

## EJECUCIÓN DE DIQUES DE CUBÍPODOS EN EL PUERTO DE SAN ANDRÉS (MÁLAGA) Y PUNTA LANGOSTEIRA (A CORUÑA)

M. Santos<sup>1</sup>, A. Corredor<sup>1</sup>, J.R. Medina<sup>2</sup>, M.E. Gómez-Martín<sup>3</sup>

<sup>1</sup>SATO (Grupo OHL), Pº Castellana 259-D-8º, 28046 Madrid, [mosantos@ohl.es](mailto:mosantos@ohl.es), [acorred@ohl.es](mailto:acorred@ohl.es)

<sup>2</sup>Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, 14, 46022 Valencia, [jrmedina@upv.es](mailto:jrmedina@upv.es)

<sup>3</sup>Universidad de Alicante, Carretera San Vicent del Raspeig s/n, 03690 Alicante, [esther.gomez@ua.es](mailto:esther.gomez@ua.es)

### RESUMEN

Este artículo describe los condicionantes logísticos y la construcción de los primeros diques de Cubípodos construidos en España, en las fachadas Mediterránea y Atlántica. Se describe el proceso constructivo del dique de San Andrés (Puerto de Málaga), condicionado por la baja capacidad portante del terreno y las fuertes restricciones de espacio; se trata de un dique en talud convencional ( $H/V=cot\alpha=2.0$ ) protegido con un manto bicapa de Cubípodos de  $W[t]=6$  en tronco y morro. Por otro lado, se describe el proceso constructivo de la primera fase del contradique de Punta Langosteria (A Coruña) o dique Sur y el dique Norte para asegurar la toma de agua de la central térmica; se trata de dos diques en talud ( $H/V=cot\alpha=1.5$ ) perpendiculares a la costa protegidos por mantos monocapa de Cubípodos de  $W[t]=15$  y  $25$ . En el caso de Punta Langosteira han sido las restricciones temporales las que han condicionado las obras y su programación en ciclos de trabajo de 24 horas/día.

### INTRODUCCIÓN

El Cubípodo es un nuevo elemento para la construcción de mantos de diques en talud desarrollado a lo largo de los últimos años por SATO y la Universitat Politècnica de València (UPV). Después de múltiples ensayos físicos para estudiar la estabilidad hidráulica y el rebalse en diferentes laboratorios, el diseño de encofrados y los ensayos de fabricación y de caída de prototipos, en 2012 y 2013 se han construidos los primeros diques en talud protegidos con Cubípodos. En el Puerto de Málaga, sobre un terreno de poca capacidad portante, se ha construido un dique en talud convencional con manto bicapa de Cubípodos; en Punta Langosteria (Puerto Exterior de A Coruña), se han construido dos diques protegidos con un manto monocapa de Cubípodos. La Figura 1 muestra la primera capa de Cubípodos colocados sobre la capa de filtro en el dique de San Andrés (Málaga).



Figura 1. Primera capa de Cubípodos en el dique de San Andrés (Puerto de Málaga).

En el Puerto de Málaga se ha desarrollado un proyecto global para un mejor aprovechamiento de las áreas portuarias. Uno de ellos es el de la habilitación de la Dársena de San Andrés, que conllevó la construcción de un nuevo dique, abrigando dicha dársena

con los materiales extraídos de la demolición del antiguo contradique. De esta forma se han generado nuevos espacios y se ha eliminado el obstáculo que supone para las maniobras el ya inútil contradique. La obra consistió en la ejecución de un dique en talud protegido con Cubípodos de 6 t en manto bicapa con un talud 2/1. El dique tiene una longitud de 258 m, siendo la traza curva en los primeros 157 m y recta en el resto. La ejecución tuvo lugar durante los años 2011 y 2012.

El dique de abrigo principal de Punta Langosteira, descrito por Maciñeira et al. (2009), tiene una longitud de 3.35 km y está protegido por un manto bicapa de bloques cúbicos de  $W[t]=150$  y talud  $H/V=2.0$  diseñado para resistir un temporal de cálculo de  $H_s[m]=15$  y  $T_p[s]=18$  a profundidad  $h[m]=40$  (BMVE) con rango de marea  $\Delta h[m]=PMVE-BMVE=5.0$ . Tras completarse el dique de Punta Langosteira en 2011, se han completado en 2012 y 2013 dos nuevos diques perpendiculares a la línea de costa (dique Norte y dique Sur) para proteger la toma de Gas Natural Fenosa de la central térmica de Sabón, la cual se ha visto alterada debido al transporte litoral inducido por la construcción del dique de abrigo principal. La Figura 2 muestra el Dique Sur (primera fase del Contradique del Puerto Exterior de A Coruña en Punta Langosteira) durante su construcción.



Figura 2. Contradique de Cubípodos monocapa en Punta Langosteira.

La Autoridad Portuaria de A Coruña (APAC) licitó en 2012 el proyecto de Protección de la Toma de GNF y Mejora de la Utilización de las Instalaciones en Punta Langosteira. Dicho proyecto, adjudicado en el verano de 2012, incluyó la realización del dique Sur, coincidente con el primer tramo de 450 m del contradique de la dársena (Fase 1 del Contradique del puerto Exterior de A Coruña). La UTE propuso una solución variante con Cubípodos monocapa y talud  $H/V=3/2$ , muy ventajosa en mediciones (60% de ahorro de hormigón) y validada mediante ensayos físicos a escala reducida. La solución monocapa permitió asimismo un ahorro importante en tiempo de ejecución, dada la necesidad de la APAC de disponer durante la primera campaña (otoño 2012) del dique Sur (contención de arenas y Fase 1 del contradique).

La Figura 3 muestra uno de los casos estudiados para determinar el oleaje de cálculo para el contradique de Punta Langosteira; el oleaje más desfavorable es el difractado desde el morro del dique de abrigo principal y temporales del NW.

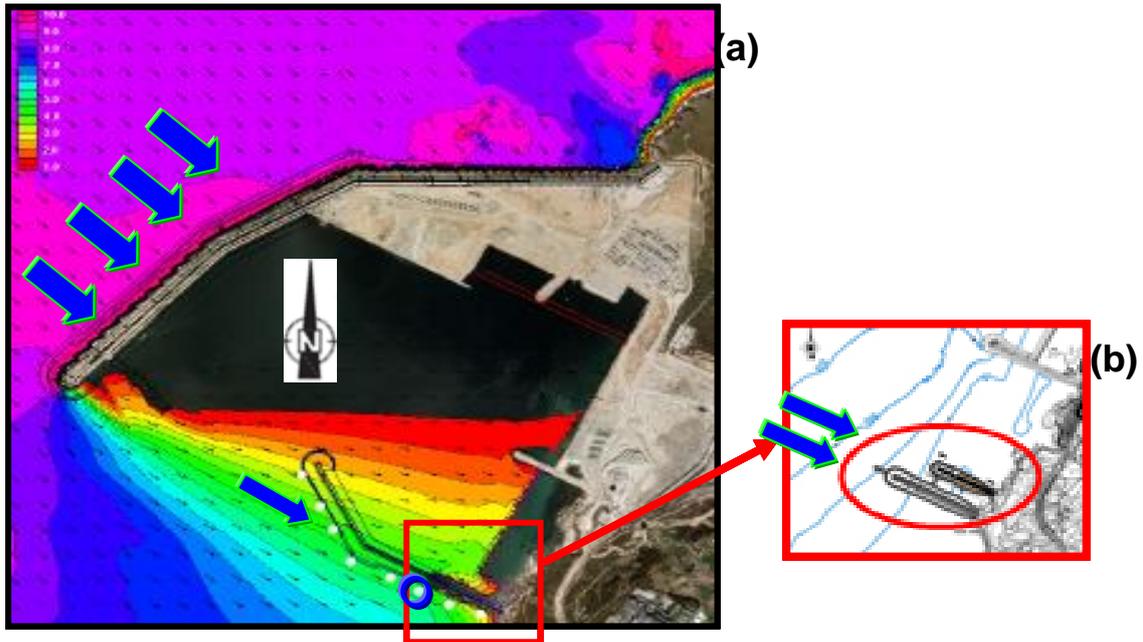


Figura 3. Contradique de Punta Langosteira: (a) propagación de oleaje y (b) diques Norte y Sur.

### ENSAYOS FÍSICOS A ESCALA REDUCIDA

El dique de San Andrés (Puerto de Málaga) se ha protegido con un manto bicapa de Cubípodos (ver Corredor et al., 2012). La baja capacidad portante del terreno y los grandes asentamientos esperados a largo plazo favorecieron la solución bicapa de Cubípodos, ya que las piezas son muy robustas (ver Medina y otros, 2011) y la estabilidad hidráulica es muy elevada. La solución base era un dique convencional  $H/V=2.0$  con manto bicapa de cubos de  $W[t]=14$  y  $21$  calculada teóricamente para resistir un temporal de cálculo de  $H_s[m]=5.1$ ,  $T_p[s]=12$  y  $0 < \Delta h[m] < 0.8$ ; además, la sección disponía de una berma de 40 metros de anchura coronada a la profundidad  $h[m]=6.75$ . Para optimizar y validar la solución bicapa de Cubípodos se realizaron ensayos 2D y 3D de estabilidad hidráulica y rebase en la UPM y en el CEDEX respectivamente (ver Gómez-Martín y otros, 2013). La solución final fue colocar un manto bicapa de Cubípodos de  $W[t]=6$  en toda la traza del dique, debido a la gran estabilidad hidráulica mostrada tanto por el manto monocapa como por el bicapa (ver Gómez-Martín y otros, 2013). 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. La Figura 4 muestra la sección tipo del Dique de San Andrés.

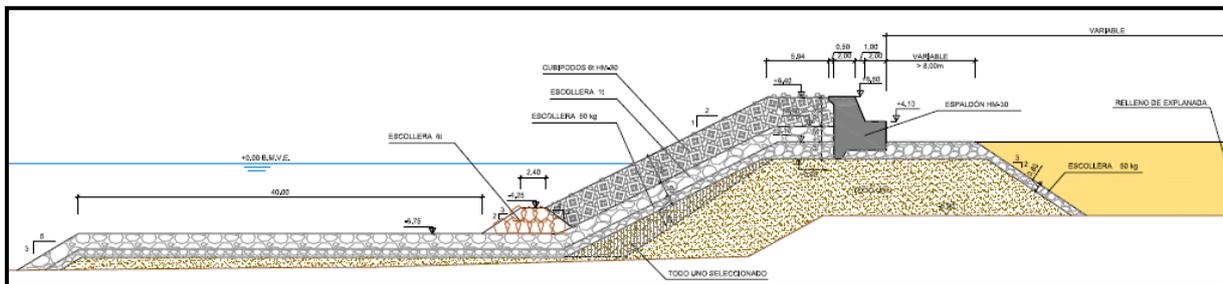


Figura 4. Sección tipo del dique de San Andrés (Puerto de Málaga).

Los diques Sur y Norte de Langosteira en la zona del contradique disponían de una solución base ensayada en el CITEEC con mantos bicapa de bloques cúbicos de  $W[t]=20$  y  $35$  y taludes  $H/V=1.75/1$  y  $2/1$ . Los ensayos descritos por Medina y otros (2013) se refieren a una variante que mejoró el diseño original con una solución de manto monocapa de

Cubípodos de  $W[t]=15$  y  $25$ , con talud  $H/V=1.5$ , que fue la finalmente construida. El ahorro económico y la reducción de las huellas energéticas y del carbono fueron muy importantes con una reducción en el consumo de hormigón superior al 60%. La Figura 5 muestra una imagen del modelo de Cubípodos monocapa ensayado en el CITEEC (Peña, 2012); la disposición en planta del modelo y los sensores fue similar en el caso de los modelos de Cubípodos, a la disposición de la solución base ensayada.



Figura 5. Vista del modelo monocapa de Cubípodos (Solución variante).

En la solución variante validada en los ensayos, los arranques de los diques Norte y Sur se protegieron con mantos bicapa convencionales de escollera de  $W[t]=5$ , mientras que los troncos y el morro Norte se protegieron con mantos monocapa de Cubípodos de  $W[t]=15$  y el morro Sur con Cubípodos de  $W[t]=25$ . Las Figura 6 muestra la sección del morro del dique Sur correspondientes a la solución variante monocapa de Cubípodos.

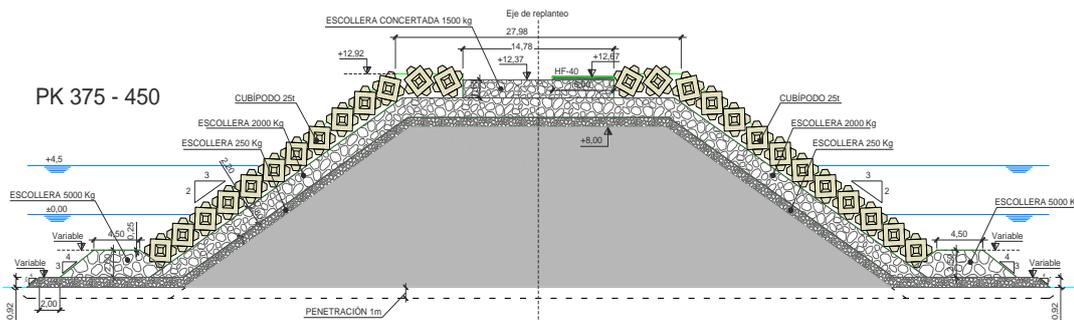


Figura 6. Sección monocapa con Cubípodos de 25t del morro del dique Sur (1ª fase del contradique).

En todos los ensayos (de Málaga y Langosteira) el diseño experimental se dirigió a ensayar los modelos con un oleaje muy por encima del temporal de cálculo para garantizar un margen de seguridad a la rotura muy amplio. En los dos casos, los ahorros económicos fueron muy importantes, especialmente en el caso de la solución monocapa de Punta Langosteria.

### CONSTRUCCIÓN DEL DIQUE DE SAN ANDRÉS (PUERTO DE MÁLAGA)

La ejecución del Dique de San Andrés 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.

### Parque de Cubípodos

Uno de los retos de la construcción del Dique de San Andrés era fabricar y acopiar todos los Cubípodos necesarios para la protección del Dique en una pequeña parcela de 160x40 metros junto a la red viaria urbana de Málaga, para su colocación posterior en el verano de 2012. En el parque de Cubípodos del Dique de San Andrés, un equipo de 8 personas fabricó diariamente 46 Cubípodos de 6 t y cuatro Cubípodos de 15 t en un solo turno diario. Para ello necesitaron 23 y 2 encofrados de 2.6 m<sup>3</sup> y 6.4 m<sup>3</sup> respectivamente y dos bases por encofrado. El consumo de hormigón era de 145 m<sup>3</sup>/día con jornadas de trabajo de 10 horas/día. Se utilizó hormigón en masa HM-30 de consistencia plástica sin aditivos y con vertido directo desde camión y vial elevado lateral. La Figura 7 muestra las operaciones de vertido de hormigón y acopio en parque. Se utilizaron dos grúas ligeras sobre ruedas para mover los encofrados y mover y acopiar los Cubípodos en parque.



*Figura 7. Vertido directo del hormigón desde vial elevado lateral.*

Para la manipulación en parque, las pinzas de presión dobles mostraron los resultados óptimos. Más de 5000 Cubípodos de 6 t y 250 de 15 t fueron acopiados, en cinco y dos alturas respectivamente, en el parque de bloques del dique de San Andrés dos meses antes de su colocación. No se produjo ninguna rotura ni en la fabricación ni en la manipulación y acopio de las piezas.

La Figura 8 muestra la colocación de los Cubípodos de 6 t en parque a cinco alturas y la Figura 9 muestra una visión general del parque de bloques en la parcela (160x40 metros) destinada al futuro Auditorio de Málaga. Una curiosidad de este parque fue el rumor que se extendió ente el vecindario del puerto; el acopio de Cubípodos a 5 alturas se pensaba que

era parte del Auditorio. Seguramente la belleza y originalidad de las figuras geométricas de los Cubípodos acopiados propició la idea de que las obras del Auditorio habían comenzado.



Figura 8. Acopio de Cubípodos de 6t en parque.



Figura 9. Vista general del parque de Cubípodos del dique de San Andrés (Puerto de Málaga).

### Colocación de Cubípodos

El dique de San Andrés se construyó con talud  $H/V=2.0$  y manto bicapa de Cubípodos de  $W[t]=6$ . Antes de la colocación, se realizaron ensayos de construcción realista de mantos en el tanque de ensayos del Laboratorio de Puertos y Costas de la Universitat Politècnica de València (LPC-UPV). En un modelo a escala  $E:1/36$  y utilizando una grúa radial a escala reducida con pinzas a escala y colocación ciega, se probaron diferentes mallas de colocación en tronco recto, tronco curvo, morro y arranque. Las mallas óptimas de primera y

segunda capa fueron las que se utilizaron después en la colocación de Cubípodos (ver Pardo et al., 2014). La grúa de construcción realista sigue de forma ciega una malla X-Y similar a la que sigue la grúa prototipo guiada por el GPS situado en la cabeza de la pluma de la grúa cuando coloca Cubípodos sin visibilidad bajo el nivel del mar.

El manto bicapa de Cubípodos del dique de San Andrés se construyó en tres fases. Primero se construyó la primera capa del manto apoyada en el filtro y la berma de pie. Esto permite la protección inmediata del dique ya que en los ensayos físicos se pudo comprobar que el manto monocapa de Cubípodos  $W[t]=6$  era suficiente para resistir el temporal de cálculo. Después se construyó la segunda capa del manto, apoyada en la primera capa de Cubípodos y en la berma de pie. Finalmente, después de esperar meses para que se produjeran los asentamientos esperados (ver Figura 10), se construyó el espaldón y la coronación del manto principal.

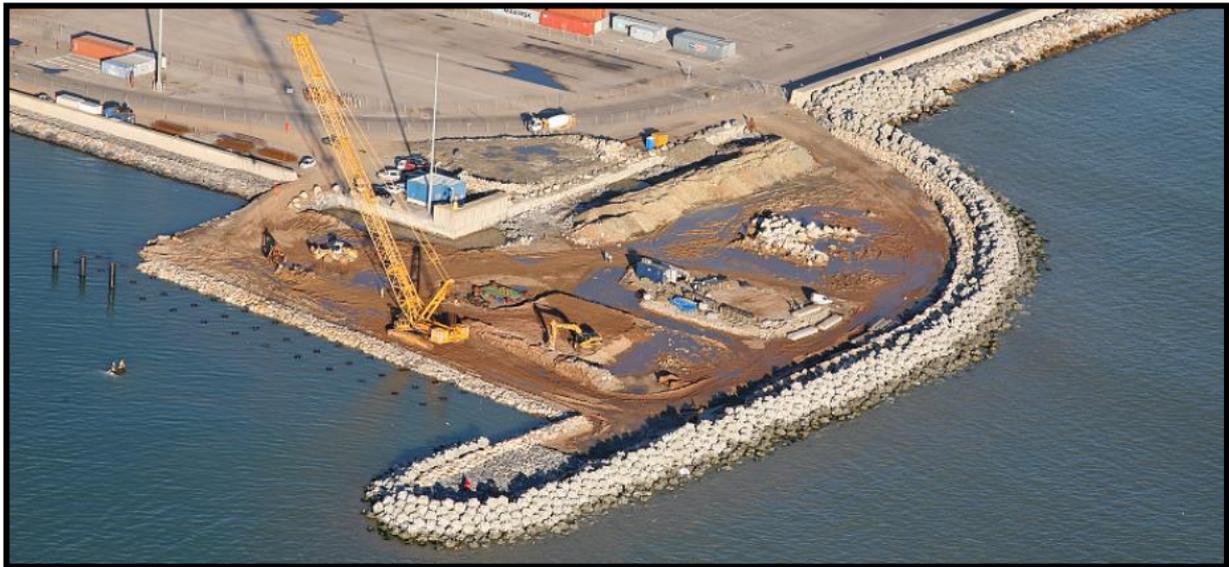


Figura 10. Dique de San Andrés antes de construir el espaldón y la coronación del manto.

Se utilizaron dos grúas de 300 t y 120 t para mover los Cubípodos de 15 t y 6 t. Para la manipulación y colocación de Cubípodos en el talud se utilizaron pinzas de presión simples y dobles, además de las pinzas pulpo convencionales; los mejores resultados se obtuvieron con las pinzas de presión simples diseñadas para el tamaño del Cubípedo a mover ( $6.4 \text{ m}^3$  y  $2.6 \text{ m}^3$ ).



Figura 11. Inicio del ciclo de colocación de un Cubípedo de 6 t en dique de San Andrés.

La Figura 11 muestra la grúa de 300 t iniciando el ciclo de colocación de un Cubípodo de 6 t en la primera capa del manto del dique de San Andrés. Este manto fue colocado con solo un ciclo de trabajo al día, con un ratio medio de colocación de 8 Cubípodos/hora. No se produjo la rotura de ningún Cubípodo en ningún punto del proceso de manipulación, transporte y colocación.

### CONSTRUCCIÓN DE LOS DIQUES SUR Y NORTE EN PUNTA LANGOSTEIRA

A diferencia del caso de Málaga, en Punta Langosteira se disponía de mucho espacio y varios puentes grúa en el parque de bloques del dique de abrigo principal, terminado en 2011. La restricción fundamental era terminar el dique Sur antes de la llegada de los temporales de invierno, iniciando las obras después del verano de 2012, debido a la necesidad urgente de frenar el basculamiento de la playa de Alba y proteger la toma de la central térmica de Sabón. El dique Sur de 450 metros de longitud quedó casi completo trabajando solo en el otoño de 2012. Se fabricaban tres Cubípodos diarios por encofrado en ciclo continuo de 24 horas/día.

La variante monocapa de Cubípodos de  $W[t]=25$  y 15 con talud 3/2 permitió ahorrar un 60% de hormigón respecto de la solución base de cubos. Además, la variante de Cubípodos permitió reducir el tiempo de ejecución y permitir la terminación del Dique Sur (450 metros) en menos de tres meses, antes de la llegada del invierno y los grandes temporales.

#### Parque de Cubípodos

En esta obra se re-utilizó uno de los parques de bloques del dique de abrigo principal (terminado en 2011) que estaba equipado con puentes grúa de 80 t. Se trabajó en ciclo continuo de 24 h/día para poder producir con rapidez los 950 Cubípodos de 25 t y 600 Cubípodos de 15 t necesarios para el Dique Sur (primera fase del contradique del Puerto). Se utilizaron 10 encofrados articulados de  $10.6 \text{ m}^3$  y 6 de  $6.4 \text{ m}^3$  (ver Medina et al., 2011) y tres bases por encofrado para producir diariamente 30 y 16 Cubípodos de 25 t y 15 t respectivamente ( $435 \text{ m}^3$  hormigón/día).

Los Cubípodos se acopiaron a tres alturas sobre un lecho de grava compactada. La temperatura media (octubre a diciembre) fue de  $13.2^\circ\text{C}$  y se utilizó hormigón en masa sin aditivos HM-30 de consistencia plástica ( $f_{ck}=30 \text{ MPa}$ ). El hormigón se vertía directamente a los encofrados desde una vía elevada con encofrados colocados en ambos lados. La Figura 12 muestra el parque de bloques con vertido directo de hormigón desde vial elevado.



Figura 12. Fabricación y acopio de Cubípodos en Punta Langosteira.

Se utilizaron pinzas de presión dobles para acopiar los Cubípodos a tres niveles en disposición cerrada (porosidad 30%). Debido a las restricciones de tiempo y a que la resistencia del hormigón de 30 MPa es muy elevada para una pieza masiva como el Cubípedo, una parte de los Cubípodos se colocaron en obra con solo 20 MPa (antes de los 28 días en parque). No se produjo la rotura de ningún Cubípedo en el proceso de manipulación, acopio y colocación.

### Colocación de Cubípodos

La colocación de los Cubípodos de 25 t y 15 t en el dique Sur se realizó muy rápida en el otoño de 2012, antes del invierno. Se utilizó una grúa de 600 t y se probaron pinzas de presión simples y dobles, así como pinzas de recuperación SATOGRAB; los mejores resultados para el manejo y colocación se obtuvieron con pinzas de presión simples específicas diseñadas para el tamaño de las piezas (10.6 m<sup>3</sup> y 6.4 m<sup>3</sup>). Como en el caso de Málaga, se realizaron ensayos de construcción realista de Mantos en el LPC-UPV para determinar las mallas de colocación idóneas que permitieran la colocación ciega en prototipo similar a la de los modelos a escala reducida (porosidad p%≈41).

La colocación se realizó trabajando en ciclo continuo de 24 h/día, obteniendo un ratio medio de colocación de 6 Cubípodos/hora. Las obras se terminaron construyendo el dique Norte de 300 metros de longitud al inicio del verano de 2013.



Figura 13. Vista general de los diques Norte y Sur ya terminados.

### CONCLUSIONES

En primer lugar destacar las **dos aplicaciones diferentes en el uso de esta nueva pieza**, el CUBIPODO, que se han hecho en función de los condicionantes y características propios de las obras donde se ha utilizado.

Ello ha sido posible gracias a que el empleo de la misma admite indistintamente monocapa o bicapa. Así pues, la baja capacidad portante del terreno y los grandes asientos diferenciales esperados en el Puerto de Málaga, propiciaron el diseño del dique con una berma de fondo de 40 metros de anchura, talud H/V=2.0 y manto bicapa de Cubípodos de  $W[t]=6$ . En el caso de Punta Langosteira, el fondo de roca y arena favoreció el talud H/V=1.5 y la protección monocapa que es más eficiente económica y ambientalmente.

Por otra parte el **gran ahorro de hormigón** frente a los diseños originales tanto en el caso de doble capa, Málaga, con un 30%, como en caso de Langosteira donde supuso más del 60%.

## AGRADECIMIENTOS

Debemos destacar y agradecer **la gran apuesta por la Innovación** de las Autoridades Portuarias de Málaga y A Coruña al haber propuesto un tipo de licitación abierta donde los pliegos de bases permitieron que los licitadores presentaran proyectos variantes a la morfología de las piezas que componen el manto principal. Ello sin dejar de ser garantes de la solución, al exigir ensayos a escala en modelo reducido para validar la solución adoptada.

Es una forma ejemplar e inteligente de ahorrar costes, reducir la huella energética e incentivar la Innovación.

## REFERENCIAS

- Corredor, A., Santos, M., Peña, E., Maciñeira, E., Gómez-Martín, E. and Medina, J.R. (2013). Designing and Constructing Cubipod Armored Breakwaters in the Ports of Malaga and Punta Langosteira (Spain). *Proc. Coastal, Marine Structures and Breakwaters 2013*, ICE (in press).
- Gómez-Martín, M.E., Medina, J.R., Corredor, A. y Santos, M. (2013). Diseño y ensayos físicos 3D del Dique de San Andrés, Puerto de Málaga. Libro de ponencias de las XII Jornadas Españolas de Costas y Puertos.
- Maciñeira, E., Noya, F. and Bajo, V. (2009). Breakwater construction at new port in Punta Langosteira, A Coruña, Spain. Execution process and technical innovation. *Proc. Coastal, Marine Structures and Breakwaters 2009*, ICE, Thomas Telford Ltd., Vol 1, 532-543.
- Medina, J.R., Gómez-Martín, M.E, Corredor, A., Torres, R., Miñana, J.V., Fernández, E., Menéndez, C.F. and Santos, M. (2011). Prototype drop tests of cube and Cubipod armor units. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, ASCE, 137(2): 54-63.
- Medina, J.R., Gómez-Martín, M.E., Peña, E., Maciñeira, E., Sande, J., Corredor, A. y Santos, M. (2013). Diseño y ensayos físicos 3D de los diques monocapa de Cubípodos en la zona del contradique de Punta Langosteira. Libro de ponencias de las XII Jornadas Españolas de Costas y Puertos.
- Pardo, V., Herrera, M.P., Molines, J., and Medina, J.R. (2014). Placement test, porosity, and randomness of cube and Cubipod armor layers." *Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, ASCE . Próxima publicación. DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943- 5460.0000245.
- Peña, E. (2012). *Optimización de la solución estructural de los trabajos correspondientes a la primera fase de la construcción del contradique y espigón en Punta Langosteira. Estudio en modelo físico de Cubípodos monocapa y bicapa*. Informe Final del GEAMA, Universidade da Coruña, 37 p.