



Congreso Nacional del Medio Ambiente
Cumbre del Desarrollo Sostenible

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Investigación sobre diques de abrigo flotantes: disminución del impacto de las obras marítimas sobre el fondo marino

Autor: Juan Carlos Lancha Fernández

Institución: OHL
E-mail: jclancha@ohl.es

Otros autores: D. ^a Elena Arredondo Lillo (Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos)



RESUMEN:

La forma tradicional de abrigar dársenas portuarias es la ejecución de un dique vertical de gravedad (que refleje el oleaje) o de un dique en talud (que absorba la energía del oleaje). No obstante, cuando la batimetría de los fondos es profunda (mayor de 40-50 m) o en el caso de condicionantes medioambientales restrictivos (ie. para explotación de canteras, protección de fondos marinos, fauna, costas o desembocaduras de ríos), puede ser de interés el plantear un abrigo mediante una estructura flotante sujeta mediante líneas de fondeo. OHL y SATO trabajan conjuntamente en la investigación sobre la implementación práctica de los diques de abrigo flotantes en un proyecto de I+D+i. El proyecto se presentó oficialmente a principios del año 2004. Consiste principalmente en el desarrollo de un modelo numérico para la simulación de diques flotantes que permita reducir la acción del oleaje en dársenas y zonas de abrigo. El diseño virtual del dique viene acompañado de unos ensayos en modelo físico a escala que corroboran los resultados. Las ventajas del dique flotante respecto al dique convencional son numerosas destacando entre ellas una fuerte ventaja económica, en aquellos casos en los que la profundidad del mar haga que sea inviable la construcción de un dique convencional y una ventaja medioambiental importante al disminuir considerablemente la zona de afección del fondo marino, permitiendo a las distintas especies marinas permanecer protegidas de la acción directa del hombre. Actualmente se trabaja en la aplicación de esta tecnología en varios puertos españoles en Valencia, Cantabria y Galicia.

1. CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES.

La forma tradicional de abrigar dársenas portuarias es la ejecución de un dique vertical de gravedad (que refleje el oleaje) o de un dique en talud (que absorba la energía del oleaje). No obstante, cuando la batimetría de los fondos es profunda (mayor de 40-50 m) o en el caso de condicionantes medioambientales restrictivos (ie. para explotación de canteras, protección de fondos marinos, fauna, costas o desembocaduras de ríos), puede ser de interés el plantear un abrigo mediante una estructura flotante fondeada mediante cadenas; tal es el caso de la ampliación del puerto de La Condamine en Mónaco.

La elección de un tipo de dique u otro ha de hacerse en función de una serie de condicionantes específicos en cada caso:

➤ La profundidad del fondo marino es el primer determinante. Hasta profundidades de unos 16 metros se imponen los diques en talud. A partir de estas profundidades empiezan a ser más convenientes los diques verticales.

➤ La ocupación del fondo marino, sobre todo si existen especies protegidas, como las fanerógamas marinas, conduce a diseñar diques verticales que ocupan mucho menos superficie que los diques en talud.

➤ La contaminación de los fondos marinos puede obligar a dragar grandes volúmenes de materiales que son mal recibidos en todas partes. En estos casos también es más favorable la construcción de diques verticales.

➤ La existencia o no de canteras de rocas no degradables en el entorno del puerto, suele condicionar también fuertemente la elección de la solución. Si hay que traer escolleras desde distancias muy grandes, las soluciones se inclinan también del lado de los diques verticales.

➤ La disponibilidad de canteras de áridos para hormigones suele tener menos importancia, pues España es un país, por fortuna, con frecuentes afloramientos rocosos de estos materiales.

➤ Los núcleos de los diques suelen necesitar volúmenes muy grandes de materiales no degradables por la acción del agua de mar. Sobre este punto se pueden dar dos circunstancias absolutamente contrarias y que influyen también en la decisión a tomar.

➤ Ya se ha dicho que la mayoría de los puertos tienen cerca núcleos de población muy importantes. Según el sustrato geotécnico de la zona del entorno portuario es posible que la presión urbana genere volúmenes muy grandes de vaciados de terrenos para los que la construcción de un dique en talud es un alivio importante.

➤ También puede pasar lo contrario, que el entorno urbano necesite materiales de este tipo, lo que encarece o, a veces, imposibilita la construcción del dique en talud.

➤ La construcción de diques con grandes volúmenes de material suelto provoca la circulación por el entorno portuario y el urbano colindante de miles de camiones o vehículos de transporte de todo tipo. Esto puede entorpecer la circulación rodada en la urbe colindante de tal modo que sea un condicionante importante a la hora de buscar la solución idónea.

➤ La capacidad portante del terreno bajo el nuevo dique es un dato también crucial para la elección de la solución. Si en el fondo marino existen materiales con baja capacidad portante como limos o arcillas, esto suele decantar soluciones que transmitan menos carga vertical al terreno.

➤ Si el dique proyectado provoca reflexiones del oleaje que afecten al canal de navegación o agiten la zona interior portuaria, la solución debe corregirse para evitar estos problemas.

2. SOLUCIÓN FLOTANTE PARA UN DIQUE DE ABRIGO.

En el apartado anterior se han descrito las soluciones más habituales empleadas por la ingeniería para la protección de superficies portuarias.

Como fácilmente se ve hay condicionantes constructivos, económicos, medioambientales, urbanísticos, etc., que a veces hacen casi imposible la elección de cualquier tipo de solución de dique. Por ello se trata de buscar una solución alternativa que ayude a solventar gran parte de estos condicionantes.

Pensar que la energía del oleaje marino pueda ser reducida mediante una estructura flotante en el mar es una idea altamente atractiva.

Los problemas de conservación del fondo marino y su ecosistema, prácticamente desaparecen.

Los problemas de falta de materiales, canteras próximas, circulación rodada por el entorno urbano, etc., quedan también minimizados. La existencia de fondos marinos blandos, contaminados o degradados, deja de tener importancia.

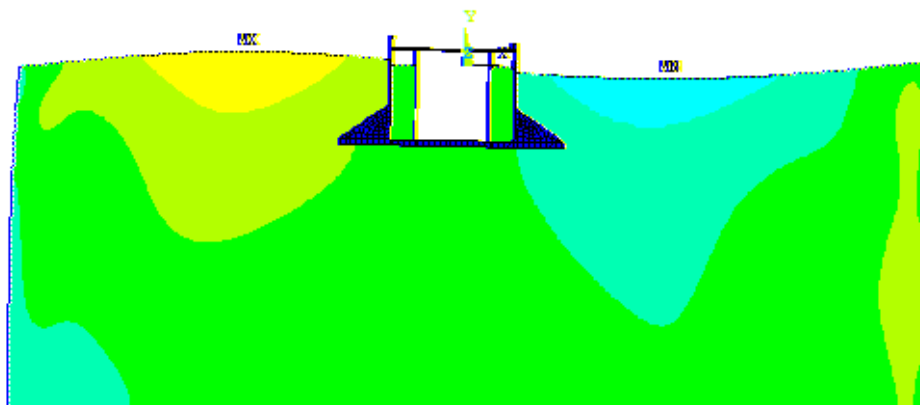
Los diques flotantes pueden proyectarse para profundidades del fondo marino muy superiores a las que habitualmente se enfrenta la ingeniería de puertos.

Por tanto, existe claramente un mercado potencial para el dique flotante, las ventajas medioambientales son abrumadoras, y desde el punto de vista económico también pueden llegar a ser muy competitivos. Es tiempo de considerar al dique flotante como una alternativa a los diques tradicionales de abrigo.

3. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.

El dique de abrigo flotante refleja parcialmente el oleaje, transmitiendo asimismo una cierta energía al interior de la dársena, tanto por fondo como por movimiento de la propia estructura. Esa energía transmitida al interior de la dársena en forma de oleaje inducido en ella debe limitarse en función de las condiciones de explotación de los atraques interiores.

Para el diseño de este tipo de estructuras y para la estimación de la energía que trasmite a la dársena abrigada, esto es, para su cálculo hidrodinámico y estructural, se ha creado un canal numérico capaz de reproducir con suficiente aproximación la interacción oleaje-estructura y su aplicación a la elaboración de una formulación general para el diseño de diques flotantes.



Este canal numérico ha sido el objetivo principal del proyecto de I+D+i "Investigación sobre Diques de Abrigo Flotantes", llevado a cabo por Obrascón, Huarte, Lain, S.A.

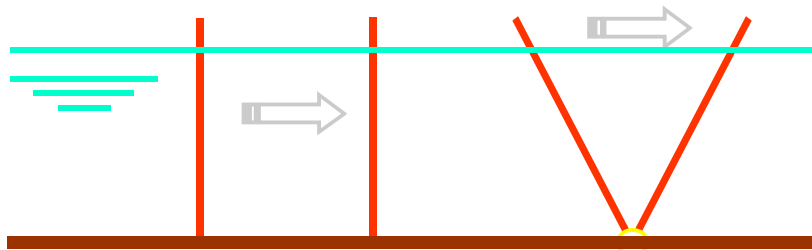
4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.

El canal numérico creado mediante el método de los elementos finitos permite resolver, en el dominio del tiempo y para cualquier tipología estructural, el problema hidrodinámico (coeficientes de reflexión, transmisión y remotes) considerando la interacción oleaje-estructura, esto es, el efecto del oleaje sobre el dique flotante y el efecto que éste, a su vez, induce sobre las aguas

El primer aspecto resuelto ha sido la puesta a punto de un "elemento finito fluido" que, formulado en movimientos, es capaz de representar los movimientos orbitales de las partículas que caracterizan una onda. A este fin se ha empleado un elemento finito estructural, con algunas modificaciones para poder reproducir el comportamiento de fluidos sin flujo neto.

El segundo aspecto resuelto en la simulación numérica se refiere al mallado en el espacio y la discretización temporal necesarios para obtener unos resultados suficientemente ajustados.

El tercer aspecto investigado se refiere a la generación del oleaje: éste se puede generar imponiendo movimientos a lo largo del tiempo sobre una superficie transversal de elementos fluidos. Si dicha superficie es plana, la paleta de generación de oleaje se corresponde con la de un canal físico, generando ondas por desplazamiento o por giro de un plano alrededor de un punto. Este tipo de generación plana presenta el inconveniente de inducir modos evanescentes sobre la masa fluida (en tanto se ajusta el corrimiento plano de la paleta al desplazamiento orbital de las partículas, que es hiperbólico en altura para una onda lineal).



Por ello, se ha hecho preferible la utilización en el canal numérico de paletas flexibles hiperbólicas que ya desde el punto de generación son capaces de dar el desplazamiento que corresponde a cada elemento para generar una onda lineal. Las paletas son además capaces de reproducir tanto un oleaje regular (monofrecuencia) como irregular (para n frecuencias).

El problema fundamental que ha abordado la puesta a punto del canal numérico es el mismo que acontece en los canales físicos, esto es: las ondas reflejadas tanto en fondo de canal como en la propia estructura flotante originan, si no se controlan, fenómenos de resonancia en las masas fluidas, tanto en las aguas abiertas como abrigadas.

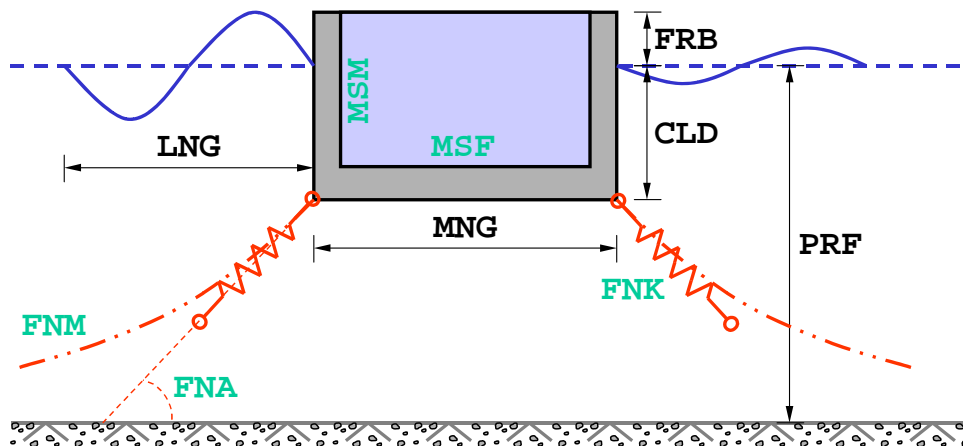
Una primera solución al problema de las reflexiones ha consistido en disponer elementos disipadores en fondo de canal (o bien elementos fluidos muy viscosos o bien una "paleta absorbente" del oleaje, siendo preferible ésta sobre aquellos, pues su viscosidad depende de la frecuencia del oleaje a disipar, mientras que la paleta absorbente permite cubrir todas las frecuencias, lo cual es imprescindible cuando se genera oleaje irregular).

Dicha solución no resuelve, sin embargo, las reflexiones inducidas entre la paleta generadora del oleaje y la propia estructura flotante, haciéndose imprescindible para evitar resonancias en dicha zona el control de las reflexiones mediante filtros digitales instalados en la paleta generadora del oleaje.

En síntesis, la misión de un filtro digital (también empleados en los canales físicos) es "anticipar" la ola reflejada en la estructura que llegará a la paleta generadora, de suerte que ésta genere en cada instante solamente el oleaje que, sumado con el re-reflejado, se corresponda con el oleaje incidente deseado, evitando así fenómenos de concentración de energía y resonancia entre la paleta generadora y la estructura. El andamiaje matemático que sustenta la teoría de filtros es complejo, habiéndose desarrollado en este estadio de la investigación un filtro específico para oleaje regular (monofrecuencia) y otro genérico para el control de reflexiones en un oleaje irregular (multifrecuencial).

Una vez puesto a punto el canal numérico y calibrado su funcionamiento respecto de los resultados analíticos para estructura fija procedentes de la teoría lineal de oleaje, procede el ensayo en el canal numérico de una estructura "móvil", esto es, cuya interacción con el oleaje sea significativa y para cuyo diseño resulta pertinente el canal numérico, habida cuenta que no existe solución analítica en tal caso.

El primer objetivo práctico de la investigación planteada ha sido la consecución de una formulación analítica (o por medio de ábacos) que permita diseñar estructuras flotantes en función de la máxima agitación admitida en la dársena que abrigan (K_t). Este objetivo pasa por la elección de las variables consideradas más representativas del fenómeno. A tales efectos, se han planteado las variables siguientes: longitud de la onda (o periodo del oleaje); profundidad del fondo marino; manga del cajón; calado del cajón; distribución de masas en el cajón y rigidez y disposición del sistema de amarre.



El ensayo en el canal numérico descrito de una colección de cajones flotantes, variando en cada ensayo la magnitud de las variables indicadas, ha permitido construir una familia de ábacos o, en su caso, proponer una formulación analítica, para el predimensionamiento de diques flotantes en función de los requerimientos de limitación de agitación en la dársena y de las características batimétricas y de oleaje de la zona en cuestión.

Se ha diseñado a nivel de anteproyecto un dique de abrigo flotante económicamente viable, empleando la formulación y ábacos anteriormente mencionados.

El dique así diseñado se ha llevado entonces a un canal de ensayo físico en modelo reducido. La adecuación de los resultados obtenidos del modelo físico a la formulación y el modelo desarrollado de forma numérica ha constituido la validación del procedimiento empleado.

5. UTILIZACIÓN DEL DIQUE FLOTANTE EN EL MAR MEDITERRÁNEO: PROTECCIÓN DE LA POSIDONIA OCEÁNICA.

El dique flotante es la estructura ideal para proteger y conservar la flora del mar Mediterráneo. Concretamente la Posidonia Oceánica, una planta endémica del Mar Mediterráneo que se encuentra en la actualidad en peligro de extinción:



Una de las comunidades vivas más interesantes del litoral son las praderas de Posidonia oceánica. Se trata de una planta superior, no de un alga, que habita agrupándose en extensas formaciones vegetales como si de un bosque se tratara.

Viven frente a la costa sobre fondos arenosos entre 0 y 25 m hasta un máximo de 40 m de profundidad. Sólo en el litoral mediterráneo ibérico se calcula una extensión de praderas marinas de 3,551 Km². Sin embargo, en las últimas décadas, estas comunidades marinas han sufrido los efectos de la contaminación orgánica, térmica y agraria, así como la de las extracciones pesqueras con cercos de fondo, arrastre o el marisqueo con gánguil. Igualmente, han incidido negativamente sobre las posidonias la frecuentación del litoral por fondeo de embarcaciones deportivas, instalaciones náuticas, construcción de puertos deportivos, regeneración de playas, etc. Entre las principales causas de su regresión se constata la eutrofización de las aguas costeras así como la degradación del litoral marino

La Posidonia oceánica es el elemento de la flora marina más destacado que se pretende proteger. Esta planta fanerógama marina (que no es un alga) cuyas hojas tienen forma de cinta, que puede verse entre la arena de las playas o encima de la misma cuando los temporales la han arrastrado hasta la costa, o en las aguas que lamen la arena, cuando no en sus asentamientos en el fondo del mar, ciertamente la conocemos todos y, sin embargo, cuán poco sabemos de los motivos que sirven para despertar el enorme atractivo que representa para biólogos y naturalistas.

Sus hojas son de color verde y tienen forma de cinta, pudiendo alcanzar hasta el metro y medio de longitud en algunos casos, llegando sus brotes a formar grandes extensiones que

son conocidas con el nombre de "praderas", localizables en general hasta los 40 m. de sonda límite inferior del litoral. La vida media de estos brotes es de unos treinta años.

Su enorme importancia para el ecosistema litoral del mar Mediterráneo y para el ecosistema marino tiene diferentes vertientes, cada cual más importante. A saber: muchas especies encuentran sus nutrientes y morada entre los brotes de posidonia, sobre todo entre sus rizomas, que llegan a constituir un enorme entramado recubierto de sedimentos en donde se alojan multitud de individuos. También podemos encontrar entre las praderas gran cantidad de equinodermos, tanto erizos de diferentes familias que se nutren de esta planta, como estrellas de mar. Los moluscos también encuentran aquí su morada, desde los populares cornos, que se alimentan de los erizos, hasta los cefalópodos, como pulpos y sepias. Los pulpos se instalan en agujeros que ellos mismos preparan a su gusto en el entramado de rizomas, mientras que las sepias se camuflan entre las hojas, cerca del fondo, haciendo ambos el mejor uso de su providencial mimetismo, adoptando el color del entorno para pasar desapercibidos por sus depredadores. Se alimentan de camarones, cangrejos y peces pequeños.

Por otro lado, la posidonia atrae igualmente a numerosos peces, que se alimentan a su vez, de crustáceos, erizos, moluscos y gusanos.

Otra particularidad, sumamente valiosa, es que resultan fundamentales en el mantenimiento natural de la línea de costa y la estabilidad en las playas de arena y los fondos marinos, ya que sus rizomas retienen sedimentos, sus hojas reducen el movimiento del agua y la acumulación de sus hojas muertas en la playa (tan molestas para muchos), reduce el impacto de las olas sobre éstas, evitando que la resaca se lleve consigo la arena y convierta la playa en otro clásico codolar o macar.

Sin embargo, las praderas de posidonia oceánica se ven altamente amenazadas por la contaminación, la pesca de arrastre, el tráfico marítimo, las anclas de las embarcaciones, la destrucción del litoral por la construcción de puertos artificiales, o la creación de playas artificiales, es decir, por la creación de una oferta turística mal interpretada y, si con todo esto no fuera suficiente, por la aparición y proliferación de la llamada "alga asesina", la *Caulerpa taxifolia*.



La construcción de diques flotantes para garantiza por un lado la menor invasión del fondo marino, y por otro lado, la menor afección en el litoral, con lo cual se ayuda a la protección de la Posidonia , esta planta tan delicada que cubre nuestras zonas costeras.