

DISEÑO Y ENSAYOS FÍSICOS 2D y 3D DEL DIQUE DE SAN ANDRÉS, PUERTO DE MÁLAGA

M.E. Gómez-Martín¹, J.R. Medina², A. Corredor³, M. Santos³

¹Universidad de Alicante, Carretera San Vicent del Raspeig s/n, 03690 Alicante, esther.gomez@ua.es

²Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, 14, 46022 Valencia, jrmedina@upv.es

³SATO (Grupo OHL), Pº Castellana 259-D-8º, 28046 Madrid, acorred@ohl.es, mosantos@ohl.es

INTRODUCCIÓN

El dique de San Andrés forma parte del Proyecto constructivo de habilitación y mejora de la dársena exterior y abrigo exterior de San Andrés, uno de cuyos objetivos es el abrigo de la zona de poniente del Puerto de Málaga para la disposición de las nuevas instalaciones pesqueras y de recreo. En la margen izquierda del río Guadalmedina, adosado a los diques existentes de la terminal de contenedores, se ha construido el muelle al que se trasladarán las instalaciones pesqueras del puerto de Málaga. La construcción del dique de protección sureste de la dársena de San Andrés ha sido ejecutada por la UTE SATO-OHL (adjudicación en 06/2011) en una zona que se caracteriza por la baja capacidad portante del terreno.

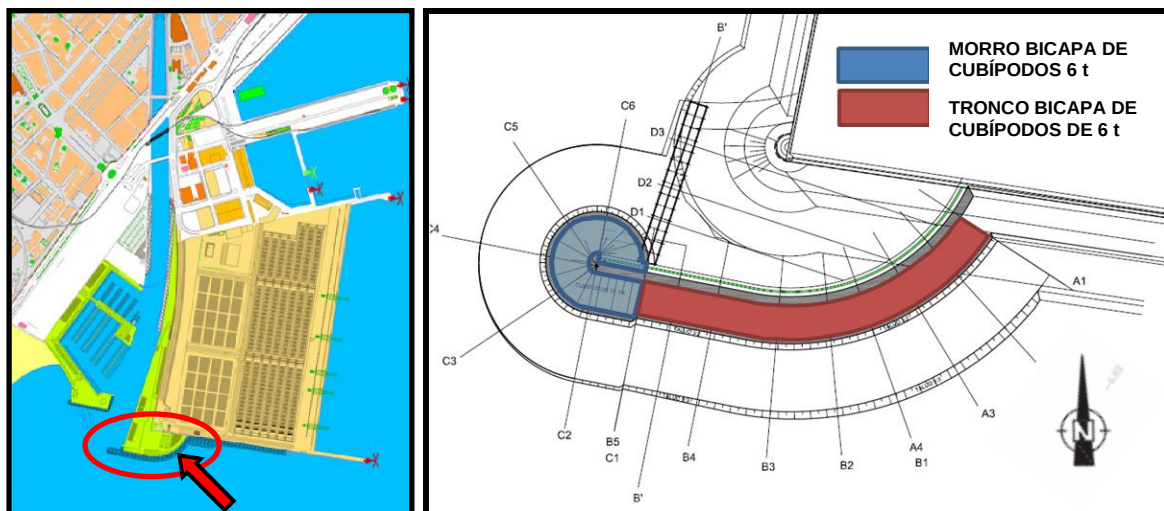


Figura 1. Ubicación y planta del dique de San Andrés (Puerto de Málaga).

El objetivo principal del proyecto es el diseño y construcción de un dique en talud de respuesta flexible que evite los modos de fallo geotécnicos ocasionados por la baja capacidad portante del terreno y los grandes asentamientos esperados. Además, el diseño del dique debe propiciar una alta estabilidad hidráulica, rebases admisibles y bajo coste de construcción. El dique tiene una longitud de 258 m, siendo la traza curva en los primeros 157 m y recta en el resto.

En este artículo, se analiza el diseño preliminar del dique de San Andrés con distintos elementos prefabricados de hormigón y soluciones monocapa o bicapa para el manto principal. Finalmente, se presentan los ensayos físicos 2D y 3D para estudiar la estabilidad hidráulica y el rebase de las soluciones monocapa y bicapa con Cubípodos, realizados en el canal de ensayos de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y en el tanque de oleaje unidireccional del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), respectivamente.

ANTECEDENTES

Condicionantes geotécnicos

El proyecto constructivo de INECO (2010), en el que se definían las obras a licitación, describía un fondo marino areno-limoso-arcilloso hasta los 15-20 metros de profundidad, caracterizado por la baja capacidad portante a corto plazo y los procesos de consolidación esperados a largo plazo. La berma frontal de 40 metros en el dique, las columnas de gravas en el muelle y las precargas y construcción por fases señalaban con claridad la preocupación del proyectista respecto de los mecanismos de fallo geotécnicos (círculos de deslizamiento, hundimiento, asentos, etc.).

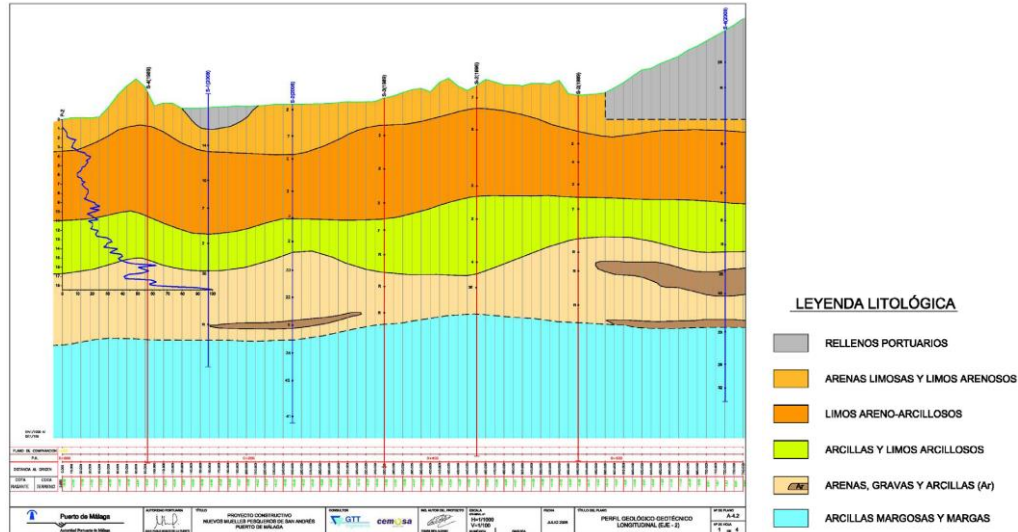


Figura 2. Perfil estratigráfico del lecho marino a lo largo de un corte longitudinal por la margen izquierda del río Guadalmedina (Fuente: UTE GTT Ingeniería-Cemosa, 2008).

La principal problemática geotécnica asociada al diseño del dique en talud fue la seguridad frente a la rotura del terreno (círculo de deslizamiento). Por un lado, debido a la baja capacidad portante del terreno a corto plazo, se esperaban problemas de rotura por círculo de deslizamiento profundo en caso de ejecutar el dique en talud en una sola fase. Por ello, se recomendó la construcción del dique por fases, con una ejecución inicial de bermas de escollera sobre las que apoyar un primer relleno del núcleo que actuase a modo de precarga, acelerando la consolidación de los estratos subyacentes antes de finalizar la ejecución del dique completo. Por otro lado, la anchura (40 m) y peso de la berma frontal de resistencia pasiva proyectada, fue el segundo factor determinante en la estabilidad global del dique, con objeto de interceptar los círculos de deslizamiento someros y forzar una rotura profunda que movilizase una amplia superficie de deslizamiento.

Estos dos aspectos (ganancia resistente por consolidación y dimensiones de la berma de resistencia pasiva) han condicionado el diseño global del dique en talud.

Temporal de cálculo

El proyecto de INECO (2010) incluye diversos estudios de clima y propagación de oleaje con diferentes métodos. Sin embargo, las principales características que condicionan la situación más crítica de estabilidad hidráulica y rebase del dique de San Andrés, son las siguientes:

1. La batimetría general de Málaga es una bahía con una pendiente de fondo aproximada del 2% que en la zona del puerto tiene la máxima pendiente en la dirección SE. Esto induce al oleaje a refractarse hacia la dirección SE en la zona del dique.
2. El oleaje exterior (boya de Málaga) es más intenso para las direcciones E ($K_a=1.00$) y ESE ($K_a=0.95$) y menos intenso para el resto de direcciones SE, SSE y S con $K_a=0.60$. Además, el dique de abrigo principal del puerto genera un cierto abrigo por difracción frente a los oleajes de componente Este.
3. El oleaje más desfavorable resulta el del ESE en aguas profundas, que cambia ligeramente hacia el SE (S59°E) a pie de dique, considerando la refracción y difracción correspondientes.

4. El Proyecto de INECO (2010) establece como temporal de cálculo $H_s[m]=5.1$ y $T_p[s]=12$. La dirección a pie de dique está en el rango SE-ESE. La incidencia es casi normal en el arranque del dique y oblicua ($45-65^\circ$) en el tramo recto.

	MAILLA ESE_E DIRECCIÓN ESE ALTERNATIVA 1 $T_p=12s$
	ORDEN FIGURAS: FRENTES ISOALTURAS DE OLA

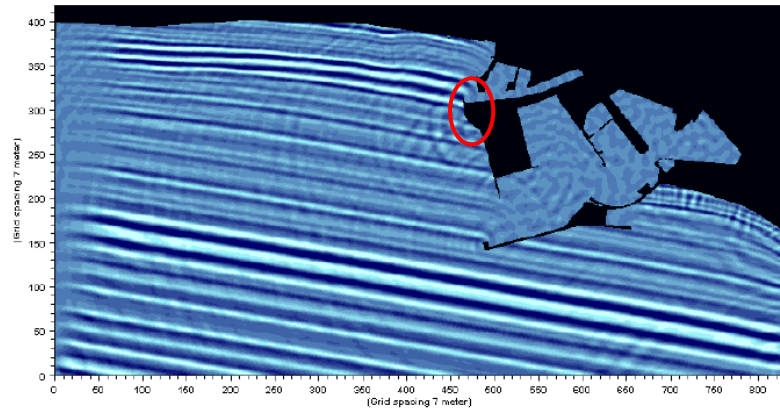


Figura 3. Propagación de oleaje: dirección ESE y $T_p[s]=12$ (Fuente: CEDEX, 2010).

Proyecto base

El proyecto base de INECO (2010) considera el temporal de cálculo a pie de dique definido por $H_s[m]=5.1$, $T_p[s]=12$, y dirección $S59^\circ E$; aplicando la formulación de Berenguer y Baonza (1999) se diseña un dique en talud de 260 m de longitud con manto bicapa de cubos de $W[t]=21$ en el morro y de $W[t]=10$ y 21 en el tronco. La Figura 4 muestra la sección tipo del proyecto base, correspondiente al dique de abrigo, cuyo francobordo es $R_c[m]=+6.50$, coronando la berma superior del manto principal de cubos bicapa a la cota $A_c[m]=+5.60$. La sección incluye una berma de resistencia pasiva con escollera de $W[t]=1$ y 40 m de anchura, a la profundidad $h[m]=-6.75$.

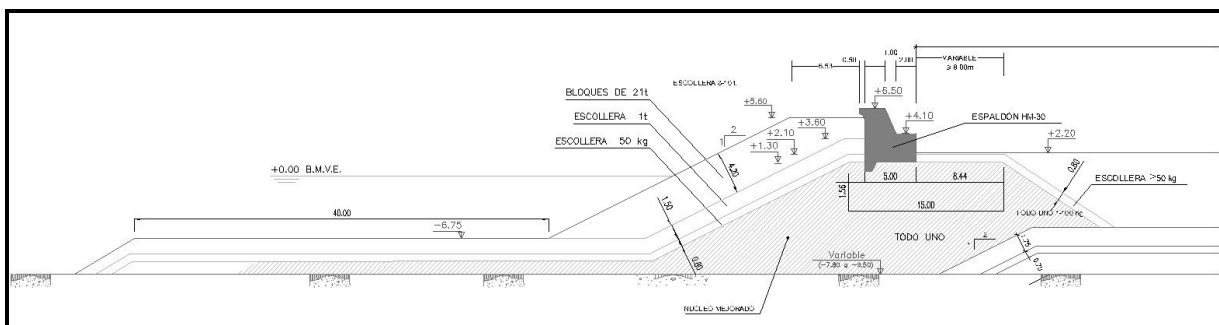


Figura 4. Sección tipo Proyecto base dique de San Andrés (Fuente: INECO, 2010).

Considerando una carrera de marea de 0.8 m, la cota de coronación (+6.50) tiene un francobordo relativo $C=(6.5-0.8)/5.1=1.12 < 1.5$ correspondiente a un dique muy rebasable (ver Grau, 2008) si no tuviera limitación por fondo. Sin embargo, la berma de 40 metros a la profundidad $h[m]=6.75$ limita el oleaje que puede alcanzar el talud del dique; aproximadamente, la altura de ola máxima que puede alcanzar el pie de dique es $H_{max}[m] \approx 0.8 \times (6.75 + 0.8) = 6.0$, mucho menor que la máxima que alcanzaría el dique con oleaje sin limitación de fondo ($H_{max}[m] \approx 1.8 \times H_s = 9$).

ESTUDIO DE SOLUCIONES: MANTOS MONOCAPA Y BICAPA

Se ha realizado un estudio de soluciones con distintos tipos de piezas prefabricadas de hormigón en una o dos capas para resistir el temporal de cálculo $H_s[m]=5.1$ y $T_p[s]=12$, con direcciones de oleaje en el sector SE-ESE.

La Figura 5 muestra las piezas seleccionadas por Dupray y Roberts (2009) para describir la evolución del diseño de elementos de hormigón en masa para los mantos de los diques en talud. Las variables para clasificar las piezas son: (1) la robustez de la forma geométrica (masiva y esbelta) que condiciona la resistencia estructural y el tamaño máximo de pieza sin armar que se puede usar en la práctica, (2) la colocación en el talud (aleatoria, orientada, uniforme, etc.) que condiciona los medios constructivos, las tolerancias y los rendimientos en obra y (3) el número de capas (monocapa, bicapa ó multicapa) y la porosidad del manto, que afecta directamente el volumen de hormigón necesario para construir la obra e indirectamente las tolerancias de puesta en obra y otros aspectos constructivos. Además, hay que considerar otras variables como fiabilidad constructiva, tipo y densidad del hormigón, tipo de cemento, dosificación, áridos utilizados, aspecto, proceso de fraguado, protocolo de fabricación, etc.

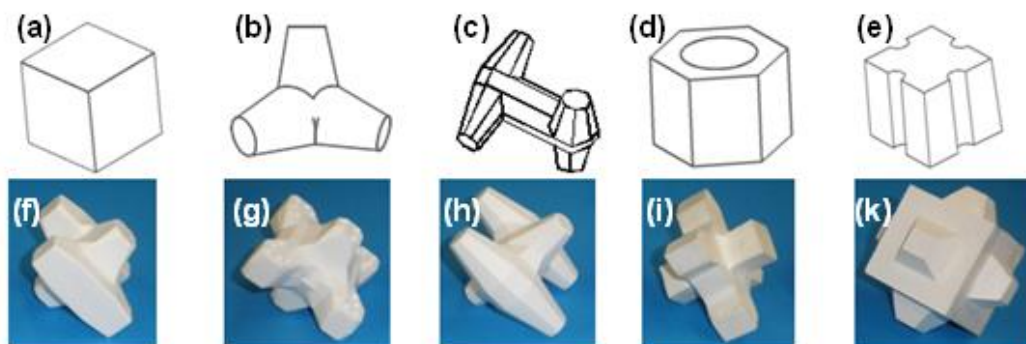


Figura 5. Piezas prefabricadas de hormigón para el manto principal: (a) cubo, (b) Tetrápodo, (c) Dolo, (d) Seabee, (e) cubo Antifer, (f) Accropode, (g) Accropode II, (h) Core-Loc, (i) Xbloc y (j) Cubipod (Fuente: Dupray and Roberts, 2009).

La Solución Base de proyecto (manto bicapa de bloques cúbicos con colocación aleatoria y talud 2/1) define la solución convencional española de referencia, pero plantea problemas como el adoquinamiento a largo plazo y un elevado consumo de hormigón, con el correspondiente sobre coste y las grandes huellas energética y del carbono asociadas.

Para definir la mejor alternativa para el Dique de San Andrés, se identificaron las características principales de la obra. En este caso, las condiciones geotécnicas fueron fundamentales y la berma ancha de 40 metros y el talud tendido $H/V=2/1$ son el reflejo de la componente de limos y arcillas de las capas del terreno bajo el dique. La precarga y la berma ancha tenían como objeto reducir los asentamientos a medio y largo plazo y mejorar la estabilidad frente a círculos de deslizamiento. La estabilidad hidráulica y el consumo de hormigón fue otro factor importante a considerar. Por otro lado, en la solución base, la relación $(R_c-PMVE)/H_s \ll 1.5$, por lo que cabía esperar rebases de consideración (ver Grau, 2008).

Así pues, los objetivos del diseño del manto principal de la Solución Variante fueron: (1) mantener o mejorar las condiciones de estabilidad geotécnica de la Solución Base, (2) ser poco sensible a los asentamientos globales y diferenciales a largo plazo, (3) ser estable con poco consumo hormigón y (4) mantener o mejorar las condiciones de rebase.

Justificación de la Variante

Las malas condiciones geotécnicas del terreno fueron el factor condicionante principal de los parámetros de diseño. La pendiente del talud $H/V=2/1$ favorece la estabilidad del terreno y un incremento de la pendiente del talud habría supuesto salir del marco de las hipótesis de cálculo definidas en el proyecto, por lo que en la Solución Variante se decidió mantener el talud 2/1.

Si las condiciones del terreno son malas e impredecibles a largo plazo, las piezas que resisten por trabazón (Accropode, Core-Loc, Xbloc, etc.) no son adecuadas ya que los asientos diferenciales pueden provocar roturas y desacoplamiento fatales en disposición monocapa. Las piezas que resisten por gravedad (cubo, cubo Antifer, Cubípodo, etc.) son las adecuadas dado que permiten con los asientos reordenaciones de piezas en el manto sin que la integridad de la pieza se vea comprometida con tensiones por trabazón. Además, la solución bicapa con piezas masivas (cubo, Cubípodo, etc.) dota al manto de una gran reserva de estabilidad adecuada para neutralizar grandes asientos diferenciales en el terreno a largo plazo. Por otro lado, hay que considerar que, si las piezas pueden resistir por gravedad las acciones hidráulicas del oleaje, un menor peso de las piezas del manto reduce las cargas sobre el terreno y es favorable para la estabilidad geotécnica de la sección.

La estabilidad hidráulica del manto principal es otro de los aspectos de diseño importantes. La Fig. 6 (ver Medina y otros, 2010) muestra los coeficientes de estabilidad (K_D) y coeficientes de seguridad, a inicio de avería y a inicio de destrucción, de diversas piezas en tronco y morro. El manto bicapa de Cubípodos (C2) es mucho más estable que el manto bicapa de cubos convencional (B2) con el consiguiente aumento de la seguridad, ahorro de recursos ambientales y reducción de cargas sobre el terreno.

Tramo	Pieza	K_D	nº capas	talud	Inicio de Destrucción (IDe)		Inicio de Averías (IDa)	
					SF(IDe5%)	SF(IDe50%)	SF(IDa5%)	SF(IDa50%)
tronco	cubo	6.0	2	3/2	1.05	1.35	0.67	0.86
	Cubípodo 2	28.0	2	3/2	1.09	1.40	0.82	0.99
	Cubípodo 1	12.0	1	3/2	1.31	1.64	1.06	1.27
	Accropode	15.0	1	4/3	1.05 a 1.40	1.26 a 1.51	0.93 a 1.24	1.15 a 1.38
	Xbloc	16.0	1	4/3	1.07	1.68	1.17	1.32
morro	cubo	5.0	2	3/2	1.17	1.40	0.88	1.13
	Cubípodo 2	7.0	2	3/2	1.19	1.36	0.99	1.18

Figura 6. K_D y coeficientes de seguridad implícitos del cubo, Cubípodo, Accropode y Xbloc. (Fuente: Medina y otros, 2010).

La estabilidad hidráulica de una determinada pieza o forma geométrica suele indicarse señalando su coeficiente de estabilidad (K_D) utilizado en la fórmula de Hudson (1959), popularizada por el SPM (1975):

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

donde W es el peso de las piezas del manto, γ_r y γ_w son los pesos específicos del hormigón y del agua, H es la altura de ola de cálculo y α es el ángulo que forma el talud con la horizontal. La Ec. 1 puede escribirse en forma de número de estabilidad, N_s , utilizando el peso específico relativo sumergido y el lado del cubo equivalente de la pieza, $\Delta = ([\gamma_r/\gamma_w] - 1)$ y $D_n = (W/\gamma_r)^{1/3}$. Si se toma la equivalencia $H = H_s$ propuesta por el SPM (1975), la Ec. 1 puede reordenarse para definir el número de estabilidad de la Ec. 2, que puede considerarse la ecuación de Hudson generalizada.

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} = \sqrt[3]{K_D \cot \alpha} \quad (2)$$

Para el caso del Dique de San Andrés, utilizando hormigón con densidad 2.3 t/m³, el peso de las piezas en tronco y morro de Cubípodos bicapa con talud 3/2 (margen de seguridad adicional), resulta: $W[t]=3.8$ para el tronco y $W[t]=15$ para el morro.

El tronco de Cubípodos propuesto en la Solución Variante es de $W[t]=6 \gg 3.8$, muy del lado de la seguridad, con el objetivo de reducir el número de piezas a fabricar y colocar sin aumentar el coste de la obra. Tampoco es conveniente subir mucho el peso de las piezas del manto para no aumentar en exceso las cargas sobre el terreno y los consumos de

energía y materiales (huellas energética y del carbono asociadas al consumo de hormigón). El morro de Cubípodos bicapa de $W[t]=15$, aumenta el margen de seguridad hidráulica al eludir a corto plazo (construcción) y a largo plazo (asientos) los problemas de adoquinamiento de los bloques cúbicos. Sin embargo, una vez realizados los ensayos 3D se comprobó la gran de estabilidad hidráulica del morro bicapa de Cubípodos de $W[t]=6$, finalmente ejecutado, tal y como se describe en el siguiente apartado.

Después de la estabilidad geotécnica y la estabilidad hidráulica, el rebase es el otro aspecto importante a considerar. El manto bicapa de bloques cúbicos de la Solución Base tenía caudales de rebase elevados ($\gamma_r=0.50$), mientras que el manto bicapa de Cubípodos ($\gamma_r=0.44$) propuesto en la Solución Variante tiene caudales de rebase menores para el mismo oleaje (ver Smolka y otros, 2008). Al reducir los caudales de rebase, se reduce el riesgo de sufrir daños en el trasdós del dique y se mejoran las condiciones de estabilidad del espaldón.

Así pues, el Cubípodo presenta varias características que la convierten en una pieza idónea para este proyecto: (1) capacidad de reordenación frente a movimientos de piezas inducidos por los asentamientos, (2) pocos cambios de porosidad en diversas circunstancias, (3) resistencia hidráulica por gravedad, (4) gran estabilidad hidráulica con menor consumo de hormigón y menores cargas sobre el terreno, (5) elevada resistencia estructural, (6) manipulación segura con pinzas de presión, (7) fácil colocación aleatoria con porosidad homogénea del 41%-42%, (8) ausencia de adoquinamientos a corto y largo plazo, (9) bajos caudales de rebase, (10) dos puestas al día, acopio eficiente y otras ventajas logísticas.

Por un lado, el Cubípodo está libre de los problemas de adoquinamiento que plantean los bloques cúbicos o paralelepípedicos, cubos Antifer, etc. a corto y largo plazo con la incertidumbre y compactación heterogénea derivada; por otro lado, es mucho más robusto y no plantea los problemas de colocación precisa que requieren las piezas como el Accropode y Core-Loc. En los bloques cúbicos, tanto el oleaje como los asientos diferenciales propician pequeños movimientos de los bloques que pueden generar grandes problemas a largo plazo con zonas inferiores de muy baja porosidad y zonas superiores desprotegidas, con los problemas añadidos de aumento de rebase y pérdida de estabilidad hidráulica. En las piezas trabadas (Accropode, Core-Loc, Xbloc, etc.), los asientos diferenciales pueden provocar la rotura y descolocación de piezas y el colapso de la estructura. Por el contrario, los Cubípodos tienden a mantener la porosidad constante, tanto en mantos bicapa como monocapa, con el consiguiente beneficio para la estabilidad hidráulica y la contención del rebase; en el caso del manto bicapa de Cubípodos, la capacidad para neutralizar deformaciones es muy elevada ya que una sola capa es suficiente para resistir el temporal de cálculo.

MODELOS FÍSICOS A ESCALA

Ensayos 2D (UPM)

Los ensayos 2D de estabilidad y rebase específicos del Dique de San Andrés fueron realizados en el canal de ensayos de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) a escala E:1/40. Demostraron que el manto monocapa de Cubípodos de $W[t]=8$ y talud H/V=2/1, es estable (daño nulo) por encima del temporal de cálculo ($H_s[m]=5.6$ y $T_p[s]=12$). Estos ensayos proporcionan un número de estabilidad para un nivel de daños nulo (<IDa) de $N_s=2.94$. Los ensayos demostraron que el manto monocapa de Cubípodos con $W[t]=6$ sería suficiente para resistir el oleaje de cálculo ($H_s[m]=5.1$). Los rebases medidos resultaron admisibles para las condiciones ensayadas.

Por consiguiente, el manto bicapa de Cubípodos con $W[t]=6$ de la Solución Variante está muy sobredimensionado desde el punto de vista hidráulico pero se justifica por las ventajas logísticas de las piezas de mayor tamaño y la necesidad de disponer de una gran reserva de seguridad para hacer frente a grandes deformaciones del terreno a largo plazo y la incertidumbre que genera sobre toda solución monocapa.

Los ensayos 2D de estabilidad y rebase específicos realizados en el canal de ensayos de la UPM prueban también la estabilidad hidráulica de la berma de pie con escollera de $W[t]=6$ y de la berma de 40 m. de anchura, proyectada con escollera de $W[t]=1$.

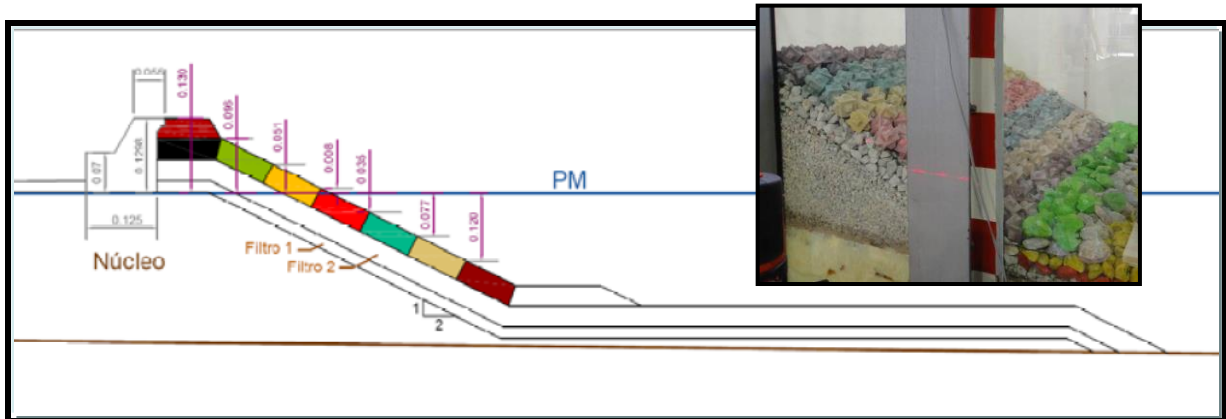


Figura 7. Sección 2D ensayada en la UPM del dique de San Andrés (Puerto de Málaga).

Ensayos 3D (CEDEX)

Los ensayos 3D de estabilidad hidráulica y rebase a escala $E:1/36$ se realizaron en el tanque 3D (45.0x6.5x2.0 metros) del Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC) del CEDEX, con oleaje unidireccional y absorción activa de reflexiones. Las características del temporal de cálculo fueron: $H_s[m]=5.1$, $T_p[s]=12$ y $0<\Delta h[m]<0.8$, pero los ensayos se realizaron con oleaje creciente hasta alcanzar $H_s[m]=5.7$, con $T_p[s]=12$ y $T_p[s]=14$, y $0<\Delta h[m]<1.0$. Debido a que la profundidad existente en la berma de 40 m de anchura era de $h[m]=7.55$ en PMVE ($\Delta h[m]=0.8$), el dique se encuentra en condiciones de rotura parcial del oleaje. Así pues, la oblicuidad y rotura del oleaje sobre la berma, genera un aumento de la estabilidad hidráulica del morro comparado con condiciones de no rotura (ver Lomónaco et al., 2009, y Burcharth et al., 2010).



Figura 8. Modelo 3D ensayado en el CEPYC, con manto bicapa de Cubípodos de $W[t]=6$ en tronco y de $W[t]=15$ en morro, del dique de San Andrés (Puerto de Málaga).

En primer lugar se ensayó un dique en talud $H/V=2/1$ con manto bicapa de Cubípodos de $W[t]=6$ en el tronco y de $W[t]=15$ en el morro (ver Figura 8), estos ensayos con oleaje creciente por encima del temporal de cálculo demostraron la elevada estabilidad hidráulica del morro, muy superior a la habitual, debido a la rotura del oleaje sobre la berma ancha y a

la oblicuidad del mismo. Lo cual justificó un nuevo ensayo 3D con la solución Variante finalmente adoptada, con talud $H/V=2/1$, manto bicapa de Cubípodos de $W[t]=6$ en tronco y morro (ver Figura 9), escollera de $W[t]=6$ en la berma de pie y escollera de $W[t]=1$ en la berma frontal de fondo.



Figura 9. Modelo 3D ensayado en el CEPYC, con manto bicapa de Cubípodos de $W[t]=6$ en tronco y morro, del dique de San Andrés (Puerto de Málaga).

La sección ensayada (ver Figura 10) finalmente construida, presentó una estabilidad hidráulica elevada en los ensayos realizados con oleaje superior al temporal de cálculo, caracterizados por $H_s[m]$ hasta 5.7, $\Delta h[m]=0.0$ y 1.0, y $T_p[s]=12$ y $T_p[m]=14$. Los ensayos demostraron que las bermas, la alineación recta del tronco y el morro no sufren daños con oleaje superior al de cálculo. Tan sólo se observaron daños bajos o muy bajos en el arranque curvo del tronco: $D<1,5\%$ para $H_s[m]=5.1$ y $\Delta h[m]=1.0>0.8$; y $D<4\%$ para $H_s[m]=5.7$ y $\Delta h[m]=1.0>0.8$. Los rebases medidos resultaron admisibles para las condiciones ensayadas. El arranque del nuevo dique se decidió reforzarlo con una capa de Cubípodos de $W[t]=15$ ya que era un punto singular que mostraba los mayores caudales de rebase.

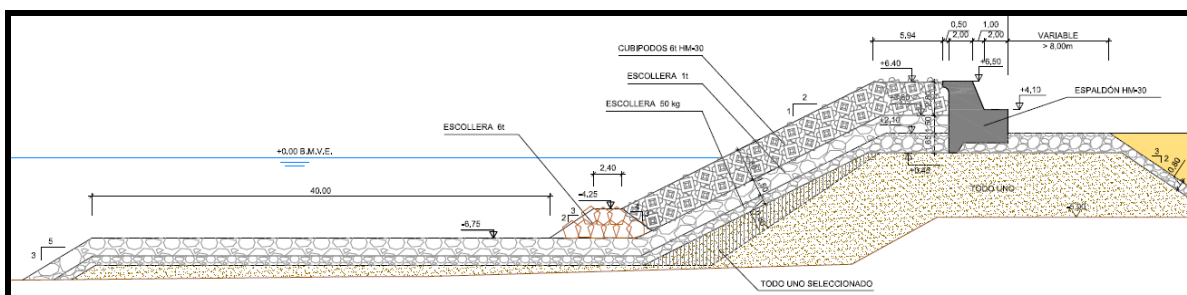


Figura 10. Sección bicapa con Cubípodos de 6 t del dique de San Andrés (Puerto de Málaga).

Finalmente 5000 Cubípodos de $W[t]=6$ fueron utilizados en la construcción de tronco y morro y 250 Cubípodos de $W[t]=15$ en el arranque del tronco apoyado sobre el dique de escollera existente. La ejecución del Dique de San Andrés, descrita con detalle por Santos et al. (2013), tuvo lugar durante los años 2011 y 2012, en los que se colocaron en primer lugar la berma y la sección sumergida, continuando con el avance terrestre. El proceso de fabricación de Cubípodos se realizó en un parque situado en el recinto del puerto, usando 23 y 2 encofrados de 6 y 15 t con dos puestas al día, y realizando un acopio de los Cubípodos de 6 t hasta en 5 alturas. Todo ello permitió la fabricación de Cubípodos con

rendimientos similares a los de los cubos. La colocación de los elementos se realizó con pinzas de presión, con rendimientos medios de 90 piezas/día por equipo en turno de día y sin problemas reseñables. Después de la consolidación del terreno, la fase final fue la ejecución del espaldón y colocación de los Cubípodos de la berma superior.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este artículo se describe la Solución Variante construida del dique de San Andrés (Puerto de Málaga), analizando posibles alternativas de diseño consideradas para el manto principal del dique. La Solución Base (proyecto a licitación) contemplaba un manto bicapa con talud $H/V=2/1$ de bloques cúbicos de pesos $W[t]=10$ y 21 con colocación aleatoria. Se analizan primero algunos aspectos relevantes del proyecto a licitación que afectan el diseño del dique y los condicionantes principales de las posibles alternativas. En segundo lugar se definen las características principales que debe tener una buena solución comparando diversas soluciones alternativas. Finalmente se justifica la Solución Variante y se describen los ensayos 2D y 3D de validación realizados.

La solución óptima para el dique debía cumplir las condiciones particulares de la zona: (1) mejorar las condiciones de estabilidad geotécnica, (2) adaptarse a los grandes asientos esperados a corto y largo plazo, (3) garantizar un balance entre la estabilidad hidráulica y el consumo de hormigón y (4) minimizar los rebases. Las piezas masivas de hormigón (cubos, Cubípodos, etc.) con colocación aleatoria, resisten por gravedad, se adaptan mucho mejor a los asientos que las piezas esbeltas que resisten por trabazón (Acrópodos, Core-Loc, Xbloc, etc.). Por tanto, si son previsibles grandes asientos diferenciales a corto y largo plazo, los mantos monocapa de piezas esbeltas trabadas se consideran una solución mucho peor que los mantos bicapa de piezas masivas, ya que los primeros pueden sufrir roturas incontroladas, mientras que los segundos presentan una respuesta flexible.

Por otro lado, dentro de las piezas masivas de colocación aleatoria en dos capas, los mantos de bloques cúbicos convencionales se caracterizan por el problema del adoquinamiento (compactación heterogénea) descrito por Gómez-Martín y Medina (2008 y 2014); si los asientos son importantes los problemas de adoquinamiento empeoran. Por el contrario, el Cubípedo se caracteriza por una buena adaptabilidad a las deformaciones del talud, manteniendo su aleatoriedad y una porosidad homogénea del manto en espacio y tiempo.

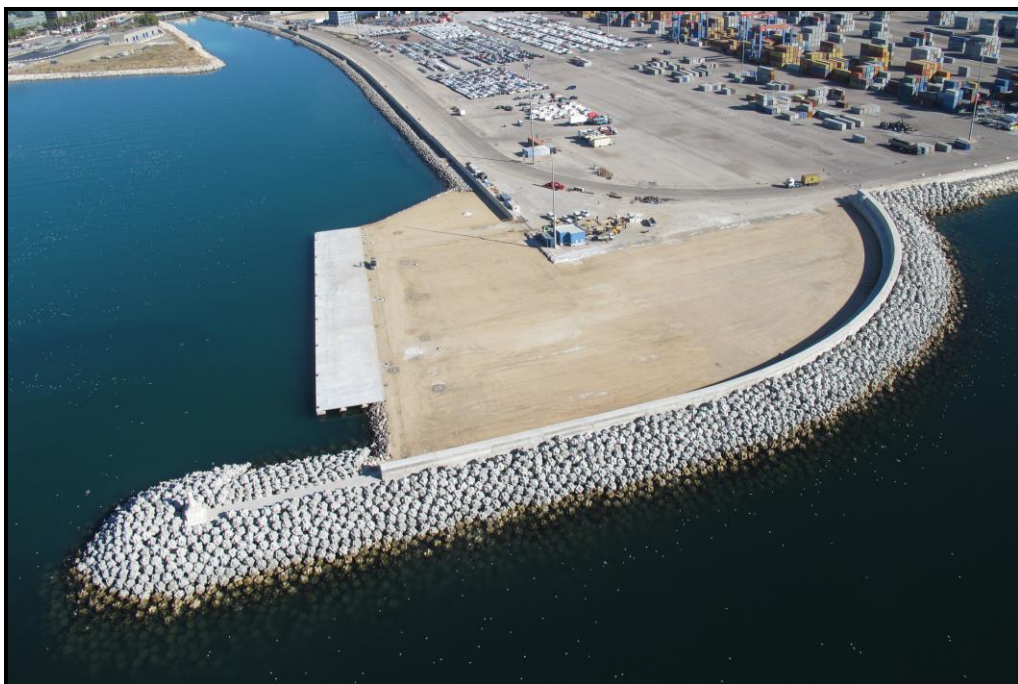


Figura 11. Vista general del Dique de San Andrés terminado, con manto bicapa de Cubípodos de $W[t]=6$ en tronco y morro, Puerto de Málaga.

Así pues, la solución óptima adoptada y ejecutada para el dique de San Andrés ha sido el manto bicapa de Cubípodos de 6 t en tronco y morro, con colocación aleatoria en talud $H/V=2/1$. Se realizaron 2 ensayos físicos a escala: (1) un ensayo 2D a escala 1/40 en el canal de oleaje de la UPM de una sección monocapa con Cubípodos de 8 t (3.5 m^3) que resistió estados de mar superiores a las condiciones de diseño sin daños y (2) un ensayo 3D a escala 1/36 en el tanque unidireccional del CEDEX de la sección bicapa con Cubípodos de 6 t (2.6 m^3) en tronco y morro que permitió validar condiciones de oleaje superiores a las de diseño sin daños y con rebases admisibles; lo cual justificó la solución finalmente construida (ver Figura 11) que ha permitido ahorros del 30% en el consumo de hormigón del manto principal del dique, respecto de la Solución Base, con la consiguiente reducción de la huella energética y del carbono.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Autoridad Portuaria de Málaga su apuesta por la innovación y el ahorro, al haber propuesto un tipo de licitación abierta que admitía soluciones variantes al tipo de piezas que forman el manto principal, exigiendo ensayos a escala reducida que validasen la solución adoptada. Se agradece también la ayuda del Ministerio de Economía y Competitividad y del FEDER (BIA2012-33967).

REFERENCIAS

- Berenguer, J.M. y Baonza, A. (1999). Experimental research on hollowed cubes for breakwater protection. *Proceedings of the International Conference Coastal Structures '99*: 255-261.
- Burcharth, H.F., Andersen, T.L. and Medina, J.R. (2010). Stability of Cubipod armoured roundheads in short crested waves. *Proc. of 32nd Conference on Coastal Engineering, ASCE, 32(2010): structures.39*.
- CEDEX (2010). Estudio de la modificación de las obras de abrigo de la dársena de San Andrés. Informe Técnico para Ministerio de Fomento, Organismo Público Puertos del Estado, Clave CEDEX: 24-410-5-004.
- Dupray, S., and Roberts, J. (2009). Review of the use of concrete in the manufacture of concrete armour units. *Coasts, marine structures and breakwaters. Adapting to change, ICE-Thomas Telford Ltd., Vol. 1, 245-259+297-298*.
- Gómez-Martín, M.E. and Medina, J.R. (2008). Erosion of cube and Cubipod armor layers under wave attack. *Proc. 31st Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE, 3461-3473*.
- Gómez-Martín, M.E., and Medina, J.R., 2014. Heterogeneous packing and hydraulic stability of cube and Cubipod armor units. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 140(1): 100-108*.
- Grau, I. (2008). Avances en la construcción de diques de abrigo en España. Libro del III Congreso Nacional de la Asociación Técnica de Puertos y Costas, Puertos del Estado, 13-60.
- Hudson, R.Y. (1959). Laboratory investigations of rubble-mound breakwaters. *Journal of Waterways and Harbors Division, ASCE, 89(WW3): 93-121*.
- INECO (2010). Proyecto constructivo de habilitación y mejora de la dársena exterior y abrigo exterior de San Andrés. Puerto de Málaga. Autoridad Portuaria de Málaga, noviembre de 2010.
- Lomónaco, P., Vidal, C., Medina, J.R. and Gómez-Martín, M.E. (2009). Evolution of Damage on Roundheads Protected with Cube and Cubipod Armour Units. *Proc. Coastal, Marine Structures and Breakwaters 2009, ICE, Thomas Telford Ltd., Vol 1, 169-180+186-188*.
- Medina, J.R., Gómez-Martín, M.E, Corredor, A., y Santos, M. (2010). Diseño de diques en talud con el manto principal de Cubípodos, *Revista de Obras Públicas, Col. ICCP, Madrid. 157(Nov.): 37-52*.
- Santos, M., Corredor, A., Medina, J.R. y Gómez-Martín, M.E. (2013). Ejecución de diques de Cubípodos en San Andrés (Puerto de Málaga) y Punta Langosteria (A Coruña). Libro electrónico de las XII Jornadas Españolas de Costas y Puertos (in press).
- Shore Protection Manual (1975). *Shore Protection Manual, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, Virginia*.
- Smolka, E., Zarranz, G. y Medina, J.R. (2009). Estudio Experimental del Rebase de un Dique en Talud de Cubípodos. Libro de Ponencias de las X Jornadas Españolas de Costas y Puertos, Universidad de Cantabria-Adif Congressos, 803-809.
- UTE GTT Ingeniería-Cemosa (2008). Proyecto constructivo nuevos muelles pesqueros de San Andrés. Puerto de Málaga. Autoridad Portuaria de Málaga, julio de 2008.