

ENSAYOS DE CAÍDA DE CUBOS Y CUBÍPODOS

**J. R. Medina¹, M.E. Gómez-Martín², A. Corredor³, R. Torres³, J. V. Miñana³,
E. Fernández³, C. F. Menéndez³, M. Santos³**

1. *Laboratorio de Puertos y Costas, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera, 14, 46022 Valencia. jrmedina@upv.es*

2. *Departamento de Construcción, Universidad de Alicante, 03690 San Vicente del Raspeig, Alicante. esther.gomez@ua.es*

3. *SATO (Grupo OHL), Pº Castellana 259-D-8º, "Torre Espacio", 28046 Madrid. acorred@ohl.es, rtorres@ohl.es, jvicmina@ohl.es, efernand@ohl.es, cmenende@ohl.es, mosantos@ohl.es*

INTRODUCCIÓN

Los diques en talud son la tipología de referencia para las obras de abrigo portuarias por la facilidad de construcción, su respuesta robusta frente a los temporales y la menor exigencia a la cimentación. En general, se construyen con un núcleo poco permeable de todo tipo de cantera, sobre el que se superponen capas de piedra y elementos de tamaño creciente (núcleo, capas de filtro y manto principal). El coste de un dique rompeolas depende de factores físicos y de tres factores de diseño clave: el tipo de elemento de hormigón con el que se forma el manto principal (cubo, Tetrápodo, Dolo, etc.), el número de capas (monocapa ó bicapa) y el tipo de colocación (aleatoria o especial). Cada pieza/nºcapas/colocación tiene un coeficiente de estabilidad hidráulica, resistencia estructural y condicionantes logísticos distintos.

La búsqueda de formas nuevas con coeficientes de estabilidad elevados es una línea de investigación clásica que llevó en los años 60 a la invención del Dolo, que teóricamente permitía reducir mucho el peso de los elementos del manto. Sin embargo, la rotura de diques como los de Sines y San Ciprián puso de relieve la importancia de la resistencia estructural del elemento además de la estabilidad hidráulica. Dupray y Roberts (2009) analiza la evolución de las piezas prefabricadas para los mantos de diques en talud señalando que el colapso de diques protegidos con piezas esbeltas impulsó el desarrollo de piezas más robustas ("bulky") como el Acrópodo, Core-Loc y Xblock y una segunda generación más reciente como el

Accrópodo II y el Cubípodo. La Figura 1 muestra en la primera fila algunos tipos de piezas anteriores al desastre de Sines (1978) y en la segunda fila piezas más modernas.

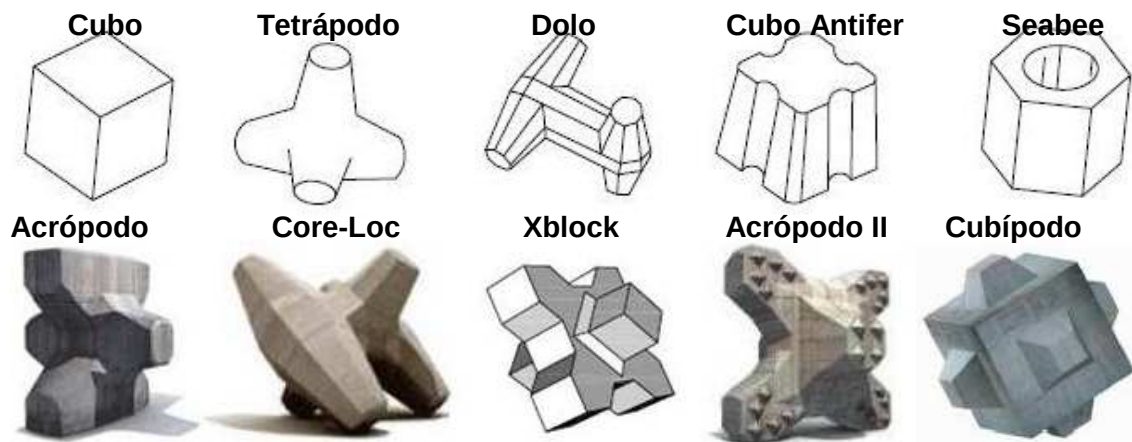


Figura 1. Elementos prefabricados para el manto principal.

El sencillo bloque cúbico de hormigón, utilizado ya en el siglo XIX, tiene una estabilidad hidráulica baja, pero tiene una elevada resistencia estructural y es muy fácil de encofrar, almacenar y colocar en obra. Así pues, la robustez o fragilidad del elemento, el volumen de hormigón necesario y los problemas logísticos de fabricación y puesta en obra son los aspectos esenciales para la selección del tipo de elemento que se utiliza en la práctica para la construcción de mantos de diques. En este artículo se describen los ensayos de caída de prototipos incluidos el Proyecto CUBIPOD, que engloba las investigaciones desarrolladas para estudiar una nueva pieza prefabricada para la construcción de mantos: el Cubípodo.

El Cubípodo es un elemento de tipo masivo (de la familia de los cubos, paralelepípedos, cubos Antifer, etc.), pero diseñado para superar algunos de sus inconvenientes más graves (adoquinamiento, baja estabilidad hidráulica, etc.). El Cubípodo es un elemento de forma básica cúbica o paralelepipedica que dispone de una protuberancia en cada cara para evitar el acoplamiento entre elementos y aumentar la fricción con la capa inferior. El Cubípodo ha demostrado (ver Gómez-Martín y Medina, 2008) una estabilidad hidráulica muy superior al bloque cúbico convencional, pudiendo incluso ser colocado en capa única, mientras que también se ha podido comprobar (ver Corredor y otros, 2008) que los rendimientos de encofrados, la manipulación con pinzas, el almacenamiento y otros aspectos logísticos son parecidos a los del bloque cúbico convencional, con el que se puede conseguir un ahorro económico importante (entre 15% y 40% para un dique de tamaño medio) y una reducción de la huella energética muy importante (superior a la económica). En

este artículo se describen los ensayos de caída de prototipos realizados en el Parque de Bloques de SATO del Puerto de Alicante en marzo de 2008 para evaluar y comparar la robustez estructural de los bloques cúbicos convencionales y los cubípodos de 15 t y 16 t respectivamente. Los cubípodos de 16 t se corresponden aproximadamente con los ensayados en laboratorio a escala 1/50 (ver Gómez-Martín y Medina, 2008) y los que podrían utilizarse en los mantos de los grandes diques del Mediterráneo.

ENSAYOS DE CAÍDA DE PROTOTIPOS

El diseño experimental de los ensayos de caída de prototipos de cubos y cubípodos que se presentan, se inspira en la metodología utilizada para evaluar las piezas Accrópodo, Core-Loc y Xblock (ver Muttray et al., 2005) incluyendo ensayos de volteo y caída libre. Las diferencias metodológicas principales respecto de los ensayos de caída de piezas “bulky” más esbeltas son: mayor tamaño de los prototipos, plataformas de caída y volteo mucho más resistentes, mayores alturas de caída, no dejar formas de caída importantes sin ensayar y llegar a la caída extrema desde más de 8 metros.

Diseño del encofrado del Cubípodo

Una de las grandes ventajas de los bloques cúbicos convencionales frente a las piezas especiales modernas (Acrópodo, Xblock, etc.) es la simplicidad del encofrado (tipo flanera) y el ciclo de producción (dos puestas/día); las piezas especiales tienen la mayoría encofrados deslizantes y ciclos de producción de 24 horas que requieren mucho más espacio y mucha más mano de obra. Para mantener los rendimientos y eficiencia del bloque cúbico convencional, los técnicos de SATO han ideado un encofrado para el Cubípodo de tipo flanera (solicitud de patente española P200702396) que permite también dos puestas/día. El encofrado consta de dos elementos, una base estática y un molde superior con seis elementos articulados que permiten, para el prototipo de 16 t (7 m^3), llenar y vibrar en dos fases y desencofrar cada 6 horas. La Figura 2 muestra el encofrado utilizado para fabricar cubípodos y la zona de almacenamiento de prototipos previa a los ensayos de caída. Para facilitar la operación de desencofrado y que la fabricación del Cubípodo pueda tener rendimientos similares al bloque cúbico convencional, es necesario que el encofrado tenga en todas sus caras verticales una ligera conicidad (ver Corredor y otros, 2008), de forma análoga a los bloques cúbicos convencionales. Además, los técnicos de SATO

han adaptado pinzas de manipulación de bloques cúbicos para poder mover los cubípodos de forma análoga a los bloques cúbicos convencionales. En comparación con el uso de eslingas, la manipulación de piezas con pinzas es más segura y eficiente. Se pudo comprobar durante los ensayos de caída de prototipos que el funcionamiento y operatividad de la pinza doble adaptada es semejante a la pinza simple utilizada para los cubos.



Figura 2. (a) Encofrado del Cubípodo y (b) zona de almacenamiento de prototipos.

Para el almacenamiento de cubípodos en parque, se pueden utilizar los sistemas abierto y cerrado mostrados en la Figura 3. Con el sistema abierto de almacenamiento, se puede conseguir una porosidad media en parque del 50% comparado con el 30% que se puede conseguir con el sistema cerrado de cubípodos y el 20% del parque de bloques cúbicos convencionales. El sistema cerrado de almacenamiento de cubípodos requiere menos espacio pero no sería recomendable para piezas de menos de 20 t para poder utilizar con facilidad las pinzas utilizadas en estos ensayos de caída.

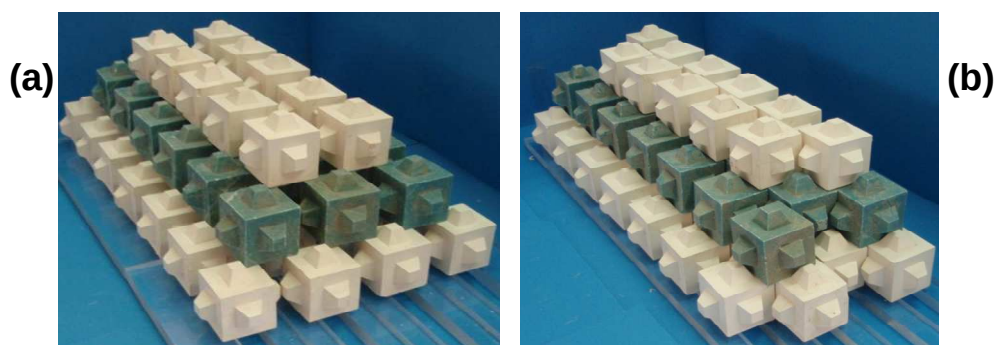


Figura 3. Sistemas de almacenamiento en parque: (a) abierto y (b) cerrado.

Fabricación de bloques cúbicos y cubípodos

Para los ensayos de caída de prototipos se fabricaron 8 bloques cúbicos convencionales de 15 t utilizando un encofrado de la ampliación del Puerto de Alicante y 11 cubípodos de 16 t utilizando dos bases y el molde superior de la Figura 2. El tamaño (7 m^3) utilizado para ensayar el Cubípodo es mayor que cualquiera de los

utilizados para otras piezas especiales (ver Muttray et al., 2005) y se corresponde aproximadamente con el tamaño necesario para grandes diques en el Mediterráneo.

Para cubos y cubípodos se utilizó un mismo tipo de hormigón, con las características y dosificación habituales para bloques, de una única planta de fabricación de hormigón; se sacaron dos probetas estándar del hormigón de cada prototipo para romperlas a 7 y 28 días con objeto de verificar la homogeneidad del hormigón utilizado. El hormigón utilizado era HM-30/B/25/IIIa+Qb con 350 k/m^3 de cemento CEM I 42.5 R, tamaño máximo de árido de 25 mm y relación agua/cemento de 0.5. Las probetas dieron a los 7 y 28 días unas resistencias a compresión media de 52.5 y 63.5 N/mm^2 (CV= 8.3% y 8.2%) para cubos y 48.7 y 58.7 N/mm^2 (CV=11.3% y 12.0%) para cubípodos. Los prototipos se fabricaron a finales de Enero de 2008 y se utilizaron a principios de Marzo de 2008, por lo que se utiliza como referencia la resistencia a compresión a los 28 días.

Ensayos de volteo

Para evaluar los efectos de múltiples impactos de pequeña intensidad, cubo y Cubípodo se han ensayado volteando los prototipos sobre una plataforma rígida. En el Parque de bloques del Puerto de Alicante, sobre un suelo arenoso muy compactado, se construyó una losa de hormigón armado de 170 t ($10.0 \times 7.5 \times 0.9 \text{ m}$) como plataforma para los ensayos de volteo. Se utilizó una retroexcavadora para las maniobras de volteo (ver Figura 4) y una célula de carga de 20 t de lectura directa con una precisión de 10 k (0.07%) para pesar las taras y los prototipos antes y después de las caídas. Se ensayaron dos tipos de volteo (parcial y total) de cubos; con 24 vuelcos en cada caso que dieron una pérdida de masa relativa (RLM) inferior al 2%, y cuatro prototipos para volteo frontal diagonal (60 empujones) con $\text{RLM} < 0.3\%$.

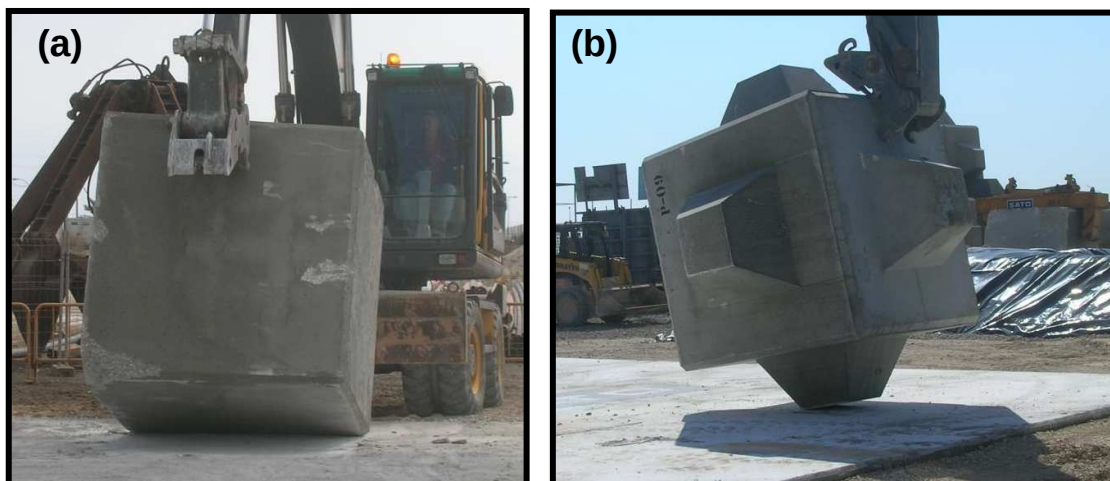


Figura 4. maniobra de volteo: (a) parcial de cubo y (b) frontal de cubípodo.

Ensayos de caída libre

Para evaluar los efectos de fuertes impactos, cubo y Cubípodo se han ensayado dejándolos caer sobre plataforma rígida. Sobre un suelo arenoso muy compactado, se construyó una losa de hormigón armado de 72 t (5.0x5.0x1.15 m) protegida con una protección de acero de 20 mm, para evitar punzonamiento, como plataforma para los ensayos de caída libre. Para los ensayos de caída se realizó un proyecto específico de seguridad que exigió definir unos perímetros y caballones de seguridad en la plataforma de caída libre para evitar que la manipulación y caída de prototipos y la proyección de partes rotas pudiera causar daños; además, la utilización del puente grúa de 63/25 t, las pinzas de 20 t y 2x20 t y diferentes tipos de máquinas y equipos exigió también cumplir determinados protocolos de seguridad.

Los ensayos de caída libre se realizaron dejando caer los prototipos desde diferentes alturas en diferentes posiciones, intercalando ensayos de caída libre de cubípodos y bloques cúbicos, empezando por los lanzamientos desde menor altura. La altura de caída se define como la diferencia entre la cota del punto más bajo del prototipo antes de soltarlo y la cota de la plataforma de caída libre. Fijada una altura de caída, se repitieron los lanzamientos hasta un máximo de seis veces o alcanzar la rotura del prototipo. Se utilizaron tres tipos de caídas libre de prototipos según la forma de coger el bloque: (AD) caída de martillo con impacto cara contra plataforma, (ED) caída de arista con arista contra plataforma y (RD) caída aleatoria apoyando de manera inestable una esquina del prototipo en un bloque lateral antes de soltarlo sobre la plataforma de caída. La Figura 5 muestra las caídas AD de cubo y Cubípodo que alcanzaron la rotura de la pieza.



Figura 5. Caída libre de martillo desde dos metros de altura que provoca rotura del prototipo: (a) sexta caída del Cubípodo y (b) primera caída del bloque cúbico.

Se empezó con el lanzamiento de cubípodos y pronto se pudo comprobar que éstos resistían caídas mucho mayores que los bloques cúbicos; también se observó que las caídas de martillo eran más destructivas que las caídas de arista y éstas más que las caídas aleatorias. Se realizaron caídas libres de cubos y cubípodos desde dos metros de altura ($h[m]=2.0$) en las tres posiciones (martillo, arista y aleatorio); además, se realizaron caídas libres de martillo de cubos desde $h[m]=0.5$, 1.0 y 1.5 . El prototipo lanzado desde $h[m]=1.5$ se rompió al tercer lanzamiento y otros resistieron sin romperse seis caídas de martillo desde $h[m]=0.5$ y $h[m]=1.0$.

Corredor y otros (2008) definen un modelo conceptual de rotura para explicar las observaciones de los ensayos de caída. En este modelo, la energía potencial liberada al soltar cada prototipo se pierden tres procesos: roturas de borde, fracturas internas y disipación de energía. Una parte de la energía se pierde al romper un volumen pequeño de hormigón en los bordes (puntas y aristas); otra parte de la energía provoca roturas internas que, si son grandes, pueden significar la rotura de la pieza, y finalmente, se pierde energía por fricción en el aire y plataforma, en el terreno, en fisuras de la plataforma, etc. El diseño experimental de CUBIPOD intentó reducir al mínimo los procesos de disipación de energía, con una fuerte compactación del terreno antes de los ensayos, un diseño robusto de la plataforma de caída libre y un control de su estado a lo largo de los ensayos para garantizar que la proporción de energía disipada no era muy grande y similar para cubos y cubípodos. Así pues, las variables principales a considerar son: (1) altura de caída, (2) número de caídas, (3) resistencia a compresión y tracción del hormigón, (4) tamaño de la pieza y (5) tipo de pieza.

Dado que la resistencia del hormigón y el tamaño de la pieza son similares para cubos y cubípodos, el resultado de las caídas (RLM) depende del tipo de pieza, altura de caída y número de caídas. Buscando el mejor factor potencial corrector para considerar el número de caídas de martillo en el caso de los bloques cúbicos, se ha podido definir una altura de caída equivalente, h_e , dado por la ecuación

$$h_e = h \cdot n^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

Siendo h la diferencia entre las cotas del centro de gravedad del prototipo al soltarlo y al impactar sobre la plataforma y n el número de repeticiones de la caída. Se ha podido establecer un patrón de comportamiento para los cubos en caída de tipo martillo descrito en la Figura 6, que se representa también los ensayos de caída libre de cubípodos sin distinguir si el tipo de caída es martillo, arista y aleatorio. Tanto los bloques cúbicos como

los cubípodos muestran un rango lineal de pérdida de masa con un límite de la caída de “martillo” que genera aproximadamente un RLM=4% de pérdida de masa; si se supera ese límite, la pieza se rompe. La altura equivalente de caída crítica es aproximadamente $h_e[m]=1.9$ para cubos y $h_e(m)<3.1$ para cubípodos. El Cubípodo muestra una mayor resistencia a la caída que el cubo convencional. A pesar de haber utilizado unos cubípodos de mayor tamaño (peso medio 16.6 t) que los cubos (peso medio=15.3 t) y el mismo hormigón, los cubípodos resisten impactos mayores que los bloques cúbicos convencionales. A pesar de su apariencia robusta, la menor resistencia a la caída del bloque cúbico convencional se explica porque el Cubípodo consume más energía en las roturas de borde localizadas (tacones, vértices, aristas, etc.) generando menores aceleraciones del núcleo de la pieza y evitando así la fractura interna que muestra con más facilidad el bloque cúbico convencional.

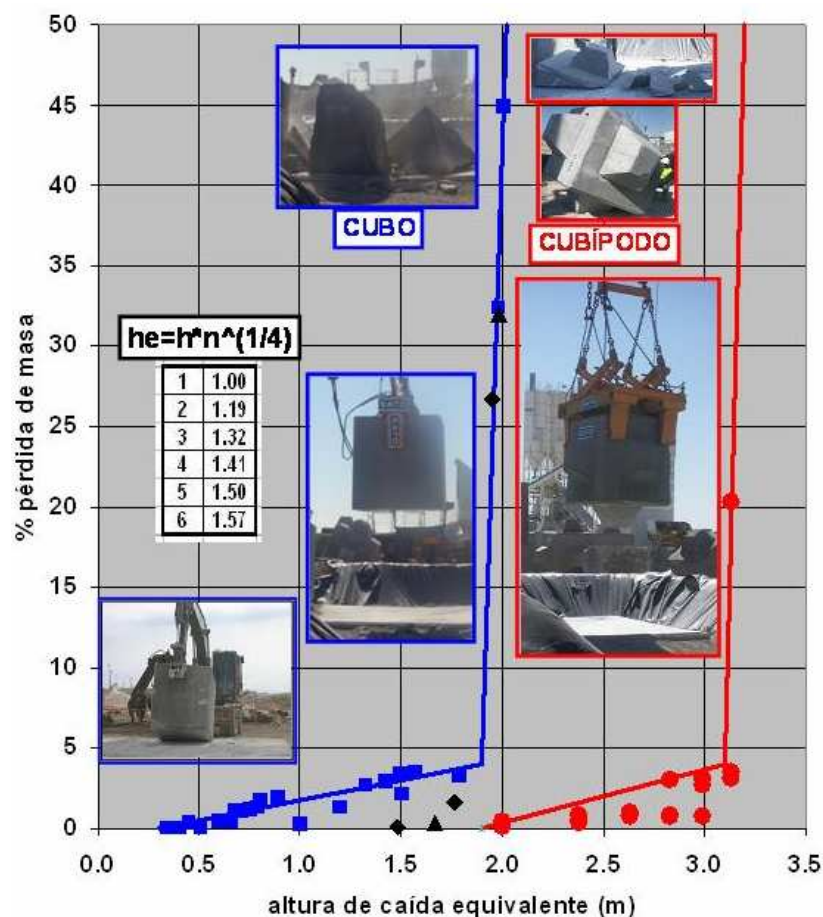


Figura 6. Pérdida de masa de cubos y cubípodos en caída libre sobre plataforma rígida.

El único prototipo de Cubípodo que llegó a la rotura (sexta caída de martillo desde $h[m]=2.0$), mantuvo el 80% de la masa inicial y cinco de los seis tacones, un resto mucho mejor que los cuatro restos de los cubos rotos durante los ensayos. Los bloques cúbicos y los cubípodos son mucho más resistentes a las caídas que otras

piezas especiales (Accropodo, Core-loc y X-block, etc.) ya que los ensayos de caída publicados de estas piezas no cubren todo el espectro de volteos y caídas exigibles en estas piezas, los prototipos ensayados son más pequeños y las roturas se producen con caídas desde mucha menor altura. Por otro lado, si se comparan los resultados con los modelos de impacto numérico de elementos finitos, puede comprobarse que los prototipos reales resisten caídas mayores que los modelos numéricos; por ejemplo, Latham and Xiang (2009) presentan los resultados de un modelo numérico similar al Xblock con altura de rotura estimada en pocos centímetros, claramente inferior a la mostrada por Muttray et al. (2005). Esto confirma que los modelos numéricos deben evolucionar (amortiguamiento de plataforma, modelos plásticos de rotura de hormigón, etc.) para razonablemente predecir los resultados de los ensayos de caída de prototipos reales.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

El Cubípodo es un elemento prefabricado nuevo de tipo masivo para la formación de mantos de diques en talud: está diseñado para superar los defectos más graves del bloque cúbico convencional (adoquinamiento, baja estabilidad hidráulica, etc.). Los ensayos físicos 2D y 3D a escala reducida (1/50) han demostrado que el Cubípodo genera menor remonte y rebase y tiene en el tronco una estabilidad hidráulica muy superior al bloque cúbico convencional; además, en el morro es más estable que el cubo pero no tanto como en el tronco. A diferencia del cubo convencional, el Cubípodo puede ser colocado en una sola capa con una gran estabilidad hidráulica y respuesta mucho más flexible que otras piezas especiales en mantos monocapa.

En este artículo se describen los ensayos de caída de prototipos de bloques cúbicos convencionales (15 t) y cubípodos (16 t) desarrollados dentro del Proyecto CUBIPOD. Los cubípodos resisten caídas de mayor altura (50%) sobre plataforma rígida que los bloques cúbicos convencionales. En este artículo se describe el encofrado tipo flanera diseñado por SATO para producir cubípodos de un modo similar a los cubos convencionales (dos puestas/día). También se han adaptado pinzas convencionales de cubos para conseguir pinzas dobles con las que manipular cubípodos de forma análoga a los cubos. Tanto el encofrado como las pinzas de manipulación se han probado con éxito en el parque de bloques de SATO del Puerto de Alicante durante la realización de los ensayos de caída de prototipos realizados la primera semana de marzo de 2008.

Los cubípodos de más de $W[t]=20$ se pueden acopiar en disposición cerrada con una porosidad media aproximada en parque del 30%, mientras que las piezas de menor tamaño $W[t]<20$, necesitan ser acopiadas en disposición abierta con una porosidad media aproximada en parque del 50%. La manipulación y colocación del Cubípodo en obra (modelo reducido) es similar a la de los bloques cúbicos convencionales, teniendo una calidad de colocación en obra (modelo reducido) mucho mayor que los cubos convencionales al no tener tendencia al adoquinamiento y propiciar una colocación aleatoria sobre el talud con porosidad homogénea. Los ensayos de caída de prototipos han demostrado que la resistencia estructural del Cubípodo es muy elevada, habiendo mostrado mejor comportamiento que el bloque cúbico convencional frente a todos los esfuerzos de impacto ensayados, tanto volteos como caídas. Esta resistencia estructural probada permite sustituir cubos por cubipodos para aumentar la seguridad y reducir el coste y la huella energética simultáneamente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen 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. También se agradece el trabajo del ingeniero Romain Goumy en el control desarrollo de los ensayos de caída y al CDTI el soporte financiero para los trabajos de investigación y desarrollo del Cubípodo dentro del Proyecto CUBIPOD.

REFERENCIAS

- Corredor, A., Torres, R., Miñana, J.V., Fernández, E., Menéndes, C.F., Santos, M., Gómez-Martín, M.E., Goumy, R. y 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 ATPyC*, O.P. Puertos del Estado, 187-211.
- Dupray, S. and Roberts, J. (2009). Review of the use of concrete in the manufacture of concrete armour units. *Proc. Coastal., Marine Structures and Breakwaters 2009*, ICE (in press).
- Gómez-Martín, M.E. and Medina, J.R. 2008. Erosion of cube and Cubipod armor layers under wave attack. *Proc. 31st International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 3461-3473.
- Lathan, J.-L., Xiang, J. 2009. Application of finite-discrete element method to dynamic stress development in armour units and armour layers. *Proc. Coastal., Marine Structures and Breakwaters 2009*, ICE (in press).
- Muttray, M., Reedijk, J.S., Vos-Rovers, I. and Bakker, P. 2005. Placement and structural strength of Xbloc® and other single layer armour units. *ICE Coastal, Structures and Breakwaters 2005*. London, 555-567.