

ACTUACIÓN EXPERIMENTAL CON DIQUES MODULARES EN SANTA M^a DEL MAR (CÁDIZ). REDES NEURONALES, SOCAVACIÓN Y LICUEFACCIÓN DE ARENAS

Josep R. Medina¹, Juan J. Muñoz², Begoña Tejedor²,
Gregorio Gómez-Pina³ y Lorenzo Fages³

INTRODUCCIÓN

La mayoría de las playas españolas son espacios muy sensibles desde el punto de vista ambiental y son también activos colectivos de gran importancia económica y social. No solamente los ecosistemas marinos y terrestres dependen de la estabilidad de las playas sino que una gran parte de la actividad económica y del desarrollo social está estrechamente vinculado a las playas. En este contexto, la erosión de nuestras playas es un problema generalizado en muchos tramos costeros que tiene consecuencias muy negativas para algunos sectores económicos (turismo) y afecta también valores naturales litorales terrestres y marinos. De acuerdo con el informe europeo EUCC(2003), hay cuatro causas principales de la erosión de las playas en Europa que son las mismas en las costas españolas: (1) la retención de sedimentos en los embalses, (2) la extracción de áridos del circuito sedimentario marítimo-fluvial, (3) los diques de abrigo de las zonas portuarias y (4) los desarrollos urbanos litorales. Restablecer el flujo sedimentario natural de los cauces fluviales a la costa y a lo largo de la costa es sin duda la mejor estrategia a largo plazo para solucionar muchos de los problemas erosivos que padecemos en las playas peninsulares; sin embargo, las múltiples dificultades económicas, técnicas, políticas y legales que plantea esta estrategia a corto plazo empuja a la comunidad técnica a la adopción de medidas paliativas basadas en la construcción de obras costeras de protección del litoral. Además, la anunciada elevación del nivel medio del mar durante las próximas décadas debido al calentamiento global y el posible aumento progresivo de la intensidad de los temporales debido al cambio climático, plantea un escenario de erosión generalizada de las costas que se añade a las cuatro causas antrópicas principales de la erosión costera referidas anteriormente.

¹ Universidad Politécnica de Valencia.

² Universidad de Cádiz.

³ Demarcación de Costas de Andalucía-Atlántico.

Durante las últimas décadas, la mayor parte de las obras de protección de costas en España han estado basadas en la alimentación artificial (de origen terrestre o marino) y, en su caso, la construcción de espigones, diques exentos y diques de pie para reducir los volúmenes de sedimentos de aportación. Muñoz-Pérez *et al.* (2001) detallan cómo se han utilizado sólo en las playas del Golfo de Cádiz y durante una década más de 12 millones de m³ arena en alimentaciones artificiales. La regeneración o alimentación artificial pura de playas con sedimentos del fondo marino ha sido considerado durante muchos años la mejor respuesta ingenieril a los problemas locales y generales de erosión de playas ya que, además de solucionar el problema erosivo local en la zona de trabajo, se mejoran los problemas erosivos que suelen tener las playas adyacentes; En la década de los 80 y hasta 1996 el gobierno español impulsó con determinación las alimentaciones artificiales puras de playas con sedimentos de origen marino como la herramienta fundamental de lucha contra la erosión, dejando las obras duras (espigones, diques exentos, etc.) para definir apoyos estructurales puntuales o para proteger la costa en zonas sin depósitos sedimentarios accesibles de suficiente volumen.

Sin embargo, muchos grupos ecologistas españoles han estado presionando desde la década de los 80 para detener las obras de regeneración de playas con sedimentos de origen marino hasta reducir de manera significativa este tipo de actuaciones a partir de 1996 (ver Medina y otros, 2001). Resulta contradictorio que esta presión ecologista específica no se haya producido en países vecinos similares como Francia o Italia y resulta paradójico que el resultado final de esta presión ecologista contra las alimentaciones artificiales marinas haya desembocado en la realización de obras consideradas por la comunidad técnica española como obras mucho más duras y de mayor impacto ambiental (soluciones con más sedimentos de origen terrestre y más escollera). Esta paradoja puede explicarse en parte por el hecho de que las regeneraciones artificiales con sedimentos de origen marino mejoran ostensiblemente la calidad de las playas erosionadas pero suelen generar enormes plusvalías y propiciar desarrollos inmobiliarios que son detestados por muchos grupos ecologistas.

Con los precedentes anteriores, resulta evidente que en España es muy importante la consideración de los impactos ambientales y la aceptación social de las obras de protección de costas y lucha contra la erosión. La concentración demográfica y de actividades económicas es muy fuerte en amplias zonas de la costa española, asentándose en ella la base del sector económico más competitivo del país: el turismo de sol y playa. La reducción de los impactos ambientales y la mejora de la aceptación social de las propuestas de actuación en la costa no son sólo objetivos deseables sino factores críticos de muchas actuaciones en la costa española (ver Yepes and Medina, 2005). En este contexto, se hace más difícil con el paso de los años la utilización de escolleras y materiales de cantera en obras costeras, dada la escasez de canteras, las molestias que ocasionan su uso y la difícil reversibilidad de este tipo de obras. Por el contrario, las estructuras prefabricadas de hormigón aparecen como alternativas razonables a las estructuras convencionales para su uso en zonas costeras sensibles ya que pueden reducir significativamente el impacto de la construcción. Estas soluciones no convencionales, plantean nuevas opciones de protección de costas pero también nuevos problemas técnicos que deben resolverse.

En este artículo se presenta el nuevo concepto de dique modular, los ensayos a escala realizados en laboratorio y una actuación experimental en la Playa de Santa M^a del Mar (Cádiz). Por un lado se utiliza la metodología de redes neuronales (NN) para caracterizar la energía transmitida, disipada y reflejada por diques modulares exentos ensayados en canal a escala 1/10, comparando los resultados con una estructura similar convencional de escollera. Por otro lado, se presentan los resultados preliminares del seguimiento de una actuación experimental a escala prototipo, en la que se han instalado tres pequeños segmentos de dique modular en la playa de Santa M^a del Mar (Cádiz) para analizar los procesos de construcción, asentamiento, socavación y licuefacción de arenas y de respuesta de la playa.

DIQUE MODULAR

Siguiendo la clasificación de las técnicas de protección de costas de Medina y otros (2001), la retirada planeada y la alimentación artificial marina se encuentran entre las técnicas de protección de costas más blandas (menor impacto ambiental) y el abandono y la defensa longitudinal entre las más duras (mayor impacto ambiental). Este artículo se refiere a elementos utilizados para construir diques exentos y diques de pie, técnicas de protección de dureza media-baja que se utilizan para reducir las aportaciones de sedimentos necesarias para estabilizar playas. Estas estructuras se denominan genéricamente de baja cota de coronación (LCS = "low-crested structure") y se construyen generalmente con escollera y materiales sueltos. En este artículo se toma como referencias de comparación los resultados del proyecto europeo DELOS (ver Burcharth and Lamberti, 2004) centrado en LCS convencionales.

Las obras con diques exentos convencionales (escollera y materiales sueltos) pueden plantear problemas de suministro de materiales (canteras y transporte) en algunas zonas y generan siempre problemas ambientales asociados a la difícil reversibilidad de la construcción. Estos dos problemas, unidos a las molestias (polvo, turbidez, ruido, tráfico, etc.) generados en el entorno de la zona de trabajo, reducen significativamente su aceptación social en zonas costeras sensibles. En términos de huella ecológica, la superficie y huecos de la piedra en LCS favorecen el aumento de biomasa y biodiversidad en zonas de playa, pero los productos de cantera introducidos en la playa natural es sin duda un elemento extraño (granulometría y composición) que conviene evitar, siendo además muy difícil restituir la situación inicial una vez vertidos los materiales externos. Como alternativas a las LCS convencionales de escollera podemos señalar las estructuras prefabricadas de hormigón, normalmente ideadas para satisfacer determinados requerimientos hidráulicos. La prefabricación tiene la ventaja de eliminar la mayor parte del impacto ambiental de la obra en la zona litoral de trabajo y concentrarla en una zona industrial preparada adecuadamente (planta de prefabricación). Por ejemplo, los elementos modulares de hormigón fabricados a escala prototipo en la planta de prefabricados de GH de Benissanó (Valencia) se trasladaron por carretera al Puerto de Cádiz y se instalaron después por vía marítima en la actuación experimental de la playa urbana de Santa M^a del Mar de la ciudad de Cádiz. Además del concepto de dique modular, objeto del presente artículo, podemos resaltar dos

patentes americanas de diques prefabricados sumergidos (diques arrecife o diques de pié) que se han utilizado en España y en diferentes proyectos americanos durante los últimos años.

Stauble and Tabar (2003) describen la utilización del *Prefabricated Erosion Prevention concrete breakwater* (PEP) en tres proyectos en la costa americana de Florida (Dupont Palm Beach, Midtown Palm Beach y Vero Beach). La unidad PEP tiene una sección del tipo triangular con una altura de 1,83 metros, una anchura de 4,57 metros y una longitud de 3,66 metros, con un peso aproximado de 23 toneladas. Estas estructuras prefabricadas de hormigón armado se transportan por vía marítima hasta la posición de la grúa que, apoyada en plataforma, ensambla longitudinalmente las unidades con un machihembrado lateral. Se suelen instalar directamente sobre el fondo arenoso sin geotextiles. Estas obras tienen cuatro objetivos principales: (1) reducir la altura de ola que ataca la playa, (2) reducir la energía transmitida durante los grandes temporales, (3) estabilizar la línea de orilla y (4) reducir los cambios de volumen de sedimentos. La idea conceptual de Rauch (1989, 1992) era favorecer la subida de la arena del lado barloomar y retener el pié de perfil de lado sotamar.

Con una idea conceptual muy similar a la de la unidad PEP, Creter (1993) patenta la unidad Beachsaver, también con 1,83 metros de altura, 4,75 metros de anchura, 3,05 metros de longitud y un peso aproximado de 19 toneladas. Stauble and Tabar (2003) describen tres obras monitorizadas en New Jersey (Avalon, Cape May Point y Belmar). En España se construyó en 2003 un dique de pié tipo Beachsaver en la playa de El Campello (Alicante). La figura 1 muestra la idea conceptual del Beachsaver; como en el caso del PEP, el diseño triangular pretende que los sedimentos rebasen el dique desde barloomar y queden retenidos a sotamar. Las unidades Beachsaver se suelen instalar sobre geotextiles para frenar el asentamiento del dique. La forma y concepto es similar a la del PEP pero se construyen huecas machihembradas, con hormigón de alta resistencia y una forma algo más compleja. Las tres obras con unidades PEP y Beachsaver monitorizadas y descritas por Stauble and Tabar (2003) tenían una profundidades de instalación entre dos y cuatro metros.

Los dos tipos de diques prefabricados descritos anteriormente y otros descritos por Rodríguez y otros (2003) se caracterizan por ser prefabricados de sección completa,

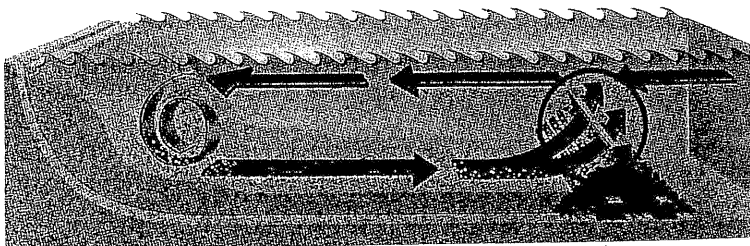


Figura 1. Dique de pié con unidades Beachsaver.

por lo que sólo es posible decidir sobre uno de los dos factores fundamentales (francobordo y profundidad de instalación) que controlan el comportamiento hidráulico y sedimentario del dique. Por ejemplo, los dos tipos de unidades descritos anteriormente tienen 1,83 metros de altura y si se espera un asentamiento de 0,7 metros (media de las tres obras monitorizadas con unidades Beachsaver), sólo se pueden conseguir francobordos negativos del orden de un metro con profundidades de instalación de $h = 2$ metros, dentro de la zona de rompientes. En esta zona, no sólo las corrientes transversales, sino también las longitudinales son muy importantes y se pueden generar nuevos procesos erosivos como señala Dean *et al.* (1997) en la descripción de la monitorización de la obra de protección de costas con PEP de Palm Beach (Florida).

Rodríguez y otros (2003) describen el concepto de dique modular como una nueva herramienta para el control de la erosión y la defensa de costas. A diferencia de los otros tipos de diques prefabricados, el dique modular no se ha pensado para responder óptimamente a unas condiciones hidráulicas concretas (profundidad y francobordo) sino que se ha ideado para resolver los problemas logísticos de la acumulación y el transporte de unidades prefabricadas con la red intermodal de transporte de contenedores. Los principios básicos del diseño del dique modular son: (1) carácter modular por el que se puede construir una amplia variedad de secciones con pocos tipos diferentes de módulos, (2) transporte y manipulación de los módulos con medios convencionales, que abaraten y faciliten instalación, (3) almacenamiento en un reducido espacio dentro o fuera de las infraestructuras portuarias, y (4) defensa de costas reversible que pueda ser desinstalada con facilidad dejando el entorno de ubicación sin afecciones permanentes. En la figura 2 se muestran una sección TCT con los módulos C88 (8 x 8 pies) y T70. La figura 3 muestra los modelos a escala 1/10 de tres secciones diferentes construidas con los mismos módulos y la Figura 4 muestra la sección TCT a escala prototipo.

En este artículo se describen los ensayos 2D a escala 1/10 de estructuras modulares tipo dique exento construidas con los tipos de módulos cuadrados (C88) y triangulares (T70), consiguiendo alturas totales de 2,5 y 5 metros y anchuras de coronación de 2,5 a 7,5 metros (ver fig. 3). Con sólo dos tipos de módulos (C88 y T70) se pueden construir una gran variedad de estructuras costeras adaptadas a las condiciones climáticas y del terreno de cada lugar. Por consiguiente, es factible fabricar y acumu-

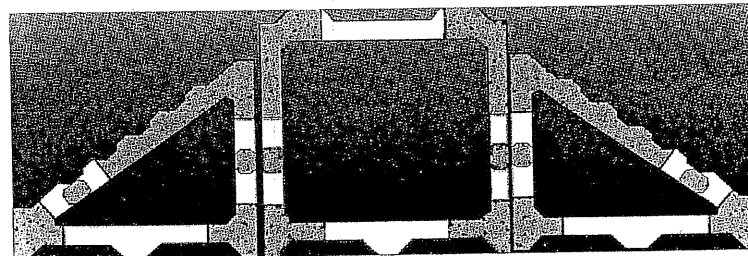


Figura 2. Sección TCT con módulos básicos C88 y T70.



Figura 3. Modelos de dique modular ensayados a escala 1/10.

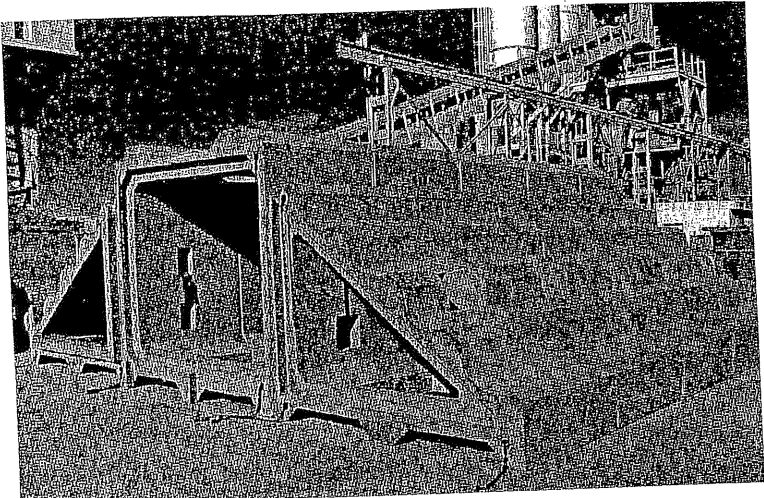


Figura 4. Dique modular TCT colocado en la Playa de Santa Mª del Mar (Cádiz).

lar los módulos antes de saber el emplazamiento y funcionalidad de la obra y transportar y construir en muy breve plazo la obra modular necesaria en un lugar concreto. Esto hace viable la construcción reversible de obras de protección de costas en situaciones de emergencia ya que la obra modular puede ser desinstalada con relativa facilidad, reubicada o los módulos reutilizados en otro lugar con un impacto ambiental mínimo en la zona de actuación. Todos los módulos tienen 2,5 metros de anchura y 2,0 metros de longitud; el módulo cuadrado C88 pesa 8,5 toneladas con 2,5 metros de altura, mientras que el triangular T70 pesa 6,0 toneladas y tiene 2,1 metros de altura. Los módulos tienen un machihembrado para su unión longitudinal tubular y aberturas simétricas para su unión transversal.

Así pues, los diques modulares están indicados para intervenciones en playas especialmente sensibles desde el punto de vista ambiental o social, donde el uso de

escollera y materiales de cantera no sea recomendable, donde deba minimizarse el impacto ambiental de la obra o donde deba garantizarse la posibilidad de un desmantelamiento rápido y limpio con restitución completa del estado inicial. La fabricación industrializada y el carácter modular permite fabricar, acumular y reutilizar módulos, las características idóneas para obras de emergencia en las que se debe actuar con rapidez y con información incompleta susceptible de ser modificada con el paso del tiempo. Como cualquier estructura de hormigón prefabricada de tipo arrecife, las estructuras construidas con elementos modulares pueden usarse y considerarse también de manera secundaria (ver Medina y Serra, 1987) como arrecifes artificiales pesqueros ya que los huecos y superficies nuevas que generan pueden aumentar significativamente la biomasa de la playa de arena.

ENSAYOS FÍSICOS BIDIMENSIONALES

Para evaluar el comportamiento hidrodinámico de los diques modulares (transmisión y reflexión), se ensayaron los modelos 2D de la figura 3 que cubren un amplio rango de aplicaciones como diques exentos. Se utilizó el canal de ensayos del Labo-

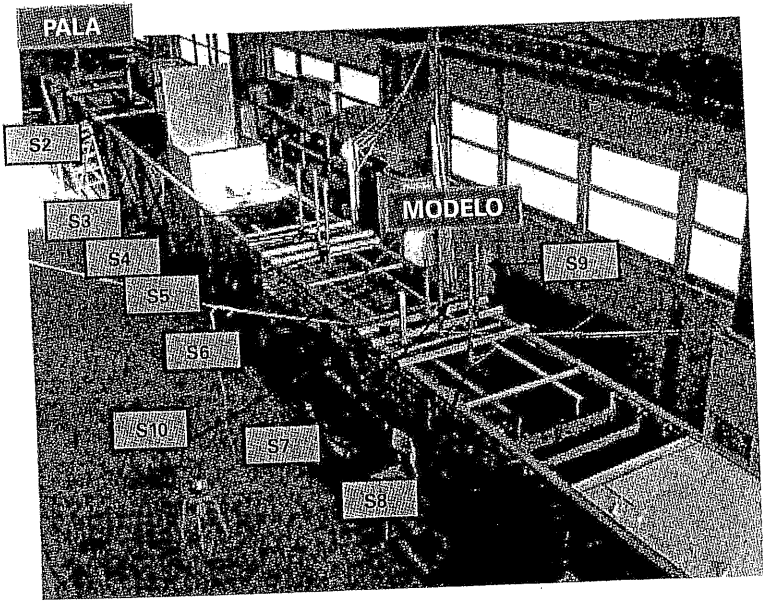


Figura 5. Canal de ensayos 2D y disposición de sensores.

ratorio de Puertos y Costas de la Universidad Politécnica de Valencia (30,0 x 1,2 x 1,2 metros) generando oleaje regular e irregular. Se formó con láminas transparentes un canal central efectivo de 0,60 cm de anchura para ensayar las secciones de la figura 3 y dos canales laterales de 30 cm de anchura para disipación de energía. A escala 1/10 se midieron oleajes incidentes y reflejados con el método LASA (Medina, 2001) adecuado para medir oleaje no lineal y no estacionario. También se pudo comprobar la estabilidad de los módulos por capas frente a cualquier tipo de oleaje. La figura 5 muestra el canal de ensayos y la posición del modelo y los sensores.

Para estos experimentos de transmisión, los modelos se colocaron sobre un lecho de 6 cm de gravilla de $W_{50} \approx 0,5$ gramos (prototipo: 60 cm de piedra $W_{50} \approx 0,5$ kg) y una pendiente de fondo de 3% simulando una colocación sobre banqueta regularizadora y fondo duro (ver figura 6). Con esta disposición y resultando estables, para todo tipo de oleaje, tanto la gravilla como el modelo, quedó razonablemente modelada la transmisión, reflexión y disipación de energía para este tipo de estructuras. Medina (2005) y Medina *et al.* (2006) describen con detalle los ensayos realizados.

Con este diseño experimental quedaron sin analizar los fenómenos de socavación y posible licuefacción de arenas, que pueden producirse en su instalación típica sobre fondos de arena. Así pues, los resultados obtenidos en el laboratorio son comparables con los ensayos típicos de transmisión de estructuras LCS convencionales de baja cota de coronación sobre fondo de gravas o superior. En su instalación sobre fondos arenosos o sedimentos más finos, debe esperarse un asentamiento por socavación algo inferior al 50% de la altura del dique (ver Sumer and Fredsoe, 2002) que afectará al francobordo aumentando la transmisión de oleaje. Precisamente uno de los objetivos de la Actuación Experimental de Santa Mª del Mar era comprobar los procesos de asentamiento y socavación de este tipo de estructura en una playa de arena en la que ya se había observado el hundimiento completo hasta la desaparición de un dique de pié convencional tipo Ahrens construido en 1998.

Los ensayos de oleaje regular sobre las tres tipologías (TCT, TC3T y TCT2) cubrieron los rangos $1,5 < T(s) < 3,5$, $5 < H(cm) < 25$ y $20 < h(cm) < 60$. En cada caso se lanzó un tren regular corto para evitar multirreflexiones.



Figura 6. Modelo TCT sobre capa granular y fondo duro.

Los ensayos irregulares fueron de 600 olas, espectro JONSWAP ($\gamma = 3,3$), $f_{min} = 0.5$ fp y $f_{max} = 2,5$ fp y francobordos $-15 < F(cm) < +5$ que se corresponden con un dique exento con la coronación algo por encima o por debajo del nivel medio del mar en reposo. Subjetivamente, el comportamiento del dique modular resultó similar al de una sección convencional de escollera y las comparaciones objetivas posteriores corroboraron esa impresión inicial. Los sensores se colocaron a las distancias recomendadas por Mansard and Funke (1980).

El objetivo principal de los ensayos 2D a escala reducida era estimar la eficiencia hidráulica reflexión-transmisión-disipación del dique modular en relación a los diques convencionales de escollera. También se pudo evaluar la estabilidad de la estructura al deslizamiento. Los módulos en la misma capa estaban solidarizados pero las capas de módulos superpuestas estaban sueltas, por lo que se podían producir deslizamientos globales y de capa; sin embargo, no se observó ningún tipo de deslizamiento en ninguna de las combinaciones de oleaje y francobordo ensayadas.

Los ensayos de transmisión miden la proporción de energía reflejada, transmitida y disipada por el conjunto estructural en diferentes estados de mar. Ello se lleva a cabo calculando experimentalmente los coeficientes de transmisión (CT) y reflexión (CR), para diferentes situaciones marítimas caracterizadas por la altura de ola, el periodo de ola y el nivel medio del mar (francobordo). La energía disipada, por su parte, es determinada como la diferencia entre la energía incidente y la reflejada+transmitida.

$$E_{disipada} = E_{incidente} - E_{transmitida} - E_{reflejada} \quad (1)$$

El coeficiente de transmisión CT y de reflexión CR se definen como la relación entre la altura de ola transmitida y reflejada y la altura de ola incidente, H_i :

$$CT = \frac{H_t}{H_i} \quad CR = \frac{H_r}{H_i} \quad (2)$$

Mediante el método LASA (Medina, 2001), se separó el oleaje incidente del reflejado, delante y detrás de la estructura, calculándose así el oleaje transmitido y las energías de la Ecuación 1. Si el oleaje es irregular, las alturas y periodos de ola se refieren a alturas de ola significantes H_{m0} y periodos medios T_{01} . En total se realizaron 305 ensayos con oleaje regular y 36 ensayos con oleaje irregular de las tipologías TCT, T3CT y TCT2 de la Figura 3. Tendiendo en cuenta que la energía es proporcional al cuadrado de la altura de ola, el porcentaje de energía reflejada, transmitida y disipada puede calcularse como $\{CT^2\}$, $\{CR^2\}$ y $\{1 - CT^2 - CR^2\}$. Tanto la percepción subjetiva del comportamiento del dique modular como los resultados obtenidos apuntan a un comportamiento similar al de los diques convencionales de escollera con la misma sección.

MODELO NEURONAL

Para describir la transmisión, reflexión y disipación de energía de los diques modulares en relación a los convencionales de escollera la misma sección, se parte de la sección tipo de referencia de la figura 7 donde se indican las principales variables estructurales que condicionan la transmisión de energía.

Además de las variables estructurales, deben considerarse las variables altura de ola significativa y periodo medio del oleaje incidente (H_{m0i} y T_{01i}) y las relaciones adimensionales de peralte (H_{m0}/L_{01i}) y profundidad relativa (h/L_{01i}). En este artículo se utilizan las redes neuronales optimizadas con estrategias evolutivas de Medina

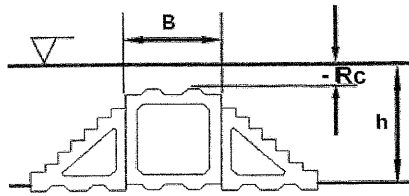


Figura 7. Sección TCT: Rc=francobordo, h=profundidad y B=anchura de la coronación.

(2005) para eliminar el ruido experimental y seleccionar las variables explicativas más relevantes. Los fundamentos y aplicación de estas técnicas están descritos por Medina et al. (2002) y Rodríguez y otros (2004) implementadas en el software NEUROPORT 2.0 (ver Medina, 2003) que partiendo de una población inicial de redes neuronales (madres) se genera por mutación un número de redes "hijas" que compiten con

sus "madres" para formar la siguiente generación. Las mejores redes son las que se imponen midiéndose la calidad de la red con la función error generalizado $PSE = MSE[1+2P/(N-P)]$, donde MSE es el error cuadrático medio, P es el número de parámetros libres y N es el número de datos de aprendizaje. Las mejores redes no sólo deben tener un buen ajuste a las observaciones sino que, además deben ser tan simples como sea posible, permitiendo además eliminar variables de entrada (explicativas) que son poco significativas.

En nuestro caso, con sólo 31 ensayos de oleaje irregular y 3 tipologías, resulta muy conveniente un sistema de optimización neuronal de tipo evolutivo que permite eliminar entradas poco relevantes. Con la parametrización estructural de la figura 7, Medina (2005) toma los siguientes adimensionales explicativos como entradas ini-

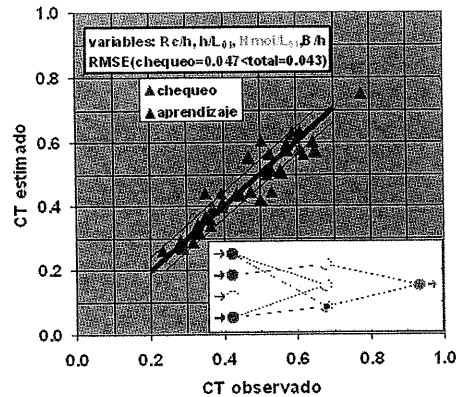


Figura 8. Estima neuronal de coeficiente de transmisión (CT).

ciales de la red: $\{F/h, h/L_{01}, Hm0i/L_{01} \text{ y } B/h\}$. Se tomaron aleatoriamente el 25% de los ensayos para chequear el resultado final y se entrenaron la red neuronal con el 75% restante. La figura 8 muestra los resultados de la modelación neuronal de la transmisión.

El proceso evolutivo selecciona el francobordo relativo (Rc/h), la profundidad relativa (h/L_{01}) y la anchura relativa (B/h) y elimina el peralte del oleaje ($Hm0i/L_{01}$) como variable explicativa. El resultado es consistente con un error de chequeo similar al de aprendizaje. Para la estima neuronal de la reflexión, el proceso evolutivo rechaza también la variable peralte del oleaje ($Hm0i/L_{01}$), seleccionando todas las demás; los resultados también son consistentes y quedan señalados en la figura 9.

Con los modelos neuronales descritos en la Figuras 8 y 9, se pueden estimar los coeficientes de reflexión y transmisión de diques modulares de sección trapezoidal dentro de los rangos $-0,38 < Rc/h < +0,25$, $0,03 < h/L_{01} < 0,21$ y $0,42 < B/h < 3,75$. Las estimaciones neuronales de los coeficientes de transmisión y reflexión permiten calcular el porcentaje de energía transmitida, reflejada y disipada por el dique modular. La figura 10 muestra un gráfico de diseño típico en el que se refleja el efecto del periodo del oleaje y la posible utilización de una sección TC3T en lugar de TCT; menores periodos y mayores anchuras de dique producen menores transmisiones y reflexiones de oleaje.

Si el fondo es arenoso, se inducen procesos de socavación que generan asentamientos ("self burrial") apreciables que debieran ser algo inferiores al 50% de la altura del obstáculo (ver Sumer and Fredsoe, 2002). Este asentamiento reduce la relación Rc/h provocando un aumento importante de la transmisión del oleaje y una ligera reducción de la reflexión del oleaje. Si además de los procesos de socavación nor-

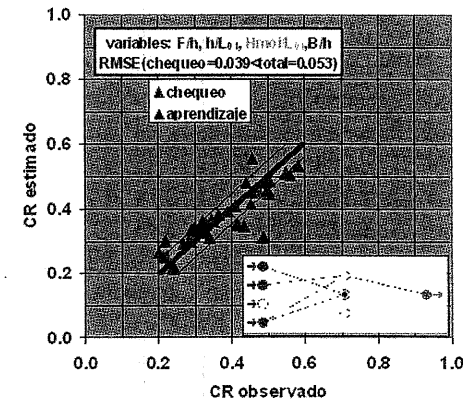


Figura 9. Estima neuronal de coeficiente de reflexión (CR).

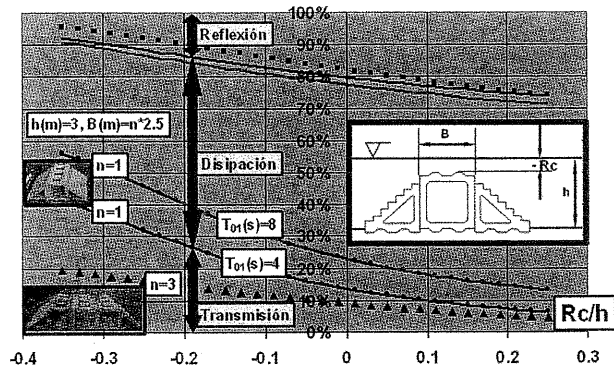


Figura 10. % Energía transmitida, disipada y reflejada (sin asentamiento).

males, se producen procesos de licuefacción de arenas, la estructura se puede hundir más y su efectividad reducirse apreciablemente.

Aunque subjetivamente se pudo comprobar durante los ensayos que el comportamiento del dique modular era similar al de una estructura convencional de escollera, se planteó a continuación una comparación objetiva entre las estimaciones de transmisión obtenidas con la red neuronal señalada anteriormente (figura 9) y la formulación de d'Angremond *et al.* (1996) de la Ecuación 3 propuesta también por Briganti *et al.* (2003) dentro del Proyecto DELOS referido al estudio de las estructuras LCS convencionales.

$$CT = -0.4 \cdot \frac{Rc}{H_{m0i}} + 0.64 \cdot (1 - e^{-(0.5 \cdot I_p)}) \cdot \left(\frac{B}{H_{m0i}}\right)^{-0.31} \quad (3)$$

Es necesario indicar que los adimensionales utilizados por la red neuronal y por la fórmula propuesta en DELOS son diferentes, por lo que ha sido necesario utilizar toda la información de los ensayos para determinar en cada caso las variables correspondientes y poder así comparar unas estimaciones con otras. La figura 11 muestra los resultados obtenidos con la fórmula de d'Angremond *et al.* (1996) correspondiente a estructuras LCS convencionales y los neuronales correspondiente a diques modulares. El comportamiento es similar, aunque parece que la transmisión del dique modular es algo menor en valores con $CT > 40\%$ y algo mayor en valores con $CT < 40\%$. Por consiguiente, cabe esperar que el comportamiento funcional del dique modular sea similar a la LCS convencional de escollera en su aplicación como dique exento (coeficiente de transmisión similar).

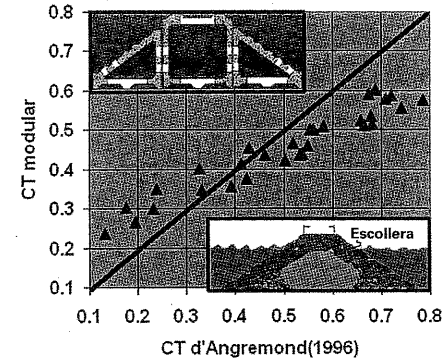


Figura 11. Comparación de los coeficientes de transmisión del dique modular y del convencional.

LA PLAYA DE SANTA Mª DEL MAR (CÁDIZ)

Los ensayos 2D descritos anteriormente se refieren a un modelo a escala 1/10 sobre lecho granular y fondo duro e impermeable. Sin embargo, la aplicación típica del dique exento modular se realiza sobre fondo de arena donde los procesos de socavación y licuefacción pueden ser importantes. Con objeto de evaluar una posible utilización de un dique modular TCT como dique de pié en la playa de Santa Mª del Mar (Cádiz), se ha realizado una actuación experimental consistente en la instalación de tres segmentos cortos de dique TCT sobre la traza del dique de pié convencional de escollera de 1 a 3 tn construido en 1998. Este dique tipo Ahrens se hundió en el fondo de arena durante el primer invierno después de la construcción, posiblemente por la socavación y los procesos de licuefacción de arenas inducidos por el oleaje.

La playa de Santa María del Mar, en el casco urbano de la ciudad de Cádiz (ver figura 12), que actualmente es una playa de arena dorada de 450 metros de longitud, no era accesible en pleamar hasta que en el año 1985 se hizo una alimentación artificial con arena procedente de marismas y se construyeron dos espigones laterales de contención construidos sobre fondo rocoso (ver figura 13). Desde 1985 es una playa urbana muy concurrida con bañistas y practicantes del surf. La playa de Santa Mª del Mar había perdido gran parte de su arena en 1996 por lo que se construyó (sobre fondo de arena) la prolongación del espigón Norte en 1997 y un dique sumergido de cierre a tres metros de profundidad (BMVE), de 400 metros de longitud y dos metros de altura sobre lecho marino. El objetivo de estas obras era frenar la salida de arena de la playa que se había observado en la década anterior sin perjudicar la excelente opinión que de la playa tienen los gaditanos.

Ante la observación del hecho insólito de la desaparición del dique de pié en el invierno de 1998, se sospechó de un fenómeno de licuefacción de arenas inducido



Figura 12. Playa de Santa M^a del Mar.

por el oleaje en el que la escollera del dique de pié podría haberse hundido en el fondo marino y desaparecer de la vista en pocos meses. Para verificar la posición de la escollera, se realizó en marzo de 2002 una campaña de sondeos con lanzas de agua (Fondemar, 2002) que identifican "sustrato duro" ente 1,5 y 2 metros de profundidad. Los perfiles del sondeo mediante lanzas de agua son compatibles con la explicación más sencilla: las piedras de 1 a 3 tn que constituían el dique de pié se hundieron en la arena del fondo marino por un proceso de socavación primero y licuefacción después esparciéndose en una anchura de 20 a 30 metros siguiendo la traza del dique de pié hasta encontrar el sustrato duro situado entre dos y tres metros por debajo del fondo (ver Figura 15). La granulometría de la playa (noviembre 2005) es de: $D_{50}=0,35$ mm en la orilla, $D_{50}=0,23$ mm a dos metros de profundidad, $D_{50}=0,21$ mm a tres metros de profundidad y $D_{50}=0,15$ mm a cinco metros de profundidad. La carrera de marea es de 2,8 metros.

La playa de Santa María del Mar, en su extensión actual, no es una playa natural sino que es el resultado de la alimentación artificial realizada en las últimas dos décadas; por consiguiente, debe asumirse un cierta inestabilidad general que tienda a sacar

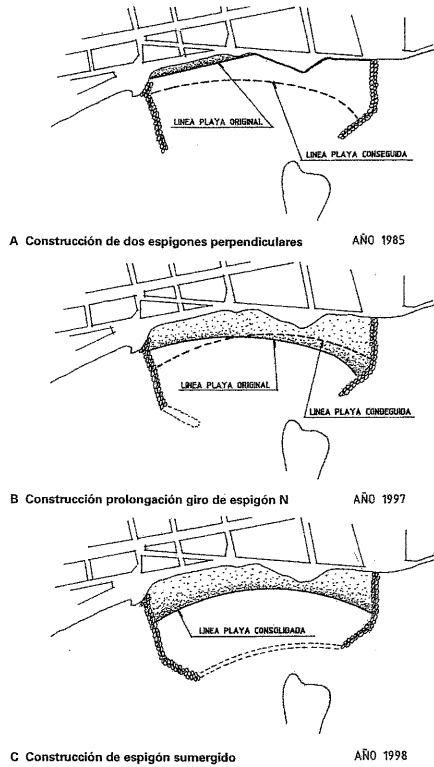


Figura 13. Espigones de Santa María del Mar (1985-1998).

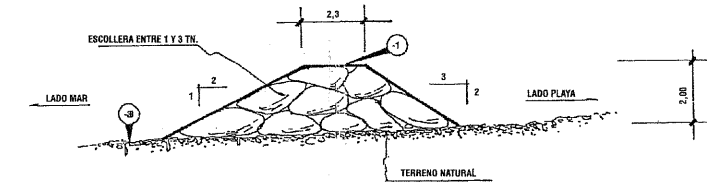


Figura 14. Dique de pié en Santa María del Mar (1998).

arena de la playa. Esta playa tiene además tres características que favorecen los procesos de socavación y licuefacción y de arenas: (1) la arena de la playa forma una capa de pocos metros sobre sustrato rocoso impermeable, (2) la carrera de marea llega a los 2,8 metros afectando el nivel freático de la playa y el istmo de Cádiz junto a la playa y (3) los movimientos de arena en la playa son importantes dependiendo sobretodo de la dirección e intensidad de los temporales. La arena que sale del espacio entre espigones tiende a pasar a la playa de La Victoria situada al Sur ya que el transporte general de sedimentos es de unos 27.000 m³/año hacia el Sur (ver Gómez-Pina *et al.*, 2004). Por su parte, además de la alimentación artificial inicial, la playa de Santa M^a del Mar ha recibido recargas sucesivas durante las últimas dos décadas a un ritmo medio de unos 20.000 m³/año.

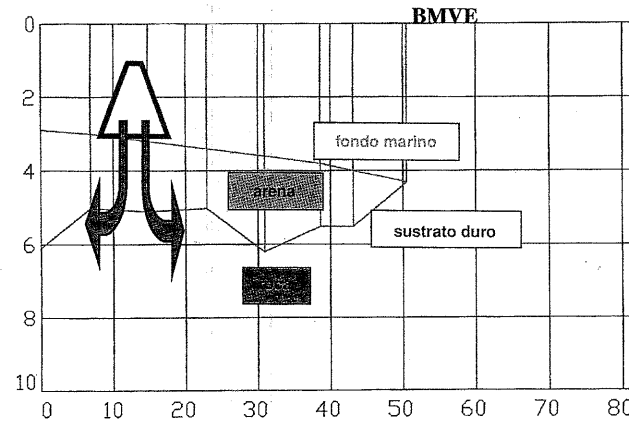


Figura 15. Perfiles del sondeo mediante lanza de agua P03 (2002).

ACTUACIÓN EXPERIMENTAL EN LA PLAYA DE SANTA M^a DEL MAR (CÁDIZ)

Ante el fallo completo e inesperado de la solución convencional de escollera en 1998, la dificultad de aplicar una solución convencional, se decidió evaluar la construcción de un dique de pie con elementos modulares prefabricados, especialmente indicados para espacios ambientales sensibles. Los elementos del dique modular se fabrican fuera de la playa y se pueden dismantelar con relativa facilidad, reduciendo al mínimo el impacto ambiental de la intervención. Para probar el comportamiento de estos elementos prefabricados, se definió la *Actuación Experimental de "Dique Sumergido en la Playa de Santa M^a del Mar (Cádiz) Mediante Módulos de Hormigón Prefabricados"* consistente en la instalación de tres segmentos cortos de dique TCT modular en diferentes puntos de la playa siguiendo la traza del dique de pié hundido en 1998, dos sin banquetta y uno con banquetta de gravas. El objetivo principal de la Actuación Experimental era comprobar las dificultades constructivas y verificar los procesos de asentamiento de la estructura por socavación y licuefacción, así como los efectos sobre la playa.

Las obras de instalación de los elementos modulares se adjudican a NECSO que con la asistencia de la empresa de trabajos subacuáticos local DIVERSHIP realizaron la instalación y montaje de los tres diques modulares cortos en otoño de 2005. Por su parte, el proceso de seguimiento y control sistemático (antes, durante y después de la instalación) de los elementos modulares y la playa han sido realizado por el

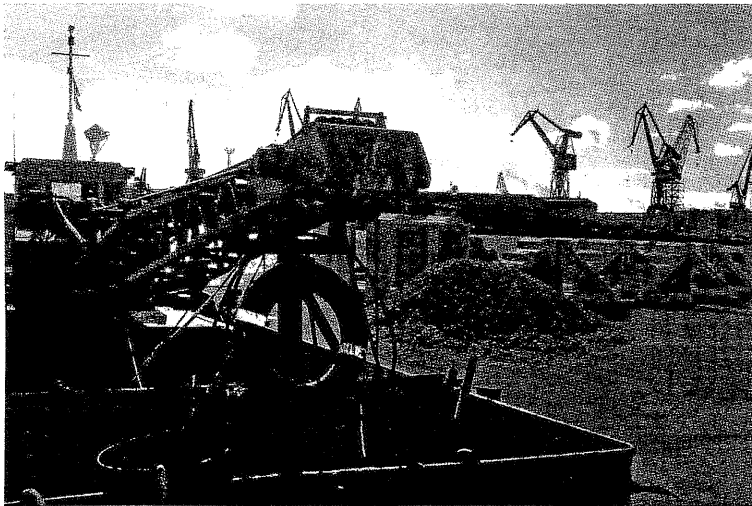


Figura 16. Embarcación atracada en el Puerto de Cádiz y módulos en el muelle.

Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Cádiz. Los módulos fueron transportados por carretera desde la planta de prefabricados de GH en Benisanó (Valencia) al Puerto de Cádiz en septiembre de 2005 y desde allí a la playa de Santa M^a del Mar con un gánguil autopropulsado con grúa de 15 tn (ver figura 16) que calaba en carga 2,5 metros y podía transportar en cántara los módulos de cada segmento de dique.

El rendimiento de los trabajos de instalación del gánguil de la figura 16 resultó ser muy bajo si el mar no estaba totalmente en calma; esto dilató la instalación más de lo previsto, quedando terminada la instalación en noviembre de 2005. Así pues, se han instalado tres segmentos cortos de dique modular TCT (ver Figuras 2 y 4) siguiendo aproximadamente la traza del dique de pié hundido en 1998 que une los morros de los dos espigones laterales de la Playa de Santa M^a del Mar. Se colocaron siguiendo la traza con una longitud en coronación de 6 metros y una disposición abierta con banquetta de grava en el caso del dique 3 y cerrada en los extremos con módulos triangulares en el caso de los diques 1 y 2. La figura 17 muestra la posición relativa de los tres diques y un conjunto de bloques cúbicos de 8 tn, así como módulos cuyo asentamiento se ha controlado en el seguimiento de los procesos de socavación y asentamiento. La figura 18 muestra un esquema de los procesos de socavación y asentamiento de los diques modulares que se analizan.

Además de las batimetrías y perfiles de playa, el control de los asentamientos de las estructuras se realizó con dos mareógrafos autónomos de presión (Aqualogger520pt de Aquatek) instalados en la base superior de los diques 2 y 3 que miden las diferencias de presión equivalentes al peso de la columna de agua-atmósfera situada sobre la vertical y referida a un nivel de referencia propio; estas diferencias de presión se traducen posteriormente a elevaciones hidrostáticas independientemente del efecto estático de la presión atmosférica. Un asentamiento del dique origina un desplazamiento vertical negativo del cero del instrumento y por tanto un aumento de la altura del nivel del mar, de este modo, se puede medir la evolución en el tiempo de la

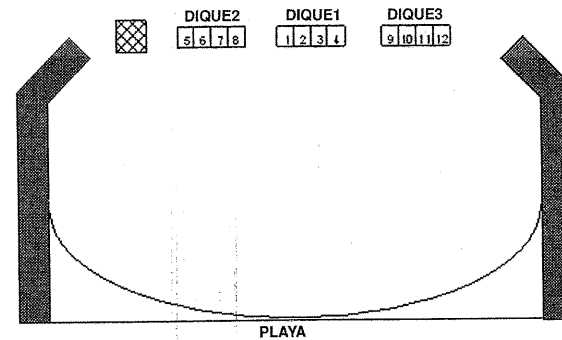


Figura 17. Posición de los diques y módulos para el control de asentamiento.

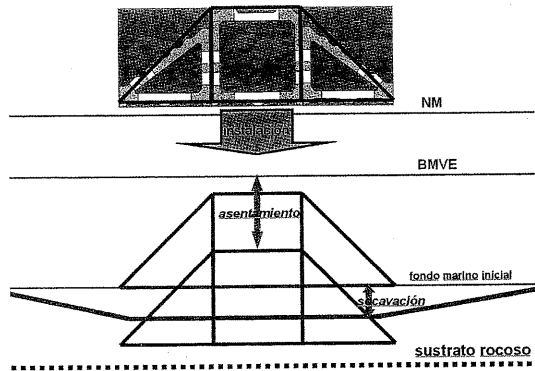


Figura 18. Esquema de asentamiento y socavación del dique modular TCT en Santa Mª del Mar.

variable "asentamiento". Al instalar los mareógrafos en los diques se referenció mediante topografía de precisión el cero del instrumento a un clavo en tierra, el cual a su vez esta referenciado a la BMVE, es decir al cero hidrográfico o datum de la zona, lo que permitirá estimar los movimientos verticales de los diques respecto a este nivel. La figura 19 muestra la variabilidad temporal de la altura del nivel del mar durante el mes de diciembre de 2005 obtenida a partir de los registros de los dos sensores de presión instalados observándose un fuerte asentamiento las semanas

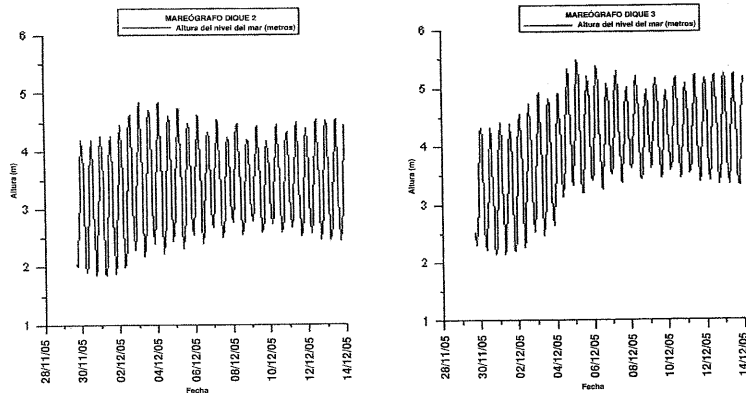


Figura 19. Altura del nivel del mar registrado por los mareógrafos instalados en los diques 2 y 3.

siguientes a la instalación y después una cierta estabilización. A partir de estos registros se ha podido determinar la variabilidad temporal del asentamiento para cada dique y donde se aprecia que existe un pequeño basculamiento en los módulos.

Además de los sensores de presión continuos, se han instalado "chapas" de referencia en la parte superior de cada uno de los módulos cuadrados y se ha realizado el levantamiento de precisión correspondiente con una frecuencia mensual. El seguimiento continúa pero pueden adelantarse algunas observaciones de carácter general referidas al esquema de la figura 18:

1. El asentamientos diferencial máximo observado (módulos de un mismo dique) ha sido de 25 cm (12 módulos monitorizados).
2. Los diques 1 y 2 (sin banquetta) han asentado aproximadamente 1.5 metros en el primer mes después de la instalación y se han estabilizado después. El dique 3 (con banquetta de gravas) ha tenido un asentamiento más lento, aproximadamente un metro de asentamiento el primer mes y 30 cm el segundo mes después de la instalación.
3. Las profundidades de socavación observadas en los diques varían entre el 10% y el 90% del asentamiento observado. Esto indica procesos de llenado y vaciado de la zona de socavación alrededor de las estructuras.

La figura 20 muestra los descensos observados en el dique 1 para cada uno de los módulos cuadrados en relación al nivel de BMVE y del fondo duro estimado con los sondeos con lanzas de agua de Fondemar (2002). En este caso, la "chapa 4" resultó dañada en el proceso de instalación y fue eliminada del seguimiento.

La figura 21 muestra una representación 3D de la posición final estimada de los diques modulares instalados en la playa de Santa Mª del Mar después de un primer

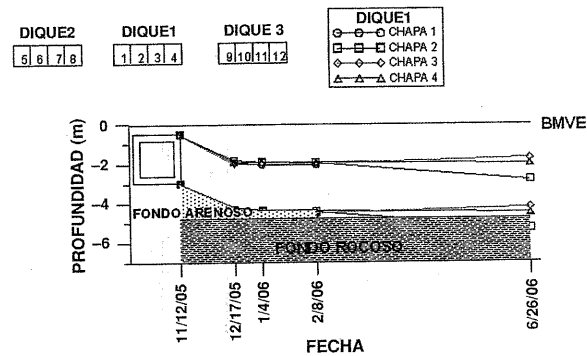


Figura 20. Descensos observados en los módulos cuadrados del dique 1.

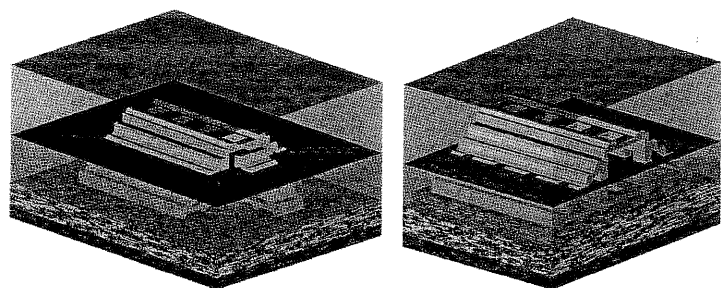


Figura 21. Representación 3D de la posición final estimada de los diques modulares.

invierno relativamente suave, respecto del fondo marino original situado en BMVE a $h = 3$ metros.

Los diques modulares TCT instalados son obstáculos pequeños de forma trapezoidal y cabe esperar asentamientos por socavación algo inferiores al 50% de la altura (ver Sumer and Fredsoe, 2002). Esta estimación general concuerda con las observaciones de Stauble and Tabar (2003) de los diques prefabricados *PEP* y *Beachsaver* (secciones triangulares de 1,8 metros de altura) indican asentamientos medios del 46% de la altura (*PEP* sin geotextiles) y del 38% de la altura (*Beachsaver* con geotextiles). En nuestro caso, los asentamientos observados son mayores de los teóricos (del orden de 1,5 metros) pudiendo, en algún caso, haber tocado el estrato duro inferior o alguna piedra apoyada en el estrato duro. Esto confirma las condiciones especialmente intensas de los procesos de socavación y licuefacción de arenas en la playa de Santa M^a del Mar. A pesar de que los elementos modulares tienen una densidad absoluta y aparente muy inferior a la de la escollera y los temporales en la zona no han sido especialmente duros, el asentamiento observado es muy importante y queda muy cerca del sustrato duro (límite físico del asentamiento).

Los procesos de socavación y licuefacción se retroalimentan ya que la socavación reduce las densidades relativas de la capa superficial y la licuefacción facilita la movilidad de los sedimentos y la erosión correspondiente. En el caso de la playa de Santa M^a del Mar, la existencia de un sustrato impermeable y duro a niveles muy altos, el oleaje intenso y las mareas favorecen la movilidad general de las arenas intensificando los fenómenos de socavación y licuefacción de arenas inducidas por el oleaje. El hundimiento rápido hasta la desaparición del dique de pie construido en 1998, las obras de refuerzo de 1999 (804 tn de escollera de 1 tn a 5 tn) del espigón Norte extendido sobre fondo arenoso en 1997 y el asentamiento progresivo hasta tocar el sustrato duro que se ha observado en la Actuación Experimental de 2005 reflejan una situación de playa sumergida con arenas de movilidad muy elevada donde los procesos de licuefacción pueden afectar a toda la capa arenosa sobre el sustrato duro que constituye la playa sumergida.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Este artículo describe el concepto de dique modular, los ensayos físicos 2D de transmisión a escala 1/10 y la Actuación Experimental de Santa M^a del Mar (Cádiz) dirigida a evaluar los procesos de asentamiento por socavación y licuefacción en la zona ante una posible utilización de elementos prefabricados para la construcción de un nuevo dique de pie entre los espigones de cierre. Desde el punto de vista funcional, el dique modular se comporta de manera análoga al convencional de sección similar con transmisiones algo inferiores si $CT > 40\%$ y algo superiores si $CT < 40\%$; sin embargo, el concepto modular permite minimizar el impacto ambiental y maximizar la reutilización, siendo especialmente indicado para las actuaciones en espacios muy sensibles.

La playa de Santa M^a del Mar es una playa urbana muy apreciada por los gaditanos con una afluencia muy importante de bañistas y surfistas. Tal y como se disfruta en la actualidad, es una playa artificial de arenas doradas apoyada entre dos espigones artificiales y con aportaciones periódicas de arena del orden de 20.000 m³/año. Para reducir estas aportaciones, en 1998 se construyó un dique de pie de escollera de 1 a 3 tn que se hundió por completo en el fondo marino ($D_{50} = 0,21$ mm) en el primer invierno, probablemente por los procesos de socavación primero y licuefacción después. Los sondeos con lanzas de agua realizados en 2002 parecen confirmar el hundimiento de la escollera hasta alcanzar el sustrato duro que existe unos dos metros por debajo del fondo marino. La existencia de un sustrato impermeable y duro muy alto, así como existencia de una marea importante (3,6 metros) y la movilidad de los sedimentos entre los espigones de cierre, plantean un escenario muy favorable a la socavación y licuefacción de arenas inducida por el oleaje.

Dada la conveniencia de construir un dique de cierre que permita reducir las aportaciones de arena a la playa de Santa M^a del Mar y el hundimiento de la solución convencional, se planteó la posibilidad de construirlo con elementos modulares especialmente indicados para actuar en zonas ambientales sensibles. Para evaluar la propuesta modular en un entorno muy desfavorable respecto a la licuefacción de arenas, se planteó la Actuación Experimental de Santa M^a del Mar (Cádiz) consistente en la instalación de tres segmentos cortos de dique modular TCT sobre la traza del dique de pie hundido en 1998. Los elementos modulares (12 C88 y 28 T70) fueron transportados por carretera sin problemas desde Valencia al Puerto de Cádiz. La instalación se realizó con un gánguil autopropulsado con grúa de 15 tn que calaba en carga 2,5 metros y podía transportar en cántara todos los módulos de un segmento de dique; los rendimientos de trabajo fueron muy grandes con el mar en calma total, pero muy bajos con agitación.

El seguimiento de la playa y de los asentamientos y socavación de los diques se inició antes de la instalación y continuó durante y después de la misma. Los trabajos de seguimiento están en curso pero se han podido extraer algunos datos y conclusiones preliminares que se describen en este artículo. Entre los equipos de seguimiento, se han utilizado dos registradores de presión para medir el asentamiento continuado de los diques 2 y 3 y se han realizado levantamientos con frecuencia mensual de todos los módulos cuadrados de los tres diques. Se han observado asentamientos diferenciales e incluso basculamientos de módulos con el paso del

tiempo; sin embargo, el hecho más relevante ha sido el asentamiento rápido y general de todos los diques del orden de un metro y un descenso lento progresivo después hasta alcanzar o casi alcanzar el sustrato duro situado entre 1,5 y 2,0 metros por debajo del fondo marino. La banquetta de gravas del dique 3 ha ralentizado un poco el asentamiento durante las primeras semanas pero no parece haber tenido efectos significativos 6 meses después de la instalación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado con los resultados de los Proyectos REFLOTA y PIMAR financiados por la Dirección General de Costas del Ministerio de Medio Ambiente. Se agradece también a Puertos del Estado el software NEUROPORT 2.0 que se ha utilizado en el estudio.

REFERENCIAS

- BRIGANTI, R.; VAN DER MEER, J. W.; BUCCINO, M. and CALABRESE, M., 2003: Wave Transmission behind Low-Crested Structures. *Proc. Coastal Structures 2003*, ASCE, 580-592.
- BURCHARTH, H., and LAMBERTI, A., 2004: Design guidelines of low crested structures. *Proc. 29th Int. Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 4126-4138.
- D'ANGREMOND, K.; VAN DER MEER, J. and DE JONG, R., 1996: Wave transmission at low-crested structures. *Proc. 25th Int. Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 2418-2427.
- DEAN, R. G.; CHEN, R. and BROWDER, A. E., 1997: Full scale monitoring study of a submerged breakwater, Plam Beach, Florida, USA. *Coastal Engineering*, 29(1997): 291-315.
- EUCC, 2003. Trends of Coastal Erosion in Europe. *Report of EUROSION Project*, Leiden (NL), June 2003, 108 p.
- FONDEMAR, 2002: Sondeo mediante lanzas de agua en la playa de Santa M^a del Mar (Cádiz). Informe para la Dirección General de Costas-Demarcación de Costas de Andalucía Atlántico, marzo 2002.
- GÓMEZ-PINA, G.; MUÑOZ, J. J.; FAGES, L.; RAMÍREZ, J. L.; ENRIQUEZ, J. and SOBRINO, J., 2004: A critical review of urban beach nourishment projects in Cádiz city alter twelve years, *Proc. 29th Int. Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 3454-41383466.
- MANSARD, E. P. D. and FUNKE, E. R., 1980: "The measurement of incident and reflected reflected spectra using a least squares method." *Proceedings of the 17th ICCE*, ASCE, 154-172.
- MEDINA, J. R. y SERRA, J., 1987: Arrecifes Artificiales (I). Problemas Pesqueros y de Protección de Costas. *Revista de Obras Públicas*, (Madrid), Nov. 1987, 725-735.
- MEDINA J. R.; TINTORÉ, J. y DUARTE, C. M., 2001: Las praderas de *Posidonia oceanica* y la regeneración de playas (in Spanish). *Revista de Obras Públicas*, 3409, 31-43.
- MEDINA, J. R., 2001: Estimation of Incident and Reflected Waves Using Simulated Annealing. *J. Wtrwy., Port., Coast. and Oc. Engrg.*, ASCE, 127(4), 213-221.
- MEDINA, J. R.; GONZÁLEZ-ESCRIVÁ, J. A.; J. GARRIDO and DE ROUCK, J., 2002: Overtopping Analysis using Neural Networks. *ICCE'2002*: 2165-2177.
- MEDINA, J. R., 2003: *Manual de Usuarios del Programa NEUROPORT 2.0*. Informe para Puertos del Estado, mayo de 2003.
- MEDINA, J. R., 2005: Modelo Neuronal para Estimar Transmisión y Reflexión del Oleaje en Diques Exentos Modulares. *VIII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puerto (en prensa)*
- MEDINA, J. R.; MUÑOZ, J. J. and GÓMEZ-PINA, G., 2006: Transmisión and reflection of modular detached breakwaters, Abstract ICCE 2006.
- MUÑOZ-PÉREZ, J. J.; LÓPEZ DE SAN ROMÁN, B.; GUTIERREZ-MA, J. M.; MORENO, L. and CUENA G. J., 2001: Cost of beach maintenance in the Gula of Cádiz (SW Spain). *Coastal Engineering* 42 (2001): 143-153.
- RAUCH, H. G., 1989: Prefabricated erosion prevention wall. US 4.818.141; 4 III 1989.
- RAUCH, H. G., 1992. Submerged breakwater and barrier reef. US-5.120.156; 9 VI 1992.
- RODRÍGUEZ, J.; GARRIDO, J. y MEDINA, J. R., 2003: Estudio de diques sumergidos prefabricados para la protección de costas (in Spanish). *CD-ROM de Ponencias VII JEPyC*, FF Ingeniería del Agua.
- RODRÍGUEZ, A.; GÓNGORA, A. y MEDINA, J. R., 2004: NEUROPORT, la aplicación de redes neuronales en el ámbito portuario. *Puertos*, Madrid, enero/febrero 2004, 57-64
- STAUBLE, D. K. y TABAR, J. R., 2003: The use of submerged narrow-crested breakwaters for shoreline erosion control. *Journal of Coastal Research*, 19(3): 684-722.
- SUMER, B. M. and FREDSOE, J., 2002: *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*. World Scientific, London.
- YEPES, V. and MEDINA, J. R., 2005: Land Use Tourism in Spanish Coastal Areas. A Case Study of the Valencia Region. *Journal of Coastal Research*, SI 49 (Proc. Of the 2nd Meeting in Marine Sciences), 83-88, Valencia-Spain.