

Diques Sinusoidales^(*)

Por E. COPEIRO DEL VILLAR

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Se presenta un tipo de dique cuya planta es de forma sinusoidal, discutiéndose su comportamiento hidráulico, sus aptitudes como espacio de paseo/solárium/acceso al baño, y sus características paisajísticas. Se plantean aplicaciones concretas de este tipo de obra en proyectos de playas artificiales y defensa de costas.

INTRODUCCION

En los proyectos de diques rompeolas está ocurriendo, con frecuencia creciente, que deben satisfacerse determinados requisitos de orden urbanístico y estético además de los relativos a efectividad hidráulica. A medida que aquellos requisitos van haciéndose más exigentes, va resultando también más claramente insuficiente el satisfacerlos adecuadamente mediante añadidos complementarios a un diseño «tradicional» de dique. Los diseños más eficaces para estos diques multifuncionales serán, necesariamente, un producto interactivo de los criterios de funcionalidad hidráulica, urbanística y estética que se establezcan como requisitos de partida. Como consecuencia de emplear este punto de vista para el diseño aparecen tipos de dique nuevos, que pueden resultar sustancialmente diferentes de los tradicionales tanto en sus formas como en su estructura y métodos de cálculo.

El «dique sinusoidal» es uno de aquellos diques multifuncionales, de tipo «bajo y ancho», cuya característica específica más importante es que en su diseño hidráulico se utilizan plenamente las tres dimensiones espaciales, en lugar de dos como ocurre con los diques tradicionales. Esta ampliación dimensional produce un tipo de estructura formal que combina más eficazmente la eficiencia hidráulica con las aptitudes urbanísticas usualmente requeridas y con una estética atractiva. En los apartados que siguen se describe este tipo de dique, se presentan algunos diseños concretos, y se le en-

marca en la tipología general de los diques rompeolas. A este artículo, básicamente descriptivo, seguirá otro en el que se discutirán criterios de cálculo.

1. DIQUE SINUSOIDAL

1.1. Diseño hidráulico

En la figura 1 se comparan las plantas de dos diques de sección simple rectangular. Se les supone de coronación baja respecto a la cresta de la ola incidente. El superior tiene eje rectilíneo, es decir se trata de una estructura convencional, hidráulicamente bidimensional. Al inferior se le ha dado forma ondulada, representable por una senoide, y su funcionamiento hidráulico es tridimensional. La superficie de coronación (y, por lo tanto, el volumen) de los dos diques es igual, ya que en ambos es igual, y constante, su anchura en la dirección de avance de la ola incidente (se supone que el oleaje llega con las crestas paralelas al eje del dique rectilíneo). El diseño sinusoidal del dique inferior le proporciona dos mecanismos adicionales para la amortiguación de la energía de olas:

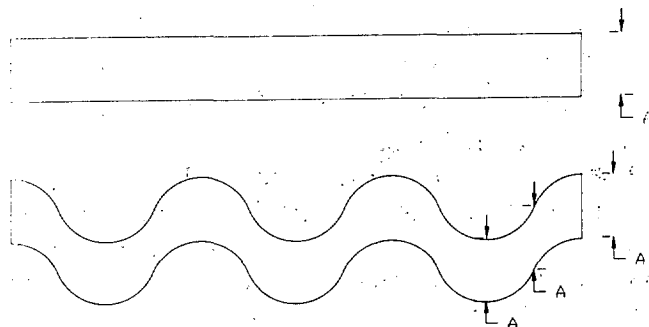


Fig. 1.—Dique-recto vs. dique sinusoidal; sección rectangular.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de enero de 1990.

La interferencia lateral de flujos en el parámetro frontal del dique; y la dispersión radial del oleaje generado por los rebases al otro lado del dique:

- * En el frente del dique, las crestas de la sinusoide dividen parte de la ola incidente en flujos diferenciados, que son canalizados lateralmente de forma que terminan colisionando entre sí, por parejas, en los senos de la sinusoide, con la consiguiente disipación de energía.
- * El oleaje que rebasa el dique no llega al otro lado de este con condiciones uniformes, sino que se concentra detrás de los senos. El oleaje que generan los rebases concentrados en esos puntos se amortigua al alejarse del dique, por dispersión radial e interferencias laterales.

La transmisión del oleaje de uno al otro del dique disminuye al aumentar la anchura de este. No obstante, por razones que se expondrán en el apartado 3.2., no resulta práctico ensanchar la coronación más allá de una determinada «anchura óptima». Si se quiere llegar a coeficientes reducidos de transmisión es preciso acudir a otro tipo de medidas.

La forma en que el dique sinusoidal entredivide y canaliza el flujo de ola incidente, sugiere la siguiente forma de incrementar el grado de protección ante el oleaje:

- * En las crestas de la sinusoide, donde se separan flujos, se puede interceptar una mayor porción de la cresta de la ola incidente colocando sobre la coronación una pieza deflectora con planta en punta de flecha enfrentada al oleaje.
- * En los senos de la sinusoide, donde convergen los flujos, un botaolas situado en la trasera de la coronación deflecta hacia arriba el agua que se reúne en esa zona, con la consiguiente disipación de energía.

La posición adecuada de esas piezas, y su altura, se establecen a partir de la trayectoria de la cresta de la ola de cálculo que rompe contra el dique. Variando las dimensiones de estas piezas puede conseguirse cualquier coeficiente de transmisión, incluido el nulo.

Como muestra de la aplicación práctica de

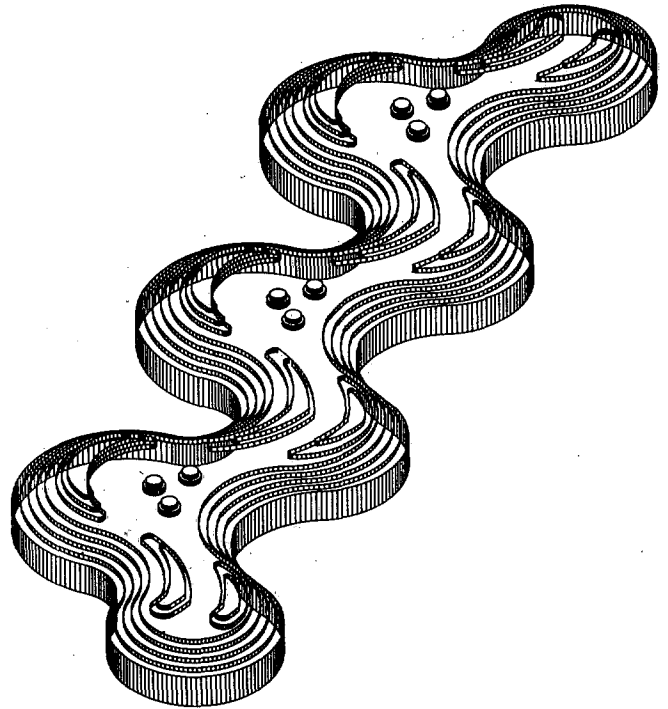


Fig. 2.—Dique sinusoidal (perspectiva isométrica semitransparente).

estos criterios de diseño, en la figura 2 se ha representado un dique sinusoidal diseñado para defender un tómbolo artificial completo en un lugar con las siguientes condiciones ambientales: Carrera de marea: 2,5 m; Profundidad en la bajamar viva: 6,7 m; Altura de ola de cálculo: 5,2 m. La plataforma de coronación del dique está 0,5 m por encima del nivel de la pleamar viva de cálculo.

Observaciones acerca del empleo de los criterios anteriores en el diseño de este dique:

- * Las piezas deflectoras se desdoblan, formando una doble fila que sigue ambos bordes de la coronación del dique, para conseguir: 1. Una menor altura de cada pieza para el mismo grado de efectividad conjunta; 2. Una coronación apta para ser utilizada en su totalidad como paseo.
- * La anchura de la coronación es mayor en la zona de convergencia de flujos (senos), que en la zona de separación de flujos (crestas), por los dos motivos siguientes:
 1. Las piezas deflectoras presentan una planta fuertemente convexa al oleaje, por lo que el «run-up» sobre ellas es

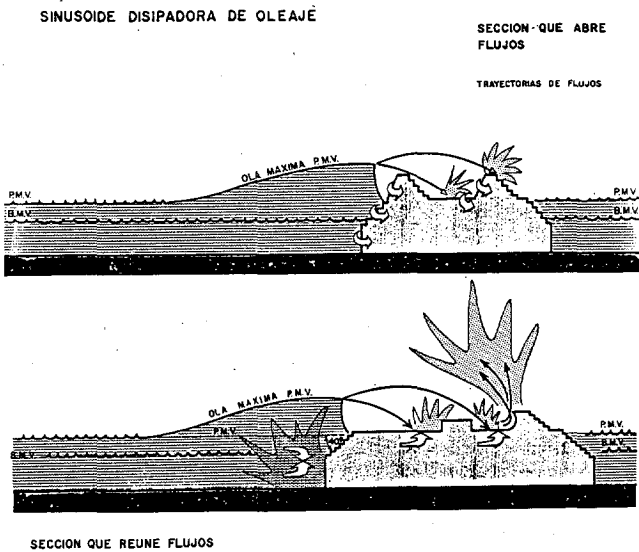


Fig. 3.—Dique sinusoidal: Incidencia de la ola de cálculo en dos perfiles.

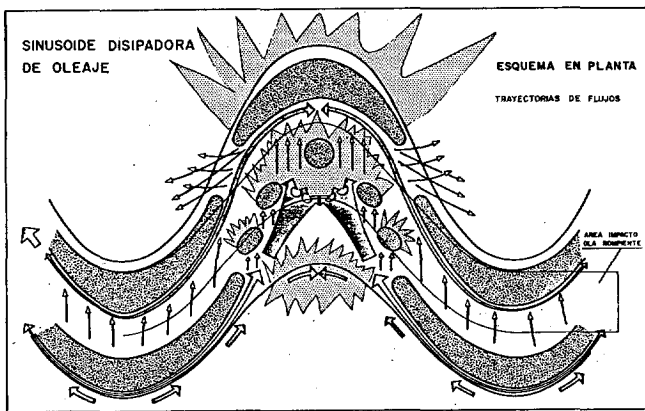


Fig. 4.—Dique sinusoidal: Colisión de flujos en planta.

escaso y las piezas pueden colocarse de forma que interceptan directamente la trayectoria en vuelo de la cresta rompiente (fig. 3, arriba). En cambio, las piezas con botaolas tienen planta cóncava hacia el oleaje, y para que su funcionamiento hidráulico sea efectivo deben colocarse más allá de la zona de caída de la cresta rompiente sobre la plataforma de coronación del dique (fig. 3, abajo).

2. El retranqueo suplementario que se da con esta medida a las piezas deflectoras respecto a las receptoras, mejora la efectividad de flujos que tiene lugar

sobre la coronación del dique. En la figura 4 se esquematiza el funcionamiento en planta de los mecanismos de disipación de energía de ola por colisión de flujos.

- * El espaciamiento lateral y la amplitud de las oscilaciones de la planta del dique deben ser suficientes para conseguir que la cresta de la ola incidente sea dividida con efectividad en flujos independientes. Con este fin se ha adoptado para este dique un espaciamiento de $1/4$ de la longitud de onda local de cálculo.
- * En las áreas de convergencia de flujos (senos), la plataforma de coronación es amplia y permite la colocación de piezas suplementarias de tamaño modesto, sin perjuicio de su funcionalidad como paseo. En el dique de la figura 2 se han colocado piezas cilíndricas de dimensiones adecuadas para servir como disipadores de energía y como bancos.

1.2. Aspectos urbanísticos y estéticos

La coronación del dique es apta para ser utilizada como paseo. Si el dique está conectado con tierra, se le puede integrar en el paseo marítimo llevando hasta aquel una ramificación de este último. Con un pavimentado de calidad y una construcción cuidadosa de las piezas deflectoras y receptoras de flujos, la coronación de este tipo de dique puede integrarse dignamente en paseos marítimos de alto nivel estético.

El dique de la figura 2 tiene todo el contorno escalonado hasta 0,5 m por debajo de la bajamar viva, con objeto de permitir un acceso cómodo al agua en cualquier punto y a cualquier hora de cualquier día. Durante las horas de baño toda la superficie del dique puede utilizarse como espacio de reposo junto al agua, con un uso similar al espacio playero. Frente a la mayor comodidad de la arena de la playa, el dique aporta la posibilidad de instalarse a distintas alturas con distintas panorámicas del mar y la playa, y una mayor separación física entre los usuarios. Las piezas deflectoras y receptoras de flujos tienen el contorno escalonado, de modo que hay una diversidad de espacios don-

de colocarse. La cara frontal de las piezas deflectoras de oleaje va también escalonada, lo que no disminuye su efectividad porque el salto vertical de los escalones es de 0,5 m. Con este salto, las condiciones de reflexión y rebalse son los mismos que los de una pared vertical (ref. 8). La única excepción al escalonamiento de la coronación del dique es el frente de las piezas receptoras de flujo que, como se indicó anteriormente, tiene perfil en botasolas.

Algunas observaciones sobre la utilización del dique como área de solárium y acceso al baño:

- * Los graderíos del contorno del dique que están bañados por la marea pueden resultar resbaladizos si crecen ciertas algas sobre ellos. Este es un problema común en las piscinas intermareales, naturales y artificiales, que son muy populares en costas rocosas con clima cálido de diversos lugares del mundo, como Canarias o Sudáfrica. El problema se resuelve pintando periódicamente los escalones con cal (ref. 4), lo que, además de inhibir el desarrollo de algas, produce una superficie blanca que no se calienta con el sol, con las consiguientes ventajas para los pies descalzos.
- * Una medida que incrementa la seguridad del uso del graderío lateral es incorporar barandillas en hileras verticales espaciadas adecuadamente. Las barandillas (que pueden ser, por ejemplo, de tubo metálico o sintético), embutidas en el piso de mortero u hormigón, resisten bien el oleaje rompiente en piscinas intermareales canarias.
- * Independientemente de lo anterior, es necesario establecer un servicio de seguridad que impida el uso del dique para el baño cuando el oleaje lo haga peligroso. El contorno interior del dique estará raras veces en esa situación de peligro. Este control es habitual en piscinas intermareales, como también lo es en las playas concurridas de todos los litorales turísticos, y debería implantarse igualmente en los diques de protección de playas, sean o no paseables. En Canarias, donde el oleaje oceánico de período largo se eleva súbitamente al llegar al dique, se dan, con una frecuencia indeseable, accidentes debidos a que alguien

ha sido sorprendido por una ola mientras estaba en el escollero del dique (los diques son utilizados por el público, estén o no previstos para ello). En cualquier caso, si uno tiene que escapar de una ola inesperadamente alta, es mejor tener delante un graderío y una barandilla de seguridad que un talud de grandes cantos.

- * Es aconsejable utilizar mortero de color claro en las superficies horizontales del dique, para que estas no se recalienten con el sol. Si las superficies verticales tienen un color más oscuro esto no sería necesariamente un inconveniente paisajístico: El dique tiene una estructura visual aterrazada, y el descomponerla en franjas de dos colores o tonos que se alternan puede resultar paisajísticamente interesante si el contraste entre los colores o/y tonos elegidos es acertado.

En cuanto a las características paisajísticas generales del dique sinusoidal: Es un tipo de obra visualmente amena, con una silueta rítmica que va cambiando de proporciones aparentes rápidamente a medida que el observador se desplaza lateral o verticalmente. En las figuras 5 a 8 se muestra el aspecto de diques sinusoidales en las siguientes situaciones. Figuras 5 y 6: Vistas del Dique de la figura 16 (Canarias), en pleamar y bajamar vivas respectivamente; figuras 7 y 8: Vistas frontal y lateral de una pareja de diques sinusoidales que defienden sendos tómbolos en la costa mediterránea (marea escasa; profundidad en los diques: 4 m).

1.3. Aspectos estructurales

Ninguna zona del dique sufre impactos violentos por parte del oleaje, debido a los siguientes elementos del diseño:

- * El frente del dique tiene una inclinación de 40.º en toda su parte emergida (a cualquier nivel de la marea), condición que excluye impactos violentos en cualquier caso (ref. 1). Este talud es además adecuado para diseñar un graderío utilizable por el público.
- * Las piezas deflectoras cumplen la misma condición anterior, y además presentan una planta convexa al oleaje incidente. Cualquiera de esas dos condiciones basta

DIQUES SINUSOIDALES

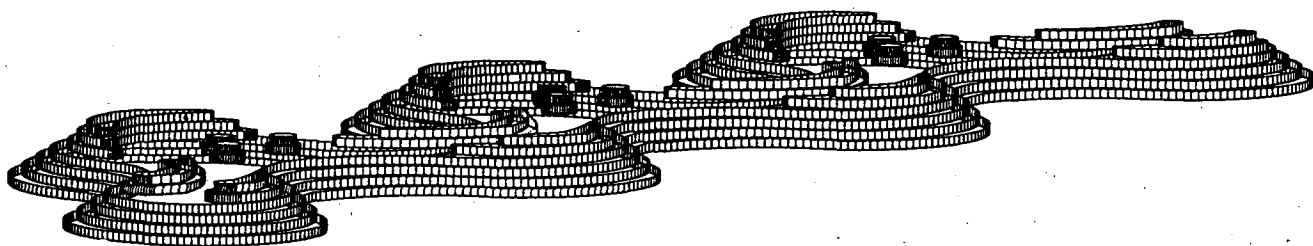


Fig. 5.—Dique sinusoidal de la fig. 2: Pleamar viva.

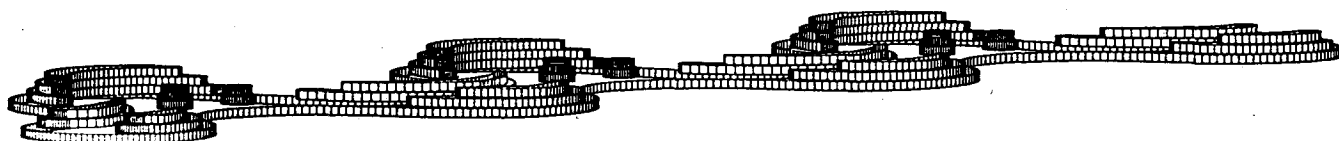


Fig. 6.—Dique sinusoidal de la fig. 2: Bajamar viva.

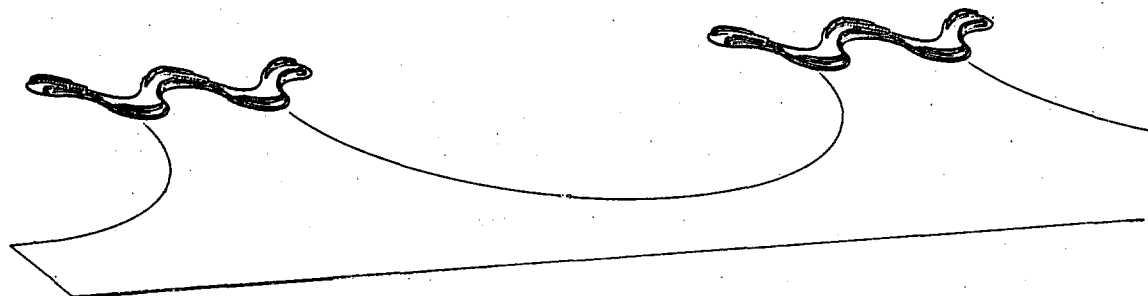


Fig. 7.—Diques sinusoidales defendiendo tómbolos (Mediterráneo); vista trasera.

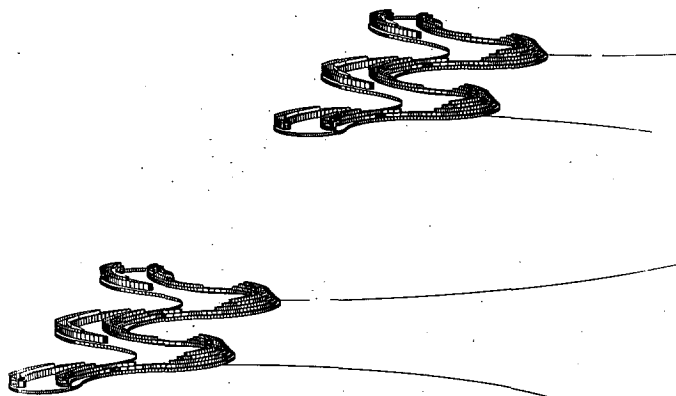


Fig. 8.—Diques sinusoidales defendiendo tómbolos (Mediterráneo); vista lateral.

para excluir impactos violentos (refs. 1, 8).

- * Las piezas receptoras de flujos están situadas fuera del alcance de la caída directa de la ola incidente, por lo que tampoco reciben impactos violentos.

Probablemente la disposición estructural más conveniente para este tipo de dique consiste, en la mayoría de los casos, en un núcleo de escollera recubierto de una capa de mortero. Este puede ponerse en obra por medio de encofrados permeables de geotextil, con la colaboración eventual de encofrados rígidos permeables y removibles. La ausencia de impactos violentos de ola permite recubrimientos relativamente ligeros y, por lo tanto, de coste asequible.

En ese tipo de diseño estructural es importante minimizar asientos diferenciales, lo que se consigue con un dimensionamiento y una distribución adecuados de los tamaños de la escollera del núcleo, e interponiendo una membrana-filtro entre el núcleo y el suelo si este es sedimentario. Por otra parte, se puede dar un grado apreciable de flexibilidad a la cubierta articulándose en losas cuyo contacto mutuo permite pequeños giros. Se puede diseñar una cubierta con esta característica utilizando en-

cofrados de geotextil.

En el apartado siguiente se muestra el empleo de un dique sinusoidal en un proyecto de playa artificial para Playa Honda (Las Américas, Tenerife; ref. 5). En este proyecto se ha empleado también el concepto de dique sinusoidal para diseñar obras especiales destinadas a proteger un desagüe de pluviales y a rematar los extremos de dos espigones.

2. PROYECTO DE PLAYA ARTIFICIAL EN PLAYA HONDA

Esta playa, situada en la costa occidental de la isla de Tenerife, requiere un grado de protección para mantener una superficie de arena extensa y estable, debido a la concurrencia de los siguientes factores:

- La playa está sujeta con frecuencia a oleaje oceánico potente de períodos largos.
- La carrera de marea es de 2.5 m.

- El perfil costero sumergido natural es relativamente empinado, por lo que el dique más profundo llega a alcanzar 9.2 m de calado en la pleamar viva.
- La arena disponible para el aporte tiene un diámetro medio de 0,25 m.

Se van a comentar cuatro elementos de este proyecto (fig. 9):

2.1. Dique Sinusoidal

El tramo de dique sinusoidal que figura en el proyecto protege uno de los extremos de la playa artificial, donde la playa seca llega hasta el mismo dique. El dique está además unido a tierra por el encauzamiento (cubierto) de una salida de aguas pluviales, encauzamiento condicionado por un espigón preexistente (que es absorbido por el diseño interior del encauzamiento), y al que se ha dado tratamiento de paseo marítimo, incluyendo zonas ajardinadas, bares, locales de servicio de playa, etc. Las con-

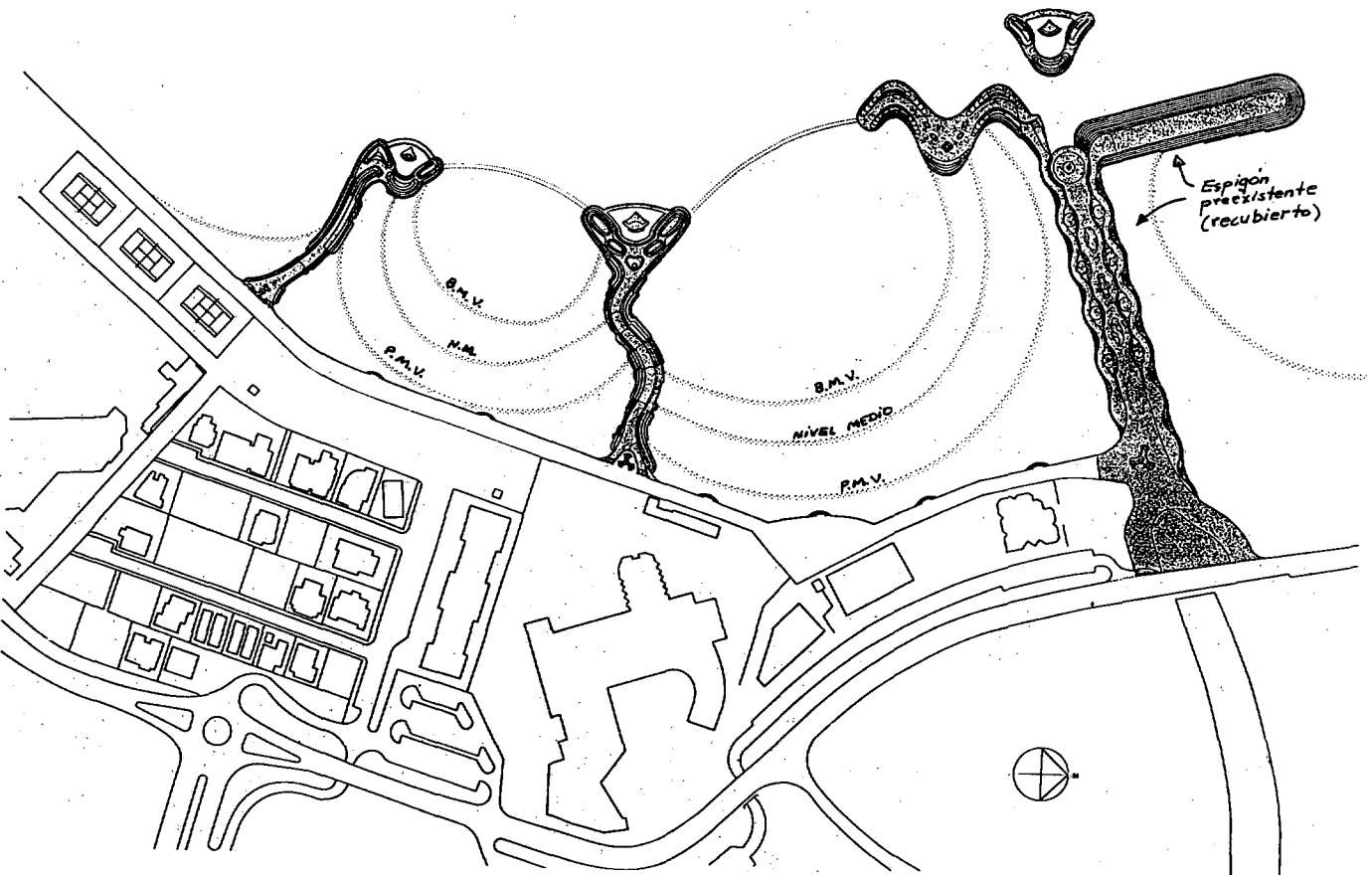


Fig. 9.— Proyecto de playa artificial en Playa Honda (Las Américas, Tenerife).

diciones de este dique son similares a las del dique de la figura 2.

2.2. Isla - Válvula

La isla situada enfrente de la salida del desagüe de pluviales es una obra que funciona como válvula, en el sentido de que impide la entrada de oleaje en el canal de desagüe sin obstaculizar la salida del agua a desaguar.

El problema que se resuelve con la isla-válvula es característico de playas artificiales que son atravesadas por desembocaduras de aguas pluviales, y cuya trasera está ocupada por urbanizaciones extensas situadas a baja cota sobre el mar. Cuando coinciden temporales de oleaje con lluvias intensas (lo que es relativamente frecuente), el oleaje obstaculiza la salida del agua drenada, que desborda el encauzamiento e inunda las áreas bajas situadas detrás de la playa. Dos circunstancias agravan este problema: 1. La nueva playa artificial es más alta (quizá un par de metros) que la preexistente, lo que eleva en la misma medida el nivel de inundabilidad del territorio situado detrás. 2. Las grandes superficies impermeables de la zona urbanizada producen escorrentías muy superiores a las del terreno natural preexistente, con lo que el caudal a desaguar aumenta drásticamente en las tormentas.

Como obra de protección ante el oleaje, la isla funciona como un tramo de dique sinusoidal (un sólo seno). Su planta en forma de vaso tumbado hace que presente una baja resistencia hidráulica al paso de la corriente de salida del desagüe.

En la figura 10 se esquematiza el funcionamiento de la isla como mecanismo de disipación/reflexión del oleaje. Principales variaciones que se han hecho en el diseño respecto a un «seno» de dique sinusoidal:

- * El borde frontal de la obra es convexo hacia mar abierto, en lugar de cóncavo, porque en este caso (dique de longitud mínima), la reflexión radial que produce aquel borde convexo siempre se dirige hacia fuera de la zona protegida por la obra.
- * Se añade una pieza deflectora en el centro del contorno exterior, de modo que el flujo incidente deflectado por esta pieza

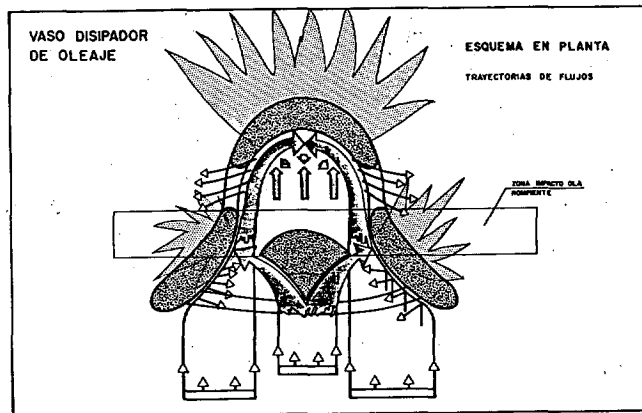


Fig. 10.—Isla-válvula: Colisión de flujos en planta.

colisiona contra los brazos laterales de la (única) pieza receptora de flujos.

- * El espacio interior de la isla, donde tiene lugar la interacción lateral de flujos y la caída de la cresta de la ola incidente, se deja en hueco, formando una cámara de amortiguación de oleaje que, al mismo tiempo, tiene la utilidad complementaria de servir como piscina a cualquier nivel de la marea.

Los contornos interior y exterior de la isla son escalonados, y tienen dimensiones adecuadas para que toda la obra emergida sirva como espacio de reposo/solárium y centro de encuentros, para bañistas que accedan a la obra: Ya sea nadando, o sobre flotadores de playa o embarcaciones ligeras.

2.3. Cabeza de los espigones

Los dos espigones meridionales de la playa llevan en su exterior una obra idéntica a la isla-válvula. Esta obra de cabeza, que en un espigón en «T» correspondería al tramo corto de dique paralelo a la playa, tiene las siguientes funciones:

- * Proteger un tramo de playa ancho y estable en el entorno de los espigones.
- * Las corrientes de retorno en chorro, que siempre son canalizadas por los lados del espigón durante los temporales, son dirigidas, por la forma del contorno de la obra, de manera que su trayectoria de salida se mantiene dentro del recinto limitado por el dique sumergido frontal y los propios espigones. De este modo se minimi-

zan las pérdidas de arena (que es fácilmente arrastrable por las corrientes de retorno en chorro) en temporales. El oleaje potente es frecuente en esta costa, de modo que esas pérdidas podrían ser grandes, por más que todavía no hay disponibles métodos de cálculo que permitan cuantificarlas con fiabilidad alguna.

- * Bajo el punto de vista urbanístico, las cabezas de los espigones, que están colocadas al final de sendos ramales del paseo marítimo (los cuales discurren sobre la coronación de los espigones) contribuyen a la amenidad de una playa que se prevé densamente utilizada. Por ejemplo, estas obras sirven como piscinas tranquilas para niños, a cualquier nivel de la marea, o como pequeños anfiteatros para espectáculos en la tarde-noche.

2.4. Tallo de los espigones

La forma en S del espigón central (espigón que divide la playa en dos lóbulos) es más efectiva que la rectilínea de los espigones clásicos con vistas a conseguir que la playa no bascule pronunciadamente en temporales. Los espigo-

nes rectilíneos reflejan el oleaje que incide oblicuamente sobre ellos hacia el tramo de playa adyacente, originando basculaciones importantes de la playa. Cuando se da al espigón un trazado ondulado como en la figura, refleja el oleaje incidente de forma dispersiva, con la consiguiente minimización de las basculaciones de la playa.

El espigón Sur, que limita la playa artificial por ese lado, tiene su tallo paralelo a la trayectoria que sigue el oleaje dominante en su camino hasta la orilla, según gira al refractarse sobre los fondos (la dirección de llegada de este oleaje es sensiblemente constante, debido a su largo período y las limitaciones geográficas de los fetches). De este modo se minimizan rebases en temporales.

El caso de estos espigones, como el de los diques rompeolas, muestra que un diseño tridimensional tiene ventajas apreciables sobre uno bidimensional. No sólo bajo el punto de vista hidráulico, sino también paisajístico: Tanto el espigón central, sinusoidal, como el meridional, que sigue la trayectoria de avance del oleaje, encajan más armónicamente entre las formas arqueadas de la orilla de la playa que lo

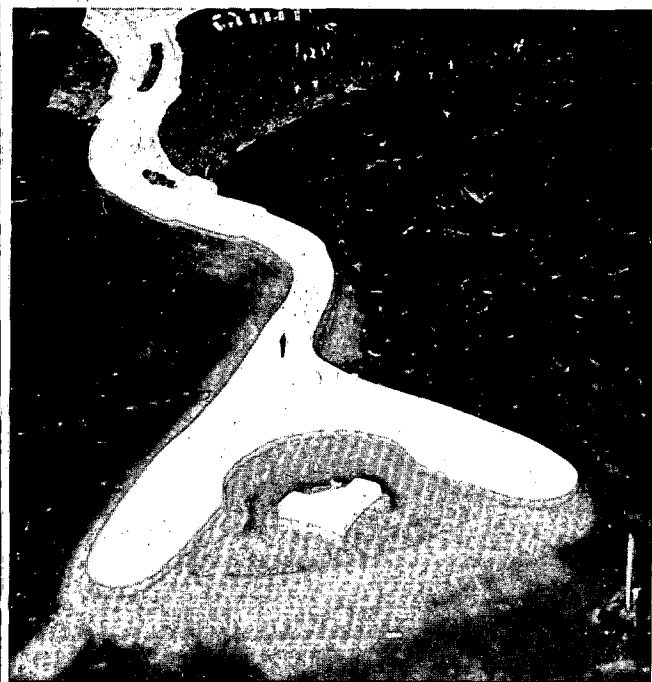


Fig. 11.—Proyecto de Playa Honda: Espigón central (marea alta viva); maqueta.

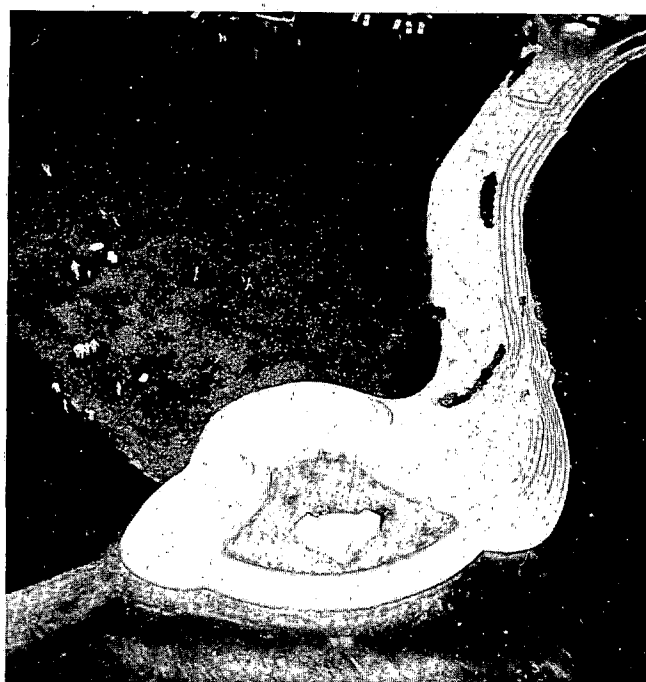


Fig. 12.—Proyecto de Playa Honda: Espigón Sur (marea baja viva); maqueta.

haría una pareja de espigones rectilíneos. Las figs. 11 y 12 son vistas frontales de ambos espigones en maqueta (fig. 11: Marea alta viva; fig. 12: Marea baja viva).

3. ANTECEDENTES Y CONTEXTO

3.1. Diques «Altos» versus diques «Bajos»

3.1.1. Altura

Los diques rompeolas de tipo tradicional, como los basados en la sección de Iribarren (fig. 13, ref. 9) o en la del C.E.R.C. (fig. 14, ref. 2), tienen una coronación alta con relación a la altura de ola de cálculo. Como son diques de sección uniforme, y estas obras tienen generalmente longitudes considerables, cuando se utilizan en costas bajas su impacto paisajístico es el de altas, largas y monótonas pantallas, plantadas entre la vista del mar abierto y el público que ocupa el frente litoral (playas, paseos marítimos, bases náuticas, etc.). Esta particularidad de los diques tradicionales, que en obras aisladas representa un inconveniente, se convierte en un verdadero agobio ambiental cuando se trata de una serie de diques en hilera que bordean el frente marítimo de una población o un núcleo turístico. Esto último está ocurriendo cada vez más generalizadamente, ya que los frentes marítimos urbanos se están saturando

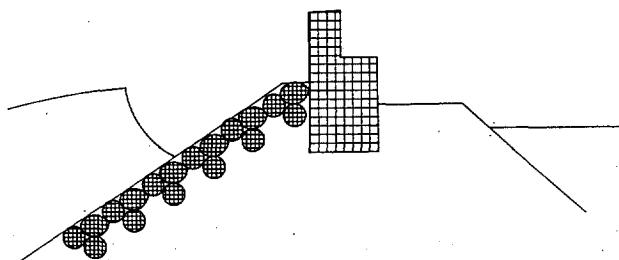


Fig. 13.—Sección de Iribarren.

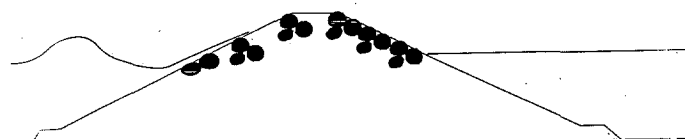


Fig. 14.—Sección del C.E.R.C.

con rapidez de diques que protegen bases náuticas, playas artificiales, desagües de aguas pluviales, etc. (fig. 15). En consecuencia hay una demanda creciente, explícita o implícita, de criterios de diseño que minimicen la altura de los diques de abrigo o/y rompan la uniformidad de su silueta, dentro de costes razonables.

3.1.2. Anchura

Partiendo de un dique de sección tradicional, si se quiere rebajar su altura significativamente conservando el mismo grado de protección frente al oleaje, es necesario dar un incremen-



Fig. 15.—Fachada marítima de Marbella.



Fig. 16.—Playa artificial en Las Américas (Tenerife).

to considerable a su anchura. De ahí que, incluso cuando se admite un grado relativamente alto de rebase del oleaje, los diques bajos tienen anchuras importantes. Como ejemplo se muestran (fig. 16) los diques de defensa de playa artificial existentes hoy en Playa de Las Américas (Tenerife): Para conseguir dejar la coronación de los diques a 0,8 m sobre la pleamar viva (3,3 m sobre la bajamar viva), se les ha dado amplitud tal que su superficie emergida representa casi el 70 por ciento de la superficie de la playa defendida por aquellos diques (a media marea). La coronación de los diques tiene, en los tramos paralelos a la orilla, una anchura de entre 15 y 25 metros, lo que equivale a la amplitud de una avenida urbana.

3.1.3. Superficie

Generalmente las playas artificiales soportan una gran densidad de usuarios. No es raro que estas playas se encuentren saturadas, en los meses-punta, desde el mismo año de su puesta en servicio. Dado que, cuando se utilizan diques bajos para defender la playa, la superficie de coronación de estos diques es importante, parece obvio que resulta deseable convertir esa superficie en un espacio utilizable por el pú-

blico. De hecho el público utiliza los diques aunque su superficie sea inadecuada para ello, buscando por un lado encontrar un lugar menos congestionado y, por otro, diversificar las opciones lúdicas de un día de playa (el dique introduce una interesante alternativa a la arena para muchos bañistas «activos» que aprecian las posibilidades del contorno de la obra para zambullidas, pesca, buceo ligero, etc.; fig. 17).

Este último hecho ha llevado, en muchos lugares, a que las autoridades municipales o la



Fig. 17.—Espigón en el Maresme (Barcelona).

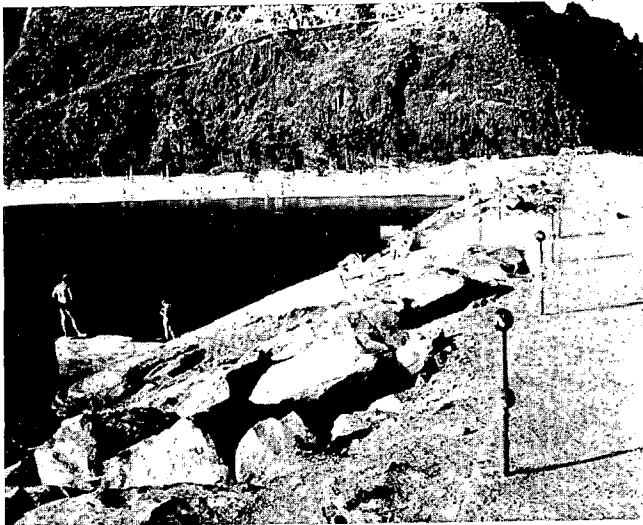


Fig. 18.—Dique de protección de playa en Las Tenerifes (Tenerife; marea baja).

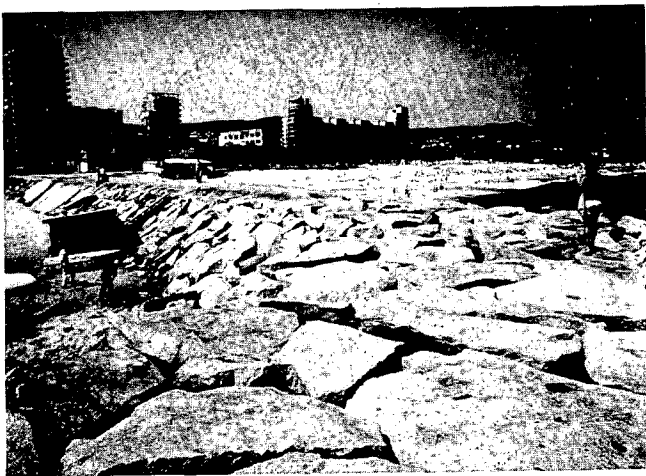


Fig. 19.—Espigón en el Maresme (Barcelona).

administración costera inmediata realicen obras ligeras de acondicionamiento de la coronación de los diques de escollera, con el fin de que su uso por el público tenga unas condiciones menos precarias que las de un escollera arrojado sin más. En las figuras 18 y 19 se muestra este tipo de acondicionamientos en diques (de altura «intermedia») de las costas catalana y canaria. En general, las alternativas utilizadas son dos: Extender una capa de piedra pequeña sobre la coronación (con o sin capa de tierra encima), que se renueva anualmente porque los temporales invernales lo desmantelan; o bien tender una vía asfaltada sobre la coronación,

que puede resultar estable al menos a medio plazo. En la costa mediterránea se han construido varios diques y espigones de escollera, de todo tipo de alturas, cuya superficie emergida se ejecuta con cantos de cara superior lisa, yuxtapuestos y nivelados, con el propósito de mejorar tanto su accesibilidad por el público como su estética (fig. 19).

En algunas localidades turísticas de la costa malagueña se ha dotado a los diques de un lado interior «paseable» (fig. 20). El diseño de estos diques, que son de altura «intermedia», se basa en la sección de Iribarren, o sea que se trata de una sección de tipo portuario que ha sido rebajada en alguna para permitir un mayor grado de rebase del oleaje. La parte que correspondería al muelle portuario pasa a ser el paseo incorporado al dique. Ese lado paseable está conectado con el paseo parítimo que bordea la zona playera.

Los casos anteriores muestran la tendencia actual hacia acondicionar los diques de tipo «clásico» para mejorar su aptitud a ser directamente utilizables por el público. El paso lógico siguiente es la inclusión plena de esta función entre las condiciones iniciales del diseño del dique. Con este objetivo por delante, se va a examinar en primer lugar el comportamiento de los diques bajos ante el oleaje.

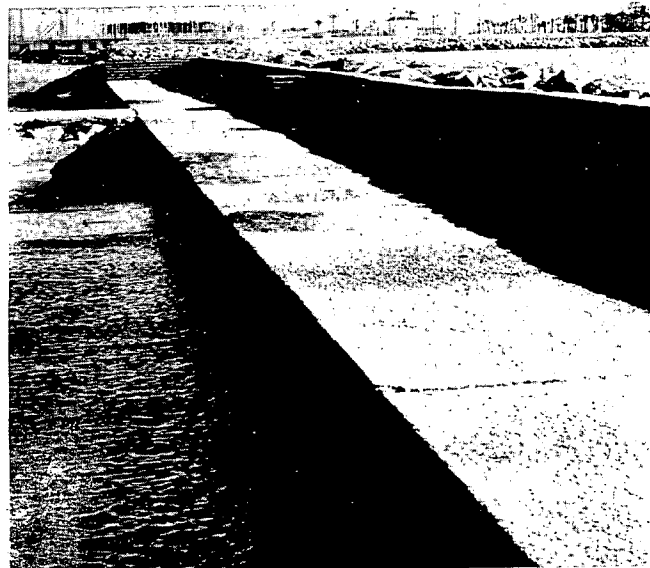


Fig. 20.—Espigón en «T» con trasera paseable en Benalmádena (Málaga).

3.2. Comportamiento hidáulico de los diques «Bajos»

Como elemento de protección ante el oleaje, los diques de tipo «alto» (cuya coronación está por encima de la cresta de la ola de cálculo), y los de tipo «bajo» (cuya coronación está bien por debajo de la cresta de la ola de cálculo), tienen comportamientos hidráulicos significativamente diferentes.

Los resultados de ensayos indican que, en los diques de tipo alto, incrementos sustanciales de la anchura de coronación no consiguen disminuciones significativas del coeficiente de transmisión (ref. 10). Los mecanismos de protección frente al oleaje fundamentales en este tipo de diques son la reflexión y, en diques granulares, la disipación en el parámetro frontal.

En los diques de tipo bajo, en cambio, al incrementarse la anchura del dique, el coeficiente de transmisión disminuye a un ritmo que es relativamente rápido al principio y se hace muy lento para las anchuras grandes. Hay pocos estudios sistemáticos sobre diques bajos-anchos. Entre ellos destacan los de Dattattri (ref. 6), que incluyen diques anchos con coronación a ras de agua, y que llevan a la conclusión de que en los diques bajos-anchos existe, para cada condición de oleaje, una determinada «anchura óptima» del dique, a partir de la cual sucesivos ensanchamientos de este no disminuyen significativamente la transmisión de energía de ola.

En este artículo no se va a analizar la formulación que da Dattattri para la anchura óptima. La existencia de una anchura óptima puede ser explicada por la siguiente hipótesis sobre el comportamiento hidráulico de los diques bajos-anchos:

Por definición, la coronación del dique «bajo» está bien por debajo de la cresta de la ola de cálculo. La cresta incidente, al encontrar el paramento del dique, rompe saltando sobre este para terminar desplomándose sobre la coronación. La caída es relativamente importante y el impacto genera una disipación considerable de energía. En el dique de la figura 2, la plataforma de coronación está a + 0,5 m (sobre la pleamar viva), y la cresta de la ola de cálculo a + 4.5 m. La distancia vertical de caída es su-

perior a 4 m, ya que la cresta que rompe en el dique sigue una trayectoria cuya dirección de salida tiene una componente vertical apreciable. Si la disipación de energía por el impacto sobre la coronación es el principal factor de efectividad hidráulica de este tipo de dique (el segundo sería la reflexión), el comportamiento que es de esperar para el coeficiente de transmisión coincide con el observado en los estudios indicados arriba:

En un dique bajo de pequeña anchura, gran parte de la cresta de la ola que rompe sobre el dique cae al otro lado de este, sin golpear contra su coronación. Al ir aumentando la anchura de coronación, esta recibe la caída de una porción creciente de la cresta, con el consiguiente incremento de la disipación de energía. Cuando se alcanza la «anchura óptima», la coronación recibe la totalidad de la cresta rompiente. Ulteriores ampliaciones no producen más zona de impacto, por lo cual la disipación de energía no varía sensiblemente. La anchura óptima es, según esto, función de la trayectoria que sigue la cresta de la ola tras romper al encontrar el dique (por tanto, del período y la altura de la ola, y del tipo de rotura); y de la altura de la coronación.

Otro resultado de los ensayos de Dattattri con diques coronados a ras de agua es que, a igualdad de anchura de coronación, no hay diferencia sensible entre la transmisión de un dique de escollera y uno de contorno liso impermeable. En términos de la hipótesis anterior, esto significa que la disipación de energía debida al impacto de caída es muy poco sensible a la rugosidad de la coronación; lo que resulta físicamente razonable cuando el ángulo de impacto es grande, como es el caso de los diques bajos respecto a la cresta de la ola. Asimismo quiere decir que la permeabilidad de la escollera no aporta tampoco nada significativo a la disipación; lo que también es razonable, porque los diques de escollera bajos no presentan un volumen importante de huecos accesibles en relación con el volumen de agua que salta sobre el dique en cada ola. Una conclusión de importancia práctica es que la coronación de los diques bajos puede ser lisa (por tanto, utilizable por el público), sin desventajas sensibles en cuanto a efectividad hidráulica res-

pecto a una superficie irregular de escollera.

Sean mas o menos ajustadas a la realidad las interpretaciones anteriores sobre los fenómenos físicos en juego, lo cierto es que la lenta disminución del coeficiente de transmisión de los diques bajos, a partir de cierta anchura relativa, hace que a menudo resulte descartable conseguir el coeficiente requerido mediante una coronación horizontal de suficiente anchura.

3.3. Diques bajos «Especiales»

Se ha indicado anteriormente que, para conseguir coeficientes de transmisión pequeños con diques bajos, es preciso acudir a anchuras excesivas; en consecuencia se han elaborado diques «especiales», consistentes en modificaciones de la sección, o en la adición a esta de ciertas piezas complementarias, con el fin de proporcionar mecanismos adicionales de obstaculización del oleaje que permitan mantener la anchura total del dique dentro de límites aceptables. Algunos ejemplos:

1. Dique de escollera con respaldón: Perfil con forma de cuenco amortiguador (J. Guerrero, fig. 21: refs. 4, 7). Es una modificación de la sección de Iribarren, que permite rebajar considerablemente la altura de coronación. El dique portuario de la fig. 21, no rebasable, tiene la coronación del parapeto a + 6,2 m, mientras que la sección de Iribarren clásica precisaría de un parapeto a + 10,0 m en ese caso. El mismo tipo de diseño puede emplearse para diques rebasables.



Fig. 21.—Dique con cuenco amortiguador en el puerto de Fuen-girola (Málaga).

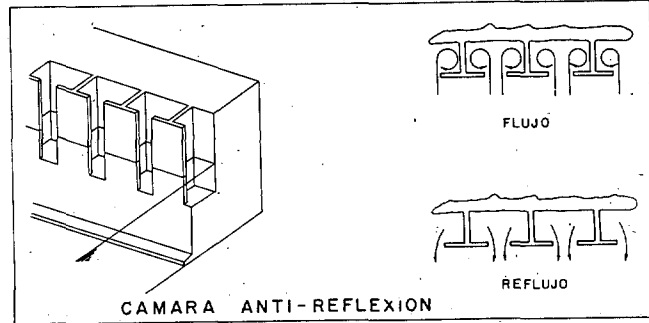


Fig. 22.—Cámaras antireflexión (tomado de ref. 7).

2. Dique rígido de sección rectangular: Cámara antireflexión adosada al paramento frontal (varios tipos; refs. 3, 7; fig. 22). Estas cámaras, que disminuyen el rebase de la ola sobre el dique, se construyen con piezas prefabricadas. Las piezas pueden ser de grandes dimensiones si los diques están situados en mares abiertos. Por ejemplo, en la marina de Tannawa (Japón), las piezas de una cámara antirreflexión «Igloo» pesan 260 Tn cada una (ref. 7).
3. Dique rectangular rígido, o mixto de coronación rígida: Malla de piezas deflectoras adosada a la coronación (P. Suárez Bores, ref. 3; fig. 23). Para diques significativamente rebasables. En este diseño se utilizan hemiconos de forma abo-inada, para que parte de la cresta de ola que cae sobre la coronación rebote en forma de flujos que se abren en abanico. La dispersión de los flujos que caen sobre el agua protegida por el dique, hace que el oleaje generado en ese espacio se amortigue, en dirección a la orilla, por interferencias mutuas y esparcimiento radial.
4. Dique rectangular rígido, o mixto de coronación rígida: Coronación lisa y botao-las trasero. En las riberas del mar del Norte, donde abundan los revestimientos costeros con una amplia berma, de escasa pendiente y utilizada como paseo, situada a pequeña elevación sobre la pleamar, a menudo se coloca un botao-las en el extremo inferior de la berma (fig. 24). Este botao-las es sumamente efectivo ya que, cuando está situado a

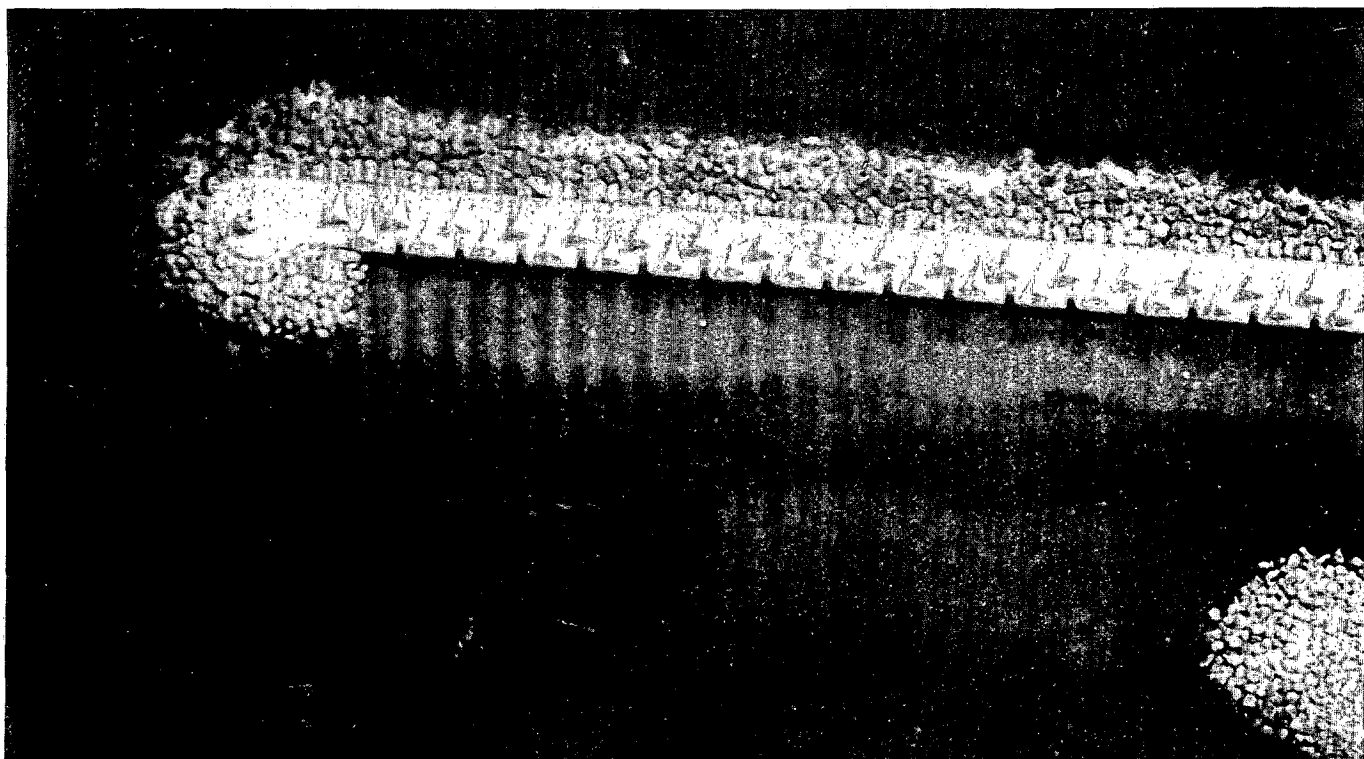


Fig. 23.—Dique con hemiconos deflectores en Cubelles (Barcelona).

determinada distancia del borde exterior del dique (según el criterio anterior, la «anchura óptima»), recibe el flujo de la ola incidente en condiciones que optimizan la deflección del agua recibida. De acuerdo con esto, en la fig. 25 se ha representado un diseño de dique «bajo», hidráulicamente eficiente y también utilizable directamente por el público en toda su superficie.

3.4. Diques y dimensiones

El diseño de los diques «tradicionales» es hidráulicamente bidimensional. Los diversos tipos de dique tienen sus correspondientes diferencias en la sección, pero no diferencias de forma en planta. La planta tiene siempre forma rectangular, con eje rectilíneo o trazando un arco de pequeña curvatura, a lo largo del cual la sección del dique es igual en cualquier punto. No hay interacción significativa entre los flujos de ola que abordan distintos puntos del dique.

Esta restricción dimensional en la concepción del dique es lógica en las etapas iniciales del

desarrollo «moderno» de los diques rompeolas (la sección de Iribarren, que data de 1954. —figura 13—, es probablemente la primera obtenida como resultado de un proceso de cálculo), por razones de simplicidad en la concepción hidráulica y estructural del dique.

La ampliación del número de dimensiones en juego incrementa el potencial de efectividad hidráulica de los diseños obtenibles. Esta ampliación va siendo progresivamente más asequible, a medida que mejora el conocimiento de los fenómenos físicos relevantes en la interacción oleaje-dique, y que aumenta la variedad de sistemas constructivos y la potencia de los medios disponibles.

Los diques «especiales» 2 y 3 del apartado anterior son representativos de la dirección hacia la ampliación dimensional del diseño, ya que tanto las cámaras antirreflexión como la malla de hemiconos deflectores generan mecanismos de amortiguación tridimensionales. Sin embargo se trata, en ambos casos, de elementos que se añaden a un dique de sección uniforme y planta clásica hidráulicamente bidimensional.

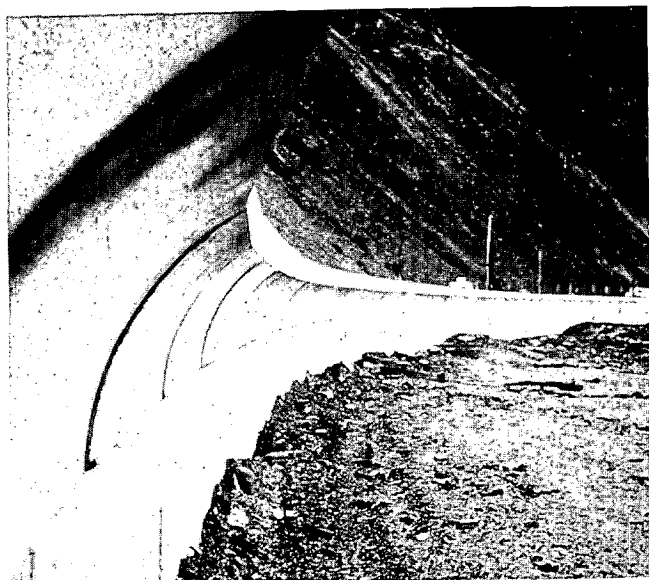


Fig. 24.—Botaolas (en construcción) en la trasera de una berma. Costa inglesa.

El dique de cilindros yuxtapuestos diseñado por el Laboratorio de Hidráulica Danés (Lundgren et al, ref. 1, fig. 26), es quizá el primer diseño hidráulicamente tridimensional en su concepción global. Es un dique de tipo «alto», concebido para proteger un puerto, para ofrecer una coronación paseable, y para ser construido con medios potentes: Cada cilindro es prefabricado en seco, remolcado a flote, y finalmente fondeado (en la marina de Brighton, el diámetro de los cilindros es de 12,5 m; ref. 11).

El dique sinusoidal que ha presentado en este artículo, es también un diseño hidráulicamente tridimensional, concebido como dique de tipo «bajo», de coronación y contornos utilizables por el público, y construible con medios modestos.

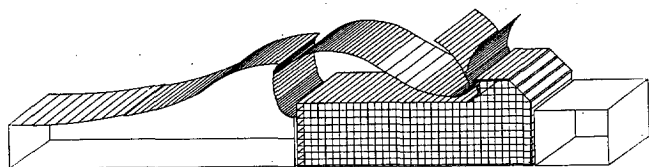
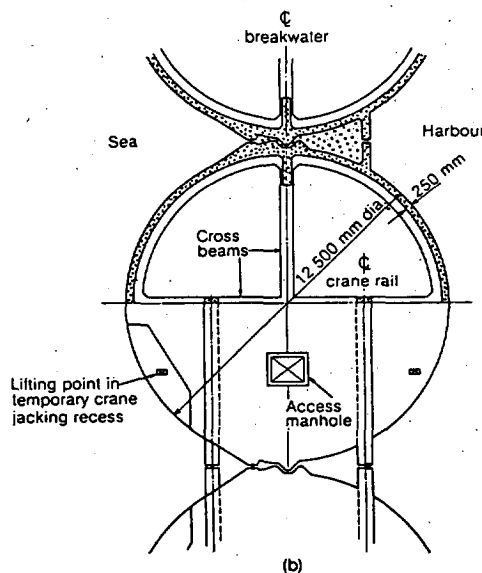
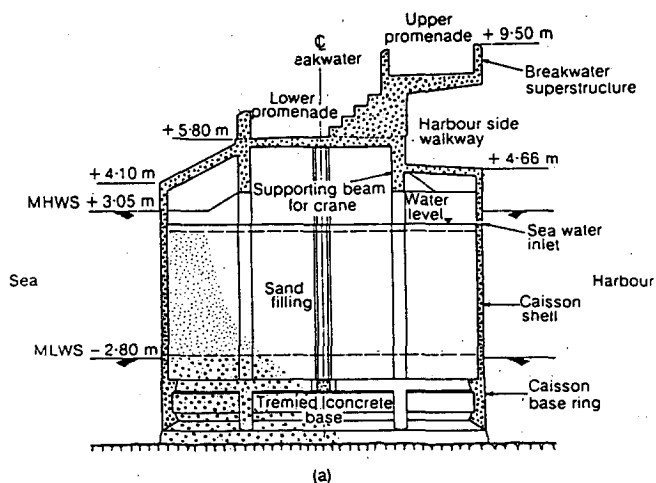


Fig. 25.—Dique bajo-ancho con botaolas trasero.



Arrangement of breakwater caissons: (a) cross-section; (b) sectional plan and plan on caisson deck.

Fig. 26.—Dique de cilindros verticales yuxtapuestos en la marina de Brighton (Inglaterra); de ref. 11.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Agustín S. Arcilla por sus sugerencias en la revisión crítica del original.

Gracias también a Pedro S. Bores y Richard Silvester por el estímulo que supone su trabajo pionero en el diseño de obras marítimas imaginativas.

4. REFERENCIAS

1. H. AGERSCHOU et al.: «Planning and design of ports and maritime structures». Wiley, 1983.
2. U.S. ARMY C.E.R.C.: «Shore protection manual», 1973.
3. Asociación Internacional Permanente de Congresos de Navegación: Bol. n.º 38 (Supl.), 1981.
4. D. BOSMAN and D. SCHOLTZ: «A survey of man-made tidal pools along the South African coast». Int. Conf. Coastal Eng., A.S.C.E., 1982.
5. E. COPEIRO DEL VILLAR: Proyecto de playa artificial en Playa Honda, Tenerife. Gobierno Canario, 1987.
6. J. DATTATRI et al.: «Performance characteristics of submerged breakwaters». Int. Conf. Coastal Eng., A.S.C.E., 1978.
7. R. DEL MORAL y J. M. BERENGUER: «Obras Marítimas». M.O.P.U., C.E.D.E.X., 1980.
8. Y. GODA: «Random seas and the design of maritime structures». Univ. of Tokyo Press, 1985.
9. R. IRIBARREN: «Oleaje y diques». Dossat, 1954.
10. W. SEELING: «Two-dimensional tests of wave transmission and reflection characteristics of laboratory breakwaters». U.S. Army C.E.R.C.: Report n.º 80-1, 1980.
11. F.L. TERRETT et al.: «Harbour works at Brighton marina: Investigation and design». Proc. Instn. Civil Engrs., May 1979.

Enrique Copeiro del Villar Martínez



Dr. Ingeniero de Caminos. Ha trabajado en el Departamento de Oceanografía de la Escuela T.S. de Ingenieros de Caminos de Madrid; en el Departamento de Ingeniería de Costas de la Universidad Politécnica de Delft (Holanda); en el Departamento de Investigación Costera del Ministerio de Obras Públicas holandés en La Haya; en la División de Ingeniería marítima de INTEC-SA, Madrid; en el Laboratorio de Puertos y Costas «Ramón Uribarren», Madrid (Director del Departamento en Ingeniería de Costas); en la Escuela T.S. de Ingenieros de Caminos de Barcelona (Catedrático de Ingeniería Marítima); en la Dirección General de Puertos y Costas del Ministerio de Obras Públicas, Madrid (Director del Programa de Planeamiento y Actuaciones en la Costa); y como consultor privado, situación en que se encuentra actualmente. Ha publicado artículos sobre análisis estadístico de oleaje, dinámica de Costas, y obras marítimas.