introducción al transporte marítimo en el contexto energético y describe tres tecnologías emergentes: Cold Ironing, GNL (Gas Natural Licuado) y biocombustibles. Cada una de estas secciones se estructura en tres apartados:

- a) Introducción a la tecnología y legislación aplicable, incluyendo sus ventajas y desventajas.
- b) Requerimientos en la infraestructura del puerto y sistema de gestión para su implementación. Grado de aceptación en el sector portuario.
- c) Experiencias de éxito.

El Cold Ironing es un sistema recomendado por la Comisión Europea que consiste en suministrar electricidad a los buques desde puerto para que éstos puedan apagar sus motores auxiliares. Con esto se reducen emisiones contaminantes, ruidos y vibraciones procedentes de los generadores de a bordo.

Es una tecnología ya madura, el sistema de conexión está normalizado en media tensión y la mayor parte de fabricantes comercializan soluciones estandarizadas ya contrastadas en el mercado. Su grado de aceptación es razonable en Europa, ante todo en el norte.

Sin embargo en España existe muy escasa implantación (Melilla es pionera en este sentido), y en todos los casos el sistema de conexión se realiza en baja tensión, aún no normalizado. Se hacen necesarias mayor número de experiencias de éxito, para lo cual un impulso de los estudios de viabilidad por parte del Gobierno ayudaría a identificar, caso por caso, cuándo este sistema es rentable tanto para las navieras como para las Autoridades Portuarias.

En este contexto el GNL se está posicionando como el combustible del futuro por producir muy pocas emisiones contaminantes, especialmente bajas en materia particulada y óxidos de azufre, así como por reducir la dependencia energética del petróleo.

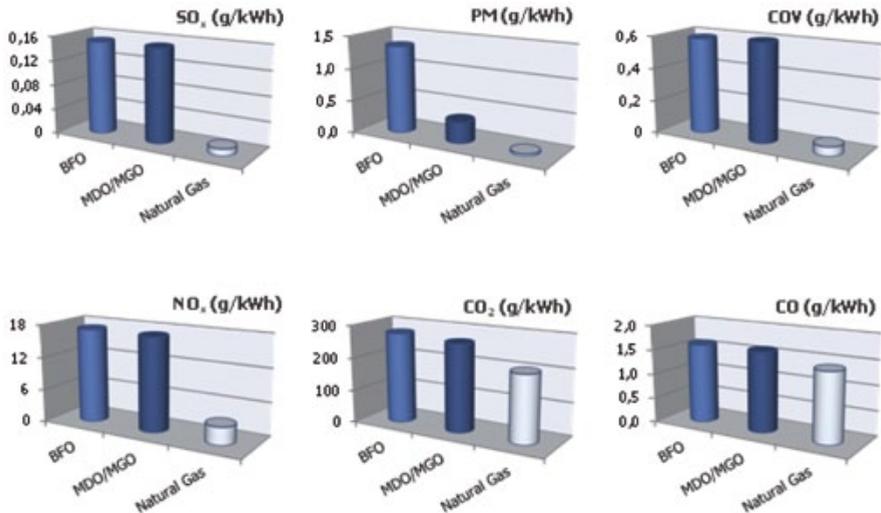


Figura 5. Comparación de emisiones producidas por cada tipo de combustible
(Fuente: Elaboración propia a partir de datos extraídos de EMEPEEA
Air pollutant emission inventory guidebook — 2009).

Esta solución resulta especialmente interesante en las zonas SECA de control de emisiones dado que hay pocas alternativas que cumplan con los cada vez más estrictos límites de emisiones de azufre fijados en el convenio Marpol (actualmente el 1%, que se reducirá al 0,1% en 2015).

En este caso se sustituye el combustible fósil que utilizan normalmente los buques por gas natural licuado a -161°C y presión atmosférica. El problema radica en que se ha de reformar el sistema de propulsión de los buques para que puedan utilizar este tipo de combustible.

La tecnología se encuentra en fase de desarrollo, existen diversos estudios en curso pero es primordial que se establezca un marco normativo tanto para los equipos como para los procedimientos por motivos de seguridad.

Sin embargo la Comisión Europea pretende garantizar la creación de una red de abastecimiento de GNL para el 2020 en todos los puertos marítimos y fluviales de las autopistas de la Red Transeuropea de Transportes (RTE-T) principal, según la propuesta de directiva sobre la creación de una infraestructura para los combustibles alternativos.

España tiene un gran potencial por la dilatada experiencia en almacenamiento y manipulación de este combustible. Existen 6 plantas de distribución en uso (Barcelona, Huelva, Cartagena, Bilbao, Sagunto y Ferrol) y tres más en construcción (Gijón, Gran Canaria y Tenerife). Siguiendo el ejemplo del puerto de Zeebrugge, se deberían aprovechar los conocimientos adquiridos y la infraestructura existente para adelantarse a la propuesta de directiva, tratando de posicionar a los puertos españoles como punto de aprovisionamiento de GNL en el sur de Europa por delante de otros países.



Finalmente los biocombustibles son actualmente el tipo de combustible alternativo más utilizado. Son una fuente de energía limpia y renovable, producen escasas emisiones contaminantes y en su mayoría son biodegradables (en caso de fuga se degradan sin contaminar). Se utilizan frecuentemente para el transporte por carretera, sin embargo en el transporte marítimo existen todavía diversos obstáculos por salvar.

La tecnología necesaria se encuentra en fase preliminar de investigación y desarrollo, los estudios existentes sobre la materia son escasos y en su mayoría los resultados no se hacen públicos ya que provienen de iniciativas privadas. Por otro lado es un combustible escaso y su precio es más elevado que el de los combustibles fósiles, el proceso de elaboración suele ser complejo lo que dificulta su producción a gran escala. No suelen existir cadenas de suministro establecidas, y a día de hoy ni las infraestructuras ni los materiales están normalizados.

En general su poder energético es menor que el combustible fósil lo que hace necesario un mayor volumen para producir la misma energía. Los depósitos de almacenamiento, tanto en tierra como a bordo, han de ser mayores. Por todo esto, aunque es una alternativa interesante para reducir la dependencia energética del combustible fósil, no parece viable a corto o medio plazo.

5. CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado evidencia la necesidad de incluir una correcta estrategia energética en los planes de empresa de las Autoridades Portuarias, quedando así materializada la aplicación de esta Guía.

Para la definición de esta estrategia energética cada Autoridad Portuaria debería analizar el estado de su desempeño energético, desarrollar una política energética, elaborar un plan de actuación en base a una planificación marcando la línea de partida, los objetivos y metas a alcanzar, y por supuesto los indicadores a utilizar para realizar el seguimiento mediante verificaciones periódicas.

Todo esto permitirá no sólo reducir la huella de carbono y la dependencia energética de los puertos, sino también reducir sus costes de explotación, reforzando la competitividad del sistema portuario español y favoreciendo la autosuficiencia y rentabilidad de las Autoridades Portuarias.

La *Guía de Gestión Energética en Puertos* fue completada en diciembre de 2013 y publicada oficialmente en junio de 2014. Actualmente se encuentra disponible, en formato electrónico, en la página web de Puertos del Estado:

<http://www.puertos.es/content/gestion-energetica>.



VERIFICACIÓN DE LA ESTABILIDAD GEOTÉCNICA DE LOS DIQUES VERTICALES EN EL PROGRAMA ROM. ESTUDIO COMPARADO CON OTROS PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACION



Juan Ignacio Grau Albert¹

1. INTRODUCCIÓN

Por necesidades del tráfico marítimo las ampliaciones de los puertos o la construcción de puertos de nueva planta, se hacen cada vez en mayores profundidades, donde la construcción de diques en talud es prácticamente inviable, tanto por razones económicas como medioambientales. Por tanto la construcción de diques verticales es cada vez más frecuente, incluso en condiciones de exposición al mar muy duras en donde, hasta hace relativamente pocos años, se pensaba que este tipo de realización era prácticamente imposible.

En lo que sigue se analizan como han ido evolucionando los criterios de diseño de los diques verticales desde la aparición del programa ROM hasta las fechas actuales realizando una aplicación práctica referida al diseño de un dique vertical ubicado en grandes profundidades y contrastando los resultados con otros procedimientos de diseño. A su vez se analizan las obras construidas desde mediados del siglo pasado hasta nuestros días y como se ha reflejado la normativa existente en las realizaciones finalmente adoptadas.

¹ Profesional libre.



2. EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE SEGURIDAD DE LOS DIQUES

La verificación de la estabilidad de los diques verticales puede hacerse desde dos aproximaciones: cálculo determinista o cálculo probabilista.

El método de cálculo determinista se caracteriza porque *la fiabilidad se expresa por medio de los coeficientes de seguridad*, calculados por medio de las ecuaciones de verificación aplicables a los distintos modos de fallo o bien mediante el cálculo de tensiones admisibles y no da por tanto ninguna información sobre probabilidades de fallo. Para la aplicación de este procedimiento se supone que son conocidas todas las variables que intervienen en la seguridad de la estructura.

El método de cálculo probabilista, como su nombre indica y a diferencia del método determinista, se caracteriza por calcular las probabilidades de fallo del modo analizado. A su vez puede plantearse desde un punto de vista de la fiabilidad de la resistencia de la estructura o de su funcionalidad. En el primer supuesto se calcula que la probabilidad de fallo de la estructura se mantiene por debajo de unos valores prefijados. En el segundo supuesto se admite que la estructura falla desde un punto de vista resistente, pero se calcula la probabilidad de que los movimientos que experimenta como consecuencia del fallo no impiden su funcionalidad.

En el cálculo probabilista, el cálculo de la fiabilidad estructural se puede abordar desde tres puntos de vista:

Nivel III: Teóricamente deben considerarse las incertidumbres de todas las variables relacionadas con el fallo, considerando sus funciones de distribución de forma explícita. En la práctica se consideran solamente las incertidumbres de las variables más relevantes relacionadas con el fallo, viniendo definidas el resto por su valor representativo. La probabilidad de fallo se calcula por integración múltiple de las funciones de distribución de probabilidad de fallo o mediante técnicas de simulación numérica (Monte Carlo). Este procedimiento, en un principio, es el más fiable, pero la determinación de las funciones de distribución de las variables, en numerosas ocasiones, es difícil.

El nivel II es una simplificación del anterior y asigna a todas las variables funciones de distribución normales caracterizadas por su media y desviación típica. La probabilidad de fallo también se aproxima a una distribución normal y la seguridad de la estructura se expresa mediante el índice de fiabilidad para lo que se calculan una serie de estados límite correspondientes a los modos de fallo previstos.

El nivel I no calcula directamente la probabilidad de fallo pero introduce una serie de coeficientes parciales que multiplican a las variables que intervienen en las funciones representativas de los modos de fallo últimos. Estos coeficientes parciales han tenido que ser calibrados previamente para una probabilidad de fallo aceptable a partir de estructuras existentes o bien mediante la aplicación de los Niveles II o III.



3. LA SEGURIDAD DE LOS DIQUES VERTICALES EN EL PROGRAMA ROM

En este contexto en España, en el año 1990, en la ROM 02 90 “Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias”, primera de las publicadas en el programa ROM, se establece un criterio para determinar, a partir del régimen de temporales, el periodo de retorno y por consiguiente la ola de cálculo de los diques verticales, en función de la probabilidad de excedencia durante su vida útil. Este valor se utilizará como un dato fijo para el *cálculo determinista* de los diques, de acuerdo con la metodología al uso para la comprobación de muros de muelle.

En el año 1994 se publicó la ROM 05 94 “Recomendaciones geotécnicas para el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias” donde se establecieron los criterios geotécnicos y los coeficientes de seguridad aceptables para la verificación, *por métodos deterministas*, de la seguridad de las estructuras.

En el año 2000 se publica la ROM 00 donde se plantea el *cálculo probabilista* de los diques, con los procedimientos de Nivel I, II y III, aunque si bien es verdad que se exponen los procedimientos, no se desarrollan métodos que permitan su aplicación. Los procedimientos a utilizar en la verificación de las condiciones de seguridad de los diques se establecen, en función del IRE y del ISA Para obras con ISA bajo (5-19), donde se encuadran la mayoría de los diques, la probabilidad conjunta de fallo debe ser menor o igual a 0,10. Para ISA bajo e IRE bajo o medio hay que aplicar métodos de coeficientes parciales y las obras con IRE alto, además, deberán verificarse con métodos de Nivel II o III.

En el año 2005 se revisa la ROM 05 94, dando lugar a la ROM 05 05, donde se incorporan *vía coeficientes parciales (Nivel I) y coeficientes de seguridad los procedimientos probabilistas* enunciados en la ROM 00. En concreto se establecen dos procedimientos para el diseño de los diques verticales.

- *Método estándar*: Se considera para el diseño un altura de ola con periodo de retorno de 50 años, se mayoran las cargas y la verificación de la seguridad del dique se hace *vía coeficientes de seguridad*. La probabilidad de fallo asociada al procedimiento es 10^{-2} . Hay que reseñar que las comprobaciones habituales *vía coeficientes parciales*, suelen plantearse como margen de seguridad, por tanto este procedimiento es atípico con respecto a lo habitual. Lo que se plantea en la ROM es sustituir la minoración de parámetros resistentes por la consideración de coeficientes de seguridad con la pretensión de que los resultados sean equivalentes.
- *Método específico*: En este procedimiento el temporal considerado para tener en cuenta la acción del oleaje es aquel cuya probabilidad de excedencia, durante la vida útil de la obra, es precisamente igual a la probabilidad de fallo del modo considerado. Las acciones que intervienen en la estabilidad no se mayoran y solo están afectadas por el valor de combinación en el caso de coexistir varias acciones. Los coeficientes de seguridad a aplicar son



menores que los correspondientes para el método estándar y hay que calcularlos para cada caso concreto. Este procedimiento es similar al que se realizaba con la ROM 02 90 y la ROM 05 94, pero con coeficientes de seguridad notablemente menores.

En el año 2009 se publica la ROM 1.0-09 "Recomendaciones para el diseño y ejecución de las obras de abrigo (Parte 1ª. Bases y Factores para el proyecto. Agentes climáticos)" donde se resumen los procedimientos de cálculo expuestos en la ROM 00. Como particularidad cabe resaltar que se incluyen una serie de figuras (2.2.33 a 2.2.37) en donde, en *función del uso* de las áreas portuarias y litorales, se definen para los diques: IRE, ISA, Vida Útil, probabilidad de fallo ELU, IREO y operatividad mínima, ISAO y número máximo de paradas anuales y duración máxima de una parada operativa.

4. ESTUDIO COMPARADO DE LAS CONDICIONES DE ESTABILIDAD DE LOS DIQUES

Como se deduce de lo anteriormente expuesto la verificación de las condiciones de seguridad en los diques, dentro del Programa ROM, ha sufrido cambios importantes a lo largo del tiempo los cuales podrían traducirse en diseños significativamente diferentes.

Prescindiendo de los Niveles II y III, de difícil aplicación como se ha expuesto anteriormente, parece interesante analizar, con la resolución de un ejemplo tipo comparado, a donde nos conducen la aplicación de los diferentes criterios considerados hasta ahora. Para tener una visión más contrastada de los resultados obtenidos, a su vez, se resolverá el mismo ejemplo con los procedimientos recogidos en "PROBABILISTIC DESIGN TOOLS FOR VERTICAL BREAKWATERS"-PROVERBS- y en "RANDOM SEAS AND DESIGN OF MARITIME STRUCTURES" 3ª EDICIÓN (RSDMS) de Yoshimi Goda complementada para el cálculo de la carga de hundimiento por TECHNICAL STANDARD IN JAPAN 2002(TSJ) .La primera publicación se ha elegido por tratarse de un estudio específico sobre diques verticales en el ámbito europeo y la segunda por considerarla representativa de las técnicas de diseño en Japón donde tan arraigada está la construcción de diques verticales.

4.1. Ejemplo tipo a resolver

En la Fig 1 se muestra la sección tipo de un dique vertical ubicado en aguas lo suficientemente profundas (cota -40) como para que no se produzcan roturas de oleaje.

El dique está cimentado a la cota -21,50 y a efectos de las comprobaciones a realizar se suponen las siguientes longitudes para las bermas de la banquetta: LM= 5 m; LP=5 m.

Por sus dimensiones y, teniendo en cuenta la cota de cimentación del dique vertical, la banquetta de cimentación tampoco afecta al oleaje, por lo que puede suponerse que el dique es puramente reflejante.



Se supone que el suelo natural (cota-40) es competente para la cimentación de la estructura y los problemas de hundimiento están determinados únicamente por la banqueta de cimentación, situación por otra parte habitual en diques cimentados en grandes profundidades.

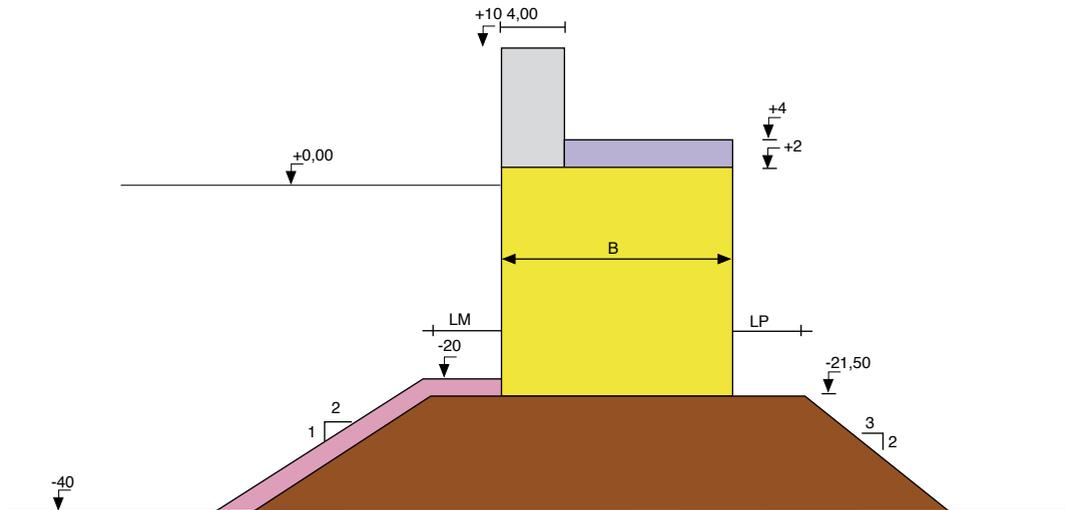


Fig 1. Sección tipo del dique vertical.

Entre cotas -21,50 y +2,00 hay un cajón de manga B. A efectos de cálculo de pesos se le asigna una densidad sumergida $\gamma' = 1,1 \text{ t/m}^3$ y seca de $\gamma_{\text{seca}} = 2,1 \text{ t/m}^3$. Entre cotas +2 y +10 se dispone un espaldón de 4 m de ancho con una densidad seca $\gamma_{\text{seca}} = 2,3 \text{ t/m}^3$ y entre cotas +2,00 y +4,00 se construye la superestructura con densidad seca $\gamma_{\text{seca}} = 2,2 \text{ t/m}^3$.

El peso efectivo del dique por ml vale: $P = 32,25B + 56 \text{ t/ml}$.

Los temporales en el lugar de ubicación del dique, en función del periodo de retorno, TR, vienen caracterizados por:

$$T_R = 475 \text{ años}; H_{1/3} = 6,60 \text{ m}; T_p = 12,0 \text{ s}; T_{1/3} = 11,42 \text{ s.}$$

$$T_R = 300 \text{ años}; H_{1/3} = 6,50 \text{ m}; T_p = 12,0 \text{ s}; T_{1/3} = 11,42 \text{ s.}$$

$$T_R = 100 \text{ años}; H_{1/3} = 6,00 \text{ m}; T_p = 12,0 \text{ s}; T_{1/3} = 11,42 \text{ s.}$$

$$T_R = 50 \text{ años}; H_{1/3} = 5,65 \text{ m}; T_p = 11,5 \text{ s}; T_{1/3} = 10,95 \text{ s.}$$



La relación mínima entre cota de coronación del dique, $C=10$ m, y la máxima $H_{1/3}=6,60$ m, es de 1,52 con lo que el dique puede considerarse como poco rebasable (ver comentarios a este respecto en el punto 4.4).

El dique, atendiendo a las características descritas, puede considerarse representativo de dique en un puerto mediterráneo español cimentado a gran profundidad.

Los esfuerzos inducidos *por la cresta* de los temporales en el dique, calculados mediante la formulación de Goda, son los siguientes:

$$H_{1/3} = 6,60 \text{ m}; T_{1/3} = 11,42 \text{ s.}; H=223,70 \text{ t}; Mv = 3449,78 \text{ mt}; P_{sub} = 5,72 \text{ t/m}^2$$

$$H_{1/3} = 6,50 \text{ m}; T_{1/3} = 11,42 \text{ s.}; H=219,56 \text{ t}; Mv = 3381,35 \text{ mt}; P_{sub} = 5,64 \text{ t/m}^2$$

$$H_{1/3} = 6,00 \text{ m}; T_{1/3} = 11,42 \text{ s.}; H=198,28 \text{ t}; Mv = 3029,72 \text{ mt}; P_{sub} = 5,20 \text{ t/m}^2$$

$$H_{1/3} = 5,65 \text{ m}; T_{1/3} = 10,95 \text{ s.}; H=179,18 \text{ t}; Mv = 2732,79 \text{ mt}; P_{sub} = 4,67 \text{ t/m}^2$$

H = empuje horizontal de la cresta; Mv = momento volcador referido a la base del dique; P_{sub} =presión de la subpresión en la arista lado mar del dique.

4.2. Cálculo determinista.

Se realizan los cálculos según ROM 02 90 + ROM 05 94 y RSDMS +TSJ

4.2.1. Modos de fallo analizados.

Deslizamiento.

$$\text{Ecuación de verificación: } Fd = \frac{\mu(P - V_{sub})}{H}$$

$$V_{sub} = 0,5 \times P_{sub} \times B \text{ t/ml (Empuje vertical negativo de la subpresión)}$$

Vuelco.

$$\text{Ecuación de verificación: } Fv = \frac{Me - M_{sub}}{Mv}$$

$Me = 16,13B^2 + 56B - 112$ mt (momento estabilizador del peso propio referido a la arista lado puerto del dique)

$M_{sub} = 0,33 \times B^2 \times P_{sub}$ m t (momento estabilizador negativo de la subpresión referido a la arista lado puerto del dique).



Hundimiento

Ecuación de verificación: $Fh = \frac{qu}{\sigma}$

q_u = carga última (t/m^2) que resiste la banqueta de cimentación, teniendo en cuenta la presencia del talud, para una anchura del cimiento B^* .

B^* = anchura eficaz de la cimentación = $2e$ m

e = excentricidad de la resultante referida a la arista lado puerto del dique.

$$\sigma = \frac{P - V_{sub}}{B^*} \quad t/m^2$$

4.2.2. Valor de los parámetros geotécnicos a considerar en los cálculos:

Se transcriben los valores recomendados a falta de datos concretos

Valor del coeficiente de rozamiento banqueta-solera cajón.

RSDMS: $\mu = 0,6$; ROM05 94 $\mu = 0,625$.

Ángulo de rozamiento interno de la banqueta:

TSJ: $\phi = 35^\circ$; .ROM 05 94: $\phi = 40^\circ$

Cohesión efectiva:

TSJ: $C = 2,0 \text{ t/m}^2$; ROM 05 94: $C = 0,0 \text{ t/m}^2$.

Densidad sumergida: $\gamma' = 1,0 \text{ t/m}^3$

4.2.3. Temporal de diseño a considerar en los cálculos

ROM 02 90

$$E = 1 - (1 - 1/T_R)^{L_f}$$

E = riesgo (en realidad es probabilidad de excedencia de una altura de ola en la vida útil) = $0,15$ (diques verticales)

Vida útil $L_f = 50$ años

Con estos valores se obtiene que el temporal de cálculo es el correspondiente a un periodo de retorno de $T_R = 308$ años. Redondeando se adopta el temporal con $T_R = 300$ años.

**RSDMS.**

No se especifica un criterio concreto para determinar el temporal a considerar en el diseño aunque indica que lo habitual es considerar temporales con periodo de retorno comprendido entre 50 y 100 años. Tampoco especifica la vida útil.

*4.2.4. Valores mínimos de los coeficientes de seguridad.***ROM 05 94**

En la tabla 4.2.7 de la ROM se dan coeficientes para situaciones persistentes y transitorias de largo plazo y accidentales y transitorias de corto plazo. No se especifica que coeficientes deben usarse para el temporal de cálculo. Como este temporal no puede considerarse una carga accidental y la denominación de "transitorias de corto plazo" parece que se refiere a cuestiones relacionadas con la consolidación del terreno, cabría pensar que hay que aplicar los primeros de los anteriormente referidos. Sin embargo con el fin de valorar la influencia que tienen estos coeficientes en los resultados se diseñara el dique considerando ambas posibilidades.

RSDMS y TSJ

Goda, en su publicación, únicamente contempla deslizamiento y vuelco. En TSJ se indica que, para diques verticales solicitados por el temporal de cálculo, el coeficiente de seguridad al hundimiento debe ser mayor que 1.

En la Tabla 1 se resumen los coeficientes de seguridad a tener en cuenta en el cálculo para los modos de fallo de deslizamiento por la base del dique (F_d), vuelco (F_v) y hundimiento (F_h).

	TR(años)	Fd	Fv	Fh
ROM02 90+ROM 05 94	300	1,4-1,2	1,4-1,2	2,5-2
RSDMS+TSJ	50-100	1,2	1,2	1-1,5

Tabla 1. Coeficientes de seguridad a considerar en el cálculo.

4.2.5. Cálculo de la anchura de dique necesaria.

En la Tabla nº 2 se indican las anchuras de dique "B" necesarias para conseguir los coeficientes de seguridad, para los diferentes modos de fallo, recogidos en la Tabla nº 1. Los cálculos siempre se han hecho para una anchura de berma en el trasdós de 5 m salvo en un caso concreto que también se ha determinado la anchura "B" con berma de 10 m.



ROM 02 90 +ROM 05 94						
Tr=300 años	Fd=1,4	Fd=1,2	Fv=1,4	Fv=1,2	Fh=2,5	Fh=2
B(m)-LP=5m	14,81	12,42	16,58	15,25	24,40	23,1
B(m)-LP=10m					24,15	22,85
RSDMS+TSJ						
Tr=100 años	Fd=1,2		Fv=1,2		Fh=1,5	Fh=1
B(m)-LP=5m	11,49		14,3		21,05	18,8
Tr=50 años	Fd=1,2		Fv=1,2		Fh=1,5	Fh=1
B(m)-LP=5m	10,11		13,45		19,65	17,55

Tabla n° 2 Ancho B en función de los coeficientes de seguridad expresados.

Como se deduce de los resultados obtenidos el procedimiento ROM es siempre bastante más conservador que el propuesto en RSDMS+TSJ. Las diferencias se deben a que los periodos de retorno de los temporales de cálculo considerados son mayores en el programa ROM y los coeficientes de seguridad son también en todos los supuestos iguales o mayores. Volveremos a hablar de este asunto más adelante. El modo de fallo que determina la anchura del dique siempre es el hundimiento. Esta característica se ha comprobado que sigue siendo cierta incluso si el dique se corona muy bajo (cota +3).

Otro aspecto interesante a analizar es el relativo a la efectividad de aumentar la anchura de la berma para conseguir el coeficiente de seguridad al hundimiento requerido. Para $T_R=300$ años y $F_h=2,50$ la anchura de cajón necesaria con berma de 5 m es $B=24,40$ m y con berma de 10 m $B=24,15$ m. Por tanto un aumento de berma de 5 m implica tan solo una reducción de la anchura del cajón de 0,25 m. Las mismas diferencias se obtienen para $F=2,00$. Por tanto, para diques cimentados en grandes profundidades como es el caso que se analiza, para conseguir la seguridad necesaria frente al hundimiento parece mucho más interesante aumentar la anchura del dique antes que conseguir esta seguridad con el incremento de las bermas.

4.3. Cálculo probabilista. NIVEL I.

El cálculo probabilista de Nivel I o de coeficientes parciales sigue el mismo sistema de cálculo que el determinista, con la salvedad de que los términos de la ecuación de verificación se afectan por una serie de coeficientes, previamente tarados, que garantizan que la probabilidad de fallo durante la vida útil de la estructura se mantiene por debajo de un determinado valor que se considera aceptable. Las ecuaciones de verificación se plantean



en términos de margen de seguridad, resistencia menos acción desestabilizadora mayor que cero, pero en la ROM 05 05 se establece una excepción a este procedimiento y, además de utilizar coeficientes parciales, se siguen manteniendo coeficientes de seguridad.

Se realizan los cálculos según ROM 05 05, RSDMS y PROVERBS.

Se calculan tan solo los modos de fallo de deslizamiento y hundimiento salvo en RSDMS que no especifica coeficientes parciales para este modo de fallo. No se calcula el vuelco rígido ya que la ROM 05 05 especifica que este modo de fallo no es geotécnico y no da los correspondientes coeficientes al respecto. El vuelco plástico es una particularidad de la ROM y tampoco se ha considerado.

En la Tabla 3 se indican los coeficientes parciales a utilizar según las distintas fuentes. Los coeficientes parciales de la ROM 05 05, para el método específico, se han calculado a partir de las formulaciones incluidas al respecto en dicho texto, en el supuesto que el dique está ubicado en el Mediterráneo. En la aplicación del método estándar ROM 05 05, también se pide considerar como acción accidental el temporal de 500 años de periodo de retorno. No se ha hecho tal comprobación por ser menos exigente que el método específico.

VIDA UTIL $L_T = 50$ años	Tr(años)	γ_H	γ_V	γ_s	$\gamma_{\mu d}$	$\gamma_{\phi h}$	F_d	F_h	P_f
PROVERBS	50	1,1	1	1	1,2	1,2	-	-	1,00E-01
		0,935	1	1	1,2	1,2	-	-	
ROM05 05. MÉTODO ESTANDAR	50	1,3	1	1,3	1	1	1,1	1,5	1,00E-02
ROM 05 05. MÉTODO ESPECIFICO	475	1	1	1	1	1	1,07	1,35	1,00E-01
RSDMS	50	1,04	1	1,04	0,79	-	-	-	8,20E-03

Tabla 3. Coeficientes parciales para obras con 50 años de vida útil.

Las notaciones tienen los siguientes significados:

γ_H = coeficiente parcial a aplicar a las fuerzas horizontales de oleaje. En PROVERBS el valor mayor corresponde a diseño sin ensayos.

γ_V = Coeficiente parcial a aplicar a los pesos

γ_s = Coeficiente parcial a aplicar a la subpresión debida al oleaje.

$\gamma_{\mu d}$ = Divisor de μ ($\mu=0,625$) para el modo de fallo de deslizamiento por la base. En RSDMS el coeficiente multiplica directamente al coeficiente de rozamiento para el que se considera un valor $\mu = 0,60$.



$\gamma_{\phi h}$ = Divisor de $\text{tg } \phi$ para el modo de fallo de hundimiento en condición drenada.

F_d = Coeficiente de seguridad para el modo de fallo de deslizamiento por la base.

F_h = Coeficiente de seguridad para el modo de fallo hundimiento.

P_f = Probabilidad de fallo admisible.

Las probabilidades de fallo corresponden a las que se consideran adecuadas para el diseño de diques verticales según las distintas fuentes. Hay que señalar que en el método específico de la ROM 05 05 no se indica que probabilidad de fallo debe usarse y se deja a criterio del proyectista. En este caso concreto se ha adoptado una probabilidad de fallo de 10^{-1} ya que es la más frecuente siguiendo los criterios de la ROM 00 y la ROM 1.0-09.

Aplicando estos criterios se obtienen los resultados que se indican en la Tabla n°4

ROM 00 +ROM 05 05. MÉTODO ESTÁNDAR		
Tr=50 años;Pf=10 ⁻²	Fd=1,1	Fh=1,5
B(m)-LP=5m	12,11	22,47
ROM 00 +ROM 05 05. MÉTODO ESPECÍFICO		
Tr=475 años;Pf=10 ⁻¹	Fd=1,07	Fh=1,35
B(m)-LP=5m	11,12	21,47
RSDMS		
Tr=50 años;Pf=8,2x10 ⁻³	Fd=1,00	
B(m)-LP=5m	11,3	
PROVERVS		
Tr=50 años;Pf=10 ⁻¹	Fd=1,00	Fh=1,00
B(m)-LP=5m	10,78	22,15

Tabla 4. Ancho B en función de las probabilidades de fallo expresadas.

Los resultados se han calculado siempre para una anchura de berma de 5 m.

4.4. Análisis de resultados.

4.4.1. Deslizamiento.

Resultados con Nivel I

El ancho B calculado mediante el procedimiento RSDMS es 11,3 m y por el método estándar de la ROM 05 05 es de 12,11m, que es un 7,17% mayor. Los resultados son



próximos, lo que es lógico teniendo en cuenta que las probabilidades de fallo son muy parecidas, aunque al ser menor en RSDMS, con este procedimiento se tendría que haber obtenido un mayor ancho, al revés de lo que sucede.

Si se comparan resultados para probabilidad de fallo 10^{-1} vemos que con el método específico de la ROM 05 05 se obtiene un ancho 3,15% mayor que con PROVERBS, por tanto el ajuste es mejor que en el caso anterior. En este caso los anchos calculados son menores que los obtenidos en la situación anterior en consonancia con una mayor probabilidad de fallo.

Resultados con método determinista.

El ancho necesario evidentemente está condicionado por el temporal de cálculo y por el coeficiente de seguridad. Si se comparan los anchos máximos obtenidos, el calculado con la ROM 05 94 es 28,89% mayor que el calculado con RSDME y, si la comparación se hace con los mínimos, la ROM da un ancho 22,85% mayor. Si la comparación se establece entre el ancho mínimo de la ROM y el máximo de RSDME el resultado es que el primero es un 7,92% mayor que el segundo.

Comparación entre método determinista y Nivel I.

La probabilidad de fallo con ROM 05 94 siempre es menor que 10^{-2} .

La probabilidad de fallo con RSDMS se mueve entre 10^{-1} y 10^{-2} en función del temporal de cálculo considerado.

4.4.2. Vuelco

Resultados con Nivel I

No se tienen resultados.

Resultados con método determinista.

La ROM 05 94 en cualquier supuesto da mayores anchuras que RSDMS Si la comparación es entre máximos la ROM da un ancho 15,94% mayor, si se hace entre mínimos un 13,38% y si se compara el mínimo de la ROM con el máximo de RSDME un 6,64% mayor.

Un resultado interesante es que si se consideran los modos de fallo deslizamiento y vuelco, la anchura del dique siempre viene determinada por el vuelco con ambos procedimientos de cálculo. Se ha comprobado que esta circunstancia se sigue produciendo aunque el dique se corone a una cota mucho más baja (cota+3,00 en vez de cota +10,00)



4.4.3. Hundimiento

Resultados con Nivel I

El método estándar de la ROM, para una probabilidad de fallo de 10^{-2} , da una anchura de dique que es un 4,66% más ancha que la que da el método específico y un 1,44% que la de PROVEBS, estos últimos procedimientos para una probabilidad de fallo de 10^{-1} . Los resultados son lógicos en el sentido de que a menor probabilidad de fallo se requiere mayor anchura pero las diferencias no casan del todo bien.

Resultados con método determinista

Si se comparan los anchos máximos obtenidos, el calculado con la ROM 05 94 es un 15,91% mayor que el calculado con RSDMS y si la comparación se hace con los mínimos la ROM da un ancho 22,87% mayor. Si la comparación se establece entre el ancho mínimo de la ROM y el máximo de RSDME el resultado es que el primero es un 9,74% mayor que el segundo.

Comparación entre método determinista y Nivel I.

El ancho mínimo calculado con la ROM 05 94 es un 3,80% mayor que el calculado con la ROM 05 05, por tanto los diques diseñados con el primer procedimiento tienen una probabilidad de fallo inferior a 10^{-2} .

Cualquiera de los anchos calculados con RSDMS+TSJ (valor máximo $B=21,05\text{m}$) son menores que el menor ancho (21,47 m) calculado para probabilidad de fallo de 10^{-1} . Por tanto la seguridad al hundimiento de los diques diseñados con RSDMS+TSJ, con los supuestos que aquí se han hecho, es inferior a 10^{-1} .

5. CARACTERÍSTICAS MÁS RELEVANTES DE LOS DIQUES VERTICALES CONSTRUIDOS EN ESPAÑA.

Los datos que se utilizan a continuación se han extraído de las publicaciones “Diques de Abrigo en España” (MOPU 1988) identificada en adelante como Ref 1 y “Diques de Abrigo en los Puertos de Interés General del Estado” (Organismo Público Puertos del Estado 2012) identificada como Ref 2. En la primera publicación se recogen las características de los diques construidos hasta el año 1986 y que, por tanto, fueron diseñados y construidos antes de publicarse la primera ROM y, en la segunda, los diseñados y construidos desde 1986 hasta 2011 y que debieron proyectarse de acuerdo con las prescripciones de las distintas ROM según fechas del Proyecto. Por su especial relevancia en el diseño también se hará una referencia a las características y resultados de cálculos realizados en Nivel III, identificados como Ref 3, de 3 diques proyectados con posterioridad a 2011, de acuerdo a los datos suministrados por el Área de Infraestructuras de Puertos del Estado.



5.1. Diques incluidos en la Referencia 1

Hasta el año 1986 la mayoría de diques verticales construidos en los Puertos de Interés General se encuentran en Canarias. Esta tipología es muy poco frecuente en la península y se concentra fundamentalmente en Algeciras y Cartagena. El dique más antiguo se construyó en Valencia (Dique Norte Tramo II) en el año 1921 y el más moderno en Santa Cruz de Tenerife (Dique Muelle del Este 3ª Alineación) en el año 1984. Una característica común en el diseño de todos estos diques es que, para definir el temporal de cálculo, aún no existe el criterio de periodo de retorno. La acción del mar queda materializada por una altura de ola determinada en función del fetch (fórmula de Iribarren) y, en contadas ocasiones, también por un periodo. Los esfuerzos del oleaje sobre el dique se calculan con la formulación de Iribarren y o Sainflou y prácticamente no se realizan ensayos en modelo reducido.

5.2. Diques incluidos en la Referencia 2

La casi totalidad de los diques construidos desde el año 1986 se proyectan después de la edición de la ROM 02 90. De hecho, salvo los diques Reina Sofía Tramo 1 en el puerto de Las Palmas (año 1989) y Castor del Valle. Tramo I en el Puerto de Algeciras (año 1990), el resto de los diques son posteriores al año 1990. En este periodo, además de en Canarias, comienza a ser habitual la construcción de diques verticales en el Mediterráneo y se ha construido el primer dique vertical en el Cantábrico (Dique Norte en el puerto de Gijón)

La aportación fundamental de la ROM 02 90 al diseño de los diques consistió en fijar, para el procedimiento de cálculo determinista, un criterio de fácil aplicación para calcular el periodo de retorno del temporal de cálculo en función de la vida previsible de la obra y del nivel de riesgo (en realidad es probabilidad de excedencia de una altura de ola). Para los valores más usuales de 50 años de vida útil y una probabilidad de excedencia de 0.15 se obtiene que el temporal de cálculo debe tener un periodo de retorno de 308 años. Este criterio para determinar el periodo de retorno, muy discutible por otra parte, fue adoptado por unanimidad por la Ingeniería española en primer lugar porque era una prescripción de la ROM y en segundo lugar por la facilidad de aplicación del método. En el año 2000 se publica la ROM 00 en donde se fija que la probabilidad de fallo admisible para la mayoría de los diques es 0,10. En la aplicación práctica de la ROM 00 se asimila la probabilidad de fallo de 0,10 al 0.15 de excedencia de la ROM 02 y se calculan los diques con un periodo de retorno de 475 años, utilizando los coeficientes de seguridad de la ROM 05 94 o, más tarde, los del método estándar de la ROM 05 05 que, por otra parte, son aplicables únicamente a un temporal con periodo de retorno de 50 años. Hay por tanto un poco de desconcierto sobre el cálculo de los diques que, en general, se traduce en diseños conservadores. En el año 2005 la ROM 05 05 define coeficientes parciales para una probabilidad de fallo de 10^{-2} asociado a un temporal con periodo de retorno de 50 años (método estándar) o bien establece criterios para fijar los coeficientes de seguridad para otras probabilidades de fallo (método específico). En el conjunto de diques incluidos en este grupo (referencia 2) no se aplicaron los criterios de la ROM 05 05 ya que de hecho, de los 33 diques analizados, 19 (57,58%) se calcularon para periodos de retorno de 300-308 años, 5 (15.15%) para periodo



RETOS DEL SIGLO XXI PARA LOS PUERTOS Y LAS COSTAS

de retorno de 475 años, 1 (3,03%) para periodo de retorno de 500 años, 6 (18,18%) para periodos de retorno comprendidos entre 68 y 230 años, en función de la vida previsible de la obra siempre inferior a 50 años y 1 (3,03%) con Nivel III de acuerdo con las prescripciones de la ROM 00. En un caso no se especifica el periodo de retorno.

5.3. Diques incluidos en la Referencia 3

En este grupo se incluyen 3 diques proyectados con posterioridad a 2011 por la singularidad en su diseño, ya que por primera vez se proyectan aplicando el método estándar de la ROM 05 05 y se verifica su probabilidad de fallo con el Nivel III, considerando como variables aleatorias la altura de ola y el periodo.

En los trabajos realizados se concluye que el modo de fallo determinante es el hundimiento y las probabilidades de fallo calculadas para este modo son $1,31 \times 10^{-2}$, $9,76 \times 10^{-3}$ y $1,15 \times 10^{-2}$ resultados acordes con la probabilidad de fallo (10^{-2}) de la ROM 05 05 para el método estándar.

5.4. Cuadro comparativo de las características fundamentales de los diques incluidos en las tres referencias.

En la Tabla 5 se resumen las características que se han considerado como más relevantes de los diques verticales construidos en España en los puertos de interés general.

Algunas características se han parametrizado referenciándolas a la altura de ola de diseño con la finalidad de poder anticipar con cierta fiabilidad el comportamiento de futuros diseños diques en función de estos parámetros.

Es interesante, por ejemplo, saber cuál es la relación de la profundidad mínima de la berma lado mar con relación a la altura de ola de diseño para que no se produzcan roturas de oleaje, la relación de la cota de coronación del espaldón con dicha ola para que haya pocos rebases o bien cuáles son las relaciones más habituales de anchura del dique a altura de ola. Aunque si bien es verdad que estas relaciones no dependen únicamente de la altura de ola (el periodo o la longitud de onda en el lugar de ubicación del dique, por ejemplo, también son relevantes) nos sirven como características orientativas para futuros diseños.

Un dique, a lo largo de su vida útil, se verá solicitado por temporales de características muy diferentes y, con todos (o casi todos, no conviene olvidarse que existe una probabilidad de fallo) debe comportarse de forma adecuada. Los temporales se caracterizan por la altura de ola $H_{1/3}$ y el periodo $T_{1/3}$ o el periodo de pico T_p y la inversa de la probabilidad de excedencia en el régimen extremal del año medio es lo que denominamos periodo de retorno. Para calcular la estabilidad de un dique se puede tomar como referencia cualquier temporal que se considere adecuado. Por ejemplo en el método estándar de la ROM 05 05 el temporal de referencia es el que tiene un periodo de retorno de 50 años y, para ese temporal y no otro, se han definido unos coeficientes parciales que nos garan-



tizan que la probabilidad de fallo se mantiene por debajo de un determinado umbral. En cambio, en la ROM 02 90, el temporal de referencia es el que tiene un periodo de retorno de 300 años.

Cuando se dan relaciones paramétricas relativas a la ola de cálculo es imprescindible saber cuál es el periodo de retorno del temporal de referencia, ya que la altura de ola de un temporal con $T_r=50$ años es muy diferente a otro con $T_r=300$ años.

En España, como hemos visto anteriormente, la gran mayoría de diques están diseñados en función del temporal de $T_r=300$ años y para poder aprovechar de forma directa la experiencia relativa a obras existentes se ha decidido parametrizar todas las relaciones con la altura de ola $H_{1/3}$ de dicho temporal identificada como altura de ola de cálculo.

En función de las características geométricas de diques construidos, recogidas en la tabla 5, de su comportamiento real y de otras consideraciones teóricas se pueden sacar una serie de conclusiones relativas a los elementos integrantes de diques verticales ubicados en grandes profundidades (el fondo natural no interfiere de forma relevante con el oleaje) y considerando que las características geotécnicas del terreno natural no son determinantes.

Banqueta de asiento del dique. Su función es servir de apoyo del dique y transmitir las cargas al terreno natural. El espesor mínimo debe ser de 1,50 m.

Berma lado mar del manto de protección de la banqueta. Su función es asegurar la estabilidad hidráulica y geotécnica de la banqueta. El peso de los elementos integrantes y su geometría están condicionados por la altura de ola y por la estabilidad geotécnica de la propia banqueta o posible socavación del suelo natural. Una anchura excesiva puede inducir presiones impulsivas. Es recomendable para evitar presiones impulsivas, coronarla por debajo de $2H_{1/3}$ referida a la BMVE. En general debe ser suficiente una anchura comprendida en un rango entre 5 y 10 m.

Berma lado puerto de la banqueta. Su función es asegurar la estabilidad geotécnica de la banqueta. Puede requerir manto de protección o no en función de los rebases existentes u otros condicionantes. En general su anchura debería estar alrededor de los 5 m. Si se quiere conseguir mayor seguridad al hundimiento es mucho más eficaz aumentar la anchura del dique antes que aumentar la berma.

Taludes de la banqueta de asiento. Su función es asegurar la estabilidad de la banqueta. Los taludes se mueven en el rango 2H:1V a 3H:2V, el primero es más normal en el lado mar y el segundo en el lado puerto.

Cota de coronación del espaldón. Su función es controlar los rebases. En los diques españoles la relación coronación/H se mueve en el rango 0,9 a 1,5 $H_{1/3}$, estando referidas las cotas a la PMVE. La experiencia, con estas cotas de coronación, es que los diques son poco o nada rebasables.



CARACTERÍSTICAS MÁS RELEVANTES DE LOS DIQUES	Diques Ref 1			Diques Ref 2			Diques Ref 3		
	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX
Máxima profundidad del fondo marino en que se ha construido un dique (m)			48			63			35.00
Cota de cimentación del dique referida a la BMVE (m)	9	11.53	18	11	17.62	32,5	16.5	22.5	26.00
Cota de cimentación del dique referida a la BMVE relativa a la altura de ola de cálculo	1,77	2,37	3,91	1,57	3.09	6,77	2.59	3.76	5.25
Cota de la berma lado mar referida a la BMVE relativa a la altura de ola de cálculo	1.30	2.05	3.47	1,27	2,75	6,15	2.41	3.47	4.85
Cota del espaldón referida a la PMVE relativa a la altura de la ola de cálculo.	1,15	1,33	1,6	0,87	1.41	2,03	1.02	1.22	1.33
Anchura del dique relativa a la altura de ola de cálculo.	1.80	2,13	3,91	2,29	3,18	4,46	2.93	3.48	4.24
Longitud de la berma lado mar (m)	5	6,79	11,2	3,13	8.1	17	6.55	9.11	12.30
Longitud de la berma lado puerto(m)	1	4,85	14,7	3,8	10.82	31	9.40	10.13	11.00

Tabla 5. Cuadro comparativo de las características más relevantes de los diques.

En las referencias 2 y 3 la altura de ola cálculo considerada como referencia es la altura de ola $H_{1/3}$ de un temporal con periodo de retorno de 300 años.

Anchura del dique relativa a la altura de ola de cálculo: Esta relación no depende únicamente de la altura de ola, también está determinada de forma directa por el periodo y por la altura del dique. También puede estar determinada por las dimensiones geométricas y profundidad de la banqueta de cimentación y la naturaleza, profundidad y pendiente del fondo natural en el lugar de ubicación del dique. Por tanto los valores que figuran en el cuadro deben interpretarse como orientativos.

Cota del espaldón referida a la PMVE relativa a la altura de la ola de cálculo: Debe interpretarse como una forma indirecta y aproximada de medir la rebasabilidad del dique. Para las relaciones indicadas en ref 1 y ref 2 la experiencia demuestra que el dique es poco o nada rebasable.

Anchura del fuste de los cajones. Viene determinada por las condiciones de estabilidad del dique. Su función también consiste en proporcionar un área de operación en coronación. En la Ref 2 la relación anchura de dique (descontando zapatas si las tiene)/ $H_{1/3}$ puede considerarse que se mueve en un rango comprendido entre 2.68 a $3,68H_{1/3}$. En los diques comprendidos en la Ref 1 este rango puede considerarse comprendido entre 1.90 y $3.26 H_{\text{cálculo}}$ pero como se dijo en el punto 4.1, no se sabe muy bien que altura de ola ni con que temporal se corresponden las alturas de ola de cálculo. Sería conveniente determinar el temporal de 300 años para homogeneizar resultados.



6. CONCLUSIONES

La mayoría de las conclusiones que se enumeran a continuación tienen un carácter general pero otras son específicas de diques cimentados en grandes profundidades, como corresponde al ejemplo desarrollado, de tal forma que ni el fondo natural ni la banqueta sobre la que se apoya el dique interfieren con el oleaje. La elección de este caso particular se ha hecho por dos motivos: Por una parte es la situación más habitual en los diques construidos y probablemente en los diques que se construirán en el futuro y por otra parte se facilita el análisis del comportamiento del dique frente al oleaje.

Cálculo determinista según ROM 02 90 y ROM 05 94.

En el cálculo determinista el periodo de retorno del temporal de cálculo debe fijarse a priori. De acuerdo con la ROM 02 90 el periodo de retorno, y consecuentemente la altura de ola, se fija, para un régimen de temporales dado, en función del nivel de excedencia de una altura (0.15) y una vida previsible de las obras de 50 años. Este procedimiento para fijar el periodo de retorno que aparentemente parece relacionarse con la seguridad de la obra, es tan arbitrario como puede serlo otro cualquiera, ya que no hay un criterio para decir si el nivel de excedencia considerado es mucho o poco y, la cuestión fundamental, en caso de excedencia de la ola no se dice por cuánto se excede, con lo que no puede establecerse si la seguridad del dique se verá comprometida. Sin embargo, aceptado el periodo de retorno de 300 años del temporal de cálculo, los coeficientes de seguridad asociados expuestos en la ROM 05 94 son altos, dando lugar a diseños conservadores.

Cálculo probabilista según ROM 00 y ROM 05 05.

La superioridad teórica del planteamiento probabilista sobre el determinista es indiscutible ya que pueden particularizarse las incertidumbres que intervienen en el diseño. Sin embargo existen ciertas ambigüedades. La primera se refiere a la probabilidad de fallo admisible: En La ROM 00 y PROVERBS se fija en 0,1 y en RSDMS, al menos para el deslizamiento, se fija en 0,01, es decir 10 veces inferior. En la ROM 05 05, método estándar, aunque no se dice de forma explícita cual es la probabilidad de fallo admisible, si se indica que la probabilidad para todos los modos de fallo, si se aplican los coeficientes de seguridad recogidos en las tablas respectivas, es también de 0,01. En el Nivel III además se tropieza con la dificultad de determinar las funciones de distribución de las distintas variables y con el Nivel II existe ambigüedad en fijar la razón característica y el coeficiente de variación de las variables. Por tanto la aplicación de los niveles II y III tiene su dificultad intrínseca. Por otra parte el imponer un cálculo probabilista en función del



IRE e ISA de la obra parece arbitrario. Si un problema puede resolverse satisfactoriamente de forma sencilla no hay por qué complicar el procedimiento de diseño. Por tanto parece prudente reservar la aplicación de los Niveles II y III para determinar los coeficientes parciales del Nivel I que debe ser el procedimiento habitual en la práctica diaria. La aplicación del Nivel III a los diseños hechos con Nivel I, de acuerdo con la ROM 05 05, demuestra que el procedimiento es seguro, con probabilidades de fallo del orden de 10^{-2} y que el modo de fallo determinante es el hundimiento.

Investigación del comportamiento de obras realizadas.

Los modos de fallo determinantes en un dique cimentado en grandes profundidades son, por orden de mayor a menor probabilidad de fallo: Hundimiento, vuelco y deslizamiento. Esto se cumple aunque la cota de coronación del dique sea baja y resulte muy rebasable. La comprobación de vuelco se refiere a vuelco rígido que aunque no tenga un significado físico siempre es un indicador fácil de calcular. En el ejemplo desarrollado en cálculo determinista puede comprobarse que tanto con la ROM 05 94 como con RSDMS la mayor anchura de dique necesaria se obtiene para hundimiento, a continuación para vuelco y la menor para deslizamiento.

En un estudio realizado en Japón (Yoshioka i Nagao) en 76 diques (38 reflejantes y 38 con protección de bloques) se llega a la conclusión que el modo de fallo dominante es el deslizamiento lo que, en un principio y partiendo del hecho de que se desconoce cómo estaban cimentados estos diques, parece que puede entrar en contradicción con la conclusión del punto anterior.

Una posible respuesta a esta aparente contradicción puede consistir en la manifestación del modo de fallo y que resulte mucho más evidente el fallo de un dique cuando desliza que cuando se hunde. A este respecto puede considerarse que una obra no ha fallado en tanto en cuanto no necesite una reparación importante para seguir prestando el servicio para la que fue diseñada, es decir entramos en el diseño del dique en función de su funcionalidad, donde se admiten deformaciones siempre que resulten compatibles con la funcionalidad de la obra.

Una forma de aquilatar los coeficientes parciales en España puede consistir en investigar el comportamiento de los diques construidos y las sollicitaciones de los temporales habidos desde su construcción, en particular en aquellos diques que llevan muchos años en servicio. La probabilidad de fallo no podemos investigarla ya que, afortunadamente, no se ha roto ningún dique, pero sí que sollicitaciones han resistido sin producirse movimientos excesivos.



IDENTIFICACIÓN DE DAÑO Y PUNTOS CRÍTICOS EN DIQUES DE ABRIGO CON TECNOLOGÍAS LASER. APLICACIÓN EN EL MANTENIMIENTO Y PROLONGACIÓN DE LA VIDA ÚTIL



**E. Maciñeira^{1y2}, E. Peña², J. Sande², F. Costa²,
H. González³, I. Puente³**

RESUMEN

Las estrategias de mantenimiento y prolongación de la vida útil de las estructuras portuarias son elementos necesarios dado el decisivo papel económico y social de los puertos. El presente trabajo realizado por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA) de la Universidade da Coruña, y el Grupo de Investigación en Geotecnologías Aplicadas (GEOTECH) de la Universidade de Vigo, desarrolla una nueva metodología que permite definir estrategias de monitorización y mantenimiento de los diques en talud.

Este nuevo método es capaz de analizar el dique en su conjunto y realizar un análisis volumétrico del daño, permitiendo definir diferentes tipos de fenómenos, como son: asentamientos, evolución de la porosidad del manto y número de piezas caídas. Los resultados se muestran a través del 'centroide de daño', que recoge la información integrada de la frecuencia e intensidad de los desplazamientos cercanos, permitiendo definir de manera precisa estrategias de mantenimiento para las estructuras portuarias.

¹ Autoridad Portuaria de A Coruña.

² Universidade da Coruña.

³ Universidade de Vigo.



INTRODUCCIÓN

Los diques de abrigo están solicitados por el oleaje a lo largo de su vida útil ocasionándoles diferentes daños acumulativos. Esta situación hace que en la actualidad una de las principales preocupaciones sea el mantenimiento de las dársenas portuarias ya construidas, de manera que se puedan mantener e incluso ampliar las actividades en su interior.

El diseño de la sección resistente de los mismos se suele hacer mediante la aplicación inicial de alguna de las formulaciones existentes en el estado del arte y, posteriormente, su verificación en laboratorio. Los inputs iniciales de dichas formulaciones, y su comprobación en laboratorio, suelen ser diferentes estados de mar (Hs, Tp, oblicuidad y nivel de mar) asociados a sus respectivas probabilidades de presentación en la vida útil, para los cuales se comprueban los criterios de daño establecidos en proyecto (ELU, ELS, ELO).

Sin embargo, el daño acumulativo producido por la sucesión de distintos estados de mar en el tiempo, no suele ser tenido en cuenta.

Este hecho, que no es tan relevante en el caso de estructuras monolíticas y diques verticales en que el colapso de la estructura se produce para la superación de un determinado umbral de sollicitación, es esencial en el caso de estructuras en talud, en las que el daño se va produciendo de forma paulatina por la acción de distintos estados de mar.

Por ello, el conocimiento del daño realmente existente en las estructuras en un momento dado, y por tanto la capacidad resistente remanente, es fundamental para garantizar la integridad de las estructuras y minimizar el riesgo de las mismas.

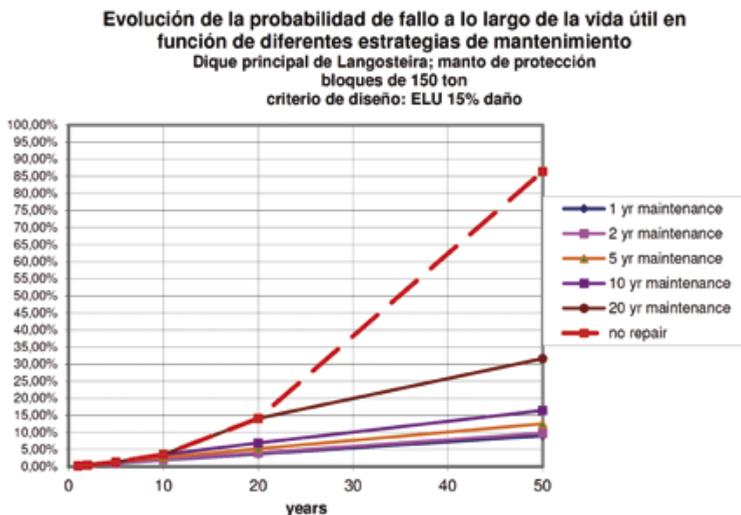


Figura 1. Probabilidad de fallo del dique de Langosteira en función de diferentes estrategias de mantenimiento.



Las metodologías actuales de auscultación de puertos son capaces de definir la geometría real de los diques, determinando el daño a través del movimiento de bloques y del número de piezas caídas. Estos métodos no son capaces de analizar todos los posibles daños o el inicio de los mismos, ni medir detalladamente las zonas donde se van produciendo a lo largo de la vida útil. La siguiente Figura 1 muestra dos ejemplos actuales de estas técnicas, restitución fotogramétrica y las sondas multi-haz.

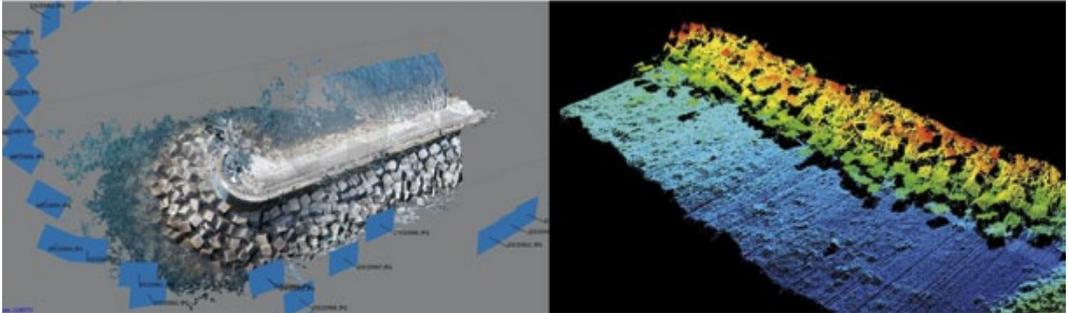


Figura 2. Ejemplo de restitución fotogramétrica (izquierda) y de sonda multi-haz (derecha).
(Fuente: <http://www.hidrografiaparatodos.es/>).

Por otro lado, la creación de nuevas piezas de protección para los diques de abrigo busca optimizar el funcionamiento frente al clásico bloque. Algunas de estas piezas pueden incluso mejorar su funcionamiento a través de un manto monocapa. Este tipo de estructuras tienen un comportamiento más rígido que la protección bicapa, por lo que no solo importa la caída de bloques en una sección, sino medir y analizar los posibles asentamientos producidos, así como la evolución de la porosidad o el coeficiente de capa que tiene el talud después de un temporal.

Por lo tanto conocer la situación real y el estado de las estructuras en cuanto a su reserva de estabilidad, genera la necesidad de desarrollar estrategias de mantenimiento que permitan realizar obras de actuación precisas y efectivas que aumenten la vida útil de estas estructuras.

La metodología desarrollada por el GEAMA y GEOTECH utiliza una técnica que analiza el daño de las estructuras de abrigo usando un escáner LiDAR en 3D, utilizado en otro tipo de obras con excelentes resultados. A partir de este escáner es posible realizar un innovador postprocesado de la información permitiendo medir y precisar la zona de daño y el movimiento conjunto de los bloques del dique, permitiendo el análisis de incremento de porosidad o el asentamiento de las piezas.

INSTALACIONES

El estudio de viabilidad de la tecnología en estructuras portuarias se ha realizado en primer lugar aplicando su funcionamiento en modelo físico, como paso previo a su aplicación en el Puerto Exterior de Punta Langosteira (A Coruña).

Los ensayos se realizaron en la Dársena de Oleaje del Centro de Investigación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC) de la Universidad de A Coruña. Esta Dársena cuenta con unas dimensiones de 33x32x1.1 metros utilizando para estos ensayos 16m de anchura para ajustarse a la escala utilizada. La dársena permite realizar ensayos 2D y 3D, de manera que se puede ajustar a las diferentes condiciones que se quieran analizar.

Se utilizaron cuatro palas generadoras de oleaje y se dispusieron playas disipativas en los bordes de la dársena a fin de evitar reflexiones en el interior del modelo que pudieran afectar a los resultados obtenidos. La batimetría del fondo permite generar olas más altas y el peralte del oleaje. La siguiente figura muestra la dársena utilizada, la batimetría y la colocación del modelo, y la posición del escáner utilizado.

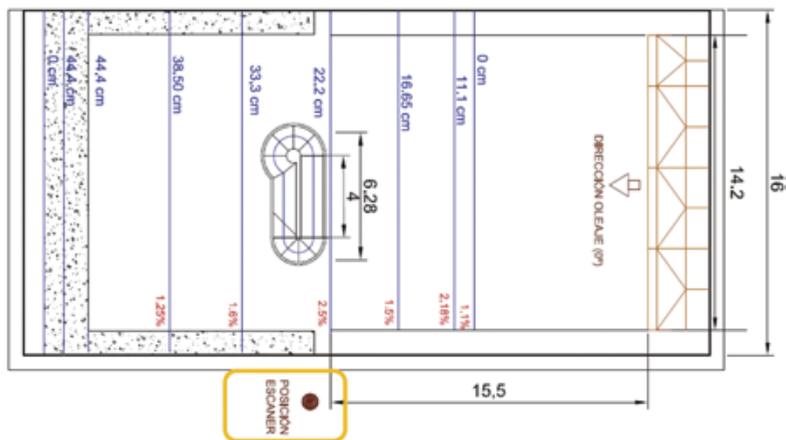


Figura 3. Esquema de la dársena y del modelo físico.

El modelo usado para realizar el estudio es un dique en talud formado por un tronco y dos morros de radios distintos (Figura 2), con un manto de protección formado por cubípodos monocapa. La pendiente del talud es $H/V=1.5$ y la escala de trabajo ha sido de $1/50$, que se correspondería con una profundidad de 17.5m.

Para evaluar el funcionamiento de la técnica se ha analizado el daño producido en uno de los morros del modelo (radio a nivel del mar $R[m]=23.5$), sometido a un oleaje creciente hasta producir la rotura del morro. Las alturas de ola ensayadas comprenden desde $H_s[m]=4$ aumentando la altura 0.5m hasta rotura. La siguiente Figura 3 muestra la sección del morro que se ha utilizado en el análisis de la viabilidad de la metodología.

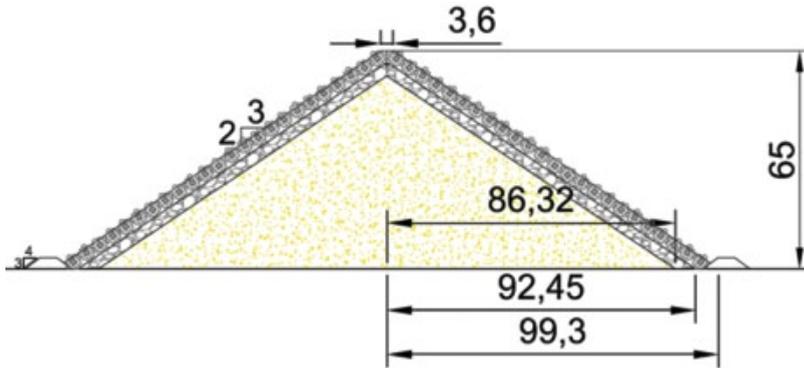


Figura 4. Sección del morro utilizado en la validación. Cotas en cm.

El sistema de escaneo fue configurado para restituir la superficie del morro con gran calidad en 3D, en un periodo corto de tiempo. Esto genera la posibilidad de analizar el daño en cada altura de ola H_s ensayada en el laboratorio con la finalidad de analizar la evolución del daño en el morro. De esta manera se obtuvo con precisión los movimientos, puntos críticos y el daño progresivo con cada incremento de altura de ola. La realización del ensayo en el laboratorio permite así comparar el método tradicional de conteo de piezas caídas con la información obtenida del escaneo y el posterior postproceso.

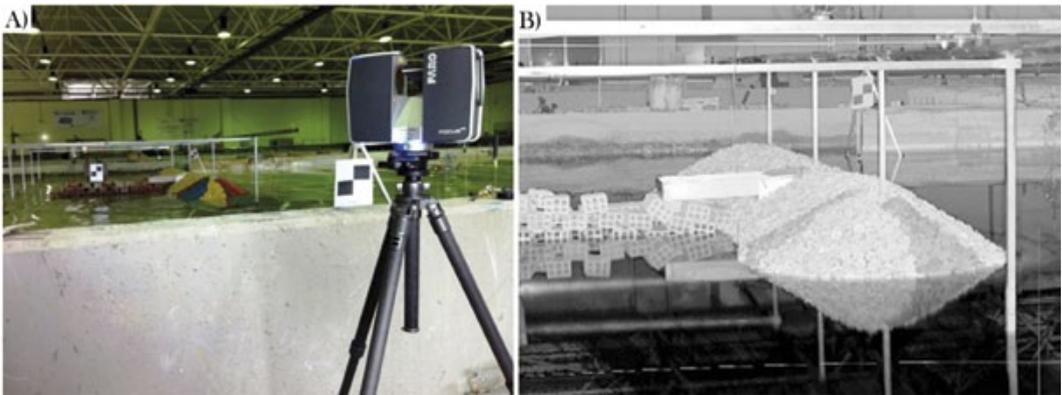


Figura 5. A) Escáner utilizado, B) Resultado de un escaneo .

ANÁLISIS DEL DAÑO

Los resultados obtenidos con el escaneo 3D con tecnología LiDAR y el código de postproceso para analizar el daño han sido aplicados para este trabajo en la superficie emergida del dique. Para el análisis de la parte sumergida, el algoritmo de postproceso es fácilmente modificable.

La forma de analizar el daño ha sido a través de un algoritmo capaz de analizar los desplazamientos en los ejes X, Y, Z. Dada la estructura que tenemos en el modelo se fijan las coordenadas X, Y, y se miden los desplazamientos producidos en el eje Z. De esta manera se puede obtener una imagen en 2D los desplazamientos producidos a través de una escala de colores. La siguiente fotografía muestra un ejemplo del estado del modelo y de los datos procesados.

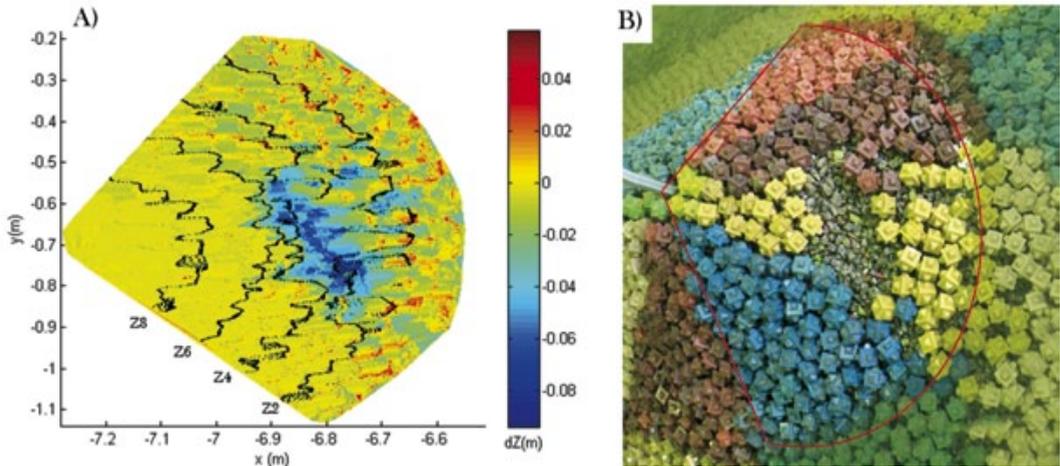


Figura 6. A) Resultado del procesado B) Daño real del modelo.

Con esta metodología se pueden analizar los movimientos producidos en los tres ejes, lo que permite analizar el área dañada. Una vez determinada dicha área es posible conocer el volumen de daño a través de los movimientos producidos en el eje Z.

Además con esta metodología se ha podido analizar la evolución de la porosidad en el manto de protección del morro.

$$p = 1 - \frac{n \cdot S_n}{S_t}$$

Donde:

p=porosidad

n= número de piezas

Sn= área nominal de la pieza

St= área del daño

Siguiendo este procedimiento para cada escalón de altura de ola somos capaces de analizar cuál es la porosidad para cada altura de ola o wave step Hs y medir el daño.



RESULTADOS

El análisis de daño se ha centrado en los sectores típicos de rotura del morro (90° y 135° desde la dirección de incidencia del oleaje). La siguiente Figura 7 muestra una fotografía del morro analizado con el escáner y los sectores de rotura.

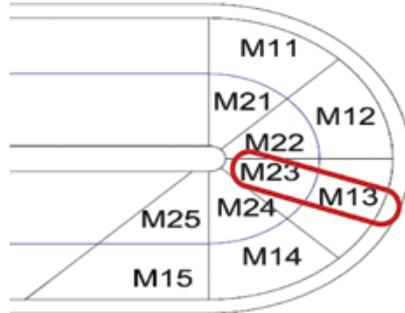


Figura 7. Esquema del modelo físico y sectores del morro analizados.

El ensayo realizado obtuvo los siguientes resultados analizados a la manera tradicional, a través del conteo de piezas caídas (Figura 8).

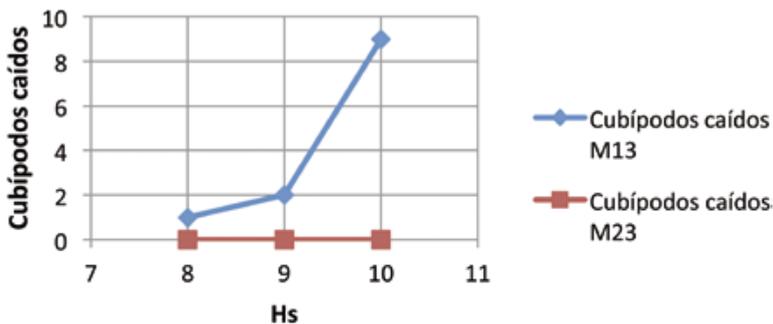


Figura 8. Piezas caídas en los sectores durante el ensayo realizado.

En la parte izquierda de la siguiente gráfica (Figura 9) se ha representado el daño obtenido desde la altura de ola de inicio de daño (wave step 3, $H_s[m]=4.0$), hasta la altura de ola mayor (wave step 7, altura de rotura $H_s[m]=5.5$).

Puede apreciarse de forma clara que, en los primeros instantes, hay ciertos movimientos de las capas inferiores (amarillo, azul oscuro), correspondientes aproximadamente a la elevación del nivel medio del mar. A medida que aumenta la altura de ola, las piezas ubicadas más arriba se deslizan o giran para rellenar los huecos habilitados en la parte inferior, de forma que las zonas superiores presentan ahora los agujeros más importantes (blanco, azul claro). Con la última altura de ola se identifica el fallo del morro, al producirse una caída importante de elementos de protección (zona roja).

En la parte derecha de la imagen se ha representado la salida de resultados de daño a través del denominado 'centroide de daño', que recoge la información integrada de la frecuencia e intensidad de los desplazamientos cercanos. El color indica la altura de ola de dicho daño, y su diámetro la intensidad del mismo. Como puede observarse, los centroides se ubican en las zonas previamente analizadas. Uno de los aspectos más importantes de la técnica es su trabajo de postproceso, y por tanto la capacidad para determinar puntos críticos de daño de la estructura portuaria.

De forma resumida, en la parte izquierda se valida la metodología, incidiendo en el hecho de que se monitoriza con detalle los movimientos de piezas en el morro. En la parte derecha se representan los puntos sensibles, que representan las zonas en las que debería focalizar un potencial trabajo de mantenimiento, para evitar futuros deslizamientos o daños en el talud.

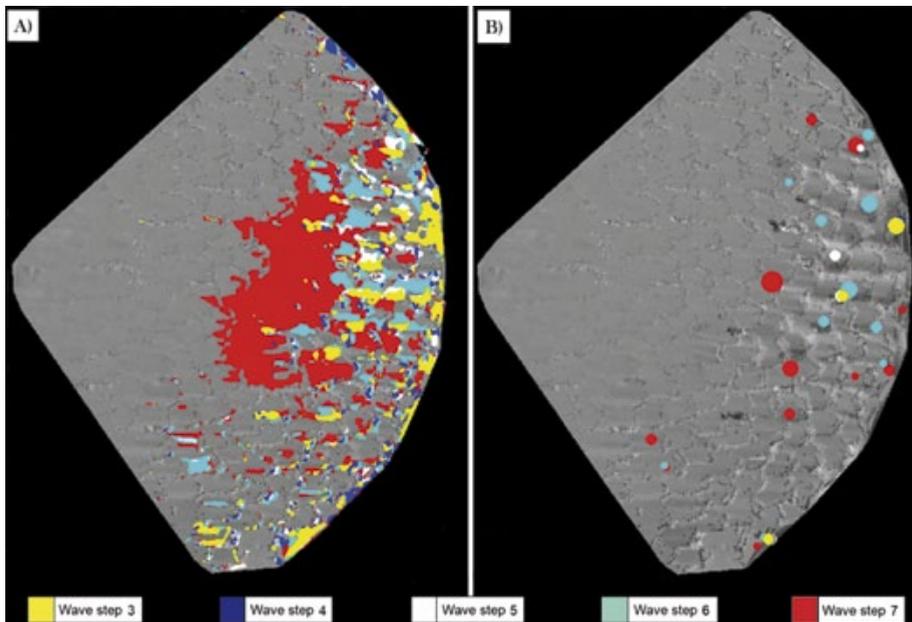


Figura 9. (A) Progresión del daño en el morro del dique y (B) Localización de los centroides de daño (puntos críticos), con alturas de ola crecientes 3-7.

La siguiente Tabla 1 muestra el detalle obtenido en la medición del daño con cada altura de ola.



	Área de daño (m ²)	Área del morro (m ²)	Volumen de daño (m ³)	Área de daño (%)
Wave step 3	0.020	0.435	9.1 * 10 ⁻⁴	4.61
Wave step 4	0.019	0.437	9.7 * 10 ⁻⁴	4.38
Wave step 5	0.024	0.438	0.0011	5.52
Wave step 6	0.038	0.438	0.0014	8.68
Wave step 7	0.096	0.439	0.0036	21.90

Tabla 1. Evolución temporal del daño.

CONCLUSIONES

La sucesión de distintos estados de mar provoca una acumulación de daño en las estructuras en talud que las va haciendo más frágiles con el tiempo. La integración en el proceso de diseño del cálculo del daño acumulativo sufrido por la estructura, y de la definición de la estrategia de mantenimiento, permiten minimizar el coste integral de la obra a lo largo de la vida útil.

El conocimiento del daño acumulado en el tiempo de las estructuras permite estimar su capacidad resistente remanente y su probabilidad de fallo "ajustada" y, consecuentemente, redefinir la estrategia de mantenimiento inicialmente planificada para cumplir con los criterios de diseño establecidos.

El presente trabajo muestra una metodología de escaneo y postproceso de movimiento de piezas en diques en talud. Los resultados muestran que esta técnica se ha aplicado satisfactoriamente en ensayos en modelo físico en estructuras portuarias, permitiendo definir la evolución del daño, la reserva de estabilidad existente, y los puntos críticos de actuación de una forma rápida y directa.

Se propone la utilización del 'centroide de daño', o punto que engloba la información de movimientos de piezas e intensidad del mismo. Con su aplicación se pueden tomar decisiones en el mantenimiento y en la prolongación de la vida útil de la estructura con mayor precisión, especialmente en el coste y en la estrategia de intervención a realizar.

Actualmente se está trabajando en el estudio de aplicabilidad de la tecnología en campo en el dique de abrigo del Puerto Exterior de Punta Langosteira (A Coruña), así como en el análisis conjunto de remonte y rebase aplicando un modelo numérico basado en la técnica SPH (Smoothed-Particle Hydrodynamics). Esta metodología combinada permitirá determinar el estado real de la estructura integrando los conceptos de estabilidad e interacción ola-estructura, así como definir la estrategia de mantenimiento adecuada a la situación real minimizando el coste global de la estructura en su vida útil.



NUEVOS MATERIALES EN LA CONSTRUCCIÓN DE CAJONES PARA OBRAS MARÍTIMAS



Salvador Capella Hierro¹

INTRODUCCIÓN

El desarrollo del diseño y construcción de cajones con materiales compuestos para obras marítimas, ha sido objeto de una profunda investigación que ha supuesto aglutinar los conocimientos portuarios junto con los de materiales compuestos, de cuyo conocimiento y ejecución España es referente mundial.

El nicho de mercado que cubre esta solución aportada por Acciona en su oferta para la obra "Ampliación de Pilas de Amarre en el Muelle de Cruceros de Puerto del Rosario, se detecta a partir de diferentes análisis de desarrollo de negocio dentro de la ingeniería civil, con el objeto de aportar ideas innovadoras que diferencien el producto y permitan abrir un nuevo mercado con expectativas reales de demanda.

El concepto se desarrolla en el ámbito de I+D con las dificultades inherentes de crear un producto que rompe con la tecnología actual y se enfrenta a los retos de todo tipo que implica una solución tan innovadora.

La oportunidad, y a la vez el reto, de construir el modelo a escala natural, ha sido propiciado por la Autoridad Portuaria de Las Palmas que realiza la ampliación del muelle de cruceros de Puerto del Rosario (Fuerteventura), con el objeto de que puedan acceder buques sin limitación de eslora, mediante dos puntos de amarre que se diseñan con los cajones en composite que se describen a continuación.

¹ Autoridad Portuaria de Las Palmas



ANÁLISIS DE MERCADO

Los estudios de mercado relacionados con el tráfico de cruceros como es el caso que nos ocupa pero también con el transporte de mercancías mundial indican el gran incremento de actividad que se está produciendo en el tráfico marítimo, reflejando una demanda creciente tanto en el número de barcos de cruceros como en el número de contenedores, lo que supone en la actualidad, que más del 80% del comercio internacional de mercancías se transporte por mar.

Este incremento de la actividad determina que el desarrollo portuario pase por acondicionar las infraestructuras portuarias para dar servicio a buques de mayor tamaño con mayor capacidad tanto de pasajeros como de carga.

En este ámbito de expansión de la demanda portuaria, tienen cabida soluciones singulares que, aparte de las soluciones tradicionales de hormigón ofrecidas por los grandes cajoneros, ocupen el nicho de mercado existente para obras portuarias más singulares, tanto de ampliación como de nueva creación, que no precisen de grandes medios y resuelvan estas obras de manera más sencilla.

SITUACIÓN ACTUAL DE LA TÉCNICA

Frente a la perspectiva de un incremento tan importante del mercado de la obra marítima, las empresas constructoras que abordan este tipo de obra se encuentran con la siguiente problemática:



- Dependencia de Cajoneros para la realización de diques verticales con cajones en condiciones competitivas de mercado.
- Supeditación de las Obras Marítimas a ejecutar/ofertar en base a la disponibilidad de Cajoneros.
- Necesidad de fuerte inversión para la compra de Cajoneros en un entorno económico financiero con restricción de crédito para empresas

Por consiguiente, el reto supone la búsqueda de una solución que proporcione una alternativa, para este tipo de obra, a la fabricación de cajones flotantes mediante cajoneros y que, a poder ser, sea independiente de materiales y procesos convencionales, de manera que se facilite su puesta en obra, y presente ventajas medioambientales en su proceso.

SOLUCIÓN PROPUESTA

La Autoridad Portuaria de Las Palmas adjudicó el 22 de noviembre de 2013 mediante concurso la obra "Ampliación de pilas de amarre en el Muelle de Cruceros de Puerto del Rosario" y financiada con *Fondos Europeos para el desarrollo de las Regiones Ultraperiféricas (R.U.P.)* a la oferta variante presentada por ACCIONA que desarrolla una solución constructiva innovadora mediante cajones de materiales compuestos, que cobra especial relevancia en el nicho de mercado planteado, permitiendo la realización sostenible de estas infraestructuras con ventajas logísticas y constructivas frente a las soluciones convencionales realizadas hasta el momento.



La solución adjudicada, basada en la utilización de cajones de composite, un material compuesto de fibra de vidrio combinado con resinas poliméricas, es disruptiva frente a las de cajones convencionales fabricados en hormigón, siendo una primicia mundial.

Esta solución ha sido reconocida con el *Premio Europeo de Medio Ambiente a la Empresa*, en su sección española, dentro de la categoría de Producto y/o servicio para el desarrollo sostenible, con fecha 5 de junio de 2014. Premio convocado por la Dirección General de Medio Ambiente de la Comisión Europea y coordinado en España por la Fundación Biodiversidad.



ESTADO DEL ARTE

En las últimas dos décadas se ha incrementado en España el uso de polímeros reforzados con fibras (FRP) en la construcción de infraestructuras civiles. La construcción de puentes utilizando compuestos de fibra de carbono (CFRP) se realiza en Asturias con 10 m de luz en el año 2004 y, en la carretera M-111 (Madrid) puentes gemelos con dos vanos de 14 m en el año 2007 (Madrid). También los composites CFRP se han utilizado para construir pasarelas peatonales como la pasarela de Cuenca con 217 m de largo y 70 m de luz con 25 cm espesor de losa de hormigón mediante la tipología de banda tesa. También los materiales compuestos de FRP se vienen utilizando para el refuerzo de estructuras dañadas como pilares de puente, o como una alternativa a la armadura de acero en hormigón armado utilizando GFRP.

Hay pocas experiencias en el uso de materiales GFRP en construcciones de ingeniería civil marítima. Las referencias se encuentran sólo para algunas aplicaciones de materiales compuestos para la protección de las orillas del mar y de estructuras contra el impacto de las olas en el ferrocarril Tuapse-Adler en la costa rusa del Mar Negro.

Hay algunas experiencias de construcción de pilas compuestas para amarrar barcos, al igual que 190 pilotes de GFRP de 14,3 m de longitud y 30,5 cm de diámetro, clavadas en el oeste de la Bahía de San Francisco. Otra aplicación son las tablestacas reforzadas de composite para construir muros de contención en el mar, como la construcción de 141 m en el malecón de Martínez Marina en Canadá o en la construcción de 421 m de protección en la costa de Keyport en Nueva Jersey, USA.

No existen experiencias conocidas en la utilización de materiales compuestos para la construcción de cajones flotantes en obras marítimas.

MATERIALES EMPLEADOS

Se lleva apostando desde hace más de 20 años por el uso de los materiales compuestos dentro del mundo de la ingeniería civil. Estos materiales tienen una alta durabilidad y se comportan de manera muy eficiente en ambientes agresivos como puede ser el ambiente marino.

En la tabla comparativa adjunta se pueden observar las principales características de los materiales tradicionales, como el hormigón y el acero, frente a las de los composites (vidrio/poliéster) bidireccional.



Comparativa de Propiedades de Materiales Tradicionales y Materiales Compuestos

Propiedades			HORMIGÓN	ACERO	COMPOSITE (Vidrio/Poliéster) Bidireccional
Densidad (Kg/m ³)			2.350	7.800	2.020
Resistencia	Longitudinal (MPa)	Trac.	1-5	200-600	400
		Comp.	15-50	200-600	300
	Transversal (MPa)	Trac.	1-5	200-600	400
		Comp.	15-50	200-600	300
	Cortante (MPa)			2-5	200-600
Módulo de Elasticidad	Longitudinal (GPa)		20-50	205	25
	Transversal (GPa)		20-50	205	25
	Cortante (GPa)		8-21	80	3,3
	Coef. de Poisson		0,2	0,3	0,126

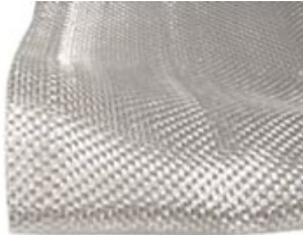
Los materiales utilizados para el desarrollo de esta solución son los conocidos como materiales compuestos. En este caso se ha empleado una combinación de fibra de vidrio con resina epoxy (Glass Fiber Reinforced Polymer - GFRP).

Las ventajas de los materiales compuestos o composites, de aplicación para este caso, son:

- Altas prestaciones.
- Peso reducido.
- Facilidad de puesta en obra y medios logísticos. Menor ocupación de superficie portuaria para su construcción.
- Carácter inalterable e impermeable.
- No necesitan mantenimiento al no sufrir oxidación, corrosión ni degradación, permitiendo alargar su ciclo de vida.
- Eficiencia energética en su ciclo de vida mayor que los materiales empleados habitualmente.
- Son más sostenibles con el medio ambiente.
- Disminución de emisiones debidas al proceso de construcción y generación de menos subproductos tóxicos.



La fibra de vidrio presenta las siguientes ventajas: resistencia mecánica, incombustibilidad, estabilidad dimensional, imputrescibilidad (es insensible a la acción de los roedores y de los insectos), incombustible (no propaga la llama ni origina con el calor humos ni toxicidad), es aislante eléctrico incluso en pequeños espesores, tiene buena permeabilidad dieléctrica, permeable a las ondas electromagnéticas, débil conductividad térmica.



Respecto a la matriz se utiliza la epoxi, al considerarla más idónea para este tipo de infraestructura marina, cuya principal función es mantener embebidas a todas las fibras que forman el compuesto y transmitir los esfuerzos entre ellas.

FABRICACIÓN

En este caso el proceso de fabricación utilizado es mediante infusión, proceso que se asemeja al RTM (Resin Transfer Molding), con las modificaciones propias de la envergadura de las piezas a fabricar y la tecnología disponible, utilizando moldes que pueden ser capaces de dar presión y temperatura al proceso. El molde aporta una alta calidad de acabado, tanto a la parte inferior de la pieza como a la exterior.



En el proceso de fabricación, primero se colocan las telas sin impregnar en el molde, a continuación se coloca el núcleo de la pieza para posteriormente disponer las capas de fibra. Una vez realizado este proceso se inyecta la resina por vacío y se le proporciona temperatura.

Una vez que las piezas permanecen el tiempo de curado dentro del molde, se extraen las piezas con el acabado definitivo.

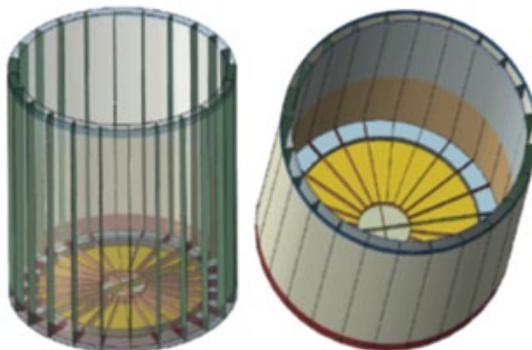


DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN

Con el fin de utilizar las excelentes propiedades que posee a tracción el material GFRP, los cajones se diseñaron con forma cilíndrica al ser las tensiones circunferenciales los esfuerzos más importantes en el diseño, teniendo unas dimensiones de 13,30 m de altura y un diámetro de 12 m.

Los cajones están formados por una base circular hecha con GFRP, que lleva ensambladas y unidas mediante adhesivo las diferentes piezas que conforman la base circular. En esta base se sitúan rigidizadores que van dispuestos de forma radial a la misma. En vertical se dispone de 12 módulos de 3 m de ancho, con dos pieles separadas 0,5 m con el fin de evitar el pandeo, que se montan de forma sucesiva hasta conformar la pared exterior del cajón. Estos módulos verticales van atornillados y adhesivados entre sí para soportar las tensiones en las uniones.

Para soportar las cargas debidas a la defensa y tiro de bolardo, en la parte superior del cilindro de GFRP, se diseñó una losa de hormigón armado de 1,80 m de espesor que distribuye las cargas en el cilindro GFRP. La losa no se consideró apoyada en el interior del cilindro GFRP, sino que se consideró apoyada en las paredes de los cajones de PRFV. Como losa de hormigón su peso propio proporciona estabilidad y es una importante carga de compresión en el cilindro GFRP.



Vista general de los cajones de GFRP para el Puerto del Rosario (Fuerteventura, España).



El sistema de montaje se realiza con una grúa ligera tal como se puede observar en las siguientes imágenes:



Zona habilitada para la construcción.



Procedimiento de Montaje.



Cuando el cajón está ensamblado, al ser de materiales compuestos, la estructura es ligera (aprox. 60t) por lo que la botadura se puede realizar mediante el uso de una grúa.



Botadura.



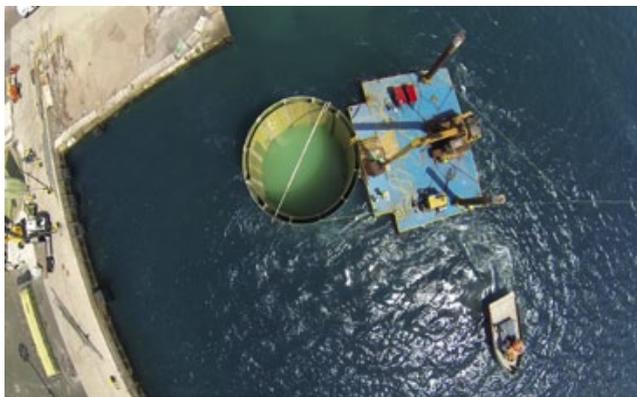
Tras la botadura, se hormigona una losa en su interior de 50 cm, a modo de contrapeso, para mejorar su estabilidad en el transporte.



Hormigonado Losa interior de fondo.



Una vez realizado esta operación, el cajón se remolca a su posición definitiva, donde se fondea y posteriormente se rellena con material granular a modo de lastre.



Remolque y Fondeo.



Los trabajos se finalizan con la ejecución de la losa de superestructura sobre el relleno granular y la colocación de un bolardo y la defensa correspondiente. En el caso del Puerto del Rosario, al ser dos los duques de alba que se construyen, se disponen dos pasarelas peatonales para mantenimiento y operación.



PROYECTO DE DISEÑO

El diseño se ha realizado utilizando la normativa vigente en obras marítimas (ROM 2.0-11), utilizando la EHE para el hormigón.

La estructura de material compuesto se ha diseñado utilizando un Modelo de Elementos Finitos (FEM) específico para estructuras complejas mediante Abaqus (SIMULIA, 2013). El modelo numérico se estableció utilizando para el laminado elementos elásticos y ortotrópicos para simular el material compuesto. El hormigón se simuló como elementos sólidos y el material de relleno se consideró como una carga. El modelo tenía más de 28.000 nodos y se hizo con 25.000 laminados y 3.000 elementos sólidos.

Con el fin de comprobar la integridad de cálculo compuesto, el criterio utilizado fue Tsai-Hill:

$$I_F = \frac{\sigma_{11}}{X^2} + \frac{\sigma_{22}}{Y^2} - \frac{\sigma_{11}}{X^2} + \frac{\sigma_{12}}{S^2} < 1.0$$

Dónde:

$X = x_t$ si $\sigma \geq 0$ y $X = X_c$ si $\sigma < 0$

$Y = y_t$ si $\sigma \geq 0$ y $Y = y_c$ si $\sigma < 0$

x_t, y_t son resistencia a la tracción en la dirección X, Y

X_c, y_c son resistencia a la compresión en la dirección X, Y

S es la resistencia al corte



También se comprueban los esfuerzos al corte mediante los criterios de resistencia al cizallamiento interlaminar con un factor de seguridad de estrés ($MS < 1$):

$$MS = \frac{\sqrt{\sigma_{ZX}^2 + \sigma_{YZ}^2}}{\sigma_{ILSS}^u} - 1$$

Dónde:

σ_{ILSS}^u = máxima resistencia al cizallamiento interlaminar.

El núcleo se comprobó utilizando:

$$\tau_{xz} = \frac{Q_x}{c}$$

$$\tau_{yz} = \frac{Q_y}{c}$$

$$MS = \frac{F_{sl}F_{sw}}{\sqrt{F_{sw}^2\tau_{xz}^2 + F_{sl}^2\tau_{yz}^2}} - 1$$

Dónde:

τ_{ii} = esfuerzo de cizalla ejes i

c = ancho del núcleo

F_{si} = esfuerzo cortante máximo en que los ejes (w: ancho y l: longitudinal)

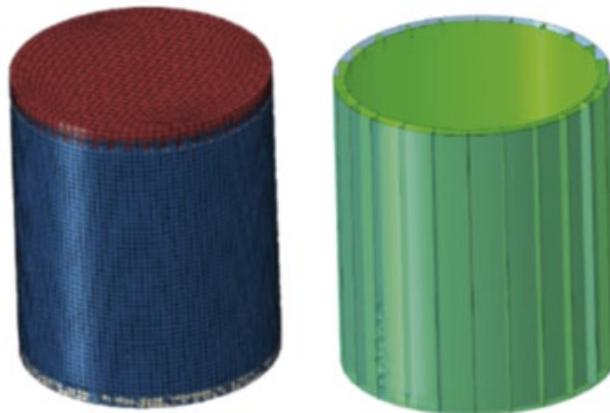
También se verifica el pandeo y los modos de fallo del sándwich, así como casos de inestabilidad locales como arrugas, hoyuelos o intracelular a pandeo, la compresión local o el engarce.

Las propiedades mecánicas de la fibra de vidrio utilizada en el diseño del material compuesto GFRP fueron UD1200HM y B45800G:

GFRP	B45800G	UD1200HM
ρ [kg/m ³]	1,905.0	1,905.0
Xt [MPa]	114.4	871.0
Yt [MPa]	114.4	37.4
Xc [MPa]	116.0	610.0
Yc [MPa]	116.0	37.4
S [MPa]	304.0	43.0
Ex [GPa]	11.5	40.7
Ey [GPa]	12.4	10.6
G12, G13, G23 [GPa]	13.8	3.3
ν [-]	0.5	0.3
ILSS [MPa]	30.0	45.0

Propiedades mecánicas de los materiales compuestos GFRP utilizados en el diseño de cajones.

El análisis de pandeo es decisivo para el comportamiento estructural de esta estructura, por lo que el cajón de GFRP se estudió en el escenario final y se calculó la carga de amarre necesaria para comenzar el pandeo. El primer modo de pandeo muestra un valor propio de 4,1. Como se puede observar en el gráfico adjunto, el cajón GFRP está muy lejos de pandeo.

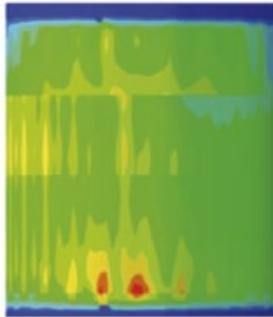
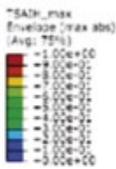


Vista general del modelo MEF y el primer modo de pandeo ($\lambda = 4,1$).

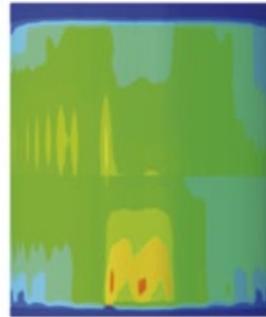
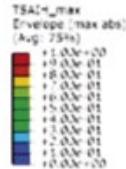
Como se puede observar en los resultados de análisis de tensión, todas las estructuras de cajones GFRP presentan un índice de Tsai-Hill muy inferior de 1. Los valores máximos se encuentran en la parte inferior del cajón pero nunca son mayores que 1.



Índices de fallo de Tsai-Hill



En la parte externa.



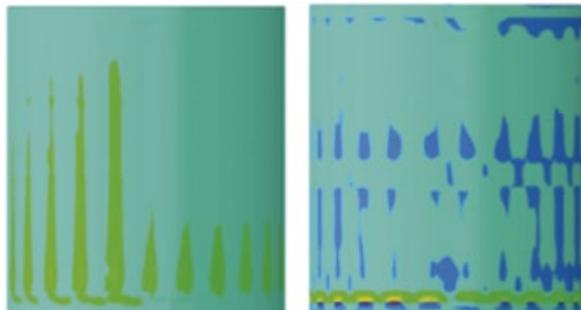
En el lado interno.

Se analizaron la losa de base de la estructura y refuerzos verticales y en la base, pero todas ellas también tienen niveles bajos de índice de Tsai-Hill.



Índices de fallo de Tsai-Hill en refuerzos verticales y de base.

También se analizaron los esfuerzos de corte, pero todos los resultados fueron inferiores a 1,5 MPa y 2.3 Mpa en diferentes direcciones. Todos los escenarios mostraron valores MS <1.



El pandeo del sándwich compuesto y los modos de fallo de inestabilidad locales también fueron revisados y siempre con valores MS <1.



VENTAJAS DE LA SOLUCION DESARROLLADA

Operativas

- No se precisa barco cajonero para la ejecución de este tipo de infraestructura portuaria.
- Fabricación de elementos prefabricados en factoría fuera de puerto.
- Ejecución de forma simultánea de varias obras portuarias a la vez.
- Aportación de experiencia, en el ámbito portuario, en el uso de nuevos materiales.
- Sistema constructivo disruptivo con los existentes actualmente, con ventajas competitivas.

Medioambientales

- El uso de materiales compuestos minimiza el uso de materiales granulares extraídos de cantera
- Se minimiza la reducción de residuos y la emisión de CO₂ a la atmósfera (hasta el 75%).
- Se reduce la afección sobre el fondo marino en un 20% al ocupar un espacio menor debido a su sección cilíndrica.
- Se reducen las operaciones de mantenimiento al ser materiales de alta durabilidad frente a los convencionales.

Constructivas

- Al no realizarse la fabricación in situ y tan sólo el ensamblado de las piezas sobre el muelle, se minimiza la afección sobre las operaciones portuarias.
- El ensamblaje entre las piezas es sencillo y se utilizan uniones adhesivadas y atornilladas, utilizándose para el montaje una grúa de pequeño tonelaje.
- La técnica constructiva es versátil y puede ser implementada en cualquier obra sin necesidad de disponer de equipos especiales, ya que las piezas se fabrican en taller y se ensamblan en obra.

Patrocinan



Colaboran



ISBN 978-846674003-6



9 788488 740038

P.V.P. 50€