

EL CUBÍPODO: NUEVO ELEMENTO PARA LA REDUCCIÓN DE COSTES EN LA CONSTRUCCIÓN DE DIQUES EN TALUD

ANTONIO CORREDOR MOLGUERO, INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. Jefe de Oficina Técnica de SATO (Grupo OHL). acorred@ohl.es.

JOSEP R. MEDINA, DOCTOR INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. Catedrático de Universidad, Director del Laboratorio de Puertos y Costas de la Universidad Politécnica de Valencia. jrmedina@upv.es.

Resumen

Este artículo describe las características técnicas del Cubípodo, un nuevo elemento prefabricado de hormigón para su uso en el manto principal de los diques en talud como alternativa al bloque cúbico convencional. El Cubípodo es un elemento de forma básica cúbica caracterizado por la existencia en sus caras de protuberancias de forma tronco piramidal que evitan la compactación heterogénea del manto y aumentan la fricción con las capas inferiores. Mantiene la robustez estructural y las ventajas logísticas (acopio, manipulación y colocación con pinzas de presión, etc.) del cubo convencional, pero con mucha mayor estabilidad hidráulica frente al oleaje y garantizando su colocación aleatoria a corto y largo plazo. Permite la construcción de mantos monocapa ($K_D=12$) mucho más estables que los bicapa de cubos ($K_D=6$), con grandes ahorros económicos (40%) y reducción de las huellas energéticas y del carbono. El Cubípodo está patentado internacionalmente (EU, EE.UU., BRA, CN, etc.) por la Universidad Politécnica de Valencia y está licenciado a SATO, que también tiene la patente del encofrado articulado tipo flanera para la fabricación

eficiente de Cubípodos (dos puestas/día). El Cubípodo recibió recientemente la medalla de oro con mención especial del jurado (sección D[construcción]) y el premio “García Cabrerizo” del XXXIX Salón Internacional de Invenciones de Ginebra (6-10 abril 2011).

1. Introducción

Desde la aparición del Tetrápodo en 1950, una gran variedad de elementos para la formación de mantos de diques han sido desarrollados en todo el mundo con objeto de mejorar la estabilidad hidráulica del manto principal de los diques en talud. La estabilidad hidráulica de una pieza se suele definir con el coeficiente de estabilidad (K_D) de la fórmula clásica de Hudson popularizada por el SPM (1984); en la fórmula de Hudson el peso de la pieza es inversamente proporcional al coeficiente de estabilidad. Por esta razón, a lo largo de los años se ha buscado el diseño de piezas que maximicen dicho coeficiente con el objeto de poder reducir el peso de los elementos del manto y por tanto el coste de las obras. Cada forma (cubo, Tetrápodo, Dolo, Accropode, Core-loc, Cubípodo, etc.) tiene unas características de estabilidad hidráulica diferentes, una resistencia estructural distinta, permite o no la colocación en una sola capa y precisa o no una colocación ordenada o trabada para garantizar su estabilidad a largo plazo.

La Figura 1 muestra las piezas seleccionadas por Dupray and Roberts (2009) para ilustrar la evolución en el diseño de piezas especiales para los mantos de diques en talud. Una primera generación de piezas, hasta el desastre del dique de Sines en 1978, buscaban una gran estabilidad hidráulica con la disposición bicapa y colocación aleatoria convencional (cubo, Tetrápodo, Dolo, etc.), y una segunda generación de piezas, posterior a la rotura de dolos que provocó el fallo del dique de

Sines (Portugal) en 1978, buscaban un equilibrio entre la robustez estructural y la estabilidad hidráulica con disposición monocapa.

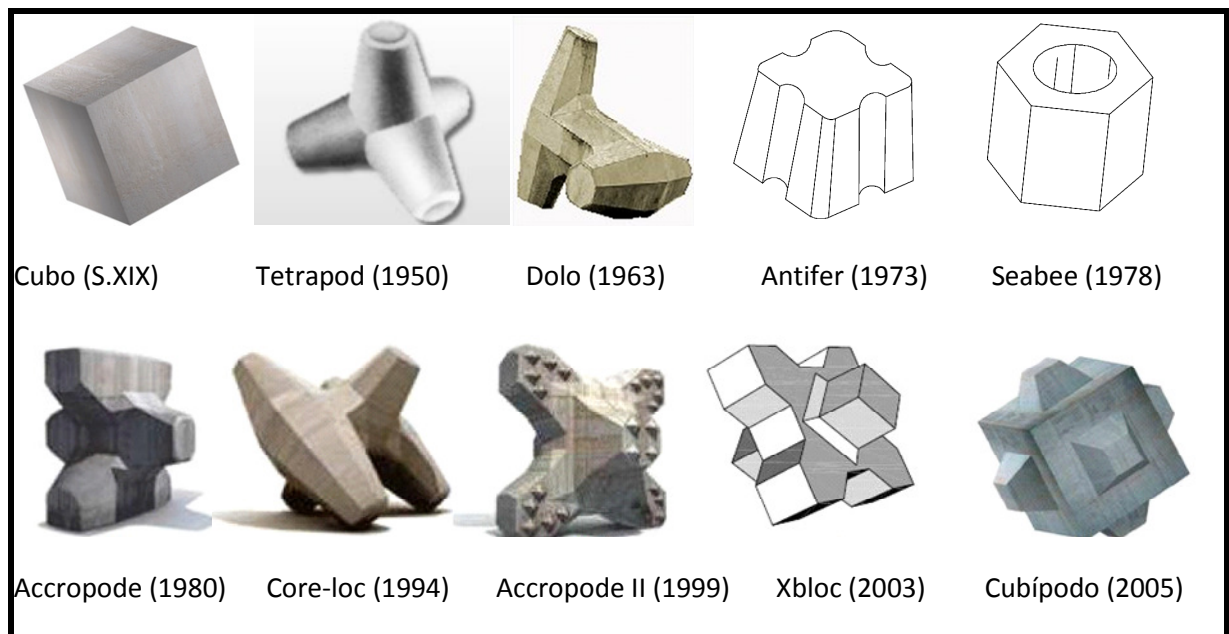


Figura 1. Evolución de las piezas para el manto principal (Dupray and Roberts, 2009).

En este artículo se describen las investigaciones realizadas para el desarrollo del Cubípodo, un nuevo elemento para la formación de mantos de diques en talud. La Figura 2 muestra un prototipo de $W[t]=16$ utilizado en los ensayos de caída de prototipos realizados en el Puerto de Alicante (ver Medina et al., 2011). Se trata de un elemento de forma básica cúbica o paralelepípedica que dispone de una protuberancia tronco piramidal en cada cara para evitar el acoplamiento entre elementos y aumentar la fricción con la capa inferior de filtro o manto secundario.

El Cubípodo presenta las ventajas logísticas y de resistencia estructural propias del cubo convencional, resolviendo los problemas típicos de adoquinamiento del bloque cúbico tradicional gracias a las protuberancias en sus caras. Los cubípodos reducen significativamente el modo de fallo de compactación heterogénea del manto principal de cubos descrito por Gómez-Martín y Medina

(2006), aumentando la capacidad resistente del dique frente a la extracción de piezas producidas por el oleaje. El Cubípodo se ha diseñado con el objetivo de aprovechar las ventajas de los bloques cúbicos y superar sus principales inconvenientes del bloque cúbico convencional (baja estabilidad hidráulica, adoquinamiento incontrolado por compactación heterogénea, elevados caudales de rebase y baja fricción con el manto secundario), gracias a las protuberancias diseñadas en sus caras.



Figura 2. Cubípodo de $W[t]=16$.

Las características del Cubípodo han quedado verificadas en los diferentes experimentos desarrollados dentro del Proyecto CUBIPOD (2007-2009) y CUBIPOD2 (2010), entre los que cabe destacar: ensayos de caída de prototipos (Puerto de Alicante-ES), ensayos físicos de estabilidad hidráulica 2D y 3D de morros y troncos monocapa y bicapa, ensayos físicos de rebase, etc (Laboratorios INHA-ES, LPCUPV-ES, IHCantabria-ES, AAU-DK).

Por otro lado, la Oficina Técnica de SATO ha diseñado y patentado un encofrado específico tipo flanera (ver Figura 6) para la fabricación eficiente de cubípodos con un proceso y rendimientos similares a los del bloque cúbico convencional (dos puestas/día). Todo ello permite un ahorro de hormigón entre el 40% y el 60%, con la consiguiente reducción de costes económicos e impacto ambiental durante la fase de construcción y durante la fase de servicio.

2. Aspectos innovadores y ventajas del Cubípodo

El Cubípodo es una pieza robusta de la familia de las piezas masivas (cubo, paralelepípedo, bloque Antifer, cubo modificado, etc.) para su colocación aleatoria en mantos de diques en talud. Con la ventaja adicional fundamental de que puede ser utilizado en mantos monocapa como alternativa a las piezas especiales tipo “bulky” (Accropode, Core-loc, Xbloc, etc.).

El Cubípodo ha sido ensayado en diferentes modelos físicos a escala (2D y 3D), así como en ensayos de caída de prototipos de $W[t]=16$, mostrando unas características excepcionales que lo diferencian del resto de elementos desarrollados hasta la fecha. Entre sus características referidas al bloque cúbico convencional, se pueden destacar:

- No se adoquina y genera mayor fricción con la capa de filtro.
- Garantiza una porosidad uniforme del manto principal del dique.
- Tiene una gran resistencia estructural.
- Tiene una elevada estabilidad hidráulica 2D en mantos monocapa y bicapa
- Tiene mayor estabilidad hidráulica 3D en morros
- Menor remonte y rebase.
- Es tan sencillo de fabricar, manipular y almacenar como el bloque cúbico.

- Tiene también una manipulación sencilla y segura con pinzas de presión.
- El acopio en parque es también muy eficiente.
- La colocación aleatoria con pinzas de presión muy fácil en obra
- Permite la colocación monocapa y también bicapa.
- El ahorro económico y de materiales es muy grande, tanto en disposición monocapa como bicapa.

Las principales ventajas y aspectos innovadores del Cubípodo respecto de otras piezas, ya sean de tipo masivo o “bulky”, se describen a continuación:

2.1. Evita el adoquinamiento del bloque cúbico convencional.

Impide el acoplamiento cara a cara de los bloques cúbicos y paralelepípedos tradicionales aumentando tanto la aleatoriedad de colocación de los propios elementos del manto, como la fricción del manto con la capa inferior ya que las protuberancias penetran en dicha capa. Consecuentemente se dificulta la extracción de los elementos del manto y el deslizamiento de los mismos (ver Gómez-Martín and Medina, 2007).



Figura 3. Adoquinamiento natural de bloques cúbicos y aleatoriedad natural de cubípodos.

2.2. Porosidad del manto uniforme.

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. 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 suelen ensayar modelos contruidos a mano con un control de obra “perfecto” que no se puede ni aproximar 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 tienen fuertes limitaciones en los equipos constructivos sometidos al viento, el oleaje y otras inclemencias atmosféricas.

En el manto de cubos es difícil conseguir en obra la porosidad de proyecto y, si se consigue, la compactación heterogénea la modificará con el paso del tiempo y la acción de los temporales. Por el contrario, el manto de cubípodos tiene una porosidad que tiene muy poca variabilidad debido a la propia forma del Cubípodo, que en los taludes tiende a colocar los núcleos cúbicos a distancias homogéneas de los núcleos cúbicos vecinos, dándole una apariencia de regularidad 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 debido a la compactación heterogénea que sufren los bloques cúbicos tanto durante la construcción como durante la fase de servicio de la obra (ver Medina et al., 2010a).

2.3. Gran robustez.

El Cubípodo presenta una elevada resistencia estructural individual de los elementos a la rotura debido a la poca esbeltez de las partes del mismo y la forma troncopiramidal de las protuberancias que previenen las flexiones y torsiones en el hormigón. Los ensayos de caída de prototipos (ver Medina et al. 2011) han probado que el Cubípodo resiste impactos y caídas mayores (altura equivalente crítica $h_{ec}[m]=3.1$) que el bloque cúbico convencional ($h_{ec}[m]=1.9$) sobre plataforma rígida; Por otro lado, la resistencia a los impactos de las piezas masivas (cubo y Cubípodo) es muy superior a la de las piezas “bulky” como el Accropode, Core-loc y Xbloc, que sólo resisten caídas de unos pocos decímetros (ver Muttray et al., 2005).

2.4. Gran estabilidad hidráulica y menor rebase.

Aumenta la resistencia de los diques frente al oleaje al evitar el adoquinamiento y los deslizamientos, evitando así la pérdida de elementos en la zona superior del manto. El manto es muy homogéneo a pesar de su colocación aleatoria y se reduce el remonte y el rebase correspondiente (tanto el manto bicapa como el monocapa). El coeficiente de estabilidad (K_D) del manto bicapa es más de cuatro veces superior al del manto convencional de cubos. Además, la homogeneidad del manto de cubípodos permite la colocación aleatoria en una sola capa; incluso en el caso de manto monocapa de cubípodos, la resistencia a la rotura total del dique es muy superior al manto convencional de cubos bicapa. La Tabla 1 muestra los coeficientes de estabilidad de algunas piezas y una estima de los coeficientes de seguridad implícitos, para dique sin rebase y oleaje sin limitación de fondo, en función del número de capas y del tramo del dique (tronco y morro). Se

observa que los coeficientes de seguridad implícitos estimados, son mayores en el caso de los morros y de los mantos monocapa con respuesta más rígida.

Tabla 1. K_D y coeficientes de seguridad implícitos del cubo, Cubípodo, Accropode y Xbloc								
Tramo	Pieza	KD	n° capas	talud	Inicio de Destrucción (IDe)		Inicio de Averías (IDa)	
					SF(IDe5%)	SF(IDe50%)	SF(IDa5%)	SF(IDa50%)
tronco	cubo	6,0	2	3/2	1,05	1,35	0,67	0,86
	Cubípodo 2	28,0	2	3/2	1,09	1,40	0,82	0,99
	Cubípodo 1	12,0	1	3/2	1,31	1,64	1,06	1,27
	Accropode	15,0	1	4/3	1.05 a 1.40	1.26 a 1.51	0.93 a 1.24	1.15 a 1.38
	Xbloc	16,0	1	4/3	1,17	1,68	1,17	1,32
morro	cubo	5,0	2	3/2	1,17	1,40	0,88	1,13
	Cubípodo 2	7,0	2	3/2	1,19	1,36	0,99	1,18

Tabla 1. Coeficiente de estabilidad (K_D) y coeficientes de seguridad implícitos (SF) del cubo, Cubípodo, Accropode y Xbloc (Medina y otros, 2010b).

2.5. Facilidad fabricación, manipulación, almacenamiento y colocación.

La facilidad de ejecución del manto de cubípodos es incluso superior al de los diques con bloques cúbicos convencionales debido al auto-posicionamiento aleatorio de los cubípodos y resulta mucho mayor que la de los diques con elementos de colocación no aleatoria (trabados, orientados, uniformes, etc.). La colocación de los cubípodos es aleatoria con pinzas de presión (ver Figura 4), no requiriendo la colocación cuidada que exigen otras tipologías de piezas existentes en el mercado, ya que no se precisa ningún requisito en la orientación de las unidades individuales para alcanzar una buena colocación (aleatoria y de porosidad homogénea). El encofrado necesario para la fabricación es sencillo, tipo flanera, similar a los utilizados para fabricar bloques cúbicos (ver Figura 6). La manipulación de las piezas se realiza con pinzas de presión dobles, similares a las utilizadas para colocar cubos (ver Figura 4). El almacenamiento de cubípodos en parque es eficiente, se pueden utilizar las disposiciones abierta (porosidad global=50%) y cerrada (porosidad

global=30%) mostradas en la figura 5, recomendadas para tamaños $W[t]<20$ y $W[t]\geq 20$ respectivamente.



Figura 4. Manipulación con pinzas de presión de cubos y cubípodos.

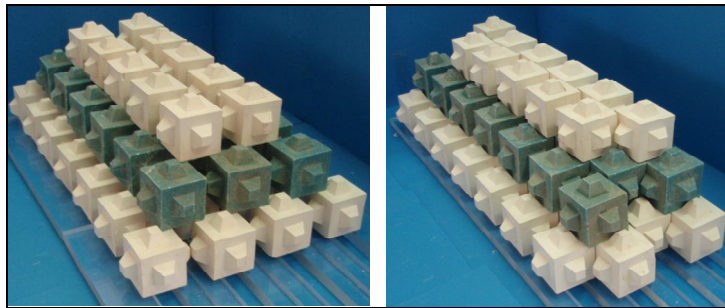


Figura 5. Disposición abierta y cerrada de almacenamiento de cubipodos en parque.

2.6. Ahorro económico y de materiales:

Comparado con los elementos cúbicos o paralelepípedicos tradicionales, el Cubípodo permite utilizar piezas mucho más pequeñas para resistir los mismos temporales debido a su elevada estabilidad hidráulica, por lo que se reduce el volumen de hormigón requerido para la construcción del dique con el consiguiente ahorro económico y reducción del impacto ambiental. Referido al manto convencional de cubos bicapa, los mantos monocapa y bicapa de cubípodos pueden reducir el coste económico entre un 15% y un 40% y los consumos de hormigón entre un 35% y un 60%. Los ahorros económicos dependen de las dimensiones del dique (ver Corredor y otros, 2008), siendo la longitud del dique, su profundidad y el oleaje de diseño los principales factores que influyen en el ahorro; los ahorros

económicos son mayores para los diques más grandes sometidos a oleajes más intensos.

3. Estado actual de la tecnología

Para caracterizar completamente esta nueva pieza, SATO y UPV apoyados por el CDTI han desarrollado el Proyecto CUBIPOD incluyendo diseño de encofrados óptimos, diseño de pinzas de presión, ensayos de caída de prototipos y ensayos físicos 2D y 3D en diferentes laboratorios (UPV-ES, INHA-ES, IH Cantabria-ES, AAU-DK) con objeto de evaluar la estabilidad hidráulica y rebase en tronco de los mantos monocapa y bicapa de cubípodos y la estabilidad hidráulica en morro de cubos y cubípodos bicapa. Además se ha realizado un estudio detallado paramétrico de los condicionantes, equipos y rendimientos esperables de la construcción de diques con cubos y cubípodos, resultando un considerable ahorro económico, tanto mayor cuanto más grande es el dique y el oleaje de cálculo. Tiene especial relevancia el diseño de un encofrado articulado tipo flanera que permite alcanzar los elevados rendimientos de los bloques cúbicos convencionales (dos puestas/día). A continuación se describen algunos de los principales estudios desarrollados durante el Proyecto CUBIPOD.

3.1. Diseño del encofrado.

Los técnicos de SATO han diseñado y patentado un encofrado que permite fabricar cubípodos al mismo ritmo que bloques cúbicos convencionales (dos puestas día). El encofrado consta de dos elementos: (1) una base estática y (2) un encofrado superior con seis elementos articulados que permiten llenar y vibrar en dos fases y desencofrar cada 6 horas. La Figura 6 muestra dos bases y un encofrado superior

articulado sobre una de las bases; el encofrado superior se coloca sobre una base con las cuatro articulaciones inferiores cerradas para proceder al llenado y vibrado principal, a continuación se cierran las dos articulaciones superiores y se procede al llenado y vibrado secundario de la zona superior; después de un tiempo de fraguado corto, se abren las articulaciones del encofrado y se cambia el encofrado superior a otra base para repetir el ciclo. Además, se han adaptado las pinzas de presión de cubos para manipular cubípodos, la Figura 4 muestra la pinza doble utilizada para manipular cubípodos durante los ensayos de caída de prototipos.



Figura 6. Bases del encofrado y encofrado superior articulado sobre base del Cubípedo.

El diseño del sistema de almacenamiento de cubípodos en parque se ha realizado de forma que se consiga una porosidad similar a la de los bloques cúbicos, debido a su gran eficiencia y aprovechamiento del espacio. La Figura 7 muestra el almacenamiento abierto en tres niveles utilizado para los ensayos de caída de prototipos de $W[t]=16$. La fabricación de los prototipos de Cubípedo para los ensayos de caída permitió comprobar que se podía desencofrar a las 6 horas y mantener un ritmo de producción similar al de los bloques cúbicos (dos puestas/día). Tanto los

encontrados tipo flanera como las pinzas de presión son más pesados en el caso de cubípodos pero el impacto económico es pequeño debido al gran rendimiento que alcanzan.



Figura 7. Acopio en disposición abierta de cubípodos y de cubos en parque.

3.2. Ensayos de caída de prototipos:

Durante la primera semana de marzo de 2008 se desarrollaron los ensayos de caída de prototipos en el Parque de Bloques de SATO del Puerto de Alicante. Para los ensayos de caída de prototipos del Proyecto CUBIPOD se utilizaron piezas de gran tamaño ($W[t]=15$ para cubos y $W[t]=16$ para cubípodos) y plataformas de caída muy exigentes (hormigón armado de más de un metro de espesor). Para cubos y cubípodos, se realizaron ensayos de volteo y de caída libre hasta $h=2$ metros de altura; además, se realizaron ensayos de caída extrema de cubípodos hasta $h=9.5$ metros de altura. La mayor resistencia a la caída de cubos y cubípodos en estas condiciones demuestra su mayor robustez frente a otros tipos de piezas más esbeltas como el Accropode, Core-loc o Xbloc. La Figura 8 (ver Medina et al.,

2011) muestra la pérdida relativa de masa (%) de cubos y cubípodos en función de la altura de caída equivalente (h_e), la cual tiene en cuenta tanto la altura de caída (h) como el número de caídas (n). El Cubípodo ha demostrado resistir alturas de caída equivalentes inferiores a 3.1 metros con pérdidas de masa inferiores al 4%, mientras que los cubos sólo resisten alturas de caída equivalentes inferiores a 1.9 metros con la misma pérdida de masa. Por tanto, se puede afirmar que la resistencia al impacto del Cubípodo es superior a la del bloque cúbico convencional.

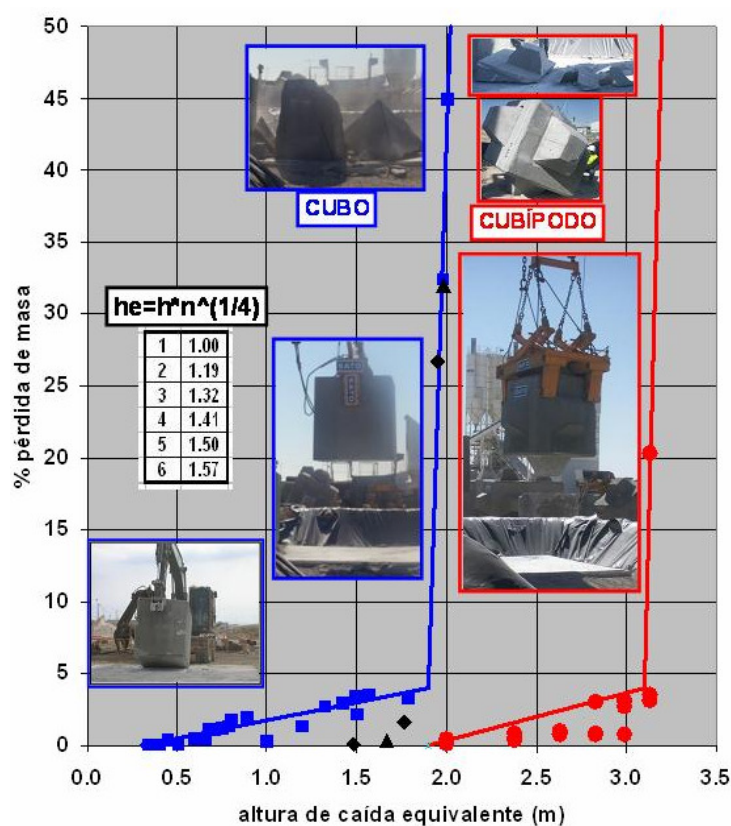


Figura 8. Pérdida de masa de los prototipos de cubos y cubípodos en caída libre.

3.3. Ensayos 2D de estabilidad hidráulica (tronco).

Se han realizado ensayos 2D de estabilidad hidráulica de mantos bicapa de cubos y cubípodos y mantos monocapa de cubípodos en el canal de ensayos del LPC-UPV (30.0x1.2x1.2 m.) y en el canal de ensayos del INHA (52.0x1.8x2.0 m.).

Los ensayos de estabilidad hidráulica se realizaron sobre sección estándar sin rebase ni limitación de fondo. La Figura 9 muestra los números de estabilidad, $N_s = H_s / \Delta D_n$ obtenidos en los diferentes ensayos 2D (tronco), en mantos de talud 3/2, obtenidos para Inicio de Avería (IA), Inicio de Avería de Iribarren (IAI) e Inicio de Destrucción (ID) en función del Número de Iribarren ($I_{rp} = T_p \tan \alpha / [2\pi H_{m0}/g]^{1/2}$). El manto de cubípodos bicapa (triángulos) es más estable que el monocapa (círculos) y éste es más estable que el manto bicapa de cubos convencional (cuadrados), ya que el ID del manto bicapa de cubos se produce antes que el IA del manto monocapa de cubípodos (ver Gómez-Martín y Medina, 2009).

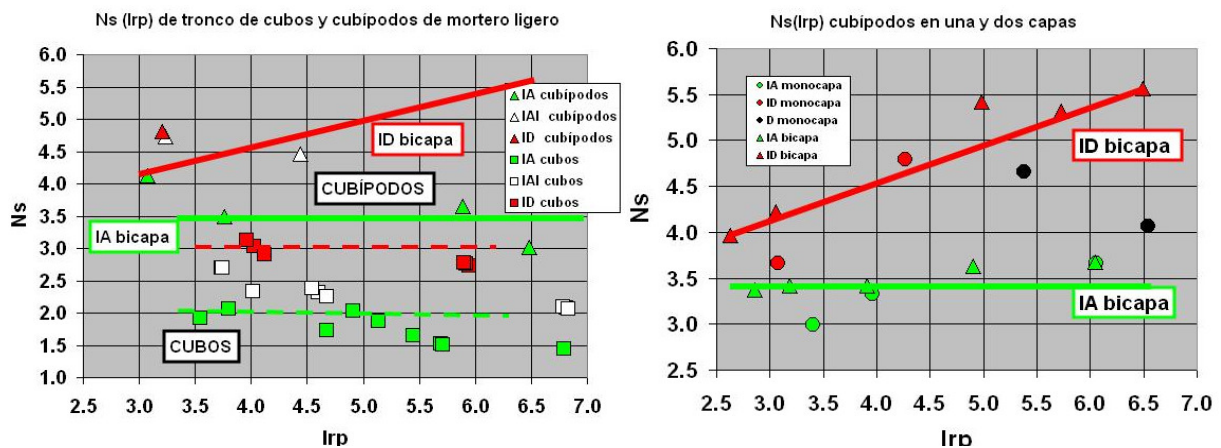


Figura 9. Números de estabilidad $N_s(I_{rp})$ de mantos bicapa de cubos y cubípodos y de mantos monocapa y bicapa de cubípodos (oleaje irregular).

El manto de cubípodos monocapa tiene una elevada estabilidad hidráulica, debido al proceso de auto-reparación que se produce cuando se dan las primeras extracciones. Cuando salta una pieza del manto, las piezas que hay alrededor se reacomodan cubriendo la parte del filtro que quedaba visible al producirse la extracción. Este proceso de auto-reparación que se produce en el manto de cubípodos está relacionado con una de las características principales de la pieza, la

auto-organización, que facilita la colocación aleatoria de los cubípodos en el talud manteniendo una porosidad homogénea.

3.4. Ensayos 2D de remonte y rebase (tronco).

Se han realizado ensayos 2D de remonte y rebase de mantos bicapa de cubos y cubípodos y mantos monocapa de cubípodos en el canal de ensayos del LPC-UPV (30.0x1.2x1.2 m.). La Figura 10 muestra la sección genérica utilizada en los ensayos de rebase. La fórmula que mejor ajusta los caudales de rebase adimensional observados es la que se muestra a continuación, con los factores de rugosidad siguientes: $\gamma_f[\text{cubos}]=0.50$, $\gamma_f[\text{cubípodos bicapa}]=0.44$ y $\gamma_f[\text{cubípodos monocapa}]=0.46$ (ver Smolka y otros, 2009). Los mantos de cubípodos reducen los caudales de rebase y con ello se puede rebajar la cota de coronación, el consumo de hormigón y el coste de construcción del dique, así como el impacto visual de la obra.

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} < 10^{-7} \quad \text{si} \quad \frac{R_c}{H_{m0}} > 2.6$$

$$Q = \frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0.2 \cdot \exp \left(0.53 \cdot I_{rp} - 3.27 \cdot \frac{A_c}{R_c} - 2.16 \cdot \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f} \right)$$

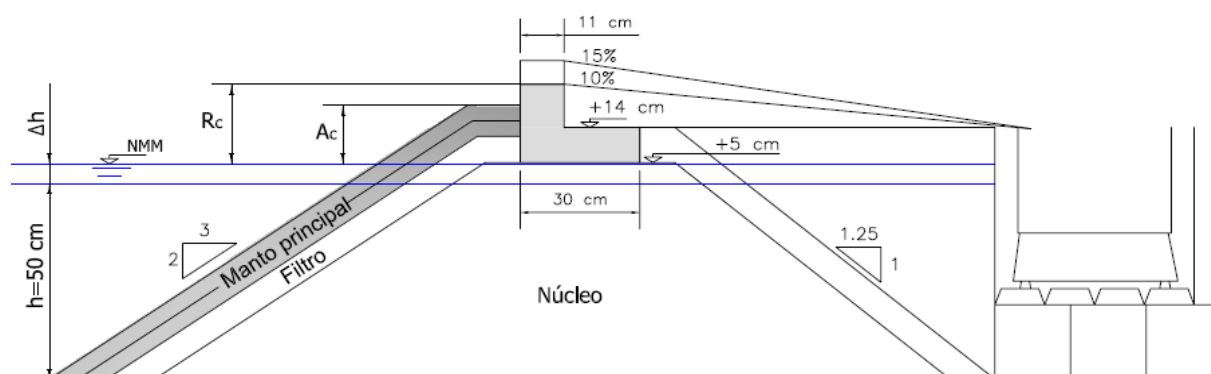


Figura 10. Sección genérica para ensayos de rebase.

3.5. Ensayos 3D de estabilidad hidráulica (morro):

Se han realizado ensayos 3D de estabilidad hidráulica de mantos bicapa de cubos y cubípodos en el tanque de oleaje y corriente del IH Cantabria-ES (24.8x8.5x1.5 m.) y en el tanque multidireccional de AAU-DK (17.2x12.0x0.72). El morro de cubípodos es más estable que el de cubos, tanto para oleaje unidireccional como direccional. La Figura 11 muestra dos de los modelos ensayados en IH Cantabria-ES y AAU-DK (ver Lomónaco et al., 2009 y Burcharth et al., 2010).



Figura 11. Modelos 3D de morros bicapa de cubípodos ensayados en IH Cantabria y AAU.

La Figura 12 muestra los números de estabilidad N_s en morros bicapa con talud 3/2 para IA e ID de cubos (cuadrados) y cubípodos (triángulos) en función del número de Iribarren, I_{rp} . Los cubípodos han resultado ser más estables en el morro que los cubos en el rango de situaciones climáticas típicas de las costas españolas ($3 < I_{rp} < 4$). Sin embargo, los cubípodos han resultado ser mucho más estables en el tronco que en el morro, tal y como se ha visto en la Figura 9.

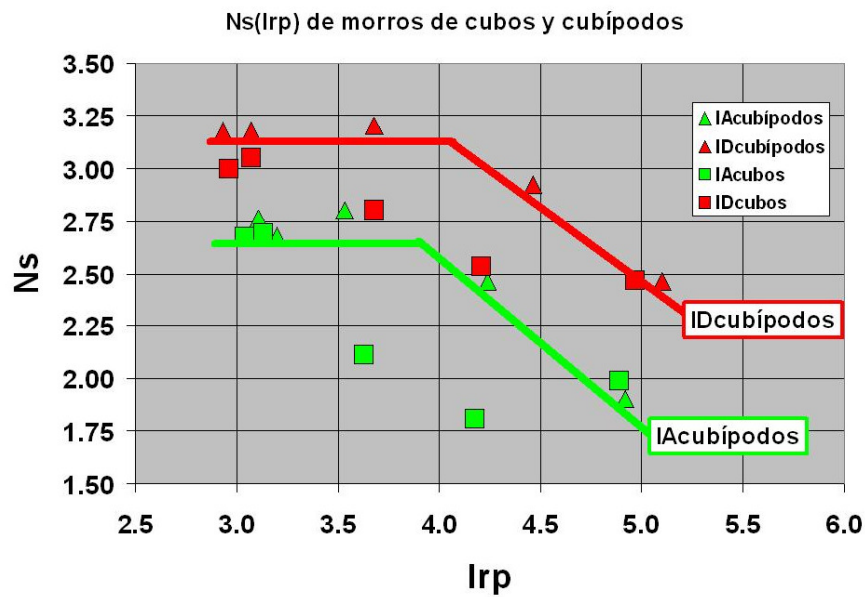


Figura 12. Números de estabilidad de morros bicapa de cubos y cubípodos (IH Cantabria).

4. Estudio paramétrico de costes:

Corredor y otros (2008) han realizado un estudio de la viabilidad económica del Cubípedo frente al cubo, considerando las distintas partidas de coste que intervienen en la fabricación y puesta en obra de los elementos del manto principal, especialmente los relativos a los siguientes procesos:

- Suministro de hormigón.
- Equipos fijos de manipulación (pinzas y encofrados), cuya repercusión depende del volumen de obra a acometer.
- Fabricación, que depende del equipo humano y material necesario y de la producción diaria óptima en cada caso.
- Preparación de la instalación para la fabricación de bloques, cuya repercusión depende del volumen de obra a acometer.
- Colocación, dependiente de los pesos de las piezas y de la geometría del dique, que condicionan las grúas y los medios de transporte.

- El acopio y manipulación muy dependiente de la compacidad del parque de almacenamiento y de los ritmos de fabricación y colocación.

La comparación de costes de utilización de bloques cúbicos y cubípodos en la construcción de mantos principales de diques en talud, se realiza mediante un estudio paramétrico para la sección tipo de la Figura 13, utilizando cubos en dos capas (B2) y cubípodos en una capa (C1) y dos capas (C2). El lado equivalente ($D_n=[W/\gamma_r]^{1/3}$) de la pieza, el talud ($\cot \alpha$) y la cota (del pie negativa y del manto positiva) definen la sección de referencia de la Figura 13.

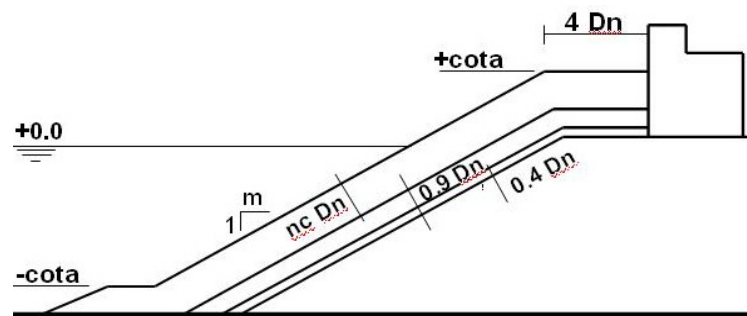


Figura 13. Sección tipo de referencia para estudio paramétrico de costes.

El estudio paramétrico analiza tres longitudes de dique representativos de diques pequeños, medianos y grandes: $L[m]=400, 1.000$ y 2.500 . Fijada la longitud y la geometría de la sección (Figura 13), se obtienen el volumen de hormigón y el número de unidades a fabricar. Se ha considerado un parque tipo de fabricación con camiones pera y andén con vertido por gravedad y acopio con grúa pórtico sobre carriles.

En la fabricación de los cubípodos respecto de los cubos convencionales se ha considerado el incremento correspondiente de medios y personal para tener en cuenta una mayor dificultad en el manejo del encofrado. Los costes de colocación se

han estimado en función de las distancias y pesos; considerándose las pinzas de manipulación de cubípodos un 50% más pesadas que las de bloques cúbicos y eligiendo el medio de colocación apropiado entre una lista de grúas habituales, analizando su ciclo. De esta forma se obtiene el rendimiento de colocación específico en cada caso.

Respecto del análisis del acopio para dimensionar el parque de almacenamiento, se ha considerado para los cubípodos las disposiciones mostradas en la Figura 5, abierta con porosidad $p\% \approx 50\%$ si $W[t] < 20$ y cerrada con porosidad $p\% \approx 30\%$ si $W[t] \geq 20$. Para los bloques cúbicos se ha tomado una calle de manipulación de $0.5 < \text{anchura}[m] < 1.0$ m y se ha estimado una porosidad media $p\% \approx 20\%$.

Para el análisis final del coste se ha repercutido el coste de instalación del parque sobre el total de la medición. El coste fijo de equipos incluye el coste de los encofrados, las pinzas de manipulación, desencofrado, colocación y la movilización de pórtico y grúa de colocación. En el coste de fabricación se ha considerado el total del tiempo de fabricación, y en el de colocación el tiempo de colocación necesario. El coste de manipulación se ha extendido al plazo total de la obra. El número de encofrados se ha ajustado en cada caso, para conseguir un óptimo global. En todos los casos se ha considerado un coste de suministro de hormigón fijo de 60 €/m³ y unos costes medios de equipos y mano de obra conforme a la experiencia del mercado actual. De esta forma se han analizado 153 casos, que se resumen en la Figura siguiente.

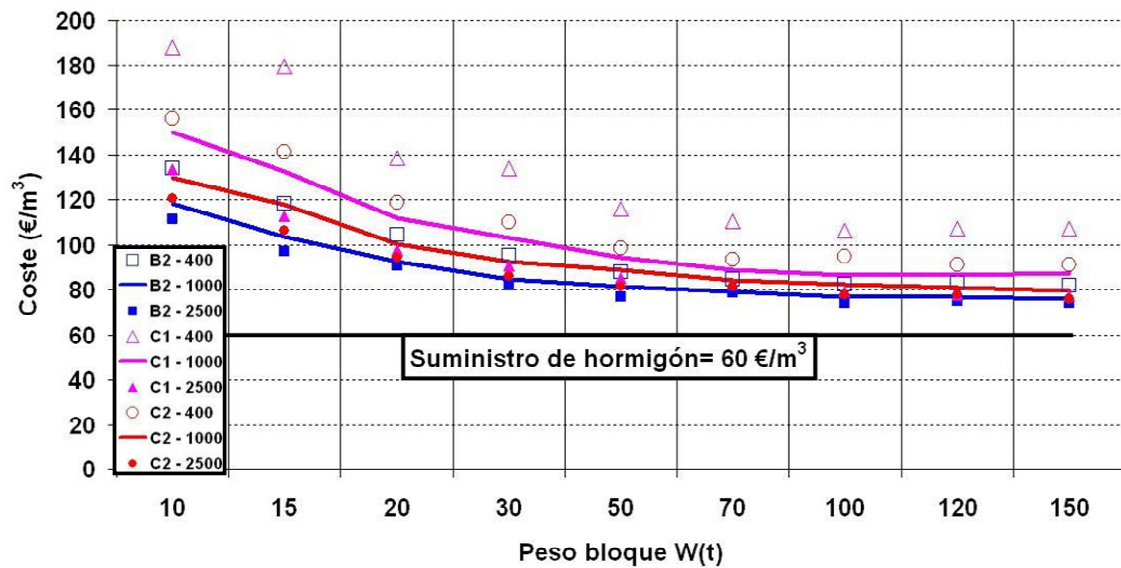


Figura 14. Coste unitario [€/m³] según la longitud del dique (L[m]) y peso de la pieza (W[t]).

La Figura 14 muestra los costes unitarios [€/m³] de los tres tipos de manto (B2, C1 y C2), para tres longitudes de dique (L[m]=400, 1000 y 2500), según el peso W[t] del elemento. Se observa que el coste unitario disminuye en todos los casos al aumentar el peso del bloque y la longitud del dique, y depende del tipo de pieza y número de capas, siendo el más económico el bloque cúbico en dos capas, a continuación el Cubípodo en dos capas y el más caro el Cubípodo en una capa.

En todos los casos estudiados, el hormigón supone un porcentaje mayor del 50% de los costes totales, por lo que resulta clave reducir el volumen de hormigón a suministrar siendo aquí donde radica la ventaja del Cubípodo debido a su gran estabilidad hidráulica que permite colocar piezas de menor peso tanto en monocapa como en bicapa. Dado que la disminución de tamaño supone un incremento del número de piezas a colocar, la comparación de costes globales no es inmediata. La Figura 15 muestra la comparación del coste del manto exterior por metro lineal de longitud de un dique con L[m]=1000 y cota[m]=15. Se observa que, el coste por metro lineal de un manto bicapa de cubos o cubípodos es prácticamente idéntico a

igualdad de peso (W), mientras que el coste del manto monocapa de cubípodos se reduce aproximadamente un 40%.

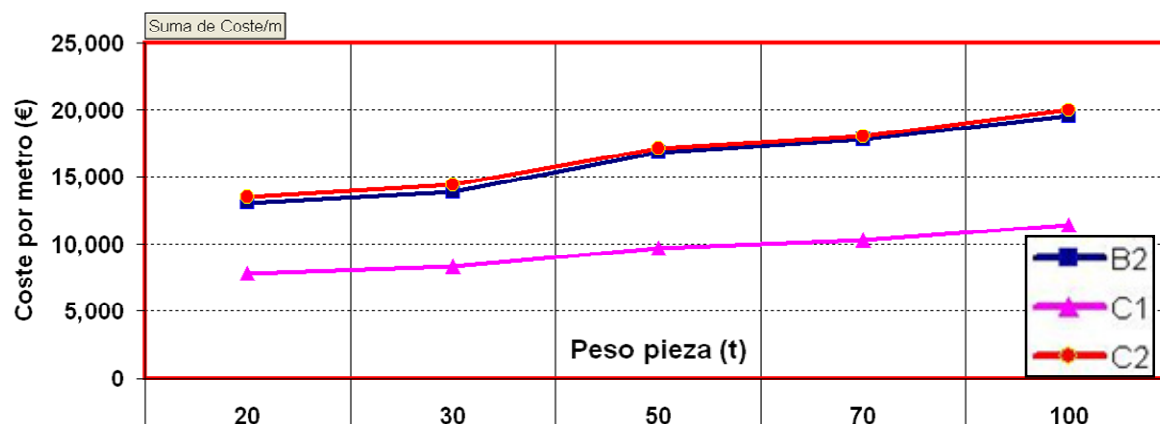


Figura 15. Coste por metro lineal de longitud de manto principal (cota[m]=15, $L[m]=1000$).

Teniendo en cuenta los coeficientes de estabilidad K_D de la Tabla 1, es viable construir mantos bicapa de cubípodos con la cuarta parte del peso del cubo y mantos monocapa de cubípodos con la mitad de peso del cubo equivalente. El costo global depende del número de piezas y su peso, pudiéndose conseguir ahorros importantes en el manto, del orden del 20% sustituyendo el manto bicapa de cubos por cubípodos y del orden del 40% si se construyen mantos monocapa de cubípodos. Los mantos de cubípodos tienen un coste global muy inferior al de cubos convencionales aunque el coste unitario de los cubípodos sea superior.

Para un mismo oleaje y profundidad, el peso de las piezas del manto ($W[t]$) será mayor en el manto convencional bicapa de bloques cúbicos (B2) que en el monocapa de cubípodos (C1) y las piezas serán aún de menos peso en el caso de cubípodos bicapa (C2) ya que el coeficiente de estabilidad es mayor (ver Tabla 1). Además, al tener un menor coeficiente de rugosidad, los mantos de cubípodos disminuyen los caudales de rebase, permitiendo reducir la cota de coronación del dique, con el consiguiente ahorro económico y reducción del impacto visual.

Para realizar una estimación preliminar de costes de construcción de mantos de bloques cúbicos (C_B) y cubípodos (C_C), se pueden utilizar las fórmulas de Molines (2009), donde $HOR[€]$ es el coste del m^3 de hormigón suministrado, $W[t]$ es el peso de las piezas del manto y $V[m^3]$ es el volumen total de hormigón utilizado en piezas de peso $W[t]$.

$$C_B \left[\frac{€}{m^3} \right] = (205 + HOR) + 1.00 \times \left[10^5 \times \left(\frac{1}{\ln(V \times W)} \right)^2 - 10^4 \times \left(\frac{1}{\ln(V \times W)} \right) \right]$$

$$C_C \left[\frac{€}{m^3} \right] = (265 + HOR) + 0.75 \times \left[10^5 \times \left(\frac{1}{\ln(V \times W)} \right)^2 - 10^4 \times \left(\frac{1}{\ln(V \times W)} \right) \right]$$

Dado que los diques en talud suelen tener diferentes tramos con tamaños de pieza distintos en función de la intensidad del oleaje a pié de dique en cada tramo, Medina y otros (2010b) estiman que el coste de ejecución material del manto principal de un dique vendrá dado por

$$Coste = \sum_{m=1}^M [V_m \times C_m (V_m \times W_m)]$$

donde M es el número de tamaños de pieza distintos del dique, m es el tamaño de pieza ($m=1, 2, \dots, M$), $W_m[t]$ es el peso de la pieza, $V_m[m^3]$ es el volumen total fabricado de ese tipo de pieza y $C_m[€/m^3]$ es el precio unitario correspondiente al tipo, peso de pieza y volumen total fabricado de esa pieza. En general, la optimización económica global de los diques suele propiciar el uso de pocos tipos de piezas de tamaño muy diferente, quedando del lado de la seguridad.

5. Conclusiones

En este artículo se describen los principales resultados obtenidos de los trabajos de investigación y desarrollo realizados dentro del Proyecto CUBIPOD. Se

describen los aspectos innovadores y ventajas del Cubípodo, un nuevo elemento para la formación de mantos de diques en talud, patentado por la Universidad Politécnica de Valencia y licenciado a SATO; describiéndose el encofrado articulado tipo flanera, diseñado por SATO para producir cubípodos de un modo similar al de los bloques cúbicos convencionales y las pinzas dobles adaptadas para manipular cubípodos en el parque de bloques de forma análoga a los cubos. Se describen los resultados de los ensayos de caída de prototipos resultando que los cubípodos son más resistentes a las caídas sobre plataforma rígida que los bloques cúbicos convencionales, así como los resultados de los ensayos físicos 2D y 3D a escala reducida realizados para estudiar la estabilidad hidráulica y rebase de cubos y cubípodos en tronco monocapa y bicapa y la estabilidad hidráulica de cubos y cubípodos bicapa en el morro. La estabilidad hidráulica del Cubípodo tanto en tronco como en morro es muy superior al bloque cúbico convencional. La Tabla 1 muestra los coeficientes de estabilidad (K_D) y los coeficientes de seguridad implícitos deducidos de las observaciones experimentales.

Finalmente, se realiza un estudio paramétrico de costes que permite comparar los costes de construcción de un manto principal de cubos bicapa con uno de cubípodos monocapa o bicapa, concluyéndose lo siguiente relativo al Cubípodo:

- Es una pieza con una gran resistencia estructural, ha demostrado ser una pieza muy robusta que resiste caídas desde mayor altura que los bloques cúbicos convencionales.
- Es una pieza que se coloca aleatoriamente sobre el talud con mucha facilidad y no está sometido a los adoquinamientos y fuertes cambios de porosidad observados en los mantos de cubos convencionales; teniendo una calidad de colocación en obra mucho mayor que los cubos al no tener tendencia al

adoquinamiento y propiciar una auto-colocación aleatoria sobre el talud con porosidad homogénea.

- Es sencillo de fabricar con un encofrado vertical tipo flanera con el que se obtienen rendimientos similares a los de los bloques cúbicos convencionales (dos puestas/día). Se pueden manipular con pinzas de presión y se pueden almacenar en poco espacio en disposición abierta o cerrada ($W[t]>20$).
- Tiene una gran estabilidad hidráulica en el tronco ($K_D[C2]_{\text{tronco}}=28$ y $K_D[C1]_{\text{tronco}}=12$) y también en el morro ($K_D[C2]_{\text{morro}}=7 > 5=K_D[B2]_{\text{morro}}$). Esto permite ahorrar coste, hormigón y reducir el requerimiento máximo de los equipos de manipulación y puesta en obra.
- Permite reducir el remonte y rebase sobre el dique, tiene factores de rugosidad, $\gamma_f[C2]=0.44$ y $\gamma_f[C1]=0.46$ menores que el del cubo $\gamma_f[B2]=0.50$, lo que permite reducir la cota de coronación, el volumen de hormigón del espaldón y el impacto visual.
- El manto de cubípodos genera mayor fricción con la capa inferior y reduce el riesgo de deslizamiento general que plantea el manto de bloques cúbicos convencional, que tiende a poner una cara de los cubos paralela al talud.
- Es una pieza ligeramente más cara de fabricar pero su repercusión por metro cúbico de hormigón no es importante a efectos de un cambio de bloque cúbico por Cubípodo debido a la mayor porosidad y estabilidad hidráulica del manto de cubípodos.
- Teniendo en cuenta los coeficientes de estabilidad hidráulica obtenidos (ver Tabla 1), se puede afirmar que en general los mantos convencionales de cubos bicapa (peso W) pueden sustituirse, aumentando la seguridad, por

mantos bicapa de cubípodos (peso W/4 con ahorro del orden del 20%) y por mantos monocapa de cubípodos (peso W/2 con ahorro del orden del 40%).

Considerando todos los factores anteriores, puede afirmarse que los mantos de cubípodos tienen un menor coste económico, consumen menos materiales, tienen una huella energética y del carbono menor y reducen el impacto visual que generan los bloques cúbicos convencionales. Las ventajas económicas y ambientales descritas anteriormente aumentan en el caso de los diques de mayor tamaño y son mayores en el caso de mantos monocapa, especialmente apropiados para los diques con limitación de fondo.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen al CDTI el soporte financiero para los trabajos de investigación y desarrollo del Cubípodo dentro del Proyecto CUBIPOD. También se agradece a la Autoridad Portuaria de Alicante y al consorcio TMS su apoyo para la realización de los ensayos de caída de prototipos dentro del recinto portuario.

7. Referencias

- Burcharth, H.F., Andersen, T.L., and Medina, J.R. (2010). Stability of Cubipod armoured roundheads in short crested waves. ASCE, 32nd ICCE, Shanghai, Paper No. 259.
- Corredor, A., Torres, R., Miñana, J.V., Fernández, E., Menéndes, C.F., Santos, M., Gómez-Martín, M.E., Goumy, R. and Medina, J.R. (2008). CUBÍPODO: Estudios de estabilidad hidráulica 2D y 3D, estudio del remonte y rebase,

- diseño del encofrado y ensayos de caída de prototipos. Libro de ponencias del III Congreso Nacional de la Asociación Técnica de Puertos y Costas, Organismo Público Puertos del Estado, 187-211.
- Dupray, S., Roberts, J. (2009). Review of the use of concrete in the manufacture of concrete armour units. Proc. of Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2009, ICE, Vol. 1, 245-259.
- Gómez-Martín, M.E., Medina, J.R. (2006). Damage progression on cube armored breakwaters. Proc., 30th Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE, 5229-5240.
- Gómez-Martín, M.E., Medina, J.R., 2007. Cubipod concrete armor unit and heterogeneous packing. Proc., 5th Coastal Structures Int. Conf., World Scientific, 140-151.
- Gómez-Martín, M.E. y Medina, J.R. (2009). Ensayos 2D y 3D de Estabilidad Hidráulica de Cubos y Cubípodos. Libro de Ponencias de las X Jornadas Españolas de Costas y Puertos, Universidad de Cantabria-Adif Congresos, 543-552.
- Lomónaco, P., Vidal, C., Medina, J.R. and Gómez-Martín, M.E. (2009). Evolution of Damage on Roundheads Protected with Cube and Cubipod Armour Units. Proc. Coastal, Marine Structures and Breakwaters 2009, Thomas Telford Ltd., Vol 1, 169-180+186-188.
- Medina, J.R., Gómez-Martín, M.E. and Corredor, A. (2010a). Influence of armor unit placement on armor porosity and hydraulic stability. Proc. 32nd ICCE, Shanghai, ASCE, Paper No. 255 / structures.41.
- Medina, J.R., Gómez-Martín, M.E., Corredor, A., Santos, M. (2010b). Diseño de diques en talud con el manto principal de cubípodos. Revista de Obras Públicas, Madrid, Spain, 2010, 157 (3515): 37-52.

- Medina, J.R., Gómez-Martín, M.E, Corredor, A., Torres, R., Miñana, J.V., Fernández, E., Menéndez, C.F. and Santos, M. (2011). Prototype Drop Tests of Cube and Cubipod Armor Units. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 137(2):54-63.
- Molines, J. (2009). Estabilidad de espaldones de diques en talud con mantos de cubos y cubípodos. Aplicación al dique de abrigo en Gandia (Valencia). Proyecto Fin de Carrera de la ETSICCP de Valencia, Sep. 2009.
- Muttray, M., Reedijk, J. S., Vos-Rovers, I., and Bakker, P. (2005). Placement and structural strength of Xbloc® and other single layer armor units. *Proc., Coastlines, Structures and Breakwaters 2005*, Thomas Telford, London, 556–567.
- Smolka, E., Zarranz, G. y Medina, J.R. (2009). Estudio Experimental del Rebase de un Dique en Talud de Cubípodos. Libro de Ponencias de las X Jornadas Españolas de Costas y Puertos, Universidad de Cantabria-Adif Congresos, 803-809.