

INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE DISEÑO EN EL COSTE DE CONSTRUCCION DEL MANTO PRINCIPAL DE CUBOS Y CUBIPODOS

J. Molines¹, Maria P. Herrera², A. Corredor³

^{1,2} Laboratorio de Puertos y Costas, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia,

¹jormollo@upv.es, ²mahergam@upv.es,

³SATO-OHL, Paseo de la Castellana, 259D, Torre Espacio, 28046, Madrid, acorred@ohl.es

RESUMEN

El coste de construcción del manto principal de un dique en talud representa una partida relevante del coste total de una obra de un dique en talud. En el presente artículo se proponen tres formulaciones para calcular el coste de construcción del manto principal con cubos y Cubípodos (monocapa y bicapa). Las nuevas fórmulas presentan un bajo error en la predicción del coste de construcción y pueden ser especialmente útiles para comparar soluciones alternativas durante la fase de diseño. Aplicando las fórmulas a un dique tipo, se ha observado que en algunas ocasiones puede ser más económico colocar pesos mayores que los estrictamente necesarios por cálculo para resistir un clima marítimo determinado. Este hecho se ha observado para obras en las que el coste de suministro de hormigón en € es inferior a aproximadamente 1/3 del coste de construcción del manto en € (obras pequeñas). En estos casos, los costes logísticos adquieren mayor importancia que el consumo de hormigón y por ello es ventajoso incrementar el peso de los elementos para así disminuir el número de piezas a fabricar, acopiar y colocar.

1. INTRODUCCIÓN

Los diques en talud son las obras de abrigo tradicionales de la costa española para crear puertos y otras zonas abrigadas del ataque del oleaje. Los diques en talud están formados por diversas capas de material granular, desde un núcleo poco permeable hasta grandes rocas o piezas de hormigón en el manto principal. Habitualmente, los diques en talud disponen de una berma de pie para asegurar la estabilidad del manto y de un espaldón en coronación (Figura 1).

Manuales como el CIRIA/CUR/CETMEF (2007), por ejemplo, proporcionan al proyectista herramientas para dimensionar el manto principal, evaluar la tasa de rebase, calcular las fuerzas sobre el espaldón, etc. CIRIA/CUR/CETMEF (2007) considera que un diseño integrado de una estructura marítima debe considerar factores técnicos, económicos, medioambientales y sociales. Centrándonos en los factores económicos, éstos se pueden agrupar en cuatro categorías: (1) suministro de materiales; (2) construcción; (3) mantenimiento y reparación y (4) desmantelamiento.

Rietveld y Burcharth (1987) analizaron la construcción, mantenimiento y reparación como factores que influyen en el diseño de un dique en talud. En su estudio detallaron los costes de construcción del dique de Zeebrugge (Bélgica) con cubos Antifer en el manto principal. Considerando los costes totales de núcleo, filtro, manto principal y coronación, el núcleo y el manto principal suponían casi el 60% y 18% de los costes por metro respectivamente.

Medina [3] definió una función matemática para estimar el coste inicial de construcción para una altura de ola significativa, analizando diques en el Mediterráneo y Atlántico.

$$C_0(H_{sd}) \approx C_0(H_{s100}) \left[1 + A \left(\frac{H_{sd} - H_{s100}}{H_{s100}} \right) \right] \quad (1)$$

donde $C_0(H_{sx})$ es el coste inicial de construcción para una altura de ola significativa H_{sx} ; H_{sd} es la altura de ola significativa de diseño; H_{s100} es la altura de ola significativa asociada al periodo de retorno de 100 años y $A > 1$ depende del clima marítimo (Mediterráneo o Atlántico).

Hauer y otros (1995) analizan el coste de construcción de diques convencionales en talud considerando diferentes tamaños de roca y dos distancias diferentes de transporte del material desde cantera (25km y 75 km). Ellos obtuvieron la altura de ola óptima de diseño que minimizaba el coste total considerando oleaje limitado por fondo y en aguas profundas. Schepers (1998) comparó el coste total de un dique con manto de cubos bicapa, Tetrápodos bicapa y Acrópodos monocapa: el coste de construcción era mayor para los cubos y Tetrápodos bicapa que para los Acrópodos monocapa.

Burcharth (2007) analizó el diseño de grandes diques en talud en aguas profundas identificando los niveles de seguridad asociados al mínimo coste total durante la vida útil y considerando coste de construcción, mantenimiento, reparación y parada operativa: en su estudio no se observaron incrementos de coste significativos al diseñar una estructura más segura. Burcharth [6] consideró una fórmula para calcular el coste total similar a la de Schepers [5]:

$$C = C_c + pwf (C_r + C_f) \quad (2)$$

donde C es el coste total; C_c es el coste de construcción; pwf es la función dependiente del ratio de interés para actualizar al valor presente del dinero; C_r es el coste directo de reparación y C_f es el coste asociado al fallo de la estructura incluyendo la parada operativa. La Ec. (2) está basada en la metodología para optimizar el diseño de diques dada por Van der Kreeke y Paape (1964), considerando el coste inicial de construcción y el coste anticipado de daño.

Corredor y otros (2008) y Medina y otros (2009) realizaron un estudio paramétrico del coste de construcción de mantos de cubos y Cubípodos considerando seis factores claves: (1) suministro de hormigón; (2) encofrados y equipos de manipulación; (3) producción; (4) preparación de la instalación para fabricación de bloques; (5) área de fabricación y almacenamiento y (6) transporte y colocación. Molines (2009) analizó los datos de Corredor y otros (2008) proponiendo dos fórmulas para estimar el coste unitario de construcción de mantos bicapa de cubos y mantos monocapa y bicapa de Cubípodos.

Medina y otros (2014) y (2015) analizan la influencia de la porosidad del manto en la estabilidad hidráulica de mantos de cubos. Ellos analizan la influencia de variaciones en el *packing density* $\phi = n[1-p]$ y la pendiente del talud en la estabilidad hidráulica y consumo de hormigón.

En este estudio se emplean los datos de Corredor y otros (2008) para obtener nuevas fórmulas para calcular el coste de construcción unitario de mantos de cubos y Cubípodos en función de parámetros de diseño habituales. Las nuevas fórmulas se aplican para conocer la influencia de variaciones en el peso del manto sobre el coste de construcción.

2. NUEVAS FÓRMULAS PARA ESTIMAR EL COSTE DE CONSTRUCCIÓN

2.1 Análisis del coste de construcción

En esta sección se resumen los trabajos de Corredor y otros (2008) y Medina y otros (2009) para comprender mejor el origen y rango de aplicación de las nuevas fórmulas. Corredor y otros (2008) realizaron un estudio de costes desde el punto de vista del constructor, con las restricciones habituales de tiempo y espacio, empleando la mínima área de almacenamiento posible y con alto rendimiento de producción y colocación.

La figura 1 ilustra la sección empleada por Corredor y otros (2008) en su estudio paramétrico, en el cual consideraron cuatro variables geométricas principales: (1) peso de los elementos del manto $W(t)$; (2) profundidad, $h(m)$; (3) longitud del dique, $L(m)$ y (4) ángulo del talud α . Además, tres tipos de mantos fueron analizados: cubos bicapa y Cubípodos monocapa y bicapa.

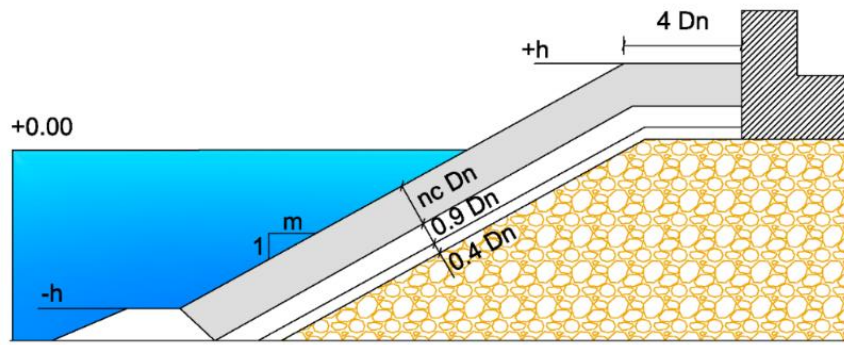


Figura 1. Sección tipo empleada en el estudio paramétrico de Corredor y otros (2008)

Corredor y otros (2008) eliminaron las combinaciones de $W(t)$ y $h(m)$ que no eran realistas, como por ejemplo grandes elementos de hormigón en aguas poco profundas (ver Tabla 1). Las posibles sinergias debidas a la construcción de filtros y núcleo no se consideraron. Así, las fórmulas que se presentan en este estudio son válidas para secciones tipo tronco recto con el mismo peso a lo largo de la longitud del dique.

L[m]=400, 1000 and 2500									
h[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 1. Combinaciones de $h(m)$ y $W(t)$ analizadas por Corredor y otros (2008)

Tres longitudes de dique fueron estudiadas, $L(m)=400, 1000$ y 2500 como representativas de dique corto, medio y largo. El peso de los elementos se varió entre 10 y 150 toneladas. El talud del dique se mantuvo constante con valor $cota=1.5$, y el calado se varió entre $h(m)=5$ y 20 .

El número de unidades que se deben fabricar y colocar en obra depende de la geometría del dique, el peso de los elementos y la porosidad del manto. Corredor y otros (2008) consideraron en su estudio *packing densities* de $\phi=1.20$ para cubos bicapa y $\phi=0.57$ y $\phi=1.14$ para Cubípodos monocapa y bicapa respectivamente.

La mayor complejidad del encofrado del Cubípodo se consideró incrementando los costes de producción de Cubípodos, que fueron manipulados con pinzas de presión dobles mientras que los cubos fueron manipulados con pinzas de presión simples. Los costes de colocación fueron estimados dependiendo del tipo de grúa que mejor se adecuaba al peso de la pieza y las distancias hasta el pie del dique, elegida de entre una lista de grúas convencionales. El área y medios de almacenamiento se diseñaron considerando una tasa de producción de dos unidades/día/encofrado, una porosidad de almacenamiento de cubos del 20% y una porosidad de almacenamiento de Cubípodos de 30% ó 50% dependiendo del peso de los Cubípodos. En todos los casos, el precio de suministro de hormigón se fijó en 60 €/m^3 . Este coste unitario es representativo de un coste habitual del hormigón en 2008. Corredor y otros (2008) apuntaron que el suministro de hormigón suponía más del 50% del coste de construcción del manto.

2.2 Fórmulas para el cálculo del coste de construcción

Empleando los datos de Corredor y otros (2008), el volumen total de hormigón empleado en el manto, $V(m^3)$ y el peso de los elementos del manto $W(t)$ fueron las variables explicativas que mejor ajustaron para explicar el coste de construcción del manto. La variable VW , que Molines [10] apuntó como la que mejor explicaba el coste de construcción, destaca también como explicativa en el presente análisis. Cuanto más pequeño es VW mayor es el coste de construcción.

Empleando la variable VW, las siguientes fórmulas se han obtenido para estimar el coste de construcción de mantos de cubos y Cubípodos:

$$C_B = (200 + CON) + 0.75 \left[10^5 \left(\frac{1}{\ln(VW)} \right)^2 - 10^4 \left(\frac{1}{\ln(VW)} \right) \right] \quad (3)$$

$$C_{c1} = (280 + CON) + 1.05 \left[10^5 \left(\frac{1}{\ln(VW)} \right)^2 - 10^4 \left(\frac{1}{\ln(VW)} \right) \right] \quad (4)$$

$$C_{c2} = (265 + CON) + 1.00 \left[10^5 \left(\frac{1}{\ln(VW)} \right)^2 - 10^4 \left(\frac{1}{\ln(VW)} \right) \right] \quad (5)$$

donde C_B (€/m³), C_{c1} (€/m³) y C_{c2} (€/m³) son el coste de construcción unitario de cubos bicapa y Cubípodos monocapa y bicapa respectivamente; CON (€/m³) es el precio unitario de suministro de hormigón; V (m³) es el volumen de hormigón empleado en el manto y W(t) es el peso de los elementos del manto. La Tabla 1 especifica los rangos de aplicación de las nuevas fórmulas. Las Eq. (3), (4) y (5) mejoran significativamente la predicción de costes de Molines (2009).

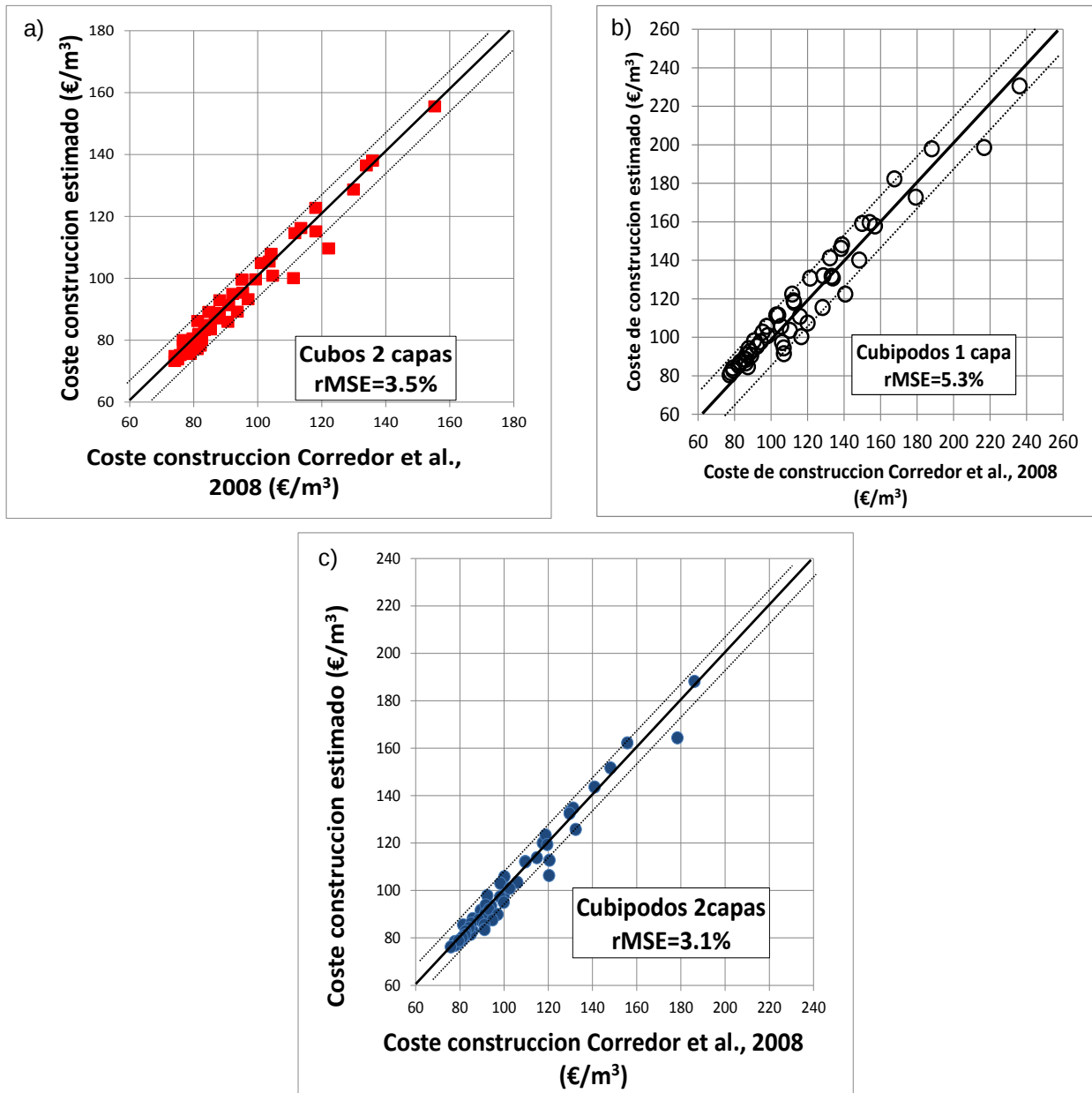


Figura 2. Ajuste de las nuevas formulaciones a los datos de Corredor y otros. (2008): a) Cubos bicapa, b) Cubípodos monocapa y c) Cubípodos bicapa.

El error cuadrático medio relativo (rMSE) del coste unitario $C(\text{€/m}^3)$ se utiliza en este estudio para medir la calidad del estimador de coste ("e") cuando se aplica a un grupo objetivo de datos ("o"). El rMSE viene dado por la Eq. (6):

$$rMSE_e(o) = \frac{MSE_e(o)}{Var(o)} = \frac{\sum_{i=1}^N (C_{e_i} - C_{o_i})^2}{N \cdot Var(C_o)} \quad (6)$$

donde N es el número total de datos; $i=1,2,\dots,N$ es el índice de datos; C_e y C_o son el coste unitario estimado y objetivo respectivamente; MSE es el error cuadrático medio empleando las Eq. (3) a (5) sobre los datos de Corredor y otros (2008) y $Var()$ es la varianza de los datos objetivos. $0\% < rMSE_e(o) < 100\%$ indica la proporción de varianza de los datos no explicada por el estimador "e".

Los errores obtenidos con las fórmulas fueron: rMSE (cubos 2 capas)=3.5%; rMSE (Cubípodos 1 capa)=5.3% y rMSE (Cubípodos 2 capas)=3.1%. La Figura 3 muestra los gráficos de validación cruzada para cubos y Cubípodos.

Asumiendo una distribución normal de los errores, la banda de confianza del 90% se obtiene como:

$$C_B|_{90\%} = C_B [Eq. 3] \pm 1.65\sqrt{MSE_B} = C_B [Eq. 3] \pm 5.78 \quad (7)$$

$$C_{C1}|_{90\%} = C_{C1} [Eq. 4] \pm 1.65\sqrt{MSE_{C1}} = C_{C1} [Eq. 4] \pm 13.48 \quad (8)$$

$$C_{C2}|_{90\%} = C_{C2} [Eq. 5] \pm 1.65\sqrt{MSE_{C2}} = C_{C2} [Eq. 5] \pm 7.39 \quad (9)$$

donde MSE_B , MSE_{C1} y MSE_{C2} son el error cuadrático medio empleando las Eq.(3), (4) y (5) respectivamente.

La Figura 3 ilustra el coste de construcción unitario (€/m^3) en función de la longitud del dique y del peso de los elementos correspondiente a cubos bicapa. Cuanto más grande es el peso de los elementos y mayor la longitud del dique, menor es el coste unitario de construcción del manto.

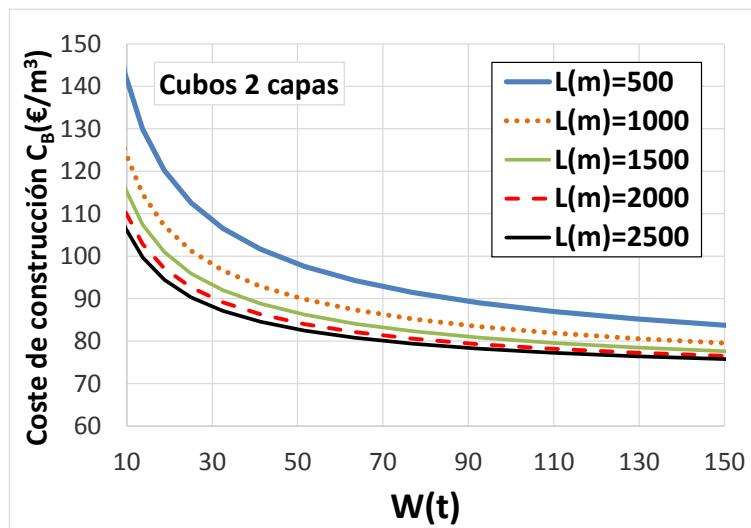


Figura 3. Comparación entre el coste de construcción estimado con $C_B(\text{€/m}^3)$ y el peso del elemento $W(t)$.

3. INFLUENCIA DEL PESO DEL MANTO SOBRE EL COSTE DE CONSTRUCCIÓN

Para cuantificar la influencia de incrementar el peso estrictamente necesario por cálculo, las nuevas fórmulas se han empleado sobre un dique tipo con tronco recto en planta con las siguientes características:

- Altura de ola de diseño variable en función del calado, $H_s=0.45 \cdot h$
- Calado, $5 < h(m) < 20$
- Porosidad, $p\%=41.5$ ($\phi=1.17$ en dos capas y $\phi=0.59$ en una capa)
- Talud, $\cot\alpha=1.5$
- Longitud de dique, $L[m]=400$ y 2500 .
- $K_D(\text{Cubos})=6$; $K_D(\text{Cubípodos 1 capa})=12$; $K_D(\text{Cubípodos 2 capas})=28$
- Densidad del hormigón, $\rho_r(t/m^3)=2.35$

- Densidad del agua de mar, $\rho_w(t/m^3)=1.025$
- Coste de suministro de hormigón, $CON(€/m^3)=60$.

El volumen de hormigón se calculó empleando la aproximación de Medina y otros (2014) y (2015) dado por $V=[\phi D_n/\sin(\alpha)][2h]L$. Para calcular el peso de los elementos se empleó la fórmula de Hudson (1959):

$$W = \frac{H_s^3 \rho_r}{K_D \left(\frac{\rho_r}{\rho_w} - 1 \right)^3 \cot \alpha} \quad (10)$$

Empleando los datos anteriores, se calculó para cada altura de ola el peso mínimo necesario para resistir ese oleaje de cálculo, $W0(t)$, el volumen de hormigón asociado a esa solución, $V0(m^3)$, y el coste de construcción del manto correspondiente al monomio $W0*V0$, $C0(€)$. La Figura 4 muestra las alturas de ola y pesos iniciales para cada solución.

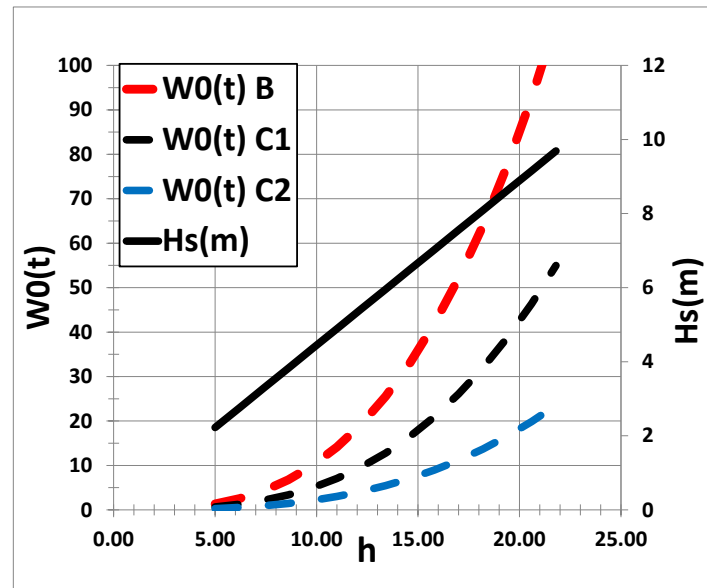


Figura 4. Peso inicial calculado para cada calado y altura de ola. Donde B: bloques cúbicos bicapa, C1. Cubípodos monocapa y C2: Cubípodos bicapa.

Posteriormente se calculó el coste de construcción del manto en tres escenarios de incremento de peso ($C_{cw}(€)$): (1) $W(t)=1.25W0(t)$; (2) $W(t)=1.5*W0(t)$ y (3) $W(t)=2*W0(t)$. En cada uno de los escenarios se calculó el incremento de coste respecto al coste inicial designado como $(C_{cw}-C0)/C0=\Delta C/C0$. La figura 5 muestra el incremento de coste relativo en función del calado: se observa como existe un punto de corte que define una región con $\Delta C/C0 < 0$ (un aumento de peso supone una disminución de coste) y $\Delta C/C0 > 0$ (un aumento de peso supone un aumento de coste). Además, el Cubípodo monocapa presenta una mayor región con $\Delta C/C0 < 0$ debido a su menor consumo de hormigón. Para la longitud de 2500 metros, las conclusiones fueron análogas.

La figura 6 representa el incremento de coste relativo de construcción del manto respecto al coste relativo de suministro de hormigón. Se observa como cuando el coste de suministro de hormigón en € (CON) es inferior a aproximadamente 1/3 del coste de construcción del manto para el peso correspondiente en € (C_{cw}), puede ser más económico colocar pesos mayores que los estrictamente necesarios por cálculo. En estos casos, los costes logísticos cobran mayor importancia que el consumo de hormigón y por ello es ventajoso incrementar el peso de los elementos para así disminuir el número de piezas a fabricar, acopiar y colocar.

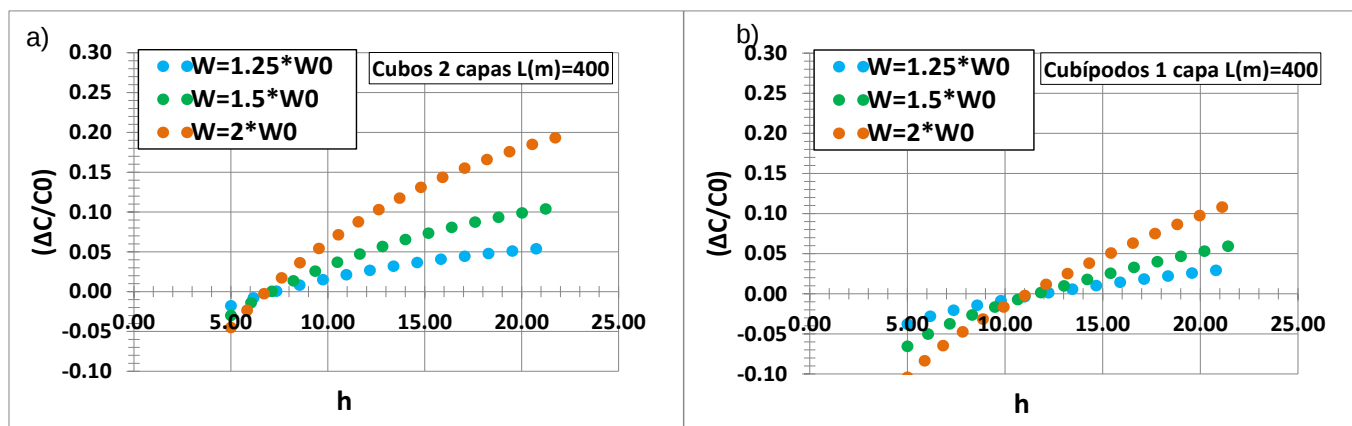


Figura 5. Incremento de coste de construcción relativo, $\Delta C/C_0$, en función del peso, $W(t)$, y el calado, $h(m)$ para $L(m)=400$: a) Cubos bicapa y b) Cubípodos monocapa.

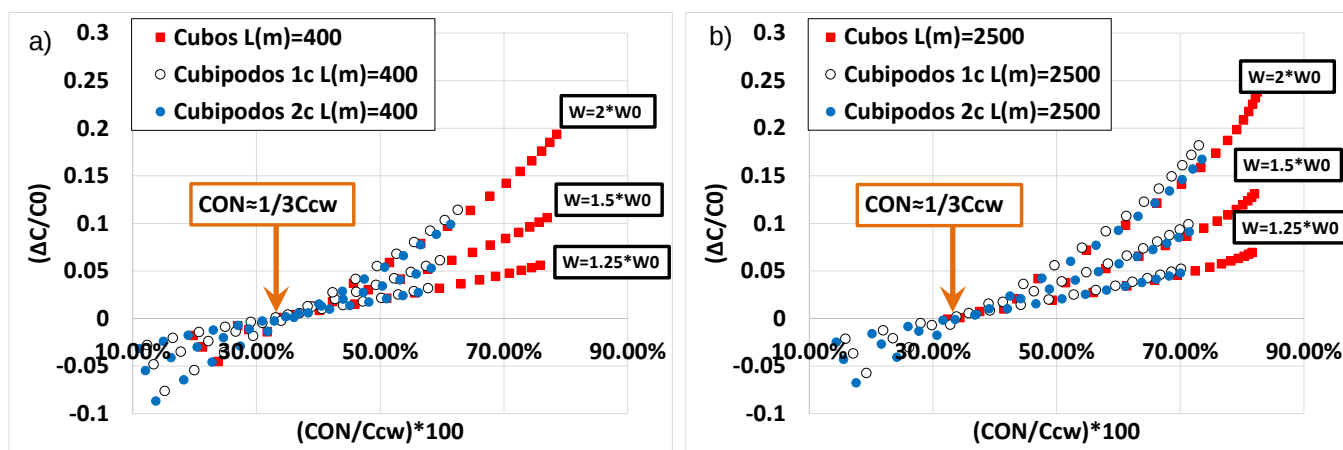


Figura 6. Incremento de coste relativo, $\Delta C/C_0$, en función del coste relativo del suministro de hormigón CON/C_{cw} : a) $L(m)=400$ y b) $L(m)=2500$.

4. CONCLUSIONES

En el presente estudio se han obtenido tres fórmulas para estimar el coste de construcción del manto de cubos y Cubípodos. Los mantos de Cubípodos destacan como una alternativa de inferior coste que los cubos, especialmente el manto de Cubípodos monocapa (Corredor y otros, (2008)). Las nuevas fórmulas pueden ser especialmente útiles para comparar soluciones alternativas durante la fase de diseño.

Aplicando las fórmulas a un dique tipo, se ha observado que en algunas ocasiones puede ser más económico colocar pesos mayores que los estrictamente necesarios por cálculo para resistir un clima marítimo determinado. Este hecho se ha observado para obras en las que el coste de suministro de hormigón en € es inferior a aproximadamente 1/3 del coste de construcción del manto en € (obras pequeñas). En estos casos, los costes logísticos adquieren mayor importancia que el consumo de hormigón y por ello es ventajoso incrementar el peso de los elementos para así disminuir el número de piezas a fabricar, acopiar y colocar. Incrementar el peso además supone aumentar la seguridad frente al fallo del dique y por lo tanto disminuir el coste de reparación durante la vida útil.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad y del FEDER (BIA2012-33967) y el apoyo del programa FPU (Formación del Profesorado Universitario) financiado por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte (primer autor: AP2010-4366 y segundo autor: FPU13/01872).

6. REFERENCIAS

- Burchart, H.F. (2007): "Aspects related to design and construction of breakwaters in deep water", Symposium Design and Construction of Deep Water Maritime Works: Gijón, Spain.
- CIRIA, CUR and CETMEF (2007): The rock manual: The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition), C683, CIRIA, London.
- Corredor, A., Torres, R., Miñana, J.V., Fernández, E., Menéndes, C.F., Santos, M., Gómez-Martín, M.E., Goumy, R. and Medina, J.R. (2008): "CUBÍPODO: Ensayos de estabilidad hidráulica 2D y 3D, estudio del remonte y rebase, diseño del encofrado y ensayos de caída de prototipos", Libro del III Congreso Nacional de la Asociación Técnica de Puertos y Costas, Puertos del Estado, p. 187-211 (in Spanish).
- Hauer, M., op den Velde, W., Vrijling, J.K. and d'Angremond, K. (1995): "Comparison of construction costs of conventional rubblemound breakwaters and berm breakwaters", Proc. 3rd Seminar on Ports and Inland Waterways, PIANC/PCDC.
- Hudson, R.Y. (1959): "Laboratory investigations of rubble-mound breakwater", Journal of Waterways and Harbors Division, ASCE, 89(WW3), p. 93-121.
- Medina, J.R. (1994): "Cost-effectiveness of D-Armour breakwater", Proc. 24th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, p.1412-1425.
- Medina, J.R., Gómez-Martín, M.E., Corredor, A., Torres, R., Miñana, J.V., Fernández, E., Menéndes, C.F. and Santos, M. (2009): "Cube and Cubipod armour unit drop tests and cost analysis", Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2009, Vol. I, Thomas Telford, p. 260-271.
- Medina, J.R., Molines, J. and Gómez-Martín, M.E. (2014): "Influence of Armour Porosity on the Hydraulic Stability of Cube Armour Layers", Ocean Engineering, Elsevier, 88, p. 289-297.
- Medina, J.R., Molines, J. and Gómez-Martín, M.E. (2015): "Influencia de la porosidad del manto de bloques cúbicos en su estabilidad hidráulica", Jornadas de Costas y Puertos, Avilés, España..
- Molines, J. (2009): "Estabilidad de espaldones de diques en talud con mantos de cubos y Cubípodos. Aplicación al dique de abrigo en Gandía (Valencia)", Final Degree Project *Universitat Politècnica de València* (in Spanish).
- Rietveld, C.F.W. and Burchart, H.F. (1987): "Construction, maintenance and repair as elements in rubble mound breakwater design", Proc. 2nd International Conferences on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, China.
- Schepers, M.R. (1998): "Cost of breakwaters with concrete elements", MSc thesis, Delft University of Technology (in Dutch).
- Van de Kreeke, J. and Paape, A. (1964): "On optimum breakwater design" ", Proc. 9th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, p.532-552.