

DISEÑO DE DIQUES EN TALUD CON MANTOS MONOCAPA PARA LA REDUCCIÓN DE LA HUELLA ENERGÉTICA Y DEL CARBONO

M. ESTHER GÓMEZ-MARTÍN, INGENIERA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS.
Profesora colaboradora, Directora del Área de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes de la Universidad de Alicante. esther.gomez@ua.es

MOISÉS SANTOS HUERTES, INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS.
Director Técnico de SATO (Grupo OHL). mosantos@ohl.es

Resumen

La construcción de grandes diques en talud requiere la utilización de piezas prefabricadas de hormigón para el manto principal; el consumo de hormigón es el factor que determina el coste de construcción del manto y de su huella energética y del carbono. Para una profundidad y clima marítimo de diseño dado, el consumo de hormigón asociado al dique depende fundamentalmente del número de capas del manto, la porosidad y la geometría de la pieza. Del manto de cubos bicapa convencional del S.XIX se pasó en 1950 al manto bicapa de piezas especiales esbeltas (Tetrapod, Dolo, etc.) colocados aleatoriamente, buscando unos coeficientes de estabilidad elevados para reducir el peso de las piezas y el volumen de hormigón. La rotura del dique de Sines en 1978 propició el desarrollo de nuevas piezas menos frágiles, como el Accropode (1980), pensadas para ser utilizadas en mantos monocapa con un consumo de hormigón muy inferior. En la actualidad, hay cientos de diques monocapa construidos por todo el mundo, pero en España sigue dominando casi con exclusividad el manto bicapa de bloques cúbicos, colocados

aleatoriamente, que consume cantidades muy elevadas de hormigón. En este artículo se analizan las ventajas e inconvenientes de los mantos monocapa en relación a los mantos bicapa convencionales, sobre todo en lo relativo a la reducción de la huella energética y del carbono.

1. Introducción

La falta de abrigos naturales, la importancia del transporte marítimo internacional de mercancías y el aumento de calados de los grandes buques ha generado necesidades crecientes de espacios portuarios artificiales y de zonas abrigadas en la costa que requieren grandes obras de abrigo y modificaciones importantes del litoral. Esta realidad ha propiciado la construcción de diques a grandes profundidades y expuestos a intensos temporales. En los últimos 20 años se han construido o ampliado en España decenas de grandes diques de abrigo, algunos de los cuales se encuentran entre los más grandes del mundo (ver Gutierrez-Serret, 2009).

Las dos tipologías fundamentales para las obras de abrigo portuarias son: (1) los diques en talud o rompeolas que provocan la rotura del oleaje y (2) los diques verticales o reflejantes que reflejan las ondas incidentes. Los diques en talud suelen ser los recomendables cuando la profundidad es pequeña ($h[m]<7$) debido a la facilidad de construcción, mientras que los diques verticales de cajones prefabricados pueden ser muy competitivos cuando la profundidad es grande ($h[m]>15$), debido a que los diques verticales reducen tanto los requerimientos de material de cantera como los plazos de construcción. Sin embargo, unas condiciones geotécnicas del fondo marino deficientes y/o la existencia de pocas ventanas climáticas para el fondeo de cajones pueden favorecer la tipología en talud

a grandes profundidades en un emplazamiento dado; por ejemplo, el nuevo Dique de Punta Langosteira en A Coruña (ver Fig. 1.) se ha construido con tipología en talud a una gran profundidad ($h[m]=40$) debido al intenso oleaje de la zona. Este artículo se centra en el estudio de los diques de abrigo de tipología en talud, utilizando mantos monocapa o bicapa de elementos prefabricados de hormigón.

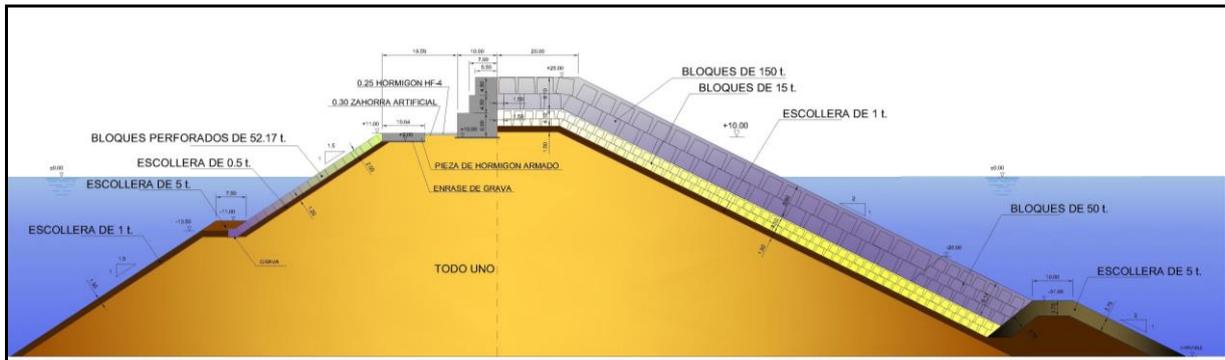


Fig. 1. Sección tipo del dique bicapa de cubos de hormigón ($W[t]=150$) de Punta Langosteira.

Fuente: Autoridad Portuaria de A Coruña.

Tradicionalmente, los diques en talud consisten en estructuras formadas por un núcleo poco permeable de todo-uno de cantera, encima del cual se colocan las capas de filtro intermedias, de piedra de tamaño creciente, hasta llegar al manto principal formado por dos capas de escollera natural o elementos prefabricados de hormigón (escollera artificial). Conforme aumentan la profundidad y altura de ola de cálculo, el tamaño y peso necesario de los elementos del manto principal aumenta y la escollera natural accesible suele ser insuficiente para construir el dique. Cuando el manto no puede ser construido con escollera natural, se recurre a las piezas prefabricadas de hormigón en masa (incluso armadas) cuya forma geométrica ha sido objeto de múltiples diseños específicos a lo largo de la historia.

En el siglo XIX ya se empezaron a usar los bloques cúbicos o paralelepípedos de hormigón en masa cuando el peso de la escollera de cantera

era insuficiente. Desde la aparición de los tetrápodos en 1950, una gran variedad de piezas especiales para la formación de mantos de diques en talud han sido desarrollados en todo el mundo con objeto de reducir los costes y el elevado consumo de hormigón que implica utilizar bloques cúbicos o paralelepípedicos convencionales (ver Dupray and Roberts, 2009). La estabilidad hidráulica se suele definir con el coeficiente de estabilidad (K_D) de la fórmula clásica de Hudson (ver SPM, 1984); por esta razón, a lo largo de los años se ha buscado el diseño de piezas prefabricadas que maximicen dicho coeficiente con el objeto de poder reducir el peso de los elementos del manto, el consumo total de hormigón y el coste de las obras. Sin embargo, a pesar de la gran diversidad de elementos (Tetrapod, Dolo, Accropode, etc.), los cubos y bloques paralelepípedicos de hormigón son los utilizados en las costas españolas casi con exclusividad. La razón fundamental que se argumenta es la gran robustez del bloque cúbico convencional y las desastrosas experiencias con piezas esbeltas, como la rotura de dolos de $W[t]>40$ en los diques del Puerto de Sines (Portugal) y San Ciprián (Lugo) hace tres décadas.

Este artículo se centra en el análisis y diseño del manto principal, que suele ser el elemento crítico de diseño de los diques en talud, el más costoso y el que tiene que resistir las grandes fuerzas que genera la rotura del oleaje sobre el talud y en función del cual se diseñan las capas de filtro, el núcleo y, en su caso, el espaldón y la berma de pié. Por consiguiente, el manto principal es el que condiciona en mayor medida el coste y comportamiento del dique a largo plazo. Como regla general, los diques en talud que no están en aguas poco profundas ($h[m]>7$) requieren mantos principales constituidos por piezas prefabricadas de hormigón en masa con una considerable huella energética y del carbono.

Una de las decisiones de diseño más importantes para la optimización del dique rompeolas es la selección del tipo de pieza para la formación del manto principal; esta decisión condiciona el número de capas (una o dos), la colocación (aleatoria, uniforme, etc.), el peso de las piezas del manto, los equipos de construcción y manipulación, la cota de coronación de la estructura (caudales de rebase), el coste económico de construcción, el consumo de hormigón y las huellas energética y del carbono. Cada pieza especial (cubo, Tetrapod, Dolo, Accropode, Core-loc, Xbloc, Cubípedo, etc.) tiene una forma geométrica y unas características de estabilidad hidráulica diferentes para porosidades y colocación específicas, una resistencia estructural distinta y permite o no la colocación en una sola capa. La figura 2 muestra la selección de piezas especiales presentada por Dupray and Roberts (2009) para describir la evolución en el tiempo de los elementos prefabricados para el manto principal de los diques en talud.

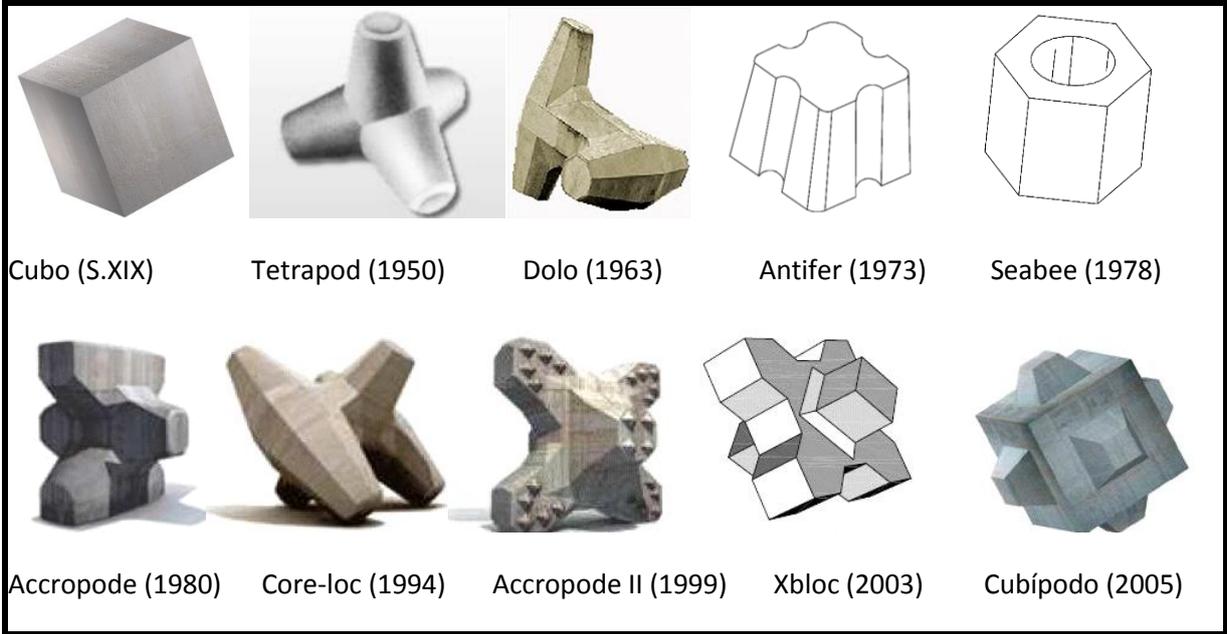


Fig.2. Evolución del diseño de los elementos prefabricados de hormigón (escollera artificial).

Las cuatro primeras piezas se colocan aleatoriamente en dos capas y la pieza Seabee es apropiada para mantos monocapa tipo mosaico (colocación uniforme). La segunda generación de piezas posterior al desastre de Sines de 1978 se pueden colocar en disposición monocapa, trabadas las cuatro primeras y con colocación aleatoria el Cubípodo.

2. Tipos de escollera artificial

La clasificación de los elementos prefabricados de hormigón se suele realizar atendiendo a las variables principales que caracterizan dichas piezas:

(1) La robustez de la forma geométrica (masiva, “bulky” o esbelta), la cual condiciona la resistencia estructural de la pieza, la calidad del hormigón y el tamaño máximo de la pieza sin armar que se puede usar en la práctica.

(2) La colocación o puesta en obra (aleatoria, adoquinada, ordenada, trabada, etc.), que condiciona los medios constructivos, las tolerancias, los rendimientos en obra y el uso de pinzas de presión (cubo y Cubípodo) o eslingas (Acrópodo, Xbloc, etc.), que afecta a los rendimientos y la seguridad en la obra.

(3) La porosidad y el número de capas (monocapa o bicapa) del manto, que afecta directamente al volumen de hormigón necesario para construir la obra y al coste económico y ambiental de la misma, e indirectamente a las tolerancias de puesta en obra y otros aspectos constructivos.

Las piezas masivas (cubo, bloque paralelepípedo, cubo Antifer, Cubípodo, etc.) que resisten el oleaje fundamentalmente por gravedad y fricción lateral, se caracterizan por tener una resistencia estructural muy elevada que permite fabricarlas de hormigón en masa casi sin limitación de tamaño ($W[t]>150$). Las restricciones de tamaño suelen venir impuestas por la capacidad de las grúas y los

equipos de manipulación. Sin embargo, las piezas esbeltas o “slender” (Tetrapod, Dolo, etc.) que resisten la acción del oleaje por trabazón, deben fabricarse de tamaño pequeño ($W[t]<10$) o ser armadas, para evitar roturas durante el proceso de construcción y la fase de servicio del dique. Finalmente, las piezas “bulky” (Accropode, Core-loc, Xbloc, etc.) que resisten por un mecanismo conjunto de gravedad y trabazón, pueden fabricarse de hormigón en masa hasta un tamaño medio ($W[t]<40$), dependiendo de la geometría de la pieza y del tipo de hormigón.

Desde la invención del Tetrapod (1950) hasta la década de los 70, se desarrollaron numerosas piezas esbeltas para ser utilizadas en mantos bicapa con colocación aleatoria y elevados coeficientes de estabilidad (Dolo con $K_D=25$); obteniéndose reducciones drásticas de tamaño y peso en comparación con los bloques de hormigón (Cubo con $K_D=6$). Sin embargo, la rotura masiva de los dolos ($W[t]=42$) del dique de Sines (Portugal), en 1978, puso de relieve la importancia de la resistencia estructural de las piezas del manto, además de su estabilidad hidráulica (ver Dupray and Roberts, 2009). Para una misma forma geométrica de hormigón en masa, al aumentar el tamaño de la pieza se reduce su resistencia estructural; las piezas esbeltas como el Dolo, se comportan muy bien a escala reducida (modelos físicos) y en diques pequeños, pero resultan muy frágiles cuando el volumen de la pieza es grande. Esto se debe a que aproximadamente las cargas crecen con el cubo del tamaño (peso propio) y su resistencia (sección) sólo con el cuadrado del tamaño; por consiguiente, las tensiones de tracción a las que se ve sometido el hormigón de las piezas crecen con el tamaño de las mismas y las vuelve más frágiles.

Así pues, a partir de los años 80 surgieron en el mercado internacional piezas de tipo “bulky” que eran más robustas que el Dolo (tipología esbelta), además de ser

muy estables hidráulicamente (Accropode, Core-loc, etc.); estas piezas modernas permitían además formar mantos monocapa para reducir considerablemente el consumo de hormigón, aunque presentaban ciertas desventajas como son: encofrados complejos de apertura horizontal, bajo rendimiento (una puesta/día), colocación cuidada con eslingas, resistencia estructural intermedia, grandes requerimientos de espacio para su acopio en obra y sobretodo la necesidad de un control de obra y seguimiento muy exigente durante la construcción. Estas piezas coexisten en la actualidad en España con las masivas de tipo cúbico que se colocan aleatoriamente en dos capas, tienen mayor robustez estructural y grandes ventajas logísticas de producción, manipulación y acopio. Las diferentes ventajas e inconvenientes de las piezas representadas en la fig. 2 ha inducido diferentes estrategias de aplicación en diferentes regiones del mundo. Así pues, en Japón (ver Hanzawa et al., 2006) se siguen construyendo grandes diques con piezas esbeltas prefabricadas de hormigón pero fuertemente armadas ($D_{0.5} \leq 80$), en España casi la totalidad de los diques se construyen con mantos bicapa de bloques cúbicos (hasta $D_{0.5} = 150$) y en el resto del mundo han proliferado los diques con mantos monocapa de piezas “bulky” (sobretudo Core-loc y Accropode hasta $D_{0.5} = 47$), existiendo en 2011 más de dos centenares de diques en talud con mantos monocapa construidos por todo el mundo.

Las piezas de segunda generación para construir mantos monocapa, mostradas en la fig. 2, tienen coeficientes de estabilidad ($16 \geq K_D \geq 12$) mucho mayores que los del bloque cúbico en disposición bicapa ($K_D = 6$), lo que permite reducir a la mitad el peso de las piezas. Aunque las porosidades del manto pueden ser menores según el tipo de pieza ($42\% < p\% < 30\%$) en comparación con el manto bicapa de cubos convencional ($p\% \approx 40$), el ahorro global de hormigón se sitúa en el entorno del

60%. Esto implica que los mantos monocapa, además de reducir los costes económicos de construcción, pueden reducir a la mitad la huella energética y del carbono de los mantos bicapa de cubos en los diques rompeolas convencionales que se construyen en España. No tiene sentido ignorar las grandes mejoras en las técnicas constructivas y de control de obra producidas en las últimas décadas que permiten construir mantos monocapa de manera segura con el consiguiente ahorro económico y de recursos ambientales.

3. Mantos monocapa o bicapa

Para piezas colocadas aleatoriamente, el número de capas y la porosidad son los principales factores que afectan el número de piezas que hay que colocar en el talud y el consumo total de hormigón. Para evaluar alternativas de manto, debe considerarse: (1) el número de capas, (2) la porosidad teórica y la que realmente se puede construir, (3) la estabilidad hidráulica y el clima marítimo a pié de obra, (4) la resistencia estructural de las piezas, (5) la colocación aleatoria, regular o trabada (6) las tolerancias de construcción y (7) otras como la manipulación (pinzas o eslingas), almacenamiento, etc.

Medina y otros (2010) señalan las condiciones que deben cumplirse para que una pieza pueda formar un manto monocapa estable. La condición básica es que la porosidad del manto no sufra grandes variaciones durante su vida útil y ello se puede conseguir siguiendo estrategias diferentes:

- (1) Mantos tipo mosaico con piezas concertadas colocadas con precisión de manera uniforme. Por ejemplo, utilizando piezas Seabee (ver fig. 2) o paralelepípedos de hormigón colocados uniformemente en el trasdós del dique de Punta Langosteira (ver fig. 1). Todas las piezas se apoyan

perfectamente cara contra cara y no es posible reducir significativamente la porosidad sin romper el orden. Bajo la acción del oleaje es muy difícil construir mantos concertados y requiere gran consumo de hormigón (porosidad $p \approx 0\%$).

- (2) Piezas especiales “bulky” (Accropode, Core-loc, etc.) trabadas con precisión y baja porosidad, de manera que no es posible que se reduzca significativamente la porosidad sin romperlas. Esta estrategia exige garantizar la integridad de la pieza (asientos y calidad del hormigón), disponer de un protocolo de colocación específico (con eslingas) y un sistema control de obra estricto.
- (3) Piezas tipo Cubípodo colocadas aleatoriamente, ya que la forma de la pieza propicia el auto-posicionamiento homogéneo e impide la compactación heterogénea manteniendo la porosidad inicial (ver Medina y otros, 2010).
- (4) Piezas colocadas aleatoriamente con una porosidad muy baja. En teoría, si la porosidad es muy baja no puede bajar de forma significativa. En la práctica es muy difícil conseguir mantos monocapa de baja porosidad con colocación aleatoria ya que las piezas tienden a colocarse en segunda capa.

A partir del Accropode en 1980, las piezas modernas de segunda generación han permitido cambiar el concepto tradicional de doble capa y respuesta flexible a monocapa con un consumo de hormigón muy bajo pero con una respuesta rígida. El manto monocapa exige utilizar coeficientes de seguridad mucho mayores que los bicapa (piezas de mayor peso) y generalmente se necesita un excelente control de

construcción, pero permiten una reducción considerable del consumo de hormigón y del coste de la obra.

Los mantos bicapa de piezas masivas con colocación aleatoria (cubos, bloques paralelepípedicos, cubos Antifer, etc.) que resisten por gravedad, muestran una respuesta hidráulica muy flexible, adecuada para grandes tolerancias constructivas e incertidumbres en el clima marítimo a pié de obra (ver Fig. 3). Los mantos monocapa de cubípodos (colocación aleatoria), también resisten por gravedad (ver Fig. 4) y tiene ventajas económicas y ambientales notables, aunque con una respuesta menos flexible que el bicapa (adecuada para tolerancias constructivas e incertidumbres climáticas menores).

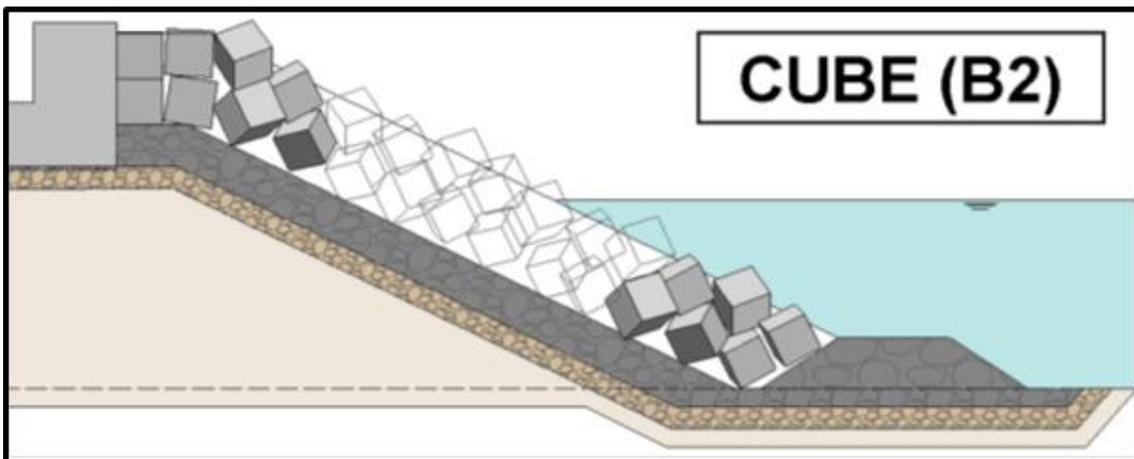


Fig.3 Sección tipo de manto de cubos bicapa (B2).

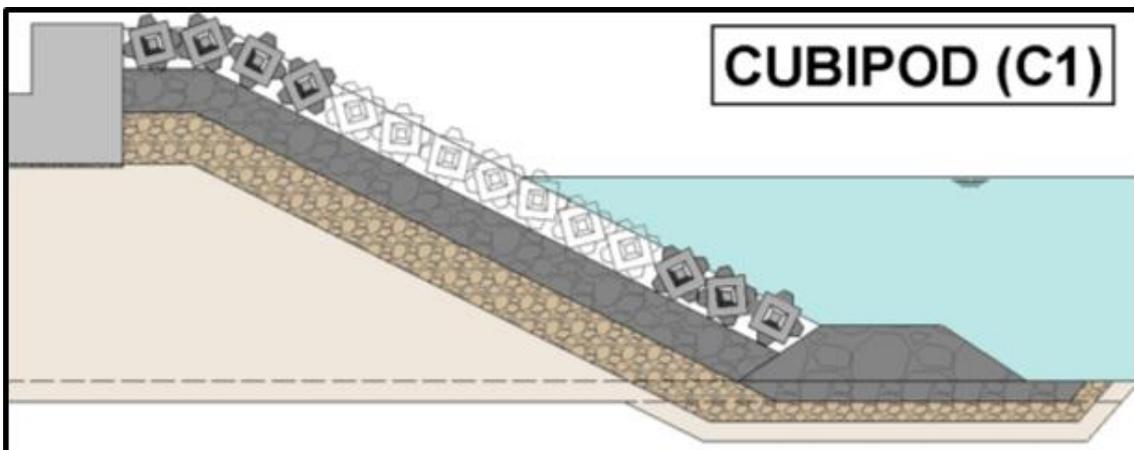


Fig.4 Sección tipo de manto de cubípodos monocapa (C1).

Los mantos monocapa de piezas especiales tipo “bulky” (Accropode, Coreloc, Xbloc, etc.) resisten por trabazón y tienen una respuesta rígida (inicio de destrucción, IDe, próximo al inicio de averías, IDa) que exige tomar coeficientes de seguridad muy elevados y tolerancias constructivas muy pequeñas. Los mantos bicapa de piezas especiales “bulky” no se recomiendan porque aumentan la complejidad constructiva, el coste de construcción, el consumo de hormigón y la incertidumbre entre lo observado en los ensayos de laboratorio y la realidad (efecto de modelo muy alto).

Finalmente, cabe resaltar que los mantos monocapa de cubos colocados aleatoriamente no son aconsejables ya que la tendencia al adoquinamiento de los cubos puede desproteger a largo plazo el manto secundario. Los mantos monocapa de cubos concertados (colocación regular), aunque son teóricamente factibles porque no pueden adoquinarse más y algunas veces se construyen (ver trasdós de la fig. 1), son difíciles de construir, consumen mucho hormigón (porosidad nula) y favorecen el remonte y rebase.

La porosidad del manto es una característica fundamental, que afecta su respuesta frente a los temporales (estabilidad hidráulica, rebase, etc.) influyendo de manera importante en el consumo de hormigón y el coste de la obra. La porosidad y el número de capas del manto ($n_c=1$ ó 2) determinan el número de piezas por unidad de superficie (densidad de colocación) y el consumo de hormigón. En ocasiones se aumenta el número de piezas por unidad de superficie (se reduce la porosidad teórica) para tomar en consideración futuras compactaciones del manto.

Es conveniente que la porosidad del manto sea uniforme ya que una porosidad variable implica la existencia de zonas particulares por donde puede

iniciarse la avería del dique o producirse un mayor rebase. En el laboratorio, se ensayan modelos físicos a escala reducida con un “control de obra” perfecto, mucho mejor que a escala prototipo, ya que las condiciones de construcción (a mano y en seco), la visión (perfecta) y los medios constructivos (sin limitación) son óptimos. En las obras reales se sufren las condiciones climáticas (oleaje y viento), una visión reducida o nula bajo el agua y se suelen tener fuertes limitaciones en las grúas y equipos de manipulación.

En el manto bicapa de cubos convencional no se puede garantizar en obra la porosidad de proyecto y, si se consigue inicialmente, se perderá durante la vida útil por efecto de la compactación heterogénea durante la acción de los temporales. Por el contrario, el manto de cubípodos (monocapa o bicapa) tiene una porosidad con muy poca variabilidad por la forma del Cubípedo, que en los taludes tiende a colocar los núcleos cúbicos a distancias homogéneas de los núcleos cúbicos vecinos, dándole una apariencia de regularidad con orientación aleatoria. Se pueden utilizar como porosidades de referencia para mantos de cubos y cubípodos 40% y 42% respectivamente, aunque la porosidad inicial de los cubos (40%) puede sufrir variaciones importantes en el tiempo y el espacio, tanto mayores cuanto mayor sea la porosidad inicial (compactaciones heterogéneas más intensas).

Así pues, la mejora de las técnicas constructivas y de control de obra permiten construir mantos monocapa que pueden reducir a menos de la mitad el consumo de hormigón y las huellas energéticas y del carbono. El manto bicapa convencional con piezas colocadas aleatoriamente tenía sentido hace medio siglo cuando el control de colocación era deficiente y las tolerancias muy grandes. Los mantos monocapa se han ido imponiendo en las últimas décadas del S. XX y serán sin duda los protagonistas del S. XXI debido a los ahorros económicos y ambientales

que representan. Además de las piezas “bulky” del S. XX (Accropode y Core-loc) que pueden alcanzar $W[t]=40$, la aparición reciente de la pieza masiva Cubípodo permite alcanzar para mantos monocapa cualquier tamaño (ver Medina y otros, 2010).

4. Impacto ambiental, huella energética y del carbono

La construcción de los diques en talud implica el consumo y transporte de grandes volúmenes de material desde las canteras al emplazamiento de la obra. Los puertos suelen estar en zonas densamente pobladas y, además del consumo de materiales, energía y emisión de CO₂, se producen ruidos y problemas de tráfico diversos. El transporte por vía marítima es siempre recomendable para reducir los impactos, pero no siempre es viable.

Los grandes diques en talud consumen grandes volúmenes de hormigón. El cemento utilizado para la fabricación de las piezas de hormigón del manto y del espaldón generan por tanto una gran huella energética y del carbono que es necesario tomar en consideración (ver Bruce and Chick, 2009). Además, si se requiere el armado de las piezas del manto, el acero genera una huella energética y del carbono muy superior. Aproximadamente, la huella del carbono del acero es diez veces superior al del hormigón y ésta cuatro veces superior a la piedra.

La tabla 1 muestra los valores medios publicados por Hammond and Jones (2008) y Bruce and Chick (2009) de la huella energética y del carbono que genera la producción de los principales materiales utilizados en la construcción de diques y que deben ser tenidos en consideración en el proceso de optimización del diseño de los diques, para disminuir tanto el coste económico como ambiental de la obra.

Material	EE [GJ/t]	EC [tCO ₂ /t]
Arena	0.10	0.005
Escollera	1.00	0.056
Hormigón	0.95	0.130
Acero	24.40	1.770

Tabla 1. Huella energética (EE) y del carbono (EC) de los principales materiales.

Además, debe considerarse la huella energética derivada del transporte de dichos materiales hasta el lugar de la obra. En la tabla 2 se indican los valores medios publicados por WRAP (2006) y Bruce and Chick (2009) de la huella energética generada según el medio de transporte utilizado para transportar dichos materiales. Aunque existe cierta incertidumbre asociado a estas estimaciones, es evidente que el transporte marítimo es el más favorable en términos de huella energética y del carbono, aunque no siempre es posible utilizarlo.

Medio de transporte	EE [MJ/t.km]
Carretera	0.40
Ferrocarril	0.09-0.60
Marítimo	0.13

Tabla 2. Huella energética (EE) del transporte de los principales materiales.

Por otro lado, además de los costes ambientales asociados a la ocupación del suelo terrestre y marino, los consumos de materiales y las huellas energéticas y del carbono, los diques suelen generar impactos visuales importantes. En este punto, la cota de coronación del dique suele ser la variable determinante del impacto visual.

Frente al bloque cúbico convencional, las piezas de segunda generación de la fig. 1 presentan factores de rugosidad menores (ver Bruce, et al., 2009 y Medina y otros, 2010) y generan por tanto menores caudales de rebase permitiendo la reducción de la cota de coronación y el impacto visual con una reducción global del impacto ambiental de la obra durante la construcción y en la fase de servicio.

Frente a las piezas masivas convencionales (cubo, cubo Antifer, etc.), las piezas de segunda generación (Accropode, Core-loc, Xbloc, Cubípodo, etc.) en disposición monocapa permite ahorrar mucho hormigón, con la consiguiente reducción de costes y de la huella energética y del carbono. Frente a otras piezas especiales para mantos monocapa, el Cubípodo permite ahorrar acero en encofrados (dos puestas día), así como el espacio de acopio y fabricación necesarios para la construcción del dique.

Así pues, como regla general, el uso de mantos monocapa permite un ahorro económico importante en la construcción del manto principal y el espaldón, mayor si el temporal de cálculo y la longitud del dique son mayores. Los ahorros económicos de las soluciones de manto monocapa respecto de los mantos de cubos bicapa convencionales son aproximadamente del 20% al 40%, según el tipo de pieza utilizada. La huella energética y de carbono del manto puede reducirse en el rango 40% al 60%, ya que el consumo de hormigón es el factor de la obra que más se reduce con el uso de mantos monocapa y piezas de elevada estabilidad hidráulica.

5. Resumen y Conclusiones

En este artículo se describen las ventajas económicas y ambientales de los mantos principales monocapa de diques en talud frente a los bicapa. En primer lugar se describe la evolución de los distintos tipos de piezas prefabricadas de hormigón desarrollados desde la utilización del bloque cúbico o paralelepípedo en el S. XIX y la aparición del Tetrapod en 1950, para ser utilizadas como escollera artificial en la construcción de diques en talud. Desde 1950 hasta la rotura del dique de Sines en 1978 se desarrollaron las piezas de primera generación (Tetrapod, Dolo,...), pensadas para tener una elevada estabilidad hidráulica y ser colocadas en dos

capas de forma aleatoria. Estas piezas de primera generación permitían reducir el peso individual de las piezas para resistir el mismo clima marítimo, pero con el problema de que su resistencia estructural era muy baja debido a su esbeltez. El desastre del dique de Sines (rotura de Dolos de $W[t]=42$) propició el desarrollo de las piezas de segunda generación (Accropode, Core-loc, Xbloc, etc.) cuyo objetivo era tener una estabilidad hidráulica alta pero garantizando una resistencia estructural intermedia y con la ventaja de poderse utilizar en mantos monocapa con colocación trabada. Finalmente, la aparición del Cubípedo, permite la colocación aleatoria en una o dos capas con elevados coeficientes de estabilidad en ambos casos y, además, tiene una elevada resistencia estructural.

Así pues, la regla general es utilizar piezas de hormigón en masa cuando no es posible construir el manto con escollera natural, ya que la solución japonesa del armado para garantizar la integridad estructural de las piezas de hormigón no es recomendable con carácter general debido al elevado coste económico y ambiental del acero, los graves problemas logísticos que genera la producción masiva de piezas armadas y las dudas sobre durabilidad y corrosión a largo plazo.

En las costas españolas, el manto bicapa convencional de bloques cúbicos o paralelepípedicos es el predominante en todas las fachadas marítimas independientemente del temporal de cálculo, de las condiciones geotécnicas y de las tolerancias de construcción, debido a la aversión que existe en España a los mantos monocapa de respuesta rígida construidos con piezas “bulky” de segunda generación. Sin embargo, en el resto del mundo, además de los diques construidos con piezas esbeltas (Dolo, Tetrapod, etc.) armadas y sin armar, en las últimas décadas se han construido cientos de diques con piezas “bulky” (Accropode, Core-loc, Xbloc, etc.) de hormigón en masa en disposición monocapa ($W[t] \leq 47$). La

reducción en el consumo de hormigón y del peso de las piezas es tan grande utilizando piezas “bulky” en mantos monocapa que se pueden compensar las evidentes ventajas logísticas de producción y colocación del bloque cúbico convencional. La mejora de las técnicas constructivas y de control de obra permiten construir mantos monocapa que pueden reducir a menos de la mitad el consumo de hormigón y las huellas energéticas y del carbono. Además, la pieza masiva Cubípodo de colocación aleatoria permite alcanzar para mantos monocapa cualquier tamaño de pieza ($W[t]>150$), debido a su elevada resistencia estructural, por lo que puede ser utilizada como sustituta del manto bicapa de bloques cúbicos en cualquier situación climática ($Hs[m]>10$).

Finalmente, se pone de manifiesto la importancia de la reducción del consumo de hormigón en el diseño y construcción del manto principal de los diques en talud, debido al impacto que tiene no sólo en el coste económico sino también en la huella energética y del carbono y por tanto del impacto ambiental de la obra. La sustitución de un manto convencional bicapa de bloques cúbicos por un manto monocapa de piezas “bulky” de segunda generación (Accropode, Core-loc, Xbloc,...) o de cubípodos puede suponer reducciones del coste del manto de más del 40% y reducciones de la huella energética y de carbono aún mayores. Resulta evidente que debe recomendarse el cambio de los hábitos de diseño de mantos de rompeolas en España, superando la aversión al riesgo y aprovechando la mejora de los diseños modernos y las técnicas constructivas y de control de obra. El diseño de diques en España debe marchar en la dirección internacional de mantos monocapa como solución por defecto, aunque considerando que puede haber situaciones excepcionales que aconsejen los diseños conservadores bicapa del pasado

(incertidumbre climática o del fondo marino, dificultades constructivas o de control de obra, etc.).

6. Referencias

- Bruce, T. and Chick, J. 2009. Energy and Carbon Costing of Breakwaters. Proc. Coastal, Marine Structures and Breakwaters 2009, Thomas Telford Ltd., Vol 1, 582-590.
- Bruce, T., Van der Meer, J.W., Franco, L. and Pearson, J.M. 2009. Overtopping performance of different armour units for rubble mound breakwaters. Coastal Engineering, 56 (2009): 166-179.
- Gutiérrez-Serret R., Grassa, J.M. and Grau, J.I. 2009. Breakwater development in Spain. The last ten years. Proc. Coastal, Marine Structures and Breakwaters 2009, Thomas Telford Ltd., Vol 1, 43-61.
- Hanzawa, M., Kato, T., Kishira, Y., Ozawa, Y., Niidome, Y., Murakami, T., Ono, A., Hidaka, K., Yoshida, H., and Tanaka, I. 2006. Fully reinforced 80t Dolos and sloping top caisson in Hososhima Port. Proc. 30th Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE, 4805-4814.
- Hammond, G. and Jones, C. 2008. Embodied energy and carbon in construction materials. Proc. Inst. Civil Engineers: Energy, 161, 2, 87–98, Thomas Telford, London.
- Medina, J.R., Gómez-Martín, M.E., Corredor, A., Santos, M., 2010. Diseño de diques en talud con el manto principal de cubípodos. Revista de Obras Públicas, Madrid, Spain, 2010, 157 (3515): 37-52.
- WRAP. 2006. Waste & Resources Action Programme. The CO₂ emissions estimator tool for the use of aggregates in construction. www.wrap.org.uk.