

EL CUBÍPODO: ELEMENTO PARA EL MANTO PRINCIPAL DE DIQUES EN TALUD

M. Esther Gómez-Martín y Josep R. Medina

Laboratorio de Puertos y Costas, ETSICCP, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera, 14, 46022 Valencia. e-mail: mgomar00@upvnet.upv.es , jrmedina@tra.upv.es.

INTRODUCCIÓN

Desde la aparición de los tetrápodos en 1950, han sido desarrollados en todo el mundo una gran variedad de elementos para la formación de mantos de diques en talud con objeto de mejorar la estabilidad hidráulica y reducir costos. Sin embargo, a pesar de la gran diversidad de elementos (tetrápodos, dolos, acrópodos, etc.), los cubos y bloques paralelepípedicos de hormigón son los utilizados en las costas españolas casi en exclusividad. La razón fundamental es la robustez del bloque y las desastrosas experiencias de rotura de dolos en los grandes diques del Puerto de Sines (Portugal) y San Ciprián (Lugo) hace tres décadas.

La porosidad y densidad de colocación de las piezas pueden afectar significativamente la estabilidad del manto principal (ver D'Angremond et al., 1999). VandenBosch et al. (2002) ponen de manifiesto que un aumento de la densidad de colocación de los cubos de hormigón no conlleva siempre un aumento de la estabilidad, sino que mantos con bajas porosidades pueden producir otros modos de fallo además de la extracción de piezas, como son los deslizamientos del manto y los levantamientos de piezas por aumento de la subpresión (uplifting). Por otra parte, Gómez-Martín y Medina (2006) definen un nuevo modo de fallo de los diques en talud, denominado *compactación heterogénea* del manto principal, muy importante en el caso de mantos de elementos con formas regulares como cubos o bloques paralelepípedicos. La compactación heterogénea del manto se caracteriza por disminuir la porosidad del manto en unas zonas y aumentarla en otras, sin necesidad de que se produzca extracción de piezas. Así pues, no sólo se debe considerar la avería producida por extracción de piezas que pasan a formar una tercera capa en el manto, sino también por compactación tanto de la primera como de la segunda capa del manto principal.

En este artículo se presenta un nuevo elemento para la formación de mantos de diques, cuya estabilidad hidráulica ha sido ensayada y cuyos resultados se comparan con los resultados de cubos. El Cubípodo es un elemento de forma básica cúbica o paralelepípedica

que dispone de una protuberancia en cada cara para evitar el “adoquinamiento” o acoplamiento entre elementos y aumentar la fricción con la capa inferior de escollera.

EL CUBÍPODO

El Cubípodo es un nuevo elemento para la construcción de diques basado en los elementos cúbicos o paralelepípedicos tradicionales, pero superando algunos de sus inconvenientes. La nueva pieza, se caracteriza por ser simple y robusta pudiendo ser utilizada como elemento constitutivo del manto principal de diques rompeolas.



Figura 1. Vista 3D del Cubípodo.

Se trata de un elemento de forma básica cúbica o paralelepípedica con una protuberancia en cada cara para evitar el acoplamiento entre elementos y aumentar la fricción tanto con el manto secundario de escollera como entre los propios elementos. El nuevo elemento presenta las ventajas de robustez y estabilidad propias del elemento original cúbico resolviendo los problemas típicos de adoquinamiento del bloque 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), manteniendo la capacidad resistente del dique frente a la extracción de piezas producidas por el oleaje. La Figura 1 muestra una vista 3D del Cubípodo ensayado en el laboratorio de Puertos y Costas de la Universidad Politécnica de Valencia (LPC-UPV).

Ventajas del Cubípodo.

El Cubípodo se ha diseñado con el objetivo de aprovechar las ventajas de los bloques cúbicos y superar sus principales inconvenientes, como son, la baja estabilidad hidráulica ($K_D=6$), el adoquinamiento o compactación heterogénea y la baja fricción con el manto

secundario del bloque tradicional, gracias a las protuberancias diseñadas en sus caras. Las principales ventajas del Cubípodo son:

1. Evita el adoquinamiento y deslizamiento del bloque tradicional: Impide el acoplamiento cara a cara de los bloques cúbicos y paralelepípedicos tradicionales y aumenta la fricción del manto con la capa inferior ya que las protuberancias penetran en dicha capa. Se dificulta así la extracción de los elementos del manto y el deslizamiento de los mismos.
2. Gran robustez: Elevada resistencia estructural individual de los elementos a la rotura debido a la poca esbeltez de las partes del Cubípodo en relación con otras piezas especiales diferentes del bloque cúbico.
3. Gran estabilidad hidráulica y menor rebase: Aumenta la resistencia de los diques frente al oleaje; al evitar el adoquinamiento de los elementos y su deslizamiento, se evita la pérdida de elementos en la zona superior y se reduce el remonte y el rebase correspondiente. Al impedir o reducir la compactación heterogénea se mantiene la resistencia del dique frente a extracción de piezas producidas por el oleaje.
4. Facilidad de construcción: Sencillez de ejecución del dique, mejora la de los bloques cúbicos tradicionales y mucho mejor que los elementos de colocación no aleatoria. La colocación de los cubípodos es aleatoria en dos capas, no requiriendo la colocación cuidada que exigen otras tipologías existentes en el mercado. El encofrado necesario para la fabricación es sencillo y no se precisa ningún requisito en la orientación de las unidades individuales para alcanzar una buena disposición aleatoria.
5. Ahorro económico y de materiales: Comparado con los elementos cúbicos o paralelepípedicos tradicionales se utilizarían piezas más pequeñas para resistir los mismos temporales, por lo que se reduce el volumen de hormigón requerido para la construcción del dique con el consiguiente ahorro económico y reducción de la huella ecológica.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Los ensayos de estabilidad de los diques en talud con el manto principal formado por cubos y cubípodos se han realizado en el canal bidimensional existente en el LPC-UPV. Se trata de un canal de 30m de longitud y sección cuadrada de 1.2x1.2 m, caracterizado por ser de

fondo variable (ver Figura 2), con 0.25 m más de profundidad en la zona de generación de oleaje que en la zona de modelo.

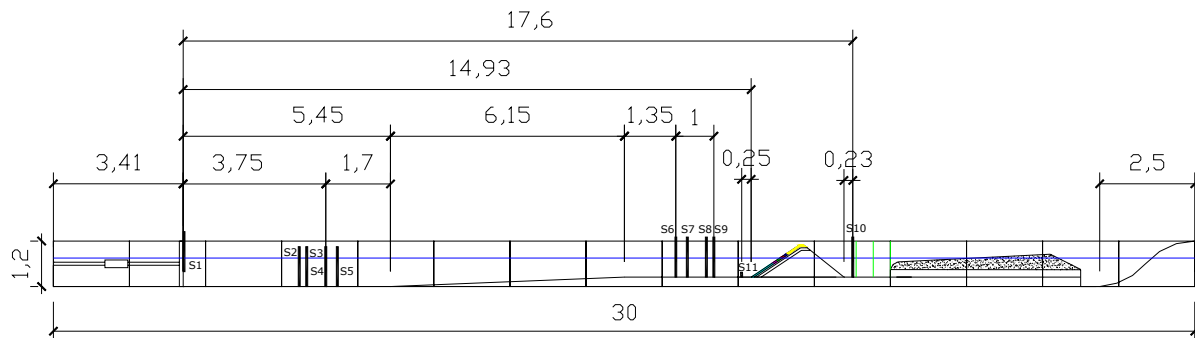


Figura 2. Sección longitudinal del canal de ensayos 2D del LPC-UPV y distribución de los sensores de nivel (cotas en m).

Se han ensayado dos modelos de dique en talud, con idéntica sección y disposición experimental, la única diferencia entre ambos modelos ha sido el manto principal, que en un caso se ha formado por dos capas de cubos y en el otro por dos capas de cubípodos. El pie de dique se sitúa a unos 15 m de la pala generadora de oleaje, siendo la profundidad del agua en la zona de modelo de 0.50 m. Aguas arriba del dique se sitúan los sensores de nivel a lo largo del eje longitudinal del canal, los cuales se disponen en dos grupos de cuatro sensores, uno en las proximidades del modelo y otro en la zona de generación de oleaje, este último separado una distancia suficiente de la pala generadora para evitar que las ondas evanescentes afecten a las mediciones. Ambos grupos permiten obtener tanto el oleaje incidente como el reflejado por la estructura. La separación de los sensores de nivel se estableció en función de la longitud de onda, atendiendo a los criterios establecidos por Mansard y Funke (1980) y Baquerizo et al. (1998); el método de separación de oleaje incidente y reflejado es el LASA desarrollado por Medina(2001) y Figueres y Medina(2004).

Los modelos son dos diques en talud en profundidad indefinida, de pendiente 1/1.5 en la cara expuesta al oleaje y de pendiente 1/1.25 en la cara no expuesta, contruidos a escala de referencia 1:30. La sección es no rebasable y cumple las recomendaciones del Shore Protection Manual (1984) para diques en aguas profundas en cuanto al peso de los elementos del manto, filtro y núcleo. Se trata de una sección permeable formada por un manto principal de 2 capas de cubos ($D_n=4$ cm) o cubípodos ($D_n=3.85$ cm) de hormigón con el filtro de grava 'tipo G1' y el núcleo de grava 'tipo G2', cuyas características granulométricas se muestran en la tabla 1. Los cubos tienen densidad $\rho=2.18$ T/m³ y un

peso de 140 g, mientras que la densidad de los cubípodos es $\rho=1.86 \text{ T/m}^3$ y el peso es de 108 g. La densidad de las gravas G1 y G2 es de 2.70 T/m^3 .

	MODELO DE CUBOS			MODELO DE CUBÍPODOS		
	Densidad			Densidad		
	D ₅₀ (cm.)	(T/m ³)	Peso (gr.)	D ₅₀ (cm.)	(T/m ³)	Peso (gr.)
Manto Principal	4.00	2.18	140	3.85	1.86	108
Filtro (G1)	1.80	2.70	16	1.80	2.70	16
Núcleo (G2)	0.70	2.70	0.90	0.70	2.70	0.90

Tabla 1.- Características granulométricas de los materiales que forman los modelos.

La sección transversal del dique en talud construido en el canal bidimensional del LPC-UPV es la que se muestra en la figura 3. El manto principal, formado por dos capas de cubos o cubípodos de hormigón, se caracteriza porque los cubos de la capa inferior son blancos o negros y los de la capa superior se han pintado en bandas de diferentes colores para poder observar fácilmente los movimientos producidos debido a la acción del oleaje.

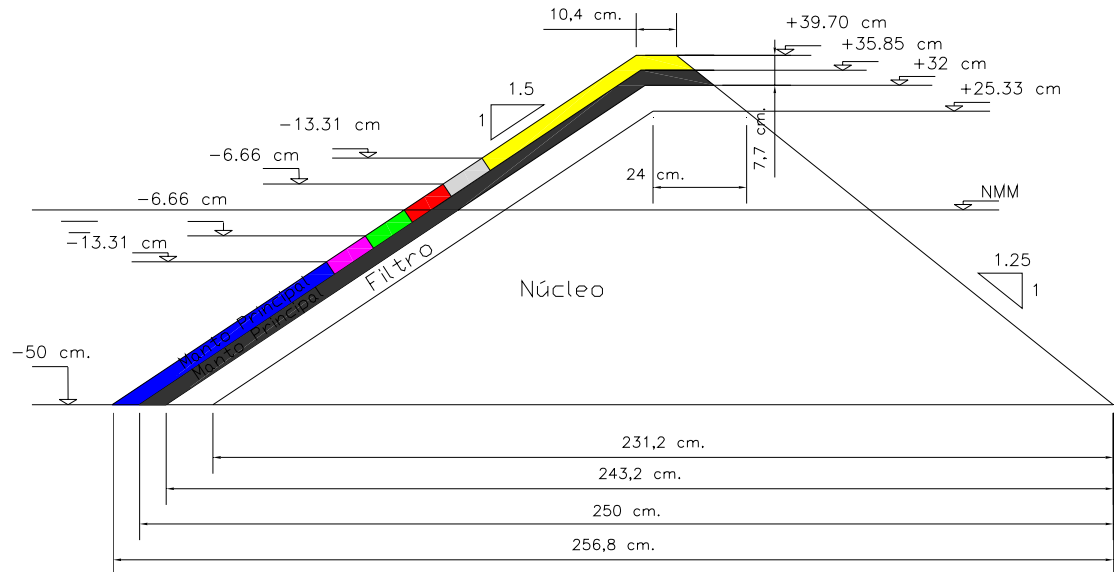


Figura 3. Sección transversal del modelo de dique en talud con manto de cubos ($D_{n50}=4\text{cm}$).

La forma de colocación de los cubos o cubípodos es aleatoria dejándolos caer y nunca encajándolos. Ambas capas se construyen al mismo tiempo de forma que la porosidad del manto sea aproximadamente constante e igual a la porosidad de proyecto, $p=40\%$ en el caso de los cubípodos y $p=37\%$ en el caso de los cubos. La porosidad del manto de cubos es algo menor que la de los cubípodos debido al reacomodamiento que sufren los cubos durante su colocación o puesta en obra, la cual ha de ser cuidadosa para evitar que gran parte de los cubos se posicionen cara contra cara. El número de cubos y cubípodos que

forman el manto principal del dique, depende de la porosidad del mismo. Así pues, en la tabla 2 se muestran el número de piezas utilizadas en el manto principal de ambos modelos.

COLORES	Nº elementos manto principal	
	Nº CUBOS	Nº CUBÍPODOS
Capa Inferior	798	820
Amarillo	285	300
Gris	57	60
Rojo	57	60
Verde	57	60
Rosa	57	60
Cyan	304	300
TOTAL	1615	1660

Tabla 2.- Número de cubos y cubípodos utilizados en la construcción de las 2 capas del manto principal.

Finalmente, se han colocado dos webcam una perpendicular a la sección y otra cenital perpendicular al talud del dique, de forma que se registran videos de todos los ensayos. Además se ha colocado una regla de referencia en las paredes del canal de manera que se puede determinar el remonte visual producido en cada uno de los ensayos. Se ha definido el remonte como la máxima (runup) altura desde el nivel medio de la superficie libre del agua en reposo, hasta la intersección entre la línea que define el talud de la estructura y la superficie libre del agua. En este trabajo se ha medido el remonte, correspondiente a cada altura de ola real, a partir del análisis visual de los respectivos vídeos cenitales tomados por la webcam situada perpendicularmente al talud del dique.

Características de los ensayos realizados.

Se han realizado ensayos de estabilidad con oleaje regular e irregular y manteniendo constante el número de Iribarren teórico (Ir^*) del oleaje generado durante cada uno de los ensayos ($Ir^*=2.5$, $Ir^*=3.0$, $Ir^*=3.5$ e $Ir^*=4.0$). Los ensayos se caracterizan porque el oleaje es de incidencia normal.

$$Ir^* = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L}} \quad (1)$$

Fijado el número de Iribarren, se parte de una altura de ola que se sabe que no producirá iniciación de averías y se va aumentando la misma (escalones crecientes de (H,T)) hasta alcanzar el inicio de destrucción del dique. La duración de las series en cada escalón de altura de ola depende del tipo de oleaje; así pues, en el caso de oleaje regular, para cada

escalón (H_{reg}, T_{reg}) se lanzan series de 25 o 50 olas hasta llegar a 500 olas que es cuando se considera que se ha producido la estabilización del talud para esa altura de ola. En el caso de oleaje irregular (Jonswap, $\gamma=1$) se generan trenes de 1000 olas consecutivas para cada escalón de altura de ola, teniendo en cuenta que el número de Iribarren se define a partir de la altura de ola de cálculo ($H_c = H_{reg} = 1.4 \cdot H_s$) y el periodo medio (T_{01}), según la ecuación 2. Entre serie y serie de oleaje se espera el tiempo suficiente para que el agua del canal esté en reposo, así se evita que existan ondas largas o transversales que puedan afectar al oleaje generado.

$$Ir^* = \frac{tg \alpha}{\sqrt{1.4 \frac{H_s}{L_{01}}}} \quad (2)$$

Los cubos y cubípodos que forman el manto principal son de distintos colores para poder determinar con facilidad la avería producida por la acción del oleaje, teniendo en cuenta que sólo se considera como ancho de estudio de la avería los 75 cm centrales del talud, de esta manera se evita que las singularidades que constituyen las paredes del canal afecten a los resultados obtenidos del daño. Para poder determinar la avería que produce cada escalón de altura de ola que ataca la estructura, se toma una fotografía perpendicular al talud desde una posición fija al finalizar cada una de las series. En la figura 4 se observa una fotografía del modelo de cubípodos construido en el LPC-UPV.



Figura 4. Manto principal del modelo de dique en talud con cubípodos de hormigón ($D_n=3.85cm$).

Gómez-Martín y Medina (2006) ponen de manifiesto que la determinación de la avería del manto principal de los diques en talud con el método clásico de conteo de los elementos extraídos y que pasan a formar una tercera capa del manto, suponen que la porosidad del mismo se mantiene constante durante la evolución de la avería, o lo que es lo mismo que la

avería se produce fundamentalmente por extracción de piezas y por tanto el número de elementos erosionados es asimilable al área erosionada (S) del talud, la cual permite obtener un valor del daño adimensional (D) según la ecuación 3.

$$D = S / D_n^2 \quad (3)$$

Al producirse la compactación heterogénea del manto, la porosidad del mismo no se mantiene constante, por lo que dicha metodología no se deben aplicar para determinar el daño adimensional que sufre el manto debido a la acción del oleaje. Es por tanto necesario medir el daño adimensional equivalente (D_e) teniendo en cuenta la diferencia de porosidad en las distintas zonas del manto con respecto a la porosidad inicial del mismo. Por ello, Gómez-Martín y Medina (2006) proponen una nueva metodología para determinar la avería producida por la acción del oleaje sobre el talud, esta nueva metodología se denomina “Medida con Malla Virtual” y consiste en considerar una malla virtual sobre el manto dividida en bandas horizontales cuyo ancho es n veces el lado del cubo equivalente (D_n), de forma que el daño adimensional producido en cada una de las bandas (D_i) se obtiene teniendo en cuenta la porosidad final de la banda después de la acción del oleaje y la porosidad inicial o de proyecto, así como el ancho de la banda. Finalmente, el daño adimensional equivalente (D_e) se obtiene como la integral de los daños de cada una de las bandas. La principal ventaja de este método es que considera el cambio de porosidad que sufre el manto, bien sea debido a la compactación heterogénea o a la extracción de piezas.

Un aspecto importante a la hora de hablar de avería en un dique es determinar cuando se considera que un dique está averiado, es decir, qué grado de avería se tiene que producir en la estructura para considerar que ésta se encuentra averiada. En este estudio se han considerado los niveles de avería definidos por Losada et al. (1986) y Vidal et al. (1991): Inicio de Avería (IA), Inicio de Avería de Iribarren (IAI), Inicio de Destrucción (ID) y Destrucción (D).

RESULTADOS EXPERIMENTALES DE ESTABILIDAD HIDRÁULICA

En todos los ensayos realizados se ha medido la avería de forma cuantitativa con el método clásico de avería (conteo visual de elementos extraídos que forman una tercera capa) y con el método de la Malla Virtual descritos anteriormente. Los resultados de daño adimensional obtenidos para cubos y cubípodos con ambos métodos ponen de manifiesto que el método

clásico de conteo visual proporciona valores del daño adimensional menores que el método de la Malla Virtual. Ello se debe fundamentalmente a que los métodos clásicos no tienen en cuenta la compactación heterogénea del manto y por tanto infravaloran el daño real que tiene la estructura. De hecho es posible que el dique se encuentre en el nivel de Inicio de Avería debido a la compactación heterogénea pero que no se haya producido la extracción de ninguna pieza y por tanto el método clásico proporcionaría valores de daño nulos.

Asimismo, es importante señalar que las diferencias entre ambos métodos se ven reducidas en el caso del modelo de cubípodos, ya que la compactación heterogénea es también menor debido a la acción separadora que ejercen las protuberancias diseñadas en el Cubípodo. Por tanto, la diferencia entre ambos métodos de medida del daño es tanto mayor cuanto más regulares sean los elementos del manto, como es el caso de los cubos o bloques paralelepípedicos.

		Método medida Daño	
		Clásico (D)	Malla Virtual (D_e)
Daño Adimensional	CUBOS	0.1	1.3
		0.8	2.5
		7.2	10.6
	CUBÍPODOS	0.2	1.4
		1.5	2.4
		9.5	10.3

Tabla 3. Medidas del daño adimensional con el método clásico y con la Malla Virtual.

Por otro lado, se ha determinado la avería de forma cualitativa a la vista de las fotografías realizadas después de cada escalón de altura de ola realizado, obteniéndose en que nivel de avería se encuentra la sección después del ataque del oleaje. Así pues, se ha obtenido la altura de ola incidente correspondiente a los 3 niveles de avería, IA, IAI e ID, definidos. El valor medio del daño equivalente adimensional (D_e) correspondiente a cada nivel de avería ha resultado ser: $D_e=1$ para IA, $D_e=3.2$ para IAI y $D_e=8.6$ para ID. La altura de ola incidente que produce estos 3 niveles de daño es diferente en el caso de cubos y cubípodos, siendo mucho mayores la alturas de olas obtenidas en el caso de los cubípodos, lo cual indica la mayor estabilidad hidráulica del Cubípodo en comparación con los cubos.

Funciones de fallo de cubos y cubípodos.

Tras analizar la avería producida en todos los escalones de altura de ola para cada uno de los ensayos con oleaje regular e irregular, se han realizado las curvas de avería, de forma que se representa el daño adimensional linealizado ($D^*=D^{0.2}$) en función de la altura de ola

adimensionalizada con la altura de ola de iniciación de averías ($H_{d=0}$). La altura de ola de iniciación de avería con la que se han adimensionalizado los datos de cubos y cubípodos es la obtenida mediante la fórmula de Hudson, correspondiente a una pieza equivalente cuyo coeficiente de estabilidad sería $K_D=4$ y con la densidad y peso de los cubos y cubípodos, según el caso. En las figura 5 y 6 se han representado, una línea discontinua obtenida por Medina et al. (1994) a partir de los datos del SPM (1984) para las escolleras ($K_D=4$), una línea de color rosa que reproduce los valores obtenidos en los experimentos realizados en este estudio con el manto de cubos ($K_D=6$) y una línea de color azul que reproduce los valores obtenidos en los experimentos realizados en este estudio con el manto de cubípodos ($K_D=35$). Además se han representado 3 líneas horizontales que representan cada uno de los niveles de avería: IA, IAI e ID.

Así pues, la figura 5 muestra la función de fallo de cubos y cubípodos de los ensayos regulares realizados. Puede observarse la gran estabilidad del Cubípodos frente a los cubos ya que valores de altura de ola adimensional que en los cubos producen grandes averías, cercanas al inicio de destrucción, en los cubípodos no alcanzan la iniciación de averías. De la misma manera, un mismo nivel de avería, los cubos lo alcanzan con alturas de ola mucho menores que los cubípodos.

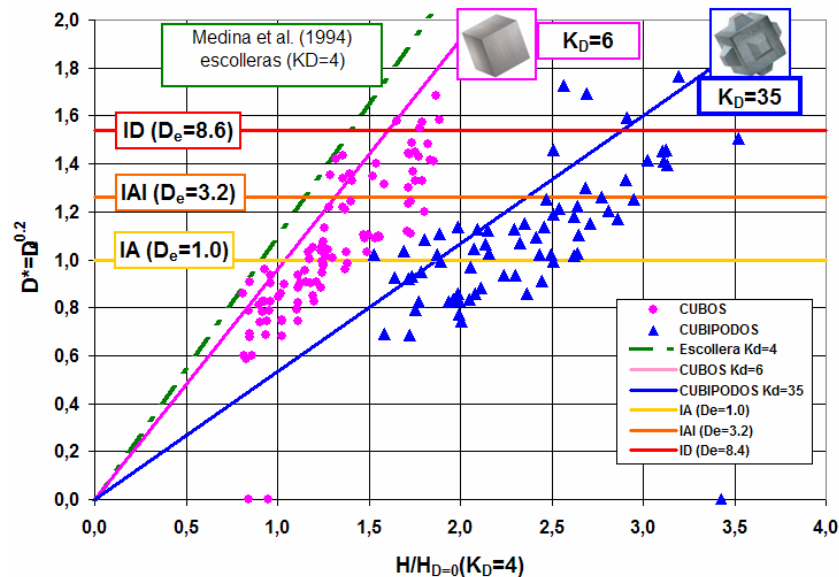


Figura 5. Daño adimensional linealizado ($D^*=D^{0.2}$) en función de la altura de ola adimensional ($H/H_{D=0}$) de cubípodos y cubos en ensayos con oleaje regular. Grados de avería considerados: IA, inicio de avería; IAI, inicio de avería de Iribarren; ID, inicio de destrucción.

En la figura 6 se muestran las funciones de fallo de cubos y cubípodos para el caso del oleaje irregular observándose, al igual que en el caso de oleaje regular, que alturas de ola

adimensionales que en la sección de cubos provocan inicio de destrucción en la de cubípodos ni siquiera producen inicio de avería. Además, se observa que la mayoría de los puntos obtenidos de la experimentación con cubípodos están por debajo de la línea que tendría una pieza con factor de estabilidad $K_D=35$.

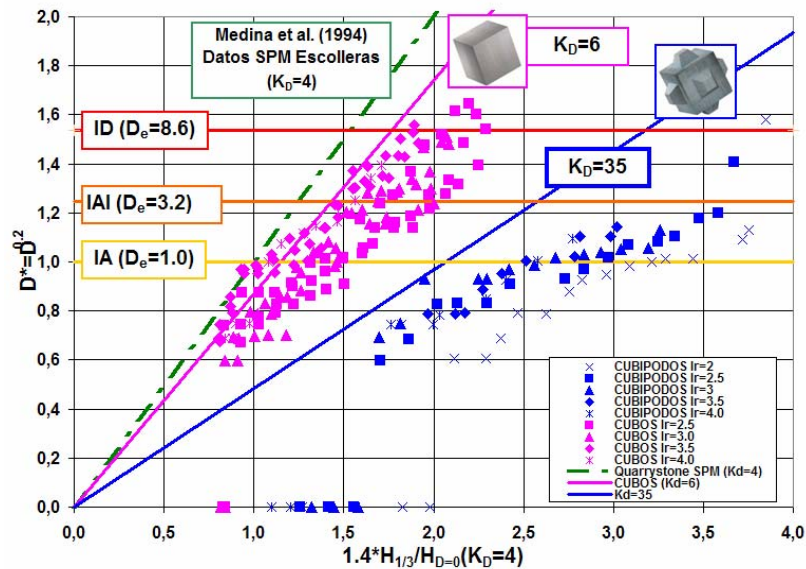


Figura 6. Daño adimensional linealizado ($D^*=D^{0.2}$) en función de la altura de ola adimensional ($H_m/H_{D=0}$) de cubípodos y cubos en ensayos con oleaje irregular. Grados de avería considerados: IA, inicio de avería; IAI, inicio de avería de Iribarren; ID, inicio de destrucción.

Los resultados de los ensayos realizados muestran que la estabilidad hidráulica de los cubípodos es mucho mayor que la de los cubos. Para alturas de ola donde los cubos ya han alcanzado el nivel de inicio de destrucción, los cubípodos se encuentran aún en inicio de avería. El coeficiente de estabilidad K_D , de la fórmula de Hudson (SPM, 1984) para la sección central del dique, toma valores de $K_D=6$ para el caso de cubos de hormigón; a partir de los ensayos realizados se han obtenido valores superiores a $K_D=35$ para el caso de los cubípodos.

La estabilidad hidráulica mostrada por el Cubípodo es muy grande; sin embargo, al tratarse de un primer ensayo físico de una nueva pieza, no es prudente considerar segura la estabilidad hidráulica $K_D>35$ mostrada en los ensayos hasta que se confirmen los resultados con otros experimentos de contraste.

RESULTADOS EXPERIMENTALES DE REMONTE

En los ensayos con oleaje regular realizados se ha medido el remonte visual (R_u), tanto para el caso de los cubos como de los cubípodos. Así pues, en la figura 7 se representa el remonte adimensionalizado con la altura de ola media incidente (R_u/H_i) frente a dicha altura de ola adimensionalizada con el diámetro medio equivalente (H_i/D_n), para los ensayos correspondientes a los números de Iribarren $I_r=2.5$ $I_r=3$ e $I_r=4$. De estos resultados se deduce que el remonte observado en la sección de cubípodos es aproximadamente un 85% el remonte de la de cubos; es decir, colocando cubípodos en el manto principal, se ha reducido el remonte en un 15%. Lo cual implicará una disminución del rebase de la estructura construida con cubípodos.

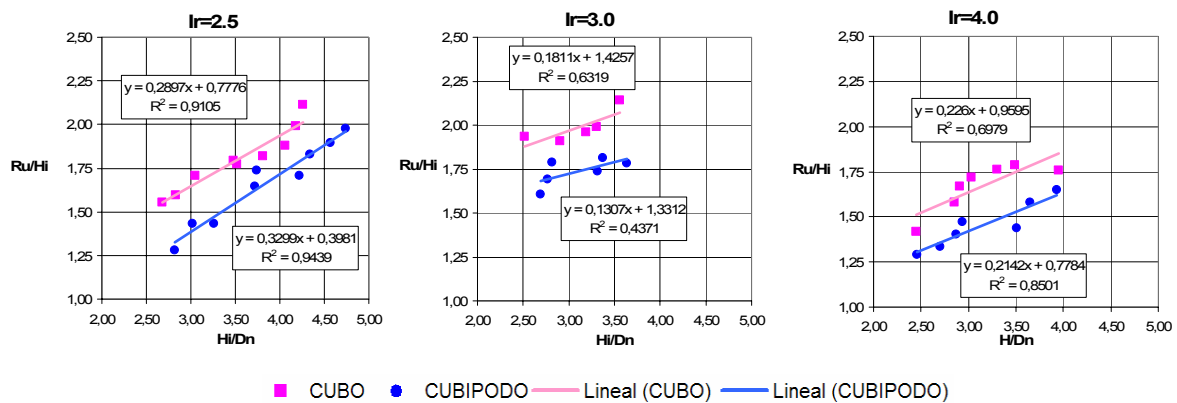


Figura 7. Remonte visual adimensional de los ensayos con oleaje regular e $I_r=2.5$, 3.0 y 4.0 .

CONCLUSIONES

La estabilidad hidráulica del manto principal de los diques en talud depende de numerosos factores, pero uno de los más importantes es el diseño y forma de los elementos utilizados en la construcción del manto principal. En este artículo, se ha estudiado la estabilidad hidráulica del Cubípodos, una nueva pieza para el manto principal de los diques en talud y se ha comparado con la estabilidad de los bloques cúbicos tradicionales.

El Cubípodos se ha diseñado con el objetivo de aprovechar las ventajas de los cubos (robustez, facilidad de colocación en obra, fabricación, etc.) pero evitando sus principales inconvenientes, entre los que destacan la excesiva compactación heterogénea que sufre el manto de cubos durante su vida útil y la baja estabilidad hidráulica ($K_D=6$).

El coeficiente de estabilidad obtenido de los ensayos 2D de cubos y cubípodos, pone de manifiesto la elevada estabilidad hidráulica del Cubípodo en comparación con los cubos y en general con la mayoría de las piezas existentes para ser utilizadas como escollera artificial. En los ensayos realizados, se ha observado que la estabilidad hidráulica del Cubípodo es tan elevada que los estados de mar que provocan el inicio de destrucción (ID) en la sección de bloques cúbicos no llegan a producir ni la iniciación de averías (IA) en la sección de cubípodos. Se ha observado en laboratorio un coeficiente de estabilidad $K_D > 35$ para el Cubípodo, en condiciones de aguas profundas y para el tronco del dique. Este valor es muy elevado en comparación con los valores publicados para otros tipos de escollera artificial. Por consiguiente, hasta confirmar los resultados con ensayos de contraste en otros laboratorios no es prudente considerar en aplicaciones reales el coeficiente de estabilidad observado en laboratorio $K_D > 35$.

Por otro lado, se ha comparado el remonte medido en los ensayos de cubos y cubípodos para el caso de oleaje regular, obteniéndose que el remonte en los cubípodos es aproximadamente un 85% del remonte de los cubos; esto es, utilizando cubípodos en el manto principal del dique en talud puede reducirse el remonte en un 15%, respecto a otro dique formado por cubos.

El Cubípodo se diseñó como elemento que se comportase de forma similar al cubo pero que superase su principal inconveniente: el adoquinamiento y la compactación heterogénea. Las protuberancias se diseñaron para evitar el acoplamiento cara a cara de los cubos y aumentar la fricción con la capa inferior o manto secundario. A la vista de los resultados experimentales, se ha observado que no sólo se ha disminuido sensiblemente el modo de fallo de compactación heterogénea con respecto a los cubos sino que, además, la estabilidad hidráulica de la pieza es del orden de cinco veces superior a la del cubo. Este nuevo elemento no sólo resiste por gravedad sino que existe un cierto grado de fricción lateral entre las piezas dentro del manto, que produce un aumento de la estabilidad y que debe ser tenido en cuenta en los experimentos futuros. Así pues, dada su aparente robustez, facilidad de colocación y elevada estabilidad hidráulica, el Cubípodo puede ser una pieza que sustituya al bloque cúbico tradicional en situaciones extremas donde la intensidad del oleaje y los medios constructivos existentes en la actualidad no permitan la utilización del bloque cúbico. En cualquier caso, es necesario señalar que son necesarios nuevos ensayos de contraste 2D, ensayos 3D de morros y ensayos con prototipos, para el

completo desarrollo de esta nueva pieza de escollera artificial para diques en talud, desarrollos que está llevando a cabo la empresa SATO en colaboración con el LPC-UPV.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Puertos del Estado la financiación del Convenio de Diques que ha permitido obtener los datos relativos a cubos. María Esther Gómez-Martín agradece la beca FPU (AP2002-3545) de la Secretaría de Estado de Educación y Universidades. Los autores agradecen también la colaboración de Joaquín Garrido, José Andreu, Noelia Taberner y Liesbet Mijlemans en la realización de los ensayos y de Miguel Figueres y Pablo Aizpún en el desarrollo de software de análisis.

REFERENCIAS

- Baquerizo, A., Losada, M.A. y Smith, J.M., 1998. Wave reflection from beaches: a predictive model. *Journal of Coastal Research*. Vol. 14(1), pp.291-298.
- D'Angremond, K., Berendsen, E., Bhageloe, G.S., Van Gent, M.R.A. and Van der Meer, J.W. 1999. Breakwaters with a single armour layer. *Proceedings of 5th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries*, 1441-1449.
- Figueres M. and Medina J.R. (2004). Estimation of Incident and Reflected Waves using a Fully Non-Linear Wave Model. *Proc. ICCE2004, ASCE*, (Vol. 1): 594-603.
- Gómez-Martín, M.E. and Medina, J.R. 2006. Damage progression on cube armored breakwaters. *Proceedings of 30th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, (Vol. 5): 5229-5240.
- Losada, M.A., Desiré, J.M. and Alejo, L.M. 1986. Stability of blocks as breakwater armor units. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 112(11), 2392-2401.
- Mansard, E.P.D. and Funke, E.R. 1980. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. *Proceedings of 17th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 154-172.
- Medina, J.R., Hudspeth, R.T., and Fassardi, C. 1994. Breakwater armor damage due to wave groups. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 120(2), 179-198.
- Medina, J.R.(2001). Estimation of Incident and Reflected Waves Using Simulated Annealing. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 127(4):213-221
- SPM (1984). Shore Protection Manual, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg, MS.
- VandenBosch, A., Angremond, K.D., Verhagen, H.J. and Olthof, J. 2002. Influence of the density of placement on the stability of armor layers on breakwaters. *Proceedings of 28th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 1537-1549.
- Vidal, C., Losada, M.A. and Medina, R. 1991. Stability of mound breakwater's head and trunk. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 117(6):570-587.