

CUBÍPODO: ENSAYOS DE ESTABILIDAD HIDRÁULICA 2D Y 3D, ESTUDIO DEL REMONTE Y REBASE, DISEÑO DEL ENCOFRADO Y ENSAYOS DE CAÍDA DE PROTOTIPOS



A. Corredor¹, R. Torres¹, J. V. Miñana¹, E. Fernández¹,
C. F. Menéndez¹, M. Santos¹, M. E. Gómez-Martín²,
R. Goumy³ y J. R. Medina³

INTRODUCCIÓN

El coste de un gran dique depende de factores físicos y de un factor de diseño clave: el tipo de elemento de hormigón con el que se construye el manto principal. Cada forma (cubo, Tetrápodo, Dolo, etc.) tiene unas características de estabilidad hidráulica diferentes, una resistencia estructural distinta y permite o no la colocación en una sola capa. La estabilidad hidráulica se suele definir con el coeficiente de estabilidad (K_D) de la fórmula clásica del SPM(1984), derivada de la fórmula de Iribarren de los años 30, que relaciona el temporal de cálculo ($H=H_b$ o $H=H_{1/10} \approx 1.27 H_{m0}$) con el peso de los elementos del manto (W) a iniciación de averías, considerando el talud ($\cot \alpha$), el peso específico del agua (γ_w) y el del material de la escollera natural o artificial (γ_r).

$$W = \frac{1}{K_D} \frac{H^3}{\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_w} - 1\right)^3} \frac{\gamma_r}{\cot \alpha} = \frac{1}{K_D} \frac{(1.27H_{m0})^3}{\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_w} - 1\right)^3} \frac{\gamma_r}{\cot \alpha} \approx \frac{2}{K_D \cot \alpha} \frac{\gamma_r (H_{m0})^3}{\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_w} - 1\right)^3} \quad (1)$$

Las ecuaciones (1) pueden transformarse en las ecuaciones (2) que muestran el número de estabilidad, N_s , como la relación entre la altura de ola H (oleaje regular) o altura de ola significativa H_{m0} (oleaje irregular) por un lado y por otro lado el lado del cubo equivalente, D_n , y la densidad relativa sumergida del material de los elementos del manto, Δ :

$$N_s = \frac{H}{\Delta D_n} = (K_D \cot \alpha)^{1/3} \quad N_s = \frac{H_{m0}}{\Delta D_n} = \frac{H_{m0}}{\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_w} - 1\right) \left(\frac{W}{\gamma_r}\right)^{1/3}} \approx \left(\frac{K_D \cot \alpha}{2}\right)^{1/3} \quad (2)$$

¹ SATO (Grupo OHL).

² Universidad de Alicante.

³ Universidad Politécnica de Valencia.

INNOVACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN

La búsqueda de formas nuevas con K_D elevados es una línea de investigación tradicional 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 (Portugal) a finales de los 70, puso de relieve la importancia de la resistencia estructural del elemento además de su estabilidad hidráulica. El sencillo bloque cúbico de hormigón tiene un K_D bajo, pero muestra una elevada resistencia estructural y es muy fácil de encofrar y desencofrar, 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 a utilizar en el manto; en las costas españolas es el bloque cúbico o paralelepípedo es el que domina con claridad en todas las fachadas marítimas.

El manto de dos capas de bloques cúbicos colocados aleatoriamente es el típico de los grandes diques en talud españoles de las últimas décadas. Los bloques son muy robustos y fáciles de manipular pero, como señalan Gómez-Martín y Medina (2006, 2007) presentan el problema del adoquinamiento que produce compactación heterogénea (daño sin extracción) y aumenta los rebases, además de generar poca fricción con la capa inferior. Por esta razón, la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) ha patentado (ES2264906) y licenciado a SATO el Cubípodo, ideado para mantener las ventajas del bloque cúbico tradicional y corregir sus desventajas, impidiendo el adoquinamiento y aumentando la fricción con la capa inferior. En este artículo se describen ensayos físicos 2D y 3D para el desarrollo del Cubípodo, así como los diseños de encofrados, pinzas de manipulación y ensayos de caída de prototipos que permiten comparar las características (estabilidad hidráulica, rebase, resistencia estructural, etc.) del bloque cúbico convencional con el Cubípodo. La figura 1 muestra una imagen 3D de cubo y Cubípodo.

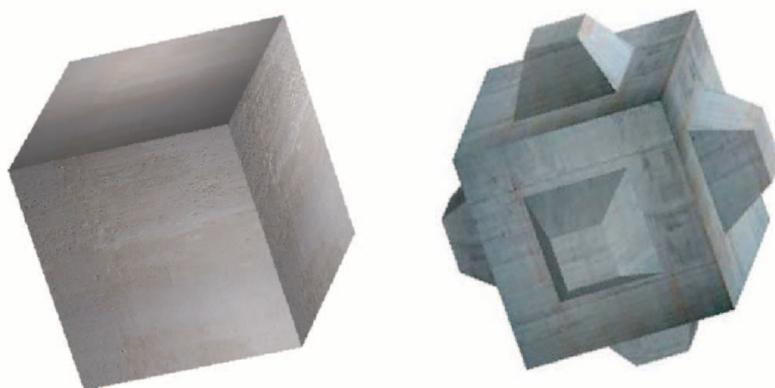


Figura 1. Vista 3D del cubo y Cubípodo.

EL PROYECTO CUBIPOD

Para el desarrollo de la idea del Cubípodo, SATO y UPV han firmado un acuerdo apoyado por el CDTI para realizar el proyecto de investigación CUBIPOD que analiza

aspectos fundamentales del nuevo elemento: estabilidad hidráulica de una y dos capas, estabilidad en tronco y morro, resistencia estructural, remonte y rebase, etc. A continuación se describen los ensayos físicos 2D y 3D realizados, los trabajos de diseño de encofrados y los ensayos de caída de prototipos realizados en el Parque de Bloques de SATO en el Puerto de Alicante. El Cubípodo ha mostrado unas características excepcionales frente al bloque cúbico convencional, que se describen a continuación:

- Sencillo de fabricar, manipular y almacenar (similar al bloque cúbico).
- Colocación aleatoria muy fácil en obra (mucho mejor que el bloque cúbico).
- Mayor resistencia a la caída que el bloque cúbico.
- Elevada estabilidad hidráulica 2D en una y dos capas (mucho mejor que el cubo).
- Mayor estabilidad hidráulica 3D en morros que el bloque cúbico.
- Menor remonte y rebase que el bloque cúbico.
- No se adoquina y genera mayor fricción con la capa inferior.
- Permite la colocación en una o dos capas.

Ensayos 2D de Estabilidad Hidráulica

Gómez-Martín y Medina (2007, 2008) presentan ensayos 2D de estabilidad de mantos bicapa de cubos y cubípodos realizados en el canal de ensayos del LPC-UPV. El Cubípodo mostró una estabilidad hidráulica del orden de seis veces el del bloque cúbico (N_s (IA) >3.0). Estos primeros ensayos de estabilidad hidráulica 2D representados en la figura 2 fueron realizados con modelos de mortero ligero de diferentes colores (considerando una densidad seca relativa media de $\gamma_r/\gamma_w = 1.94$); posteriormente, estos mismos modelos de mortero ligero y permeable (densidad saturada media a las 24 horas es $\gamma_r/\gamma_w = 2.13$) se utilizaron también en los ensayos 3D de estabilidad de morros y los resultados se pudieron comparar con ensayos similares con modelos de resina impermeable de densidad similar al hormigón en masa: $\rho_r = 2.30 \text{ g/cm}^3$. Las comparaciones de ensayos similares 2D y 3D indican que es la densidad seca la que condiciona fundamentalmente la estabilidad tanto en el tronco como en el morro de los diques.

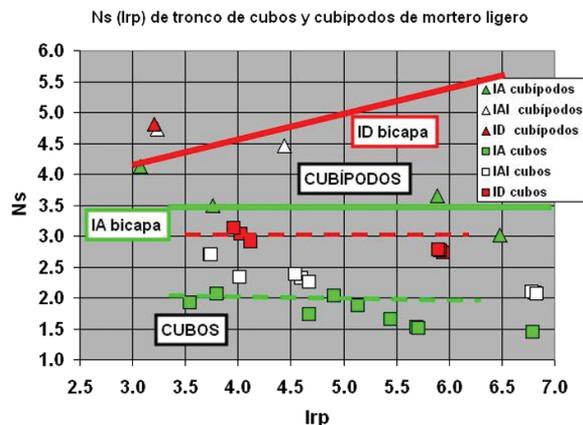
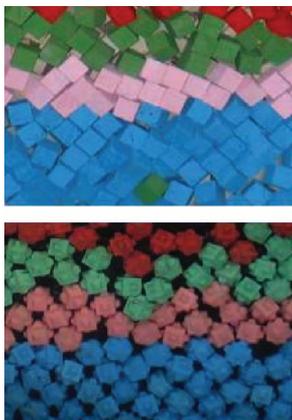


Figura 2. Números de estabilidad de mantos de cubos y cubípodos bicapa (oleaje irregular).

Ensayos 3D de Estabilidad Hidráulica en Morros

Los ensayos 3D del Proyecto CUBIPODmorros se han desarrollado en el tanque de oleaje y corriente del GIOC (IH-Cantabria). Se ha ensayado el morro correspondiente a la sección estándar no rebasable y sin limitación de fondo utilizada en los ensayos 2D descritos en el punto anterior, que se corresponde con la utilizada en el *Convenio de Diques* de Puertos del Estado (ver Medina *et al.*, 2003), comparando mantos de cubos ($D_n[\text{cm}]=3.98$) y cubípodos ($D_n[\text{cm}]=3.82$) de resina de la misma densidad $\rho_r= 2.30 \text{ g/cm}^3$. La figura 3 muestra los números de estabilidad N_s para el morro estándar con talud 3/2 de cubos y cubípodos en función del número de Iribarren, $I_{rp}=T_p \tan \alpha / (2\pi H_{m0}/g)^{1/2}$. Los cubípodos son más estables en el morro que los cubos en un amplio rango de situaciones climáticas.

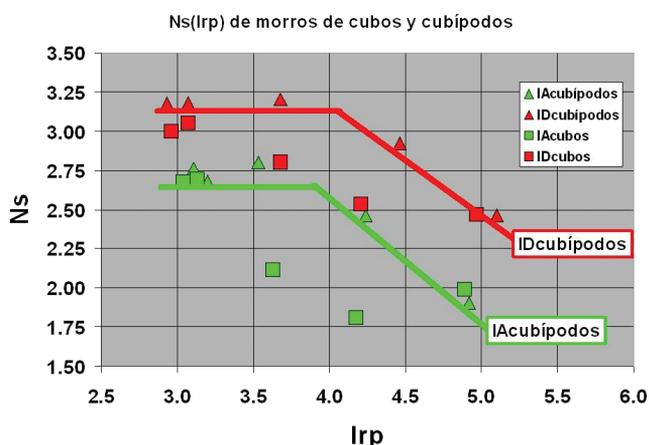
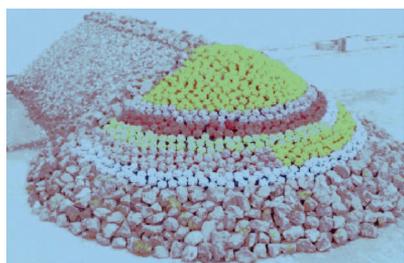


Figura 3. Comparación de los números de estabilidad en morro de cubos y cubípodos.

Ensayos 2D de Cubípodos Monocapa y Bicapa

En el canal de ensayos del INHA se han desarrollado los ensayos 2D de estabilidad hidráulica de cubípodos colocados aleatoriamente en una capa y dos capas. La estabilidad hidráulica observada del Cubípodos bicapa frente oleaje irregular ha confirmado el elevado coeficiente de estabilidad del Cubípodos observado en los ensayos del LPC-UPV publicados por Gómez-Martín y Medina (2007). Por otro lado, se ha podido comprobar que el manto de cubípodos monocapa tiene también un coeficiente de estabilidad muy elevado, aunque inferior al Cubípodos bicapa. La figura 4 muestra los números de estabilidad N_s para el talud 3/2 de cubípodos monocapa (círculos) y bicapa (triángulos) ensayados en el canal de ensayos del INHA. El número de estabilidad $N_s=3.4$ de la figura 4 se corresponde con un coeficiente de estabilidad $K_D= 52$ para oleaje irregular (Ecuación 2).

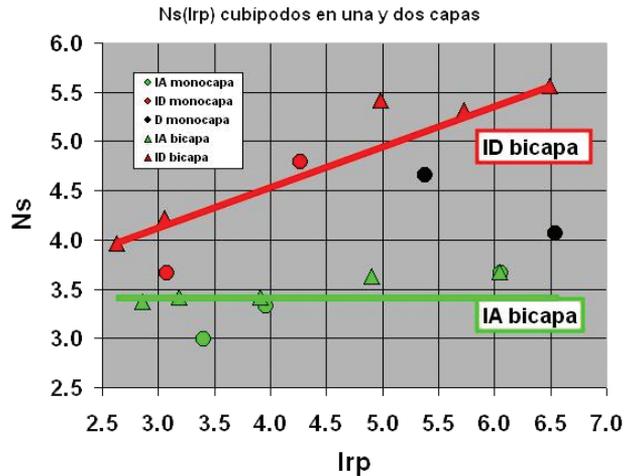


Figura 4. Números de estabilidad de la sección de cubipodos en una y dos capas.

Ensayos 2D de Remonte y Rebese

En el canal de ensayos del LPC-UPV se han desarrollado los ensayos 2D de remonte y rebese de cubos de diferentes tamaños y cubipodos monocapa y bicapa en una sección convencional de talud 3/2 con espaldón, con metodología similar a la utilizada por Medina *et al.* (2002) dentro del Proyecto CLASH. Para las secciones de cubipodos se utilizaron elementos de 128.4 g con D_n (cm)=3.82 y ρ_r (g/cm³)=2.30. Para comparar se construyó una primera sección de cubos de 143.4 g con D_n (cm)=4.04 y ρ_r (g/cm³)=2.18 pero resultó inestable frente a oleajes similares (K_D de cubo es muy inferior al K_D de cubipodo monocapa y bicapa) por lo que se construyó una segunda sección de cubos mucho mayores de 475.2 g con D_n (cm)=6.00 y ρ_r (g/cm³)=2.20. Las cotas de espaldones, mantos y niveles se corresponden aproximadamente a los grandes diques del Cantábrico sin limitación de fondo.

Con oleaje regular e irregular de intensidad creciente, se han medido remonte, rebases y presiones/subpresiones sobre el espaldón con dos niveles de agua (pleamar-bajamar), dos cotas de coronación de espaldón (baja-media) y números de Iribarren en el rango $2.5 < Irp < 6.5$. Los datos de rebese analizados hasta el momento indican que, en el caso de espaldones con baja cota de coronación y números de Iribarren bajos ($Irp=3.0$), los mantos de cubipodos monocapa y bicapa ($D_n=3.82$ cm) tiene un rebese similar, inferior al de los bloques cúbicos convencionales ($D_n=6.00$ cm), Las aproximaciones empíricas encontradas mediante regresión lineal, utilizando como variable explicada $\log Q$ y variables explicativas $Rc/Hm0$, Ac/Rc , Irp y $n.^\circ$ capas para las secciones de cubos ($D_n=6.00$ cm) y de cubipodos ($D_n=3.82$ cm) monocapa y bicapa, son las siguientes:

Cubos bicapa ($0.7 < Ac/Rc < 1.0$)

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \exp \left[-3.0 - 3.5 \left(\frac{Rc}{H_{m0}} \right) - 2.3 \left(\frac{Ac}{Rc} \right) + 0.27(Irp) \right] \quad (3)$$

INNOVACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN

Cubípodos bicapa ($0.58 < Ac/Rc < 0.80$) y Cubípodos monocapa ($0.40 < Ac/Rc < 0.65$)

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \exp \left[-1.7 - 4.7 \left(\frac{Rc}{H_{m0}} \right) - 3.6 \left(\frac{Ac}{Rc} \right) + 0.50(Irp) \right] \quad (4)$$

La figura 5 compara las observaciones de rebase en la sección de cubípodos monocapa y bicapa con la estimación empírica de la Ecuación 4. Las ecuaciones 3 y 4 sólo pueden compararse efectivamente en el entorno de $Ac/Rc=0.7$; los caudales medios de rebase en ese punto con $3.0 < Irp < 5.0$ son aproximadamente el doble en el manto de cubos bicapa que en los mantos de cubípodos monocapa y bicapa.

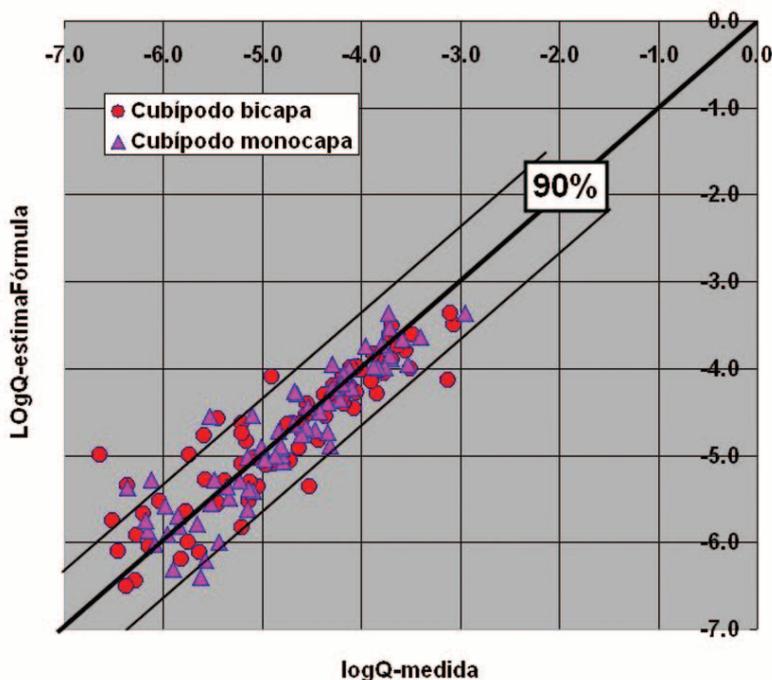


Figura 5. Comparación entre observaciones y estimaciones de rebase (cubípodos).

DISEÑO DEL ENCOFRADO DEL CUBÍPODO

Además de los ensayos físicos a escala reducida, para el uso efectivo del Cubípodo se requiere un sistema de encofrado que permita optimizar los ciclos de fabricación. Por este motivo, los técnicos de SATO han ideado un encofrado especial (solicitud de patente española P200702396) que permite fabricar cubípodos casi al mismo ritmo que bloques cúbicos convencionales. Para los ensayos de caída de prototipos, se ha diseñado un encofrado para cubípodos de $W(t) \approx 16$ (7 m^3). 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; 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.

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 un ligera conicidad, tal y como se suele hacer con los encofrados de los bloques cúbicos convencionales. La figura 7 muestra las dimensiones reales de los cubos de 15 tn y cubípodos de 16 tn utilizados en los ensayos de caída de prototipos.



Figura 6. Elemento superior articulado, bases del encofrado del cubípodo.

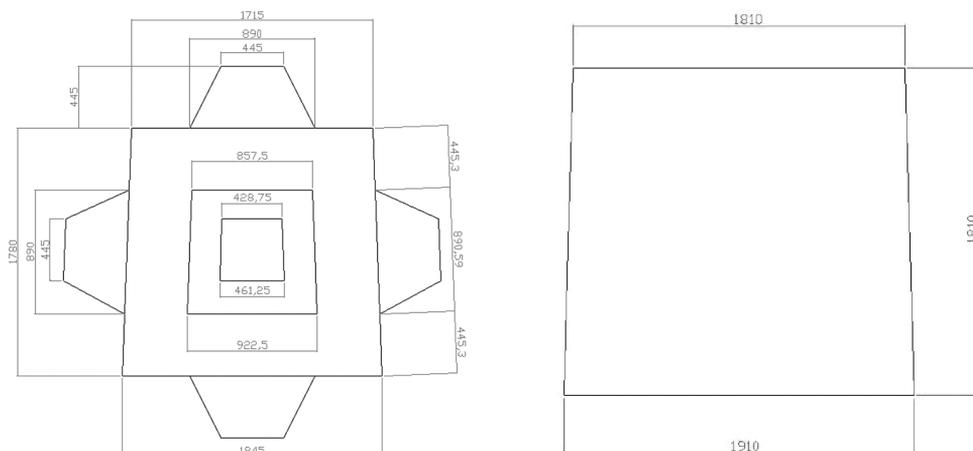


Figura 7. Dimensiones (mm) del Cubípodo de 16 t y bloque cúbico de 15 t.

INNOVACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN

Además de diseñar un encofrado sencillo para fabricar cubípodos con rendimientos similares a los bloques cúbicos, los técnicos de SATO han adaptado pinzas de manipulación de cubos para poder mover los cubípodos de forma análoga a los bloques cúbicos convencionales. La figura 8 muestra la pinza doble utilizada para manipular cubípodos en el Parque de Bloques de SATO del Puerto de Alicante durante los ensayos de caída de prototipos. El funcionamiento y operatividad de la pinza adaptada es semejante a la pinza simple de cubos que también se utilizó en los ensayos de caída de prototipos.



Figura 8. Pinzas doble adaptadas para la manipulación de cubípodos.

Una vez diseñados el encofrado y las pinzas de manipulación de cubípodos sólo resta definir un sistema de almacenamiento de cubípodos en parque, similar al de los bloques cúbicos. La figura 9 muestra el encofrado y cubípodos con almacenamiento abierto en tres niveles, esperando a ser utilizados en los ensayos de caída.



Figura 9. Encofrado y almacenamiento de cubípodos.

ENSAYOS DE CAÍDA DE CUBOS Y CUBÍPODOS

En los modelos físicos a escala reducida se suele utilizar la semejanza de Froude, muy adecuada para estudiar los procesos controlados por las fuerzas de gravedad (estabilidad hidráulica, rebase, etc.), pero inadecuada para estudiar problemas importantes como la rotura de elementos. Al utilizar la semejanza de Froude (escala de longitudes λ y de períodos $\lambda^{1/2}$) y un material de resistencia similar al del prototipo (resina o mortero de hormigón), la resistencia estructural de los elementos del manto principal de los ensayos a escala reducida es mucho mayor que la de los prototipos. Si la resistencia del material constitutivo es similar, la resistencia estructural de una pieza para el manto se va reduciendo con el aumento de tamaño. Al crecer el tamaño de la pieza, las fuerzas (gravedad, impacto, etc.) tienden a crecer con la tercera potencia del tamaño, mientras que la resistencia sólo crece con el cuadrado del tamaño; se puede afirmar de manera aproximada que la resistencia estructural de las piezas de una determinada forma y material tiene una relación inversa con el tamaño. Es por ello que resulta fundamental realizar ensayos de caída de piezas de tamaño prototipo para evaluar una resistencia que no se puede medir de forma fiable a escala reducida.

Pequeñas roturas de los elementos del manto, que no alteren sustancialmente su morfología, no afectan significativamente el comportamiento hidráulico del manto estudiado a escala reducida. Sin embargo, grandes roturas estructurales, con alteración de morfología de pieza, pueden reducir drásticamente la estabilidad hidráulica estudiada a escala reducida y provocar el colapso incontrolado de la misma. Este es el caso de la rotura de Dolos y otros elementos esbeltos, que suelen cambiar significativamente el peso y la forma de los elementos del manto y reducir drásticamente su estabilidad hidráulica. Así pues, el problema de la resistencia estructural y rotura de elementos en obra es tanto mayor cuanto mayor es el tamaño de la pieza y más esbelta su forma.

Diseño experimental de los "drop test"

El desastre de Sines (también San Ciprián y otros) impulsó el estudio de la resistencia estructural del Dolo y, en menor medida, del Tetrápodo durante las décadas de 70 y 80. Sin embargo, estas piezas son muy frágiles (generan flexiones en las caídas) y los ensayos realizados no son comparables con los que deben hacerse para evaluar la resistencia estructural a la caída de cubos y cubípodos. Para evaluar la resistencia estructural de piezas de cierta robustez, se han realizado a lo largo de las últimas décadas algunos ensayos de caída similares para las piezas Accropode, Core-loc y Xbloc. Estos ensayos se han utilizado de guía para diseñar los ensayos de caída de cubos y cubípodos que se presentan en este artículo y mantener así en lo posible la coherencia metodológica a nivel internacional en la comparación de piezas especiales para diques en talud. Mutral *et al.* (2005) describen las características de los ensayos de caída de prototipos de las tres piezas señaladas anteriormente. Para los ensayos de caída de cubos y cubípodos del Proyecto CUBIPOD se han utilizado prototipos de mayor tamaño ($W \approx 15$ t para cubos y $W \approx 16$ t para cubípodos) y plataformas de caída más exigentes; la mayor resistencia a la caída de cubos y cubípodos en estas condiciones demuestran su mayor robustez frente a otros tipos de piezas más esbeltas.

INNOVACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN

- **Tamaño de prototipos.** El primer ensayo de caída de prototipos descrito por Mutray et al. (2005) es el del Accropode en 1984 con prototipos de 6.3 m^3 volumen ($D_n=1.85 \text{ m}$). Resulta interesante que, a pesar de su similitud, el ensayo de caída de prototipos del Core-loc en 1997 reduzca a 4 m^3 ese volumen ($D_n=1.59 \text{ m}$) ya que al reducir el tamaño se aumenta la resistencia estructural y los daños son menores y más difíciles de comparar. Finalmente, los ensayos más recientes del Xbloc en 2004 mantienen el tamaño pequeño de 4 m^3 ($D_n=1.59 \text{ m}$). Para los ensayos de caída de cubos y cubípodos de CUBIPOD se ha utilizado un tamaño grande de 6.3 m^3 ($D_n=1.85 \text{ m}$) para el bloque cúbico y un tamaño algo mayor de 7.0 m^3 ($D_n=1.90 \text{ m}$) para el Cubípedo. Los cubípodos de 7 m^3 ($W=16 \text{ t}$) se pueden considerar prototipos reales ya que con ellos se podrían construir mantos de grandes diques en talud en la costa mediterránea.
- **Tipos de hormigón.** No se especifican las características del hormigón utilizado para los prototipos de Accropode ensayados en 1984. Para los ensayos de caída del Core-Loc en 1997 se utilizó un hormigón con resistencia a compresión de 43 N/mm^2 . Los ensayos de caída del X-block en 2004 utilizaron hormigón C30/37, con una resistencia a compresión entre 28 y 41 N/mm^2 , una relación agua/cemento de 0.5 y un tamaño máximo de árido de 32 mm. Para los ensayos de caída de prototipos del Proyecto CUBIPOD, se ha utilizado un hormigón HA-30/B/25/IIIa+Qb con 350 k/m^3 de cemento CEM I 42.5 R, una relación agua/cemento de 0.5, que 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, utilizando un tamaño máximo de árido de 25 mm. 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.
- **Plataformas de caída.** La base sobre la que se deja caer el prototipo suele ser de hormigón en masa o armado con un peso y dimensiones especificadas. Los ensayos de caída del Accropode en 1984 utilizaron como plataforma de caída un bloque paralelepípedo de hormigón en masa de 16 t ($2.25 \times 2.25 \times 1.40 \text{ m}$). Los ensayos de caída del Core-Loc en 1997 utilizaron una losa de hormigón en masa de 27 t ($4 \times 3 \times 1 \text{ m}$). Los ensayos del X-block en 2004 utilizaron como plataforma de caída una losa de hormigón armado de 90 t ($10.0 \times 7.5 \times 0.5 \text{ m}$) con protección de acero de 30 mm de espesor. Para los ensayos de caída del Proyecto CUBIPOD se han construido dos losas de hormigón armado, una para los ensayos de volteo de 170 t ($10.0 \times 7.5 \times 0.9 \text{ m}$) y otra de 72 t ($5.00 \times 5.00 \times 1.15 \text{ m}$) con protección de acero de 20 mm de espesor para los ensayos de caída libre.

Además de las plataformas de caída, la realización de los ensayos de caída requiere un proyecto específico de seguridad, que en el caso de CUBIPOD exigió definir unos perímetros y caballones de seguridad para evitar que la manipulación y caída de prototipos y la proyección de partes rotas pudiera causar daños. La utilización del puente grúa y diferentes tipos de máquinas y equipos exigió también cumplir los protocolos de seguridad definidos.

- **Ensayos de Volteo.** Las posibles maniobras de volteo son específicas de cada pieza (el cubo tiene una, el cubípedo dos, el Accropode siete, el X-block y Core-loc seis). La maniobra de volteo en el plano principal es la más exigente, ya que las alturas

de caída son mayores; los ensayos del Core-loc en 1997 indican pérdidas del 10% de peso con 18 maniobras parciales de caída desde sólo 10 cm de altura y las del Xbloc pérdidas del 14% del peso con 9 maniobras de caída parcial desde 31 cm. Accropode, Core-loc y Xbloc tienen respectivamente 5 y 4 posiciones de equilibrio estático sobre el suelo con 7 y 6 posibles maniobras de volteo en el mismo o diferentes planos. Estas piezas sólo se han ensayado, en el mejor de los casos, con algunas de las maniobras de volteo posibles y a un nivel inferior al máximo (maniobra parcial).

Por el contrario, cubo y Cubípodo se han ensayado utilizando todas las maniobras de volteo posibles (dos del Cubípodo y una del cubo) y a su máxima intensidad. En el caso del cubo, que se erosionó mucho más que el Cubípodo en el volteo completo, se realizaron también maniobras parciales de volteo. El Cubípodo es una pieza muy simétrica y sólo tiene dos posiciones de equilibrio estable sobre el suelo; con esta simetría del Cubípodo sólo cabe una maniobra del volteo, aunque al existir dos caras de ataque desde el suelo en la posición inclinada, pueden definirse dos formas de voltear la pieza, una frontal que mueve la pieza hacia delante y otra lateral que mueve la pieza lateralmente en diagonal. La figura 10 muestra las maniobras de volteo frontal de cubípodos y cubos, que se repitieron en cada prototipo ensayado hasta 24 veces.



Figura 10. Volteo frontal de cubo y Cubípodo.

- **Ensayos de Caída libre.** Los ensayos de caída libre consisten en coger la pieza, elevarla verticalmente y dejarla caer sobre la plataforma de caídas. Esta definición genérica de caída libre debe matizarse indicando que las variantes de caída libre que pueden aplicarse dependen de las diferentes posibilidades de apoyar la pieza sobre el suelo (una el cubo, dos el Cubípodo, cinco el Accropode, etc.), de coger la pieza y de ejecutar el lanzamiento. En el caso de Accropode, Core-Loc y Xblock existen multitud de variantes de caída libre de las que sólo se ha ensayado una en

cada caso. En el caso del Proyecto CUBIPOD, se han ensayado tres formas de lanzamiento (“martillo”, “arista” y “aleatorio”) de cada pieza que corresponde con todas las combinaciones sencillas de apoyos y pinzas que son viables utilizando el puente grúa que tiene mayores posibilidades que las excavadoras.

De acuerdo con Muttray *et al.* (2005), el Accropode y Xbloc se lanzaron varias veces sobre sus respectivas plataformas de caída, desde alturas de 1.4 a 7.3 metros con daños muy elevados que significan la destrucción completa y cambio radical de morfología en la mayoría de los casos. Los ensayos de caída de Core-Loc en 1997 alcanzaron sólo unos pocos decímetros y con daños importantes. En el Proyecto CUBIPOD, los ensayos de caída libre de cubos y cubípodos alcanzan los dos metros de altura y, en el caso de cubípodos, se han realizado además dos ensayos de caída libre extrema hasta los 9.5 metros de altura.

Equipos e instalaciones utilizados en los ensayos de caída de prototipos

Para la ejecución de los ensayos de caída de prototipos se ha utilizado una parte del Parque de Bloques de SATO del Puerto de Alicante y especialmente el puente grúa de 63/25 t de la Figura 11. En esa zona de la dársena Sur del Puerto de Alicante se instalaron los encofrados y la zona de apilamiento de bloques (ver figura 9). Los ensayos de caída se realizaron la primera semana de marzo de 2008. Previamente se construyeron las dos plataformas de hormigón armado, una de volteo (10.0x7.5x0.9 m) a nivel del suelo y otra de caída libre (5.0x5.0x1.15 m) protegida con caballón de un metro de altura (ver figura 10). El conjunto estaba vallado con un perímetro de seguridad que se despejaba cada vez que se lanzaba un prototipo en caída libre. Para mover los prototipos de $W(t) \approx 15$ a 16 se utilizaron dos tipos de pinza: una simple de cubos de 20 t y una doble de cubípodos de 2x20 t. La figura 8 muestra la pinza doble utilizada para los cubípodos en caída libre de martillo. El operador de grúa mostró una gran habilidad y flexibilidad en el manejo de los dos tipos de pinzas tanto para cubos como cubípodos. Se utilizó una retroexcavadora para las maniobras de volteo (ver figura 10) y una célula de carga de 20 t de lectura directa con una precisión de 0.05% para pesar las taras y los prototipos antes y después de las caídas.



Figura 11. Puente grúa de SATO en el Parque de Bloques del Puerto de Alicante.

La célula de carga permitió pesar con precisión de 10 kg los prototipos, antes y después de las caídas. Sólo se dejó de pesar cuando la pérdida de masa estimada visualmente era muy pequeña (del orden de 10 kg) y cuando la pérdida de peso era tan grande que no era posible coger el mayor pedazo restante, dando en este caso una pérdida de peso a estima visual. En el resto de los casos se pesó con una precisión de 10 kg las piezas más grandes después de cada caída o serie de volteos. Además del pesaje continuado de piezas, se realizó una filmación profesional completa de todas las actividades realizadas, así como filmaciones y fotografías parciales de diferentes acciones.

Resultados de los ensayos de volteo de cubos y cubípodos

Para la ejecución de los ensayos de volteo se utilizaron los bloques cúbicos C-07 y C-08 y los cubípodos P-08 a P-11 sobre la plataforma de volteo de hormigón armado (10.0x7.5x0.9 m). Se utilizó la retroexcavadora de la figura 10 para realizar hasta 24 volteos completos del cubo C-08 (ángulo=45°) y hasta 24 volteos parciales del cubo C-07 (ángulo=15°). A los cubípodos P-09 y P-10 se les forzaron volteos frontales contando el número de empujones desde posición de equilibrio en el suelo; a los cubípodos P-08 y P-11 se les forzaron volteos diagonales.

La tabla 1 muestra las pérdidas de masa en los ensayos de volteo de cubos y cubípodos. Los bloques cúbicos sufrieron pequeñas pérdidas de masa, hasta 2% después de 24 vuelcos completos. Los cubípodos mostraron pérdidas de masa irrelevantes. La plataforma de volteo se mantuvo en excelentes condiciones todo el tiempo.

3 y 4 de marzo de 2008						
CUBOS: pérdida de masa en volteo			n° de golpes			
Masa inicial(kg)	ángulo(°)	N°	8	16	24	
15410	45	C-08	170	270	310	
15220	15	C-07	10	20	60	
CUBÍPODOS: pérdida de masa en volteo			n° empujones			
Masa inicial(kg)	tipo	N°	6	13	19	25
16650	frontal	P-09	0	10	10	10
16490	frontal	P-10	0	0	0	
CUBÍPODOS: pérdida de masa en volteo			n° empujones			
Masa inicial(kg)	tipo	N°	20	40	60	
16540	diagonal	P-08	10	10	20	
16520	diagonal	P-11	10	30	40	
empujón: un golpe grande y 3 rebotes oscilantes			precisión de la célula de carga= 10 kg			
golpe: caída desde ángulo al suelo			medidas en azul= estimaciones visuales (del orden de 10kg)			
			medidas en negro= mediciones con la célula de carga			

Tabla 1. Pérdidas de masa en los ensayos de volteo

Resultados de los ensayos de caída libre de cubos y cubípodos

Para la ejecución de los ensayos de caída libre se utilizaron los bloques cúbicos C-01 a C-06 y los cubípodos P-01 y P-03 a P-07 sobre la plataforma de caída libre de hormigón armado (5.00x5.00x1.15 m.) con protección de acero de 20 mm de espesor (ver figuras 12 y 13). Además, se reutilizaron para distintas funciones en los ensayos de caída libre los prototipos de cubo y Cubípedo que habían perdido cantidades muy pequeñas de masa en los ensayos de volteo (0.4% para cubo C-07, <0.1% para el Cubípedo P-09, etc.).

Los ensayos de caída libre de prototipos se programaron intercalando ensayos de caída libre de cubípodos y bloques cúbicos, empezando por los lanzamientos desde menor altura de caída. La altura de caída se define como la diferencia entre la cota del punto más bajo del prototipo antes de soltarlo y la cota del yunque o plataforma de caída libre. Fijada una altura de caída, se repetían los lanzamientos hasta seis veces o alcanzar la rotura del prototipo. Se utilizaron tres tipos de caídas libre de prototipos según la forma de coger el bloque: (1) caída de "martillo" con la cara inferior paralela a la plataforma, (2) caída de "arista" con las caras inferiores formado 45° con la plataforma y (3) caída "aleatoria" apoyando una esquina del prototipo en un bloque lateral antes de soltarlo sobre la plataforma de caída.

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 causaban más daños en los prototipos que las caídas aleatorias. Por otro lado, se pudo comprobar que la plataforma de caída libre, a pesar de su robustez inicial, fue poco a poco deteriorándose hasta quedar fuera de servicio con el primer lanzamiento del Cubípedo P-03 desde h=3.0 metros de altura, que provocó daños importantes en la plataforma de caída libre sin sufrir una pérdida de peso significativa. El deterioro ocasionado en la plataforma de caída libre por los seis lanzamientos del Cubípedo P-03 desde h=3.0 metros de altura aconsejaron realizar los dos ensayos de caída extrema de cubípodos previstos a la máxima altura que permitían las pinzas y el puente grúa (caída en arista desde h=9.5 metros y caída en martillo desde h=8.5 metros) protegiendo la plataforma de volteo con los cubípodos en buenas condiciones P-02, P-06, P-09 y P-11 buscando un golpe uno-contra-cuatro que pueda asemejarse a la caída accidental de un Cubípedo sobre un manto de cubípodos en construcción.

Cubípodos y cubos se lanzaron en caída libre (martillo, arista y aleatorio) desde una altura de h(m)=2.0. La figura 12 muestra la caída libre de martillo del cubo C-03 desde dos metros que provocó la rotura del bloque (pérdida aproximada de peso del 45%) al primer lanzamiento. El Cubípedo P-05 con caídas de martillo desde los dos metros necesitó seis caídas para romperse (pérdida de peso del 20.34% y de una de las protuberancias). Desde dos metros de altura, los cubos C-04 y C-07 necesitaron dos y tres lanzamientos respectivamente para romper en caída de arista y aleatoria. Con seis caídas cada uno (arista y aleatoria) no fue posible romper los cubípodos P-07 y P-09. La figura 13 muestra las caídas libres de cubípodos de martillo, arista y aleatoria desde dos metros de altura.



Figura 12. Caída libre de martillo de bloque cúbico desde $h=2.0$ metros (rotura a la 1ª).

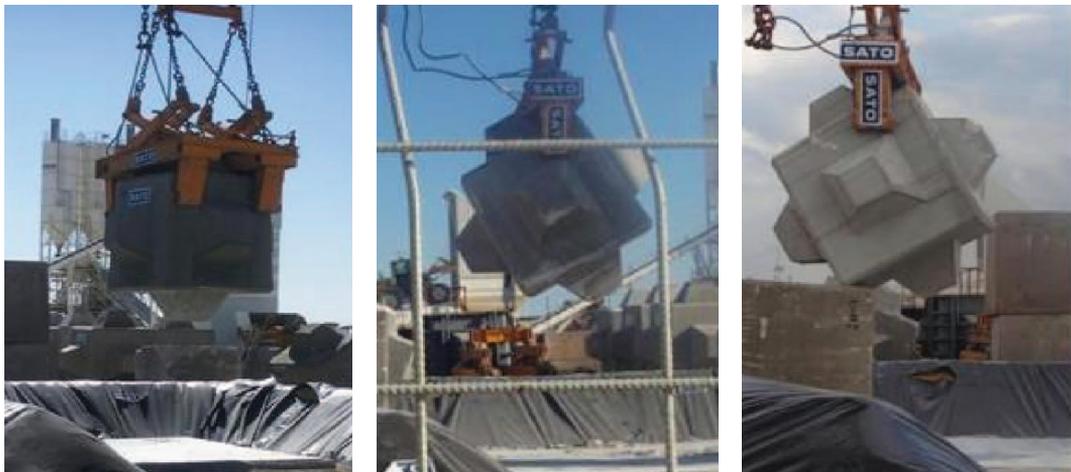


Figura 13. Caída libre de martillo, arista y aleatoria de cubípodos desde $h=2.0$ metros.

Además de los lanzamientos desde dos metros, se realizaron caídas libres de martillo de cubos desde $h(m)=0.5, 1.0$ y 1.5 . El cubo C-01 lanzado desde 1.5 metros se rompió al tercer lanzamiento y los cubos C-06 y C-02 resistieron sin romperse seis caídas de martillo desde 0.5 y 1.0 metros respectivamente. Completados los ensayos de caída libre, descritos anteriormente, se realizaron ensayos de caída extrema de cubípodos desde la máxima altura compatible con el puente grúa y pinzas utilizadas. Se utilizaron los prototipos P-01 para la caída en arista ($h=9.5$ metros) y P-04 para la caída en martillo ($h=8.5$ metros), lanzados sobre la zona central de un conjunto de cuatro cubípodos juntos (P-02, P-06, P-09 y P-11) apoyados en la plataforma de volteo. La figura 14 muestra la disposición de la caída libre extrema de martillo desde 8.5 metros de altura. Las caídas libres extremas de cubípodos se realizaron sin repeticiones, pesando todos los cubípodos (el lanzado y los receptores) después de cada lanzamiento.



Figura 14. Caída libre extrema de martillo del Cubípodo P-04 desde $h=8.5$ metros.

Las observaciones en los dos ensayos de caída extrema de cubípodos indican que la pieza que cae sufre aproximadamente la misma pérdida de masa que cada una de las piezas receptoras del impacto. El modelo más sencillo para este ensayo es suponer que la energía del impacto (aproximadamente cuatro veces la energía de un lanzamiento desde dos metros) se reparte irregularmente entre las cinco piezas generando pérdidas de peso variables pero no muy grandes (ninguna rotura). El peso y la morfología general de todos los cubípodos involucrados en el impacto de caída extrema se mantienen sin variaciones relevantes.

Funciones de fallo de la caída libre de cubos y cubípodos

En este apartado se modela el proceso de pérdida de masa por caída libre de cubos y cubípodos de acuerdo con las observaciones objetivas y las percepciones subjetivas de los ensayos de caída realizados. El modelo conceptual considerado se basa en suponer que la energía potencial de la pieza al soltarla se invierte en tres procesos fundamentales:

- 1) *Roturas de borde.* Una parte de la energía se invierte en romper un volumen pequeño de hormigón periférico (bordes) al generar presiones muy grandes en zonas de poca superficie (puntas y aristas); se producen pérdidas de masa pequeñas que no afectan la morfología de la pieza.
- 2) *Fracturas interna.* Si la deceleración del cuerpo central de la pieza es muy grande, se producen fracturas internas y planos de fractura que afectan un gran volumen de la pieza que puede llegar a romperse con importantes pérdidas de masa y cambio de morfología.
- 3) *Disipación de energía.* Una parte de la energía se pierde en procesos variados como amortiguamiento del terreno, daños en la plataforma de caída libre, ruidos, fricción con el suelo y el aire, etc.

El diseño experimental de los ensayos de caída de prototipos de CUBIPOD se realizó para 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 era pequeña.

Con el modelo conceptual anterior, las variables principales que condicionan la posible rotura de prototipos al caer repetidamente sobre plataforma rígida son: (1) altura de caída, (2) número de caídas, (3) resistencia a compresión y tracción del hormigón y (4) tamaño de la pieza. En el caso de los prototipos ensayados en CUBIPOD, se puede analizar bien la influencia de las dos primeras variables ya que se han lanzado cubos y cubípodos desde alturas variadas ($0.5 \leq h(m) \leq 2.0$) y con diferentes repeticiones ($1 \leq n \leq 6$). El análisis que puede hacerse de la tercera variable es menos fiable ya que las resistencias a compresión del hormigón utilizado es poco variable ($CV < 15\%$) y la cuarta no se puede deducir de los ensayos descritos ya que el peso de prototipos ensayados es muy similar. Por todo ello, se ha calculado la altura de caída de cada ensayo (diferencia de cotas del centro de gravedad del cubo entre la posición de lanzamiento y la posición de impacto sobre el suelo) y se ha buscado el mejor factor potencial corrector que permita considerar el número de volteos/caídas de martillo en el caso de los bloques cúbicos. El resultado ha sido una altura de caída equivalente, h_e , dado por la ecuación:

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

donde h es la diferencia entre las cotas del centro de gravedad del prototipo al soltarlo y al golpear la plataforma de volteo/caída y n el número de repeticiones de volteos/caídas. Con este modelo se ha podido establecer un patrón de comportamiento para los cubos en caída de tipo martillo descrito en la figura 15 (puntos cuadrados y líneas azules). En la figura 15 se representan también los ensayos de caída libre de cubípodos (puntos circulares y líneas rojas) sin distinguir si el tipo de caída es martillo, arista y aleatorio.

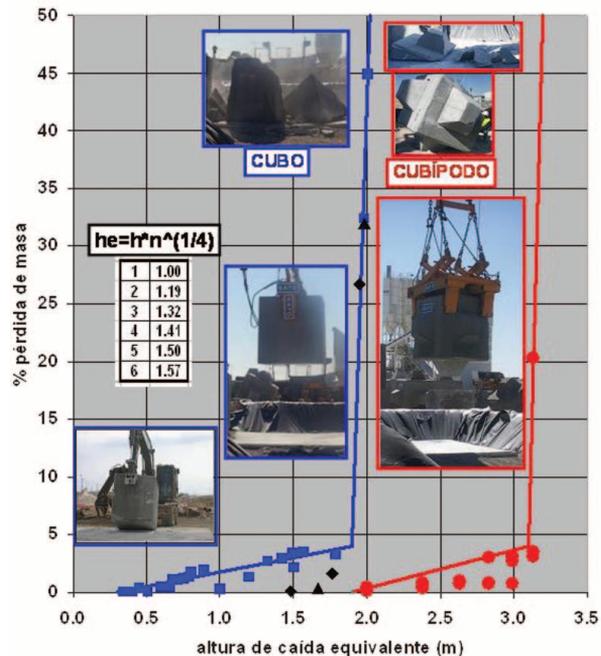


Figura 15. Pérdida de masa de cubos y cubípodos en caída libre sobre plataforma rígida.

Tanto los cubos como los cubípodos ensayados parecen que tienen un rango lineal de pérdida de masa con un límite de resistencia a la caída de "martillo", que genera aproximadamente un 4% de pérdida de masa, a partir del cual la pieza se rompe con planos inclinados de rotura y pérdidas de masa muy superiores. El rango lineal observado de pérdidas de masa son $0.3 < h_e(m) < 1.9$ para cubos (caídas tipo martillo) y $1.9 < h_e(m) < 3.1$ para cubípodos (caídas tipo martillo, arista y aleatorio). El Cubípodo ha demostrado una mayor resistencia a la caída que el bloque cúbico convencional. A pesar de haber utilizado unos cubípodos de mayor tamaño ($W=16.6$ t) que los cubos ($W=15.3$ t) y hormigón de similares características, los cubípodos han resistido caídas mayores que los bloques cúbicos convencionales. La razón fundamental de la mayor resistencia a la caída del Cubípodo, radica en la generación de roturas de borde localizadas (tacones, vértices, aristas, etc.) que reducen la energía del impacto y las aceleraciones del núcleo de la pieza, evitando así la fractura interna que muestra el bloque cúbico. Además, el único prototipo de Cubípodo que ha llegado a la rotura (P-05), ha mantenido el 80% de la masa inicial y cinco de los seis tacones, mucho mejor que los cuatro cubos rotos durante los ensayos. Tanto cubos como cubípodos son mucho más resistentes a las caídas que otras piezas especiales (Tetrapod, Accropode, Core-loc y X-block, etc.) ya que los ensayos de caída publicados no cubren razonablemente el espectro de volteos y caídas exigibles en estas piezas y con roturas producidas con caídas desde mucha menor altura.

ESTUDIO PARAMÉTRICO DE COSTES

Para el estudio de la viabilidad económica del Cubípodo se han estudiado las distintas partidas de coste que intervienen en la fabricación y puesta en obra de las piezas del manto principal. En la comparación se han considerado múltiples condicionantes y aspectos logísticos, 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, función 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 y geometría del dique, que condicionan las grúas y los medios de transporte.
- El acopio y manipulación muy dependiente de la compactidad del parque y de los ritmos de fabricación y colocación.

Para la comparación de costes de utilización de bloques cúbicos y cubípodos en la construcción de mantos principales de diques en talud, se ha preparado un estudio paramétrico de costes referido a una sección tipo genérica definida en la figura 16.

Se han considerado cuatro parámetros geométricos de referencia para el estudio de costes: (1) peso de pieza ($W[t]$), (2) cota ($h[m]$), (3) longitud del dique ($L[m]$) y (4) talud ($\cot \alpha$). En este estudio paramétrico de costes se ha estimado el coste unitario

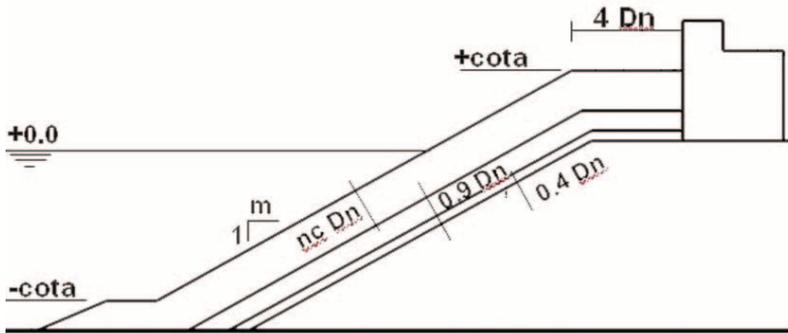


Figura 16. Sección tipo de referencia para el estudio paramétrico de costes.

(€/m³) de las piezas para el manto principal y el coste del metro lineal de dique para tres tipos de mantos y cot $\alpha=1.5$:

- B2: manto principal con 2 capas de bloques cúbicos.
- C1: manto principal con 1 capa de cubípodos.
- C2: manto principal con 2 capas de cubípodos.

El lado equivalente ($Dn=[W/\gamma_r]^{1/3}$) de la pieza, el talud (cot α) y la cota (del pie negativa y del manto positiva) definen la sección de referencia de la figura 16; se trata de una sección simplificada pero aproximada a muchos diques reales que permite la comparación de costes de utilización de piezas diferentes. Este estudio paramétrico de costes considera los medios para la ejecución del manto principal de forma exclusiva, sin considerar las sinergias en la ejecución del manto secundario y las capas de filtro o las posibles modificaciones geométricas que pudieran conllevar el cambio de tipo de pieza.

Se han considerado los casos definidos en la tabla 2, eliminando combinaciones de peso y cota que no son frecuentes en diques reales como bloques pequeños en grandes profundidades y viceversa.

Cota (m)	W(t)								
	10	15	20	30	50	70	100	120	150
5	X	X							
10	X	X	X	X	X				
15			X	X	X	X	X		
20					X	X	X	X	X

Tabla 2. Casos estudiados de peso (t) y cota (m)

En este estudio paramétrico se han analizado tres longitudes de dique: L(m)=400, 1.000 y 2.500 m, como casos representativos de dique pequeño, medio y grande.

INNOVACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN

Fijada la longitud y la geometría de la sección (figura 16), se obtienen el volumen de hormigón y el número de unidades a fabricar. La porosidad considerada para cubos y cubípodos es del 40% y 43% respectivamente con un coeficiente de capa de 1.0 en ambos casos. Además, 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 caso de volúmenes de obra pequeños esta solución no es la óptima, pero ello no invalida las conclusiones de comparación de precios.

En la fabricación de los cubípodos respecto de los bloques cúbicos 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 manipulación son debidos a la manipulación en parque (consumo de energía, alquileres de maquinaria, mano de obra, etc.). Los costes de colocación se han estimado en función de las distancias y pesos; las pinzas de manipulación de cubípodos se han considerado un 50% más pesadas que las de bloques cúbicos. Se ha elegido el medio de colocación apropiado entre una lista de grúas habituales, analizando su ciclo en función de las fuerzas de tiro, velocidades de giro, elevación de pluma, reenvíos, etc. De esta forma se obtiene el rendimiento de colocación específico en cada caso.

Una vez estudiada la colocación y la fabricación se analiza la necesidad de acopio para dimensionar el parque. Los plazos se han ajustado para que la duración de la "obra" sea mínima. Para los cubípodos se han considerado las disposiciones mostradas en la figura 17, abierta con porosidad $\approx 51\%$ y cerrada con porosidad $\approx 30\%$. La disposición cerrada de cubípodos es mucho más compacta y ahorra espacio pero presenta problemas de manipulación con pinzas para cubípodos pequeños (hasta 18 t) por lo que sólo se debe utilizar a partir de cubípodos de 20 t. Para los bloques cúbicos se ha considerado una calle de manipulación de $0.5 < \text{anchura(m)} < 1.0$ m y se ha estimado porosidad $\approx 20\%$. Con las necesidades de acopio y las características del pórtico se ha dimensionado la longitud del parque. También se ha analizado la longitud del andén de fabricación, considerando tres posiciones por molde. En la separación se incluye el margen adicional para la apertura del molde de los cubípodos.

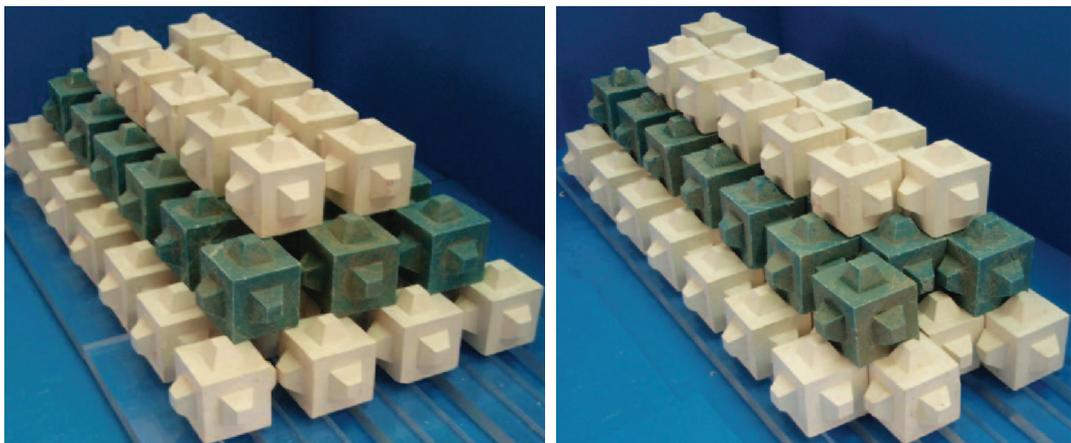


Figura 17. Disposición abierta y cerrada de cubípodos en parque.

Para el análisis final del coste se ha considerado la repercusión del coste de instalación del parque sobre el total de la medición. El coste fijo de equipos incluye el coste de los encofrados (los cubípodos necesitan además las bases), las pinzas de manipulación, desencofrado, colocación y la movilización de pódico y grúa de colocación. En el coste de fabricación se ha considerado el total del tiempo de fabricación, al igual que en el de colocación el tiempo de colocación necesario. El coste de manipulación se ha extendido al plazo total de la "obra". En cada caso estudiado, se ha ajustado el número de encofrados para conseguir un óptimo global.

En todos los casos se ha considerado un coste de suministro de hormigón fijo de 60 €/m^3 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 18.

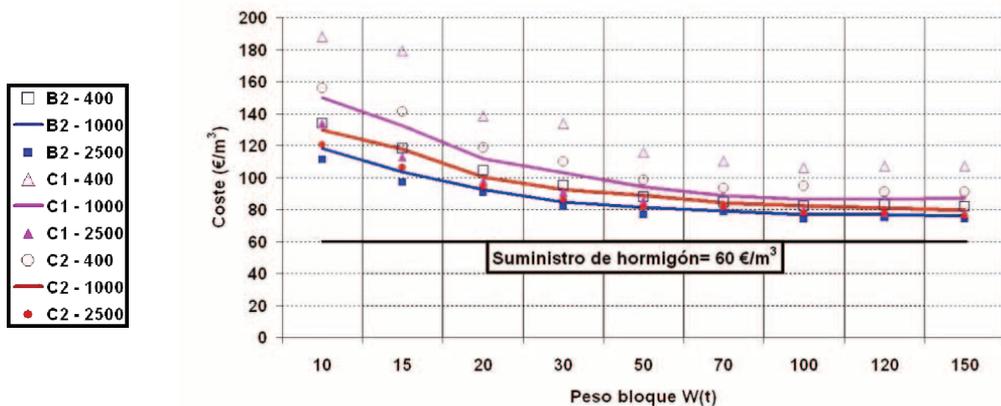


Figura 18. Coste unitario (€/m^3) según longitud del dique y peso de la pieza.

En la figura 18 se ve la variación de precio unitario (€/m^3) para los distintos casos estudiados, colocando en el eje de abscisas el peso del bloque estudiado. Para cada pieza, cubo en dos capas (cuadrados), Cubípodos en dos capas (círculos) y Cubípodos en una capa (triángulos), se señala una línea central de referencia correspondiente a $L(m)=1.000$ (cubo bicapa=azul, cubípodos bicapa=rojo y cubípodos monocapa=rosa). Esas líneas muestran un coste unitario que disminuye en todos los casos al aumentar el peso del bloque y una gradación según el tipo de pieza, siendo el más económico el bloque cúbico en dos capas, a continuación el cubípodos en dos capas y el más caro el cubípodos en una capa.

Es importante destacar la dispersión de los costes en función de la geometría y volumen de la obra, en el entorno del 30% sobre y 15% bajo la línea de referencia. Esto implica que no es posible fijar un precio "de referencia" para el hormigón en bloques sin tener en cuenta las circunstancias concretas de la obra, especialmente porque existe una variabilidad de precio en el suministro que no se ha tenido en cuenta en este análisis paramétrico, relacionado con el precio internacional del

cemento y la energía y que puede variar más de un 20% sobre los 60 €/m³ considerados.

Analizando un caso concreto para estudiar en detalle las diferencias en el coste, se muestra a continuación el desglose del coste comparado para el caso de un dique de L(m)=1.000 a la cota(m)=15 con piezas de W(t)=20. En la figura 19 se ha separado el coste de cada factor para analizar las diferencias en cada tipo de pieza. Se observa que el coste de suministro es idéntico (por definición). Los costes de manipulación son similares, lo que indica una duración total parecida en el caso de piezas bicapa, mientras que el menor número de piezas en el cubípedo monocapa incrementa levemente esta partida. El coste de colocación es parecido en los tres casos, aunque no se ha tenido en cuenta en el estudio las pérdidas de tiempo en la recolocación de cubos para evitar su adoquinamiento en las partes visibles del manto (en las no visibles se deja como quedan). El coste de instalación es también análogo en piezas bicapa, lo que indica la escasa repercusión de los suplementos necesarios como soporte de los cubípodos para su acopio. En el caso monocapa dichos suplementos influyen más al reducirse el consumo de hormigón.

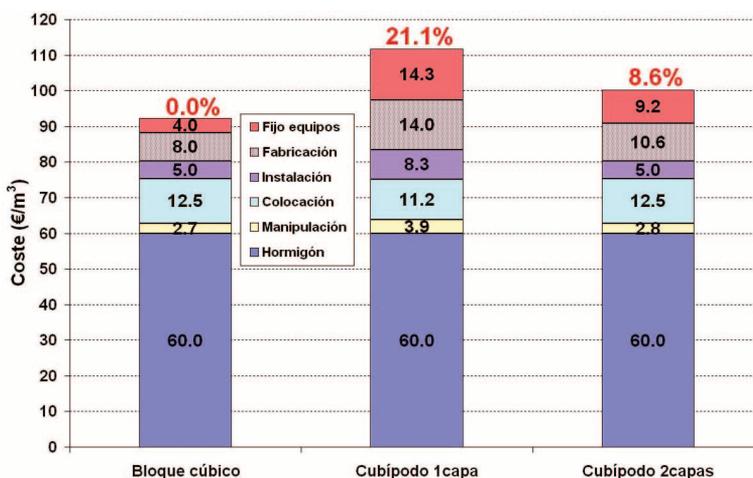


Figura 19. Descomposición de coste por factores para cota (m)=15, L(m)=1.000 y W(t)=20.

Los costes de fabricación se incrementan en los cubípodos (un 30% y 75% para dos y una capa respectivamente). Además del incremento de personal y equipos de vibración necesarios para la fabricación de cubípodos, al tener un coste de encofrados mayor, la optimización del coste global tiende a reducir el número de unidades a fabricar, lo que se traduce en una disminución de la producción diaria y una mayor repercusión de los costes en el metro cúbico fabricado. En el caso monocapa se hace particularmente evidente dicha repercusión. Por último, en los costes fijos es donde se aprecia la repercusión del coste del encofrado y las pinzas de manipulación, siendo el doble de coste para cubípodos bicapa y el triple en monocapa.

Para este caso analizado en detalle, el coste del metro cúbico de hormigón fabricado y colocado en manto de cubípodos bicapa es aproximadamente un 10% más caro (un 20% en monocapa) que el coste en las mismas circunstancias para los bloques cúbicos bicapa convencionales. En cualquier caso, analizando el reparto proporcional de los costes sobre el total para este ejemplo, se observa que el coste dominante es el de suministro de hormigón y el encarecimiento de la fabricación del cubípodo es relevante en partidas que suponen un porcentaje bajo del coste total de la pieza.

En todos los casos estudiados, el hormigón supone un porcentaje mayor del 50% de los costes totales, por lo que resulta muy importante reducir el volumen de hormigón a suministrar y en este punto es donde radica la ventaja del Cubípodo bicapa por su gran estabilidad hidráulica (varias veces superior al del cubo) y la del Cubípodo monocapa por su mayor estabilidad que el cubo bicapa y tener sólo una capa. La disminución del volumen de hormigón no es proporcional a la disminución del peso, ya que se disminuye sólo el espesor de la capa, manteniendo la superficie del talud a cubrir. Por otro lado, la disminución de tamaño supone un incremento del número de piezas a colocar, por lo que la comparación de costos globales no es inmediata. Para el dique $L(m)=1.000$ y $cota(m)=15$, la figura 20 muestra la comparación del coste del manto exterior por metro lineal de longitud. Como se puede observar, el coste por metro lineal de un manto con cubos o con cubípodos bicapa es prácticamente idéntico a igualdad de peso, mientras que el coste del manto monocapa de cubípodos se reduce aproximadamente un 40%. Según los ensayos realizados hasta el momento, la estabilidad de los cubípodos es muy superior a la de los bloques cúbicos, lo que hace viable (mayor seguridad) mantos bicapa con cubípodos con menos de la mitad de peso del cubo equivalente, mientras que el manto de cubípodos monocapa es más estable hidráulicamente que el manto de cubos bicapa del mismo peso. Con estos datos se puede hablar sin duda de unos ahorros importantes en el manto, del orden del 15% pasando el manto bicapa de cubos a cubípodos y de hasta el 40% en caso de mantos monocapa de cubípodos.

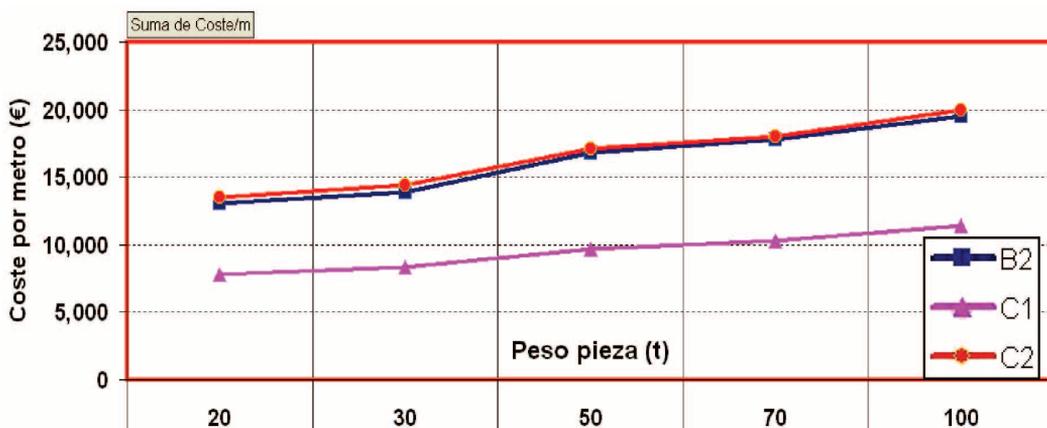


Figura 20. Coste por metro lineal de longitud de manto principal [cota (m)=15, $L(m)=1.000$ y $W(t)=20$].

RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este artículo se describen los aspectos más relevantes de los trabajos de investigación y desarrollo realizados hasta la fecha dentro del Proyecto CUBIPOD. Se describen los ensayos físicos 2D y 3D a escala reducida para estudiar la estabilidad hidráulica y rebase de cubos y cubípodos en tronco, estabilidad hidráulica de cubos y cubípodos en morro, así como la estabilidad hidráulica de cubípodos monocapa y bicapa. El Cubípodo ha mostrado una estabilidad hidráulica en tronco muy superior al cubo tanto en disposición monocapa como bicapa y menores rebases. En el morro, el Cubípodo ha mostrado mayor estabilidad hidráulica que el cubo pero una diferencia menor que en el tronco. Se describe un encofrado vertical articulado especialmente diseñado por SATO para producir cubípodos de un modo similar al de los bloques cúbicos convencionales y unas pinzas dobles adaptadas para manipular cubípodos en el parque de bloques de forma análoga a los cubos. Los dos diseños 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. Se describen los ensayos de caída de prototipos resultando que los cubípodos son más resistentes a las caídas sobre plataforma rígida que los bloques cúbicos convencionales, resistiendo caídas más de un 50% superior. Finalmente, se realiza un estudio paramétrico de costes y se concluye lo siguiente:

- 1) El Cubípodo es una pieza que se puede fabricar con los mismos procedimientos que el cubo en un parque de bloques habitual, sin requerimientos específicos de acopio y fabricación. Los tiempos de desencofrado y rendimientos son similares.
- 2) El Cubípodo es una pieza ligeramente más cara de fabricar; 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 del manto de cubípodos.
- 3) La manipulación y colocación del Cubípodo es similar a la de los bloques cúbicos convencionales, teniendo una calidad de colocación en obra mucho mayor que los cubos al no tener tendencia al adoquinamiento y propiciar una colocación aleatoria sobre el talud con porosidad homogénea.
- 4) La estabilidad hidráulica del Cubípodo es muy superior al bloque cúbico convencional, lo que redundará en una mayor resistencia a la extracción con pesos inferiores, incluso en el caso de mantos monocapa.
- 5) El remonte y rebase de mantos de cubípodos monocapa y bicapa es inferior al del manto de cubos bicapa convencional.
- 6) La resistencia estructural del Cubípodo es muy elevada, análoga a la del cubo, habiendo mostrado incluso mejor comportamiento frente a diferentes esfuerzos de impacto relacionados con volteos y caídas.
- 7) Los mantos convencionales de cubos bicapa (peso W) pueden sustituirse aumentando la seguridad por mantos bicapa de cubípodos (peso $W/2$ con ahorro $\approx 15\%$) y mantos monocapa de cubípodos (peso W con ahorro $\approx 40\%$).

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 al CDTI el soporte financiero para los trabajos de investigación y desarrollo del Cubípodo dentro del Proyecto CUBIPOD.

BIBLIOGRAFÍA

- GÓMEZ-MARTÍN, M. E. y MEDINA, J. R., 2006: Damage progression on cube armored breakwaters. *Proc. 30th International Conference on Coastal Engineering, ASCE*, (Vol. 5): 5.229-5.240.
- GÓMEZ-MARTÍN, M. E. y MEDINA, J. R., 2007: Cubipod concrete armor unit and heterogeneous packing. *Proc. Coastal Structures 2007, ASCE (in press)*.
- GÓMEZ-MARTÍN, M. E. y MEDINA, J. R., 2008: El Cubípodo: Elemento para el manto principal de diques en talud. *Libro de Ponencias de las IX Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, AZTI*, (en prensa).
- MEDINA, J. R.; GONZÁLEZ-ESCRIVÁ, J. A.; GARRIDO, J. M. y DE ROUCK, J., 2002: Overtopping analysis using neural networks, *Proc. ICCE 2002, ASCE*: 2.165-2.177.
- MEDINA, J. R.; GARRIDO J.; GÓMEZ-MARTÍN, M. E. y VIDAL, C., 2003: Armor damage analysis using Neural Networks. Balkema, *Proc. Coastal Structures 2003, ASCE*: 236-248.
- MUTTRAY, M.; REEDIJK, J. S.; VOS-ROVERS, I. y BAKKER, P., 2005: Placement and structural strength of Xbloc® and other single layer armour units. *ICE Coastlines, Structures and Breakwaters*. London: 555-567.
- SPM, 1984: Shore Protection Manual, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal and Hydraulics Laboratory, USAE Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

