

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL REBASE DE UN DIQUE EN TALUD DE CUBÍPODOS

E. Smolka¹, G. Zarranz², J. R. Medina²

1. Centro Andaluz de Medio Ambiente, Universidad de Granada, Av. Del Mediterráneo s/n 18006 Granada, España. e-mail: smolkac@correo.ugr.es.

2. Laboratorio de Puertos y Costas, ETSICCP, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera, 14, 46022 Valencia. e-mail: quizarbu@upvnet.upv.es, jrmolina@upv.es.

INTRODUCCIÓN

Los grandes diques en talud de las costas españolas se han construido habitualmente con mantos principales formados por dos capas de bloques cúbicos colocados aleatoriamente. Los bloques cúbicos convencionales son robustos, fáciles de construir y manipular y tienen un comportamiento flexible frente al oleaje. Sin embargo, como señalan Gómez-Martín y Medina (2006, 2008), tienen poca fricción con la capa inferior, poca estabilidad hidráulica y presentan el problema del adoquinamiento producido por la compactación heterogénea (daño sin extracción) que agrava los problemas anteriores y aumenta el rebase. Para superar los problemas del bloque cúbico convencional y mantener sus grandes ventajas logísticas, la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y la empresa constructora SATO han desarrollado una nueva pieza para mantos: el Cubípodo (ver Corredor y otros, 2008). Este nuevo elemento, con base cúbica y protuberancias en sus caras, mantiene las ventajas del bloque cúbico tradicional y corrige sus desventajas, impidiendo el adoquinamiento, aumentando la fricción con la capa inferior, mejorando significativamente su estabilidad hidráulica y reduciendo el rebase.

Para estudiar el comportamiento del Cubípodo y cubo frente al rebase, se ha desarrollado en el canal de ensayos de la UPV el Proyecto CUBIPODrebase. Los resultados han permitido estimar el rebase en una sección estándar sin limitación de fondo en un dique en talud con un manto formado por Cubípodos colocados en una y dos capas y compararlo con la misma sección de bloques cúbicos convencionales.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Los ensayos realizados para evaluar y analizar el comportamiento del Cubípodo frente al rebase se han desarrollado en el canal de oleaje y viento 2D del Laboratorio de Puertos y Costas de la Universidad Politécnica de Valencia (LPC-UPV). Se trata de una canal de 30m

de longitud y sección cuadrada de 1.2x1.2m, el cual posee un fondo variable que permite la recirculación del agua.

El modelo sobre el que se han realizado los ensayos consiste en una sección convencional de dique en talud (3/2) con espaldón rebasable sin escala específica. En la Figura 1 puede verse una sección esquemática del mismo. La metodología seguida en los mismos es similar a la utilizada por Medina et al. (2002) dentro del proyecto CLASH.

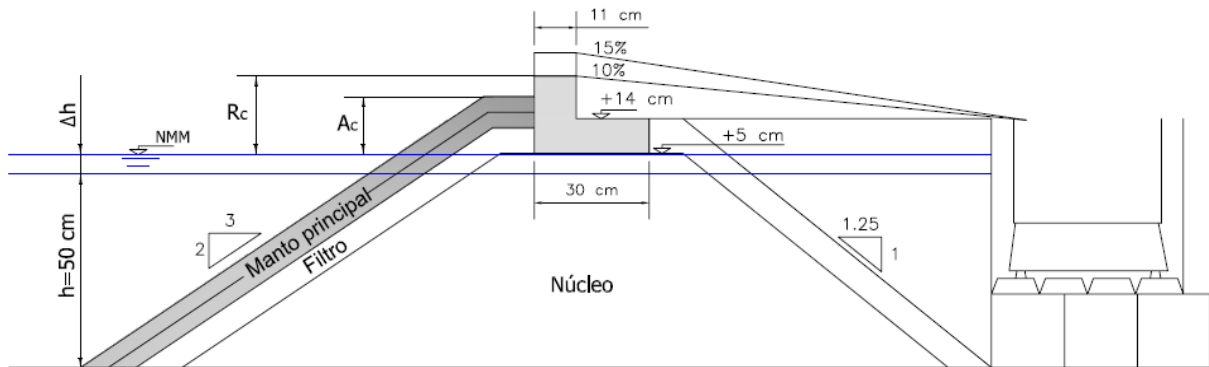


Figura 1. Sección transversal empleada en los ensayos de rebase. R_c francobordo del espaldón y A_c francobordo del manto principal.

Con el objetivo de poder comparar los resultados, el manto principal se construyó con una o dos capas de Cubípodos de resina de una densidad similar a la del hormigón ($D_{n50}=3.82$ cm, $\gamma_r = 2.30$ gr/cm³, $W=128$ gr) o con dos capas de cubos convencionales de mortero de cemento. Inicialmente se emplearon cubos de $D_{n50}=4.0$ cm ($\gamma_r = 2.20$ gr/cm³, $W=143$ gr) pero resultaron inestables y tuvieron que ser sustituidos por cubos del mismo material de mayor tamaño y $D_{n50}=6.0$ cm ($W=475$ gr), en consonancia con la menor estabilidad hidráulica del bloque cúbico ya que el coeficiente de estabilidad a iniciación de averías es cinco veces superior en el caso del Cubípodo (ver Gómez-Martín & Medina, 2008). Todos ellos se colocaron sobre el mismo material de filtro ($D_{n50}=1.70$ cm) y núcleo ($D_{n50}=0.70$ cm).

Para poder determinar las características del oleaje incidente y reflejado mediante el método LASA-V (Figures & Medina, 2004) se colocaron, en la zona de aguas arriba del dique, 8 sensores de nivel a lo largo del eje longitudinal del canal organizados en dos grupos de 4 sensores: el primero situado cerca de la pala para medir el oleaje en la zona de generación y el segundo en las proximidades del modelo. La distribución de los sensores en la sección longitudinal del canal es la que se muestra en la Figura 2.

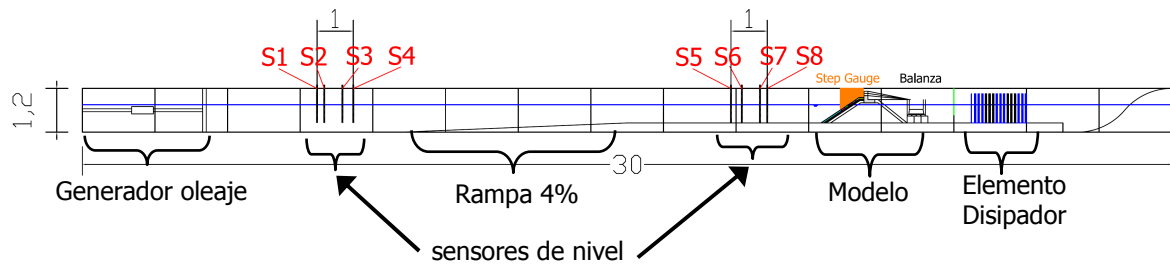


Figura 2. Sección longitudinal del canal de ensayos de oleaje y viento de la UPV: dispositivo experimental.

La distancia entre los sensores de un mismo grupo se fijó según los criterios definidos por Mansard y Funke (1980), de manera que se puedan abarcar todos los periodos de ola a ensayar sin necesidad de variar la posición de los sensores en cada ensayo.

Para la medición del rebase se ubicó en la parte posterior del dique un dispositivo de captación y medición que consta de una canaleta de recepción y conducción del agua rebasada, una cubeta receptora y una balanza de pesaje de 40 kg de capacidad y una precisión de 0.01Kg. A partir del registro de la báscula se calcula el rebase medio que se ha producido durante el ensayo haciendo uso de la siguiente expresión:

$$q(m^3 / s / m) = \frac{Peso(Kg) \cdot 10^{-3}}{t(s) \cdot b(m)}$$

siendo b el ancho de la canaleta (0.20 m) y t la duración del ensayo en segundos.

Se realizaron ensayos con oleaje regular e irregular (espectro JONSWAP $\gamma=3.0$) de intensidad creciente, desde la condición de no rebase hasta el límite máximo del sistema de medida de rebase o hasta el inicio de avería (IDa), con dos niveles de agua a pie de dique ($\Delta h = 0$ y 5 cm), dos cotas de coronación ($\Delta h + R_c = 25$ cm y 31 cm) y números de Iribarren comprendidos entre 2.7 y 7.0 ($2.7 < I_r < 7.0$).

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

A partir de los resultados de los ensayos de rebase se obtiene una herramienta que permite estimar el rebase en un dique en talud con manto principal de cubípodos colocados en una y dos capas y compararlo con el obtenido en uno formado por cubos. Para ello se han contemplado dos opciones:

- Determinar el factor de rugosidad a introducir en el programa NN_Overtopping 2.0 (red neuronal del proyecto CLASH)

- Obtener una fórmula o expresión que modele el comportamiento del rebase del manto bicapa de cubos y el monocapa y bicapa de cubípodos, teniendo en cuenta las variables más influyentes.

NN_Ovetopping 2.0: Cálculo del factor de rugosidad del cubípodo

El programa NN_Overtopping 2.0 es una red neuronal fruto del proyecto europeo CLASH, a partir de la cual se obtiene una estimación del rebase medio ($q(m^3/s/m)$) proporcionando además una medida de la fiabilidad del resultado obtenido.

De entre todas las variables de entrada necesarias en el programa falta por determinar el factor de rugosidad del cubípodo colocado en una y dos capas. Este factor da cuenta del efecto que sobre el rebase tiene la rugosidad del manto principal (dada por el tipo de elemento) y la porosidad (dada por los materiales y características del filtro y del núcleo). El proceso seguido para su obtención consiste en introducir diferentes valores del factor de rugosidad en el programa NN_Overtopping 2.0 para cada caso (cubípodos monocapa, bicapa y cubos) y comparar las estimaciones de rebase obtenidas con las observaciones de los ensayos. Los tanteos se inician tomando como valor de referencia el valor del factor de rugosidad de los cubos $\gamma_f = 0.5$, (NN_Ovetopping 2.0, Junio 2005). Para poder comparar los resultados, la obtención de los factores de rugosidad se realiza a partir de los datos de los ensayos con condiciones semejantes, tomando como parámetro geométrico de referencia A_c/R_c (relación entre el francobordo de la coronación de los elementos del manto principal, A_c , y el francobordo del espaldón, R_c). Por tanto, se comparan los resultados de cubípodos monocapa con bicapa y cubípodos bicapa con cubos.

El valor óptimo del factor de rugosidad para cada elemento se ha elegido en función del error cuadrático medio, la desviación estándar de los errores y el porcentaje de error. Bajo este criterio se obtiene de la comparación entre cubípodos monocapa y bicapa los valores óptimos de $\gamma_f = 0.48$ y $\gamma_f = 0.44$, respectivamente, mientras que de la comparación entre cubípodos bicapa y cubos los valores de $\gamma_f = 0.44$ y $\gamma_f = 0.50$, respectivamente.

Como se puede observar, el valor del factor de rugosidad obtenido para los cubos coincide con el propuesto por CLASH, por tanto los ensayos realizados están dentro del rango de aplicación de la red. Además, se obtiene el mismo valor del factor de rugosidad para los

cubípodos bicapa en las dos comparaciones realizadas, por lo que este es el valor óptimo a introducir en la red, sea cual sea el rango y en consecuencia valida el obtenido para el cubípedo monocapa de 0.48. (Tabla 1)

Elemento	Factor de rugosidad
Cubos	0.50
Cubípodos Monocapa	0.48
Cubípodos Bicapa	0.44

Tabla 1. Valor del factor de rugosidad a introducir en el programa NN_Overtopping 2.0

Otra de las conclusiones que se obtienen al analizar los resultados obtenidos es que el rebase será menor en un dique con manto principal de cubípodos bicapa que en uno de cubípodos monocapa, siendo el correspondiente a los cubos mayor a ambos.

Fórmula de rebase:

Para la obtención de una fórmula explícita de rebase se ha propuesto un modelo exponencial lineal similar al propuesto por Medina et al. (2002), de la forma:

$$Q = \frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = a \cdot \exp \left(b \cdot \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f} + c \cdot \frac{A_c}{R_c} + d \cdot I_{rp} \right)$$

donde:

$$I_{rp} = (2/3)T_p / \sqrt{\frac{2\pi H_{m0}}{g}}, \text{ con } T_p \text{ el periodo de pico y } H_{m0} \text{ la altura de ola significativa.}$$

Este modelo unifica el comportamiento de los elementos estudiados (Cubípodos colocados en una y dos capas y cubos) empleando el factor de rugosidad (γ_f) con un significado similar al de CLASH, como parámetro diferenciador. Tanto el factor de rugosidad como los parámetros a, b, c y d se estimaron minimizando el error cuadrático medio entre las observaciones y las estimaciones. Asimismo se determinó el valor del francobordo de la cota de coronación adimensional (R_c/H_{m0}) a partir del cual el rebase adimensional por unidad de ancho es significativo (mayor a 10^{-7}). Las expresiones resultantes fueron:

$$1) Q = \frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} < 10^{-7} \text{ si } \frac{R_c}{H_{m0}} > 2.6$$

$$2) Q = \frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0.2 \cdot \exp \left(0.53 \cdot I_{rp} - 3.27 \cdot \frac{A_c}{R_c} - 2.16 \cdot \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f} \right)$$

La fórmula es aplicable a los bloques cúbicos en el rango de $0.70 < A_c/R_c < 1.00$, a los Cubípodos en una capa en el rango de $0.40 < A_c/R_c < 0.65$ y a los Cubípodos en dos capas en el rango de $0.58 < A_c/R_c < 0.80$. Los factores de rugosidad obtenidos para Cubípodos en una y dos capas fueron de $\gamma_f = 0.46$ y $\gamma_f = 0.44$ respectivamente, mientras que para el cubo se obtuvo un valor de $\gamma_f = 0.50$, igual al obtenido en el proyecto CLASH. De estos valores se deduce que los Cubípodos colocados tanto en una como en dos capas reducen el rebase significativamente respecto del manto bicapa de bloques cúbicos convencionales. La Figura 3 muestra el ajuste de los datos a la formulación propuesta cuando el rebase adimensional ($Q = q/(gH_{m0}^3)^{0.5}$) resulta significativo.

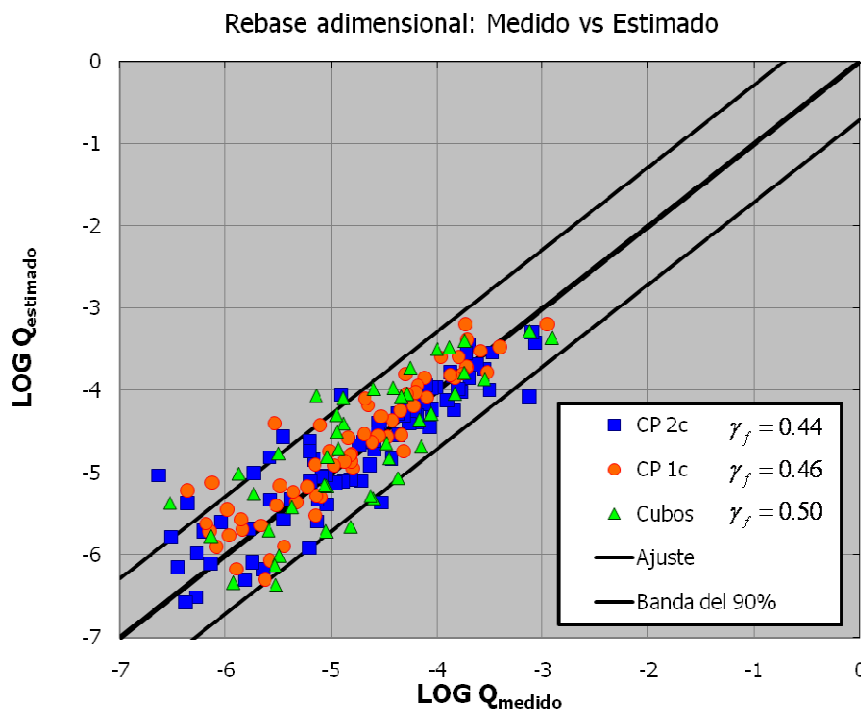


Figura 3. Ajuste del Q estimado con la fórmula respecto al observado para Cubípodos colocados en una y dos capas (CP 1c y CP 2c respectivamente) y cubos.

Cabe destacar que la fórmula obtenida es única para los tres elementos estudiados, en la que sólo se modifica el valor del factor de rugosidad, con cierta robustez, por la técnica empleada en su obtención y los resultados obtenidos, y sobre todo sencilla, ya que son tres las variables implicadas y su obtención no resulta compleja.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este artículo se realiza el estudio del rebase en un dique en talud cuyo manto principal está construido con una ó dos capas de Cubípodos y dos capas de cubos convencionales, presentándose una fórmula que permite su cálculo para cada configuración dentro del rango establecido en función del Número de Iribarren, el francobordo del espaldón, el francobordo de los elementos, la altura de ola significativa incidente y el factor de rugosidad. Esta fórmula se ha obtenido a partir del análisis de los datos experimentales obtenidos en los ensayos realizados en el LPC-UPV. Por otro lado, se han obtenido los valores del factor de rugosidad que se deben introducir en el programa NN_Overtopping 2.0, de esta forma se dispone de una herramienta adicional para estimar el rebase del Cubípodo colocado en una y dos capas. De los resultados obtenidos se deduce que los Cubípodos colocados tanto en una como en dos capas reducen el rebase significativamente respecto del manto bicapa de bloques cúbicos convencionales.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

- CLASH. (2008). CLASH. Retrieved 2008, from Website of the European Project CLASH (Crest Level Assessment of Coastal Structures by Full Scale Monitoring, Neural Network Prediction and Hazard Analysis on Permissible Wave Overtopping): <http://www.clash-eu.org/>
- Coeveld, E., van Gent, M., & Pozueta, B. (2005). Neural Network Manual NN_OVERTOPPING 2. Report of Clash: Workpackage 8, Delft Hydraulics.
- Corredor, A., Torres, R., Miñana, J.V., Fernández, E., Menéndez, 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
- Figueres, M & Medina, J. (2004). Estimation of incident and reflected waves using a fully nonlinear wave model. Proceedings of the 29th ICCE, Lisbon, Portugal.
- Gómez-Martín, M.E. and Medina J.R. (2006). Overtopping analysis using neural networks. *Proceedings ICCE 2002, ASCE*, 2165-2177.
- Gómez-Martín, M.E. and Medina, J.R. (2008). Erosion of cubes and Cubipods armor layers under wave attack. *Proc. ICCE 2008, ASCE*, 3461-3473.
- Medina, J.R., J.A. González-Escrivá, J.M. Garrido, and J. de Rouk. (2002). Overtopping analysis using neural networks. *Proceedings ICCE 2002, ASCE*, 2165-2177.