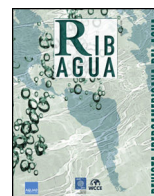




RIBAGUA

www.elsevier.es/ribagua



Jornadas de Puertos y Costas 2015

Aspectos innovadores en el diseño y construcción del dique Oeste en el puerto exterior de A Coruña en Punta Langosteira (España)

M. Santos^a, A. Corredor^a, E. Maciñeira^b, V. Bajo^b, M.E. Gómez-Martín^{c,*} y J.R. Medina^d^a SATO (Grupo OHL), Madrid, España^b Autoridad Portuaria de A Coruña, A Coruña, España^c Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, Alicante, España^d Departamento de Transportes, Universitat Politècnica de València, Valencia, España

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 26 de febrero de 2016

Aceptado el 19 de julio de 2016

On-line el 8 de agosto de 2016

Palabras clave:

Coraza
Cubípodo
Rompeolas
Estabilidad hidráulica
Mantos bicapa
Monocapa
Licitación con variante

R E S U M E N

En este artículo se describen los aspectos innovadores del diseño y proceso de construcción del dique Oeste del puerto exterior de A Coruña en Punta Langosteira. El contradique del puerto está formado por el dique sur (fase 1.^a) y el dique Oeste (fase 2.^a), actualmente en construcción, y tiene la función de completar el abrigo proporcionado por el dique principal del puerto exterior de A Coruña para garantizar una elevada operatividad de las nuevas instalaciones portuarias, así como para contener el basculamiento de las playas al Oeste del puerto. La forma de licitación de la obra, admitiendo variantes al proyecto base del concurso público, ha favorecido la innovación al permitir la propuesta de diferentes tipos de piezas y finalmente la utilización de cubípodos en el manto principal. El contradique de 1,35 km de longitud está protegido por un manto de cubípodos monocapa de 25 t y 30 t en el tronco y bicapa de 45 t en el morro. Esta solución variante de cubípodos resiste temporales superiores a los estados límite definidos ($H_s=8,75$ m en tronco) y ha reducido considerablemente el coste económico y el consumo de hormigón del dique. Para la optimización y validación de la solución variante se realizaron ensayos 3D de estabilidad hidráulica y rebase a una escala 1/51, similares a los realizados por la autoridad portuaria para justificar la solución del proyecto base. En el dique Oeste destaca la reutilización de 1.360 cubípodos de 15 t y 25 t de los mantos de los diques norte y sur que han quedado abrigados por este nuevo dique y la construcción de una transición monocapa-bicapa, con cuñas opuestas de colocación aumentando progresivamente el espesor de la capa de filtro con objeto de mantener la continuidad del perfil exterior del manto a lo largo del dique.

© 2016 IAHR y WCCE. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Innovative aspects in design and construction of the western breakwater for the outer port of A Coruña at Punta Langosteira (Spain)

A B S T R A C T

Keywords:

Armor units
Cubipod
Mound breakwaters
Hydraulic stability
Double-layer armors
Single-layer armors
Bidding with variations

This article describes the innovative aspects in design and construction of the western breakwater of the outer port at Punta Langosteira (A Coruña, Spain). The secondary breakwater is formed by the south breakwater (1.st phase) and the western breakwater (2.nd phase), currently under construction, and it is intended to complete the shelter provided by the main breakwater of the outer port of A Coruña and to ensure high operability of the new port facilities, as well as to contain the movement of the beaches to the west of the port. The bidding process, which permitted variations to the preliminary design, favors innovation, allowing for a variety of solutions based on the use of different armor units, and cubipods were finally selected for the main armor layer. The 1.35 km long secondary breakwater is protected by a single-layer 25 t and 30 t cubipod armor in the trunk, and a double-layer 45 t cubipod armor in the roundhead. The alternative cubipod solution allows for a breakwater which withstands wave climates higher than the defined limit state ($H_s=8.75$ m in the trunk) and significantly reduces the economic cost and the concrete consumption. In order to optimize and validate the alternative solution,

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: esther.gomez@ua.es (M.E. Gómez-Martín).

3D hydraulic stability and overtopping test were performed with 1/51 scale, similar to those made to justify the preliminary design by the port authority. 1,360 cubipod units (15- and 25-tonne) from the southern and northern breakwaters, which are now sheltered by the new breakwater, have been re-used at the western breakwater. A transition single- to double-layer armor has been constructed, with opposite fitting, increasing progressively the thickness of the filter layer to maintain a homogeneous exterior surface of the armor when modifying the armor thickness.

© 2016 IAHR y WCCE. Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

El puerto exterior de A Coruña en Punta Langosteira (España) está abrigado por uno de los diques más grandes del mundo, terminado en 2011; este abrigo principal se está completando ahora con el contradique del puerto de 1,35 km de longitud, construido en dos fases: la fase 1.^a, correspondiente al dique sur de 0,45 km de longitud construido en 2012, y la fase 2.^a, correspondiente al dique Oeste que continúa la traza del dique sur hasta alcanzar 1,35 km y una profundidad $h=22$ m (bajamar viva equinocial [BMVE]) en el morro, con carrera de marea $\Delta h(m)=5$. El contradique se extiende a lo largo de dos alineaciones (tramos), una primera alineación (tramo) de unos 0,85 km y orientación ESE-WNW, y una segunda alineación (tramo) de unos 0,50 km con orientación SSE-NNW.

La figura 1 muestra la planta del puerto exterior de A Coruña, en el que destaca el dique de abrigo principal de 3,35 km de longitud, protegido con un manto bicapa convencional de bloques cúbicos de 150 t en el tronco y hasta 195 t en el morro con hormigón de alta densidad [1], diseñado para resistir el temporal de cálculo ($T_R=140$ años y daños moderados $\approx 5\%$) de altura de ola significativa $H_s=15$ m y periodo de pico $T_p=18$ s, a una profundidad $h=40$ m (BMVE), con una carrera de marea $\Delta h=5,0$ m. Los temporales del NW son los dominantes en la zona y el contradique queda parcialmente

abrigado a los grandes temporales del NW. A partir del clima marítimo en aguas profundas y la propagación de los temporales al interior de la dársena, la autoridad portuaria de A Coruña determinó las características del oleaje extremo a considerar en los cálculos: estado límite de servicio (ELS) o inicio de averías (IA) y estado límite último (ELU) o inicio de destrucción (ID). Estos estados límite se consideraron en diferentes puntos del trazado del contradique (círculos blancos de la figura 2). La figura 2 muestra uno de los casos típicos de agitación del puerto con oleaje del NW.

Para el diseño inicial del contradique se aplicaron los criterios de la ROM 1.0-09 [2] en cuatro tramos diferentes del dique: 1) primera alineación (tramo), 2) quiebro, 3) segunda alineación (tramo) y 4) morro (fig. 2). Con estos criterios se propuso inicialmente un diseño típico de las costas españolas [3] en el proyecto base del dique Oeste: dique en talud ($H/V=1,5$) con manto bicapa de cubos de 25 t y 50 t en tronco y quiebro, respectivamente, y 50 t en morro, con berma de pie de bloques cúbicos de hormigón de 12,5 t y 25 t. Esta solución del proyecto base fue optimizada y validada por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA) de la Universidad de la Coruña (UDC) en el tanque de oleaje (32,0x34,0x1,2 m) del Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC) de la UDC, con los



Figura 1. Planta del puerto exterior de A Coruña en Punta Langosteira (15/09/2015). Fuente: autoridad portuaria de A Coruña y datos del mapa ©2016 Google, INEGI, ORION-ME.

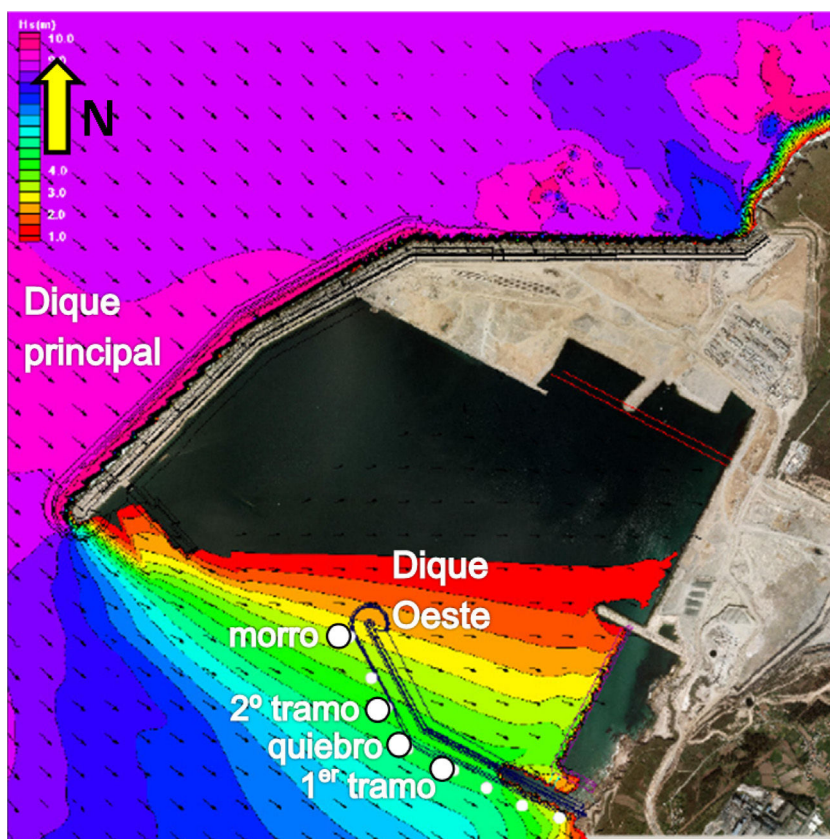


Figura 2. Contradique afectado por la difracción del oleaje en el dique principal. Fuente: autoridad portuaria de A Coruña.

correspondientes ensayos físicos a escala reducida. La figura 3 muestra la sección tipo del proyecto base correspondiente al quiebro del dique Oeste, el cual se corresponde con el punto del contradique más solicitado: $H_s(m) = 6,75$ (IA) y $8,75$ (ID), con $T_p = 15$ s y 18 s.

Una vez definida la solución inicial del proyecto base, la autoridad portuaria de A Coruña sacó las obras a licitación «con variante», pudiendo las ofertas proponer cambios en el talud, tipo y tamaño de pieza, número de capas (excepto el morro que tenía que ser bicapa), berma de pie, etc., que también debían ser validadas con los correspondientes ensayos físicos.

La licitación «con variante» es un tipo de licitación que, en grandes obras marítimas, abre la posibilidad de reducir sustancialmente los costes de construcción, mejorando al mismo tiempo la seguridad y funcionalidad de la obra. Se basa en permitir la innovación sobre los procesos de diseño y construcción, para reducir efectivamente el coste económico y el impacto ambiental, manteniendo al mismo tiempo un razonable beneficio industrial para el licitador. La licitación con variante resulta especialmente eficaz si se tiene un conocimiento profundo de la obra a realizar y se dispone de un proyecto base completo, que permita definir de una forma unívoca los aspectos sobre los que pueden versar los

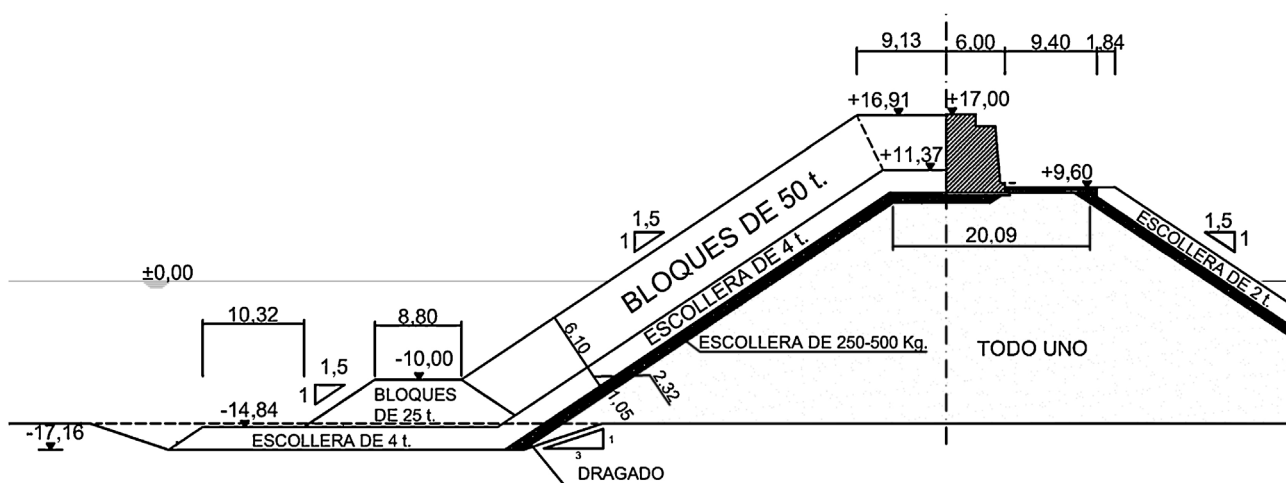


Figura 3. Sección tipo correspondiente al quiebro del dique Oeste en el proyecto base (manto bicapa de cubos, cotas en metros). Fuente: autoridad portuaria de A Coruña.



Figura 4. Piezas de hormigón para mantos monocapa y bicapa de diques en talud. Fuente: elaboración propia, recuperado de: www.concretelayer.com, www.xbloc.com y www.cubipod.com.

proyectos presentados en la fase de licitación, así como la definición de unos criterios de diseño homogéneos que permitan una comparación objetiva de las distintas ofertas en competencia. En este caso, la obra se optimiza en su diseño (coste de materiales), adecuándolo a la planificación de ejecución y pensando en la construcción (costes logísticos); se detectan y solucionan los posibles errores del proyecto inicial y se consigue un diseño constructivo final mucho mejor, más fiable y de menor coste. Ganan todas las partes implicadas: 1) la Administración promotora que consigue grandes ahorros económicos al optimizarse la obra compitiendo diferentes empresas, reduciendo costes y corrigiendo posibles errores del proyecto base, 2) el adjudicatario que puede obtener un razonable beneficio en un mercado deprimido, optimizando el diseño primero y construyendo después lo que se ha diseñado, 3) la sociedad que impulsa los procesos innovadores y reduce los costes económicos y ambientales de las obras, y 4) la comunidad técnica y científica que pone en valor los conocimientos para solucionar problemas técnicos y optimizar las obras.

Por otro lado, la licitación «sin variante» (muy frecuente en el pasado), puede generar conflictos entre la Administración promotora y el adjudicatario, ya sea por inadecuación entre lo proyectado y el proceso constructivo propuesto por el contratista, por posibles errores de proyecto, o por la disponibilidad de materiales para la ejecución de la obra; además de no permitir optimizar significativamente lo ya diseñado.

Finalmente, hay que resaltar que el futuro de las empresas constructoras pasa por competir eficazmente en el mercado internacional y para ello es necesario movilizar toda la capacidad disponible de innovación y eficiencia, facilitada por buenos proyectos base, licitaciones «con variante», tiempo suficiente para estudiar los proyectos y, en su caso, validación de las variantes con ensayos físicos. Estas condiciones permiten encontrar las mejores soluciones para reducir costes económicos y ambientales dentro del país y ganar competitividad internacional.

Al licitar diques «con variante», además del manto bicapa convencional de bloques paralelepípedicos o cúbicos, empleado en España desde el siglo XIX, entran en liza los mantos monocapa de piezas especiales (Accropode, Core-Loc, Xbloc, cubípodo, etc.), que desde los años 80 se han construido a cientos por todo el mundo y consumen mucho menos hormigón. El ahorro de hormigón de los mantos monocapa es tan relevante que puede compensar el mayor coste de los encofrados especiales y los bajos ritmos de producción de algunas piezas [4]. El cambio del tipo de pieza y número de capas, talud o berma de pie, puede generar ahorros económicos muy importantes. La validación con ensayos físicos es muy recomendable para garantizar los niveles de seguridad definidos en proyecto, sobre todo si la solución del proyecto base ha sido validada con ensayos físicos.

La figura 4 muestra algunas de las piezas descritas en [5] que se pueden utilizar en mantos monocapa (Accropode, Core-loc, Xbloc y cubípodo) y bicapa (cubo y cubípodo).

En este artículo se describen primero los ensayos físicos que sirvieron de base para el diseño de la variante de cubípodos y después se describe la construcción del dique Oeste.

2. Diseño de la solución variante de cubípodos del dique Oeste

El abrigo del dique principal del puerto exterior de A Coruña, terminado en 2011, provocó un desplazamiento de arenas hacia el interior del nuevo puerto que amenazaba la toma de agua de la central térmica de Sabón. En 2012 y 2013 se construyeron el dique sur y el dique norte con mantos monocapa de cubípodos de 15 t y 25 t [6], para frenar el basculamiento de la playa de Alba y proteger la toma de agua de la central térmica. Además de proteger la toma de agua, el dique sur (0,45 km) se proyectó con la sección y el trazado adecuado para constituir la fase 1.^a del futuro contradique del nuevo puerto. Así pues, las obras del dique Oeste (fase 2.^a) arrancan del dique sur (fase 1.^a) y completan el contradique del puerto con una longitud total de 1,35 km.

El proyecto base del dique Oeste definía una solución inicial típica en España con manto bicapa de cubos que se había optimizado y validado por el GEAMA (UDC) en el tanque del CITEEC (UDC). Este proyecto base se diseñó a nivel I y III [7], siguiendo las directrices de la ROM 1.0-09 [2]. Sobre esta solución inicial con bicapa de cubos de 25 t y 50 t, el concurso público admitía variantes en el manto (tipo y tamaño de las piezas), bermas y filtros, exigiendo la consiguiente validación con ensayos físicos similares.

La elección del tipo de pieza del manto principal condiciona el coste del dique; el uso del cubípodo permite reducir mucho el coste de construcción, tanto de los mantos bicapa de cubos (consumo de hormigón mucho menor) como de los mantos monocapa de piezas más esbeltas que resisten por trabazón (costes logísticos mucho menores). La Unión Temporal de Empresas (UTE) Dique Oeste formada por SATO, Dragados, Arias Hermanos y Drace, presentó una solución variante de cubípodos, debido a sus ventajas [8] respecto a otros tipos de piezas, entre las que destacan:

- (1) La elevada estabilidad hidráulica ($K_D(\text{tronco}) = 12$ monocapa y 28 bicapa) que permite ahorrar más de la mitad del consumo de hormigón de un manto convencional de bloques cúbicos. Comparado con piezas más esbeltas que resisten por trabazón, el consumo de hormigón es similar pero los costes logísticos son mucho menores.
- (2) La gran robustez de la pieza, superior a la del bloque cúbico convencional y muy superior a la de las piezas esbeltas, lo que permite no requerir un hormigón de tanta resistencia [8] y garantizar la integridad estructural reduciendo los costes de mantenimiento a largo plazo y la reutilización de cubípodos, como los recuperados de los diques norte y sur para ser reutilizados en el dique Oeste.
- (3) La reducción significativa del remonte del oleaje sobre el talud y el caudal de rebase respecto de los mantos convencionales de bloques cúbicos. Los factores de rugosidad de los mantos monocapa y bicapa de cubípodos son el 92 y 88% del correspondiente al manto convencional de cubos.
- (4) Se fabrican de manera muy eficiente utilizando el encofrado vertical articulado diseñado por SATO, con un ratio de



producción de 3,5 puestas/día (rendimiento máximo verificado en el parque de bloques del dique Oeste). Comparado con las piezas más esbeltas (una puesta/día y desplazamiento horizontal), los cubipodos requieren menos de la mitad de encofrados y áreas de producción mucho menores. La [figura 5](#) (izquierda) muestra la línea de producción con los encofrados verticales de cubipodos de 45 t.

- (5) Se pueden acopiar en el parque con diferentes disposiciones (porosidad entre el 30 y 50%), en niveles múltiples dependiendo del espacio disponible, similar a un parque de bloques cúbicos: requieren espacios de acopio mucho menores que las piezas más esbeltas. La [figura 5](#) (derecha) muestra el acopio a 5 alturas de cubípodos de 25 t.
- (6) Se manipulan con pinzas de presión (mayor seguridad del personal) y se colocan fácilmente de forma aleatoria en el manto, utilizando grúas convencionales con GPS diferencial y mallas de colocación tipo diamante (8 piezas/h). Comparados con mantos de cubos, los mantos de cubípodos garantizan la aleatoriedad del manto evitando el adoquinamiento. Comparados con mantos de piezas más esbeltas que resisten por trabazón, los cubípodos son mucho más fáciles de manipular y colocar en obra y no tienen limitación de profundidad (sin límite máximo de filas en talud) o problemas con asentamientos debido a su mayor resistencia estructural.

Para justificar el diseño final con cubípodos del dique Oeste, se realizó un diseño preliminar por analogía con la solución del proyecto base, el cual fue posteriormente validado con los correspondientes ensayos 3D a escala reducida. Los coeficientes de estabilidad del tronco en mantos bicapa de cubos y monocapa de cubípodos son $K_D=6,0$ y $12,0$ [9], respectivamente, por lo que el

manto monocapa de cubípodos de 25 t ($50 \times 6 / 12 = 25$) es suficiente para proteger tanto la primera y segunda alineación como el quiebro del dique Oeste. Esta solución que reduce drásticamente el consumo de hormigón y resiste oleajes superiores a los exigidos, permite reutilizar la mayoría de los cubípodos de 15 t y 25 t colocados en el dique norte y sur, los cuales quedan abrigados por el dique Oeste. Así mismo, los coeficientes de estabilidad del morro para mantos bicapa de cubos y cubípodos son $K_b = 5,0$ y $7,0$ [9], respectivamente, por lo que el manto bicapa de cubípodos de 36 t ($50 \times 5,0 / 7,0 = 36$) es suficiente para proteger el morro del dique Oeste. La solución variante de cubípodos fue validada en la misma instalación (CITEC) que la solución del proyecto base con modelos físicos a escala 1/51; los tamaños disponibles de los modelos de piezas cubípedo en el laboratorio, utilizados para la validación de la solución variante fueron equivalentes a cubípodos de 24 t y 42 t a escala prototipo.

La solución variante de cubípodos, optimiza la solución del proyecto base (figura 3), mediante un manto monocapa de cubípodos (H/V=1,5) de 25 t y 30 t en el tronco y quiebro, respectivamente, y manto bicapa de cubípodos de 45 t en el morro, con una bermá de pie de escollera de 4 t en toda su longitud. Esta solución ha propiciado grandes ahorros económicos (consumiendo la mitad de hormigón y reduciendo el presupuesto de ejecución del dique Oeste un 15,5%) y una ejecución de las obras sin incidencias significativas hasta la fecha [10]. La figura 6 muestra la sección tipo con manto monocapa de cubípodos de 25 t correspondiente a la primera alineación (tramo), quiebro (cubípodos de 30 t) y segunda alineación (tramo) de la solución variante del dique Oeste. La figura 7 muestra la sección tipo del morro con manto bicapa de cubípodos de 45 t. A continuación se describen los ensayos 3D del quiebro y morro que validan esta solución.

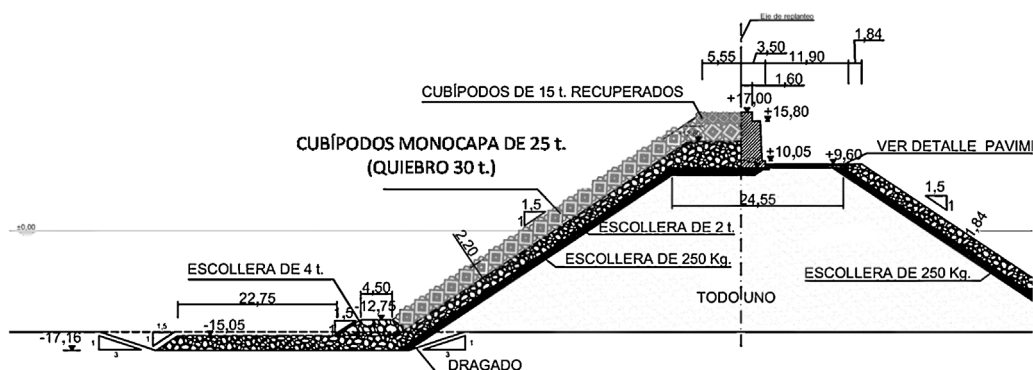


Figura 6. Sección tipo correspondiente al tronco y quiebro del dique Oeste en la solución variante (manto monocapa de cubípodos, cotas en metros). Fuente: UTE dique Oeste.

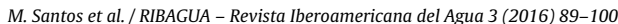


Figura 7. Sección tipo correspondiente al morro del dique Oeste en la solución variante (manto bicapa de cubípodos, cotas en metros). Fuente: UTE dique Oeste.

3. Ensayos 3D del dique Oeste

La variante de cubípodos se ensayó a escala 1/51 por el GEAMA (UDC) en el tanque del CITEEC (UDC), de 32,0x17,0x1,2 metros, con oleaje irregular unidireccional y con la semejanza de Froude. En los ensayos 3D de estabilidad hidráulica se alcanzaron oleajes superiores a los exigidos, correspondientes a periodos de retorno $T_R[\text{años}] > 200$ para ELS definido como daño $D\% = 1\%$ en el morro y $N_{od} = 0,5$ en el tronco (IA) y $T_R[\text{años}] > 5000$ para ELU definido como daño $= 10\%$ en el morro y $N_{od} = 4,5$ en el tronco (ID).

Las características de los modelos de cubípodos utilizados en los modelos físicos se muestran en la [tabla 1](#).

Donde W es la masa de la pieza, ρ es la densidad de la pieza, Δ es la densidad relativa sumergida ($\rho/\rho_w - 1$), ρ_w es la densidad del agua y $D_n = (W/\rho)^{1/3}$ es el lado del cubo equivalente. El cálculo del peso equivalente de las piezas del manto requiere considerar también el tipo de hormigón a escala prototipo y mantener los números de estabilidad ($N_s = H_s / [\Delta D_n]$) entre modelo y prototipo ($\rho = 2,35 \text{ t/m}^3$ y $\Delta = 1,29$). Los tamaños y masas de las piezas equivalentes a escala prototipo son:

Cubípodo de 187,2 g : $D_n = (4, 35 \times 1, 27/1, 29)$
 $\times 51/100 = 2,18 \text{ m}$; $W = 2,35 \times 2,183 = 24,3 \text{ t}$

Cubípodo de 313, 1 g : $D_n = (5, 16 \times 1, 28/1, 29)$
 $\times 51/100 = 2,61 \text{ m}$; $W = 2,35 \times 2,613 = 41,8 \text{ t}$

La **figura 8** muestra la planta del contradique con la fase 1.^a (dique sur) y la fase 2.^a (dique Oeste), así como una vista de los dos modelos ensayados, el modelo I para la zona del morro y tronco adyacente, y el modelo II para la zona del tronco correspondiente

Tabla 1
Características de los cubípodos del modelo físico a escala 1/51

W (g)	ρ (g/cm ³)	Δ	D _n (cm)
187,2	2,27	1,27	4,35
313,1	2,28	1,28	5,16

Fuente: elaboración propia.

al quiebro y alineaciones (tramos) primera y segunda. El objetivo principal de los ensayos de validación fue estimar la estabilidad hidráulica del manto principal y berma de pie en los modelos del tronco y morro, ensayando 8 modelos (4 del quiebro y 4 del morro) con altura de ola significativa creciente y manteniendo constante el periodo de pico y profundidad en cada modelo ($T_p(s)=15$ y 18 con $\Delta h(m)=0,0$ y 5,0). Además de medir los daños en el manto y berma de pie, se midieron los caudales de rebase y presiones en el espaldón en varios puntos, para verificar que tanto los rebases como la estabilidad del espaldón mejoraban respecto a la solución del proyecto base.

Las características de los ensayos fueron definidas por la autoridad portuaria de A Coruña en el pliego de condiciones particulares (PCP), estableciéndose dos niveles del mar ($\Delta h(m)=0,0$ y $5,0$), dos periodos de pico ($T_p(s)=15$ y 18) y ensayos con oleaje irregular (espectro JONSWAP, $\gamma=3,3$) con escalones crecientes de altura de ola significativa. Se lanzaron 1.500 olas para cada nivel energético (unas 6 h a escala prototipo), desde $H_s(m)=4,0$ hasta el fallo de la estructura o superar el valor de H_s del oleaje de diseño establecido (ELU).

Las características del oleaje de diseño se establecieron como inicio de averías (ELS) e inicio de destrucción (ELU) en los cuatro tramos del dique: 1) primera alineación (tramo) del tronco, 2) quiebro, 3) segunda alineación (tramo) del tronco y 4) morro. Las alturas de ola significante máximas ensayadas debían ser superiores a los valores de altura de ola de diseño definidos en la [tabla 2](#).

La [tabla 3](#) muestra los niveles de daño admisibles a IA (ELS) e ID (ELU) en el manto principal (tronco y morro) y en la berma de pie, establecidos en el PCP, siendo $D\%$, el porcentaje de piezas desplazadas y N_{od} , el daño relativo, definido como el número de unidades extraídas del manto dentro de una banda vertical de ancho D_n , que se extiende desde la parte inferior del manto hasta la parte superior.

En los mantos monocapa y bicapa de cubípodos, el IA se alcanza cuando unos pocos cubípodos aislados son extraídos creando huecos que se autorreparan, por lo que el daño local no progresa al elevarse H_5 [11]. En general, $N_{od}=0,5$ es un nivel razonable para el IA del tronco (recto y curvo) y coincide con el especificado en el PCP. Este valor también es razonable para el morro de cubípodos; no obstante, el PCP especificaba como criterio de IA el porcentaje de daños $D\%=1\%$. El ELU (rotura o destrucción) se corresponde con

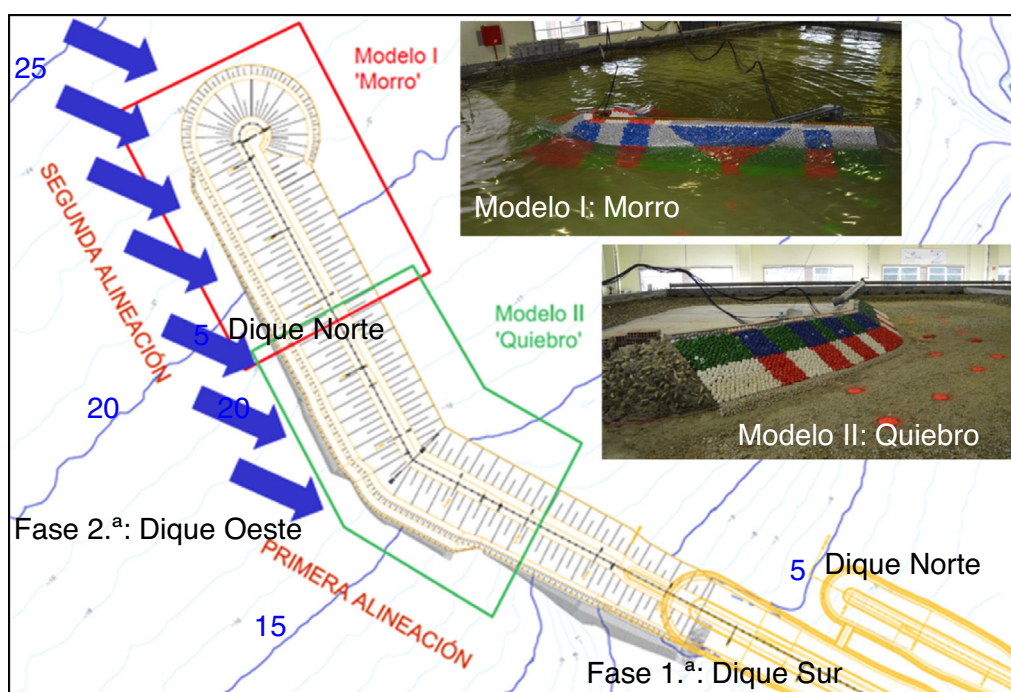


Figura 8. Planta del contradique (fases 1.ª y 2.ª) y vista de los modelos I (morro) y II (quiebro). Fuente: elaboración propia y GEAMA (UDC).

Tabla 2

Oleajes de diseño del manto principal y berma de pie para los cuatro tramos del dique Oeste

Localización	Modo de fallo	Nivel de daño	H _s (m) prototipo	Oblicuidad
Morro	Manto	ELS (IA)	5,15	40°
		ELU (ID)	5,85	
	Berma de pie	ELS (IA)	6,50	
		ELU (ID)	7,00	
Tronco: 2.ª alineación (tramo)	Manto	ELS (IA)	6,75	45°
		ELU (ID)	8,25	
	Berma de pie	ELS (IA)	7,50	
		ELU (ID)	8,75	
Quiebro	Manto	ELS (IA)	6,75	45°
		ELU (ID)	8,75	
	Berma de pie	ELS (IA)	7,50	
		ELU (ID)	9,00	
Tronco: 1.ª alineación (tramo)	Manto	ELS (IA)	6,75	83°
		ELU (ID)	8,75	
	Berma de pie	ELS (IA)	7,50	
		ELU (ID)	9,00	

Fuente: elaboración propia.

el inicio de destrucción (ID), cuando se produce la extracción de varios cubípodos próximos entre sí, creando huecos grandes que ya no se autorreparan con facilidad, por lo que el daño local progresa al elevarse H_s, amenazando con erosionar el manto secundario y provocar la rotura del dique. Si el manto de cubípodos es bicapa, para alcanzar el ID hay que medir un N_{od} muy elevado (×10) ya que debido a la capacidad de autorreparación de los cubípodos, es

Tabla 3

Niveles de daño admisibles a inicio de averías y destrucción

Localización	Daño	ELS (IA)	ELU (D)
Manto morro	D% =	1%	10%
Manto tronco	N _{od} =	0,5	4,5
Berma de pie	N _{od} =	1,0	3,0

Fuente: elaboración propia.

necesario que una buena parte de la capa superior del manto sea extraída antes de poder erosionar la capa inferior.

3.1. Ensayos 3D del modelo I «morro»

En el modelo I se ensayó el morro y 0,25 km del tronco de la segunda alineación. Este modelo se sometió a un oleaje irregular unidireccional con 40° de oblicuidad. Referido a BMVE, la profundidad variaba desde la h=22 m en el morro hasta h=19 m en el tronco. En el caso del morro, las condiciones de licitación exigían una protección bicapa en el morro y el tronco adyacente (hasta una longitud de 75 m); como el tronco se protegía con un manto monocapa, era necesario además diseñar una transición monocapa-bicapa y validarla en el ensayo. El ensayo de validación se realizó con la siguiente configuración: talud H/V=1,5/1, berma de pie de escollera de 4 t coronada a la cota -15 m en toda la traza, manto monocapa de cubípodos de 24 t en el tronco (con berma de coronación formada por dos capas, la primera de cubípodos de 24 t y la segunda de cubípodos recuperados de 15 t del dique norte y sur), manto bicapa de cubípodos de 24 t en el morro y en los 75 m de tronco adyacentes (con berma de coronación del manto bicapa formada por dos capas de cubípodos de 24 t).

La figura 9 muestra el morro bicapa y la transición entre los mantos monocapa y bicapa de cubípodos, con objeto de mantener homogéneo el perfil exterior del manto principal neutralizando el cambio relevante de espesor del manto. En la zona de manto monocapa, antes de llegar a la transición, la capa de filtro aumenta de espesor progresivamente hasta alcanzar el valor equivalente al aumento de espesor del manto; en ese punto, se define un trapecio invertido en el que se detiene el avance en cuña del manto monocapa (sobre capa de filtro de espesor máximo) y se coloca en cuña inversa el manto bicapa (sobre capa de filtro de espesor normal). Una vez enfrentadas las dos cuñas con mantos monocapa y bicapa, se aumenta la capa de filtro en el trapecio de transición y finalmente se avanza con la cuña monocapa apoyándose en la cuña bicapa. De ese modo, se apoya siempre la escollera sobre cubípodos y se consigue la continuidad del talud exterior del manto.



Figura 9. Modelo I «morro», vista del morro bicapa y de la transición monocapa-bicapa de cubípodos de 24 t. Fuente: GEAMA (UDC).

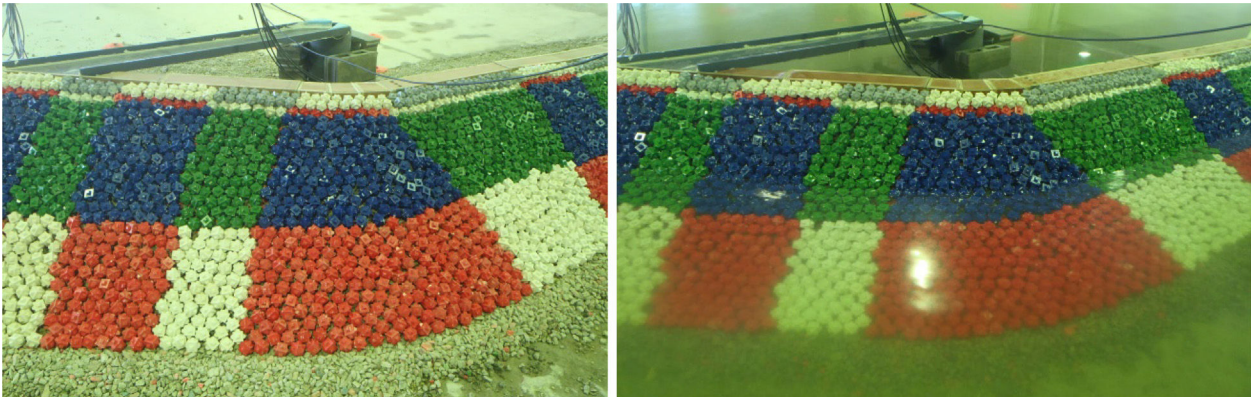


Figura 10. Modelo II «quiebro» con manto monocapa de cubípodos de 24 t, recién construido y tras el ataque del temporal $H_s(m)=9,2$ y $T_p(s)=18$ en pleamar viva equinocial ($\Delta h(m)=+5,0$). Fuente: GEAMA (UDC).

En los ensayos del morro en BMVE ($\Delta h(m)=0,0$), se produjo el IA (ELS) en el morro para $H_s[m]>6,2$ y el ID (ELU) para $H_s[m]>7,1$, valores muy por encima de los establecidos en el PCP de la licitación, llegando los ensayos hasta el escalón $H_s(m)=8,2$ en el morro y $9,2$ en el tronco. En los ensayos en pleamar ($\Delta h(m)=5,0$), también se superaron los valores de H_s definidos por el pliego para IA e ID, produciéndose el IA en el morro para $H_s(m)>5,1$ y el ID para $H_s(m)>7,6$. Una vez alcanzado el ID todos los ensayos continuaron aumentando la H_s hasta alcanzar el fallo ($D>10\%$) del morro y del tronco adyacente, llegando los ensayos hasta el escalón de $H_s(m)=8,0$ en el morro y $H_s(m)=9,3$ en la 2.ª alineación del tronco (transición monocapa-bicapa), sin producirse daños ($N_{od}=0$). El modelo I resistió por encima de los ELS y ELU fijados para este tramo de la obra.

3.2. Ensayos 3D del modelo II «quiebro»

En el modelo II se ensayó el cambio de alineación del dique Oeste, el modelo reprodujo 0,23 km de la primera alineación, el quiebro y 0,20 km de tronco de la segunda alineación. Variando la profundidad desde $h=13$ m hasta $h=19$ m, se ensayó un manto monocapa de cubípodos de 24 t con berma de pie de escollera de 4 t en toda la traza y berma de coronación de dos capas, la primera con cubípodos de 24 t y la segunda con cubípodos reutilizados de 15 t de los diques norte y sur.

La figura 10 muestra la zona más solicitada del manto monocapa (quiebro), antes de los ensayos y después del temporal caracterizado por $H_s(m)=9,2$, $T_p(s)=15$ y 18 y $\Delta h(m)=0,0$ y $5,0$; no se observan diferencias entre ambas imágenes ya que no se produjeron daños. En los ensayos del quiebro en bajar y en pleamar superaron ampliamente los valores de altura de ola significante definidos por el PCP para IA e ID en todos los tramos, sin daños ($N_{od}=0$) para $H_s(m)=9,2>8,75$. El modelo II «quiebro», se ensayó

hasta alturas de ola muy por encima del ELU establecido, para observar los posibles puntos débiles de la estructura. El modelo ensayado con manto monocapa de cubípodos de 24 t mostró una elevada estabilidad hidráulica, que resistió sin daños relevantes hasta el límite de los equipos de generación $H_s(m)=11,1>8,75$ (ELU).

La tabla 4 muestra los niveles de daño en el manto y la berma para los máximos temporales de cálculo (ELS y ELU) y los resultados integrados de todos los ensayos. El nivel de daño más importante es el ELU que, de acuerdo con la ROM 0.1-09, es con el que debe verificarse la seguridad de la estructura.

Tabla 4
Niveles de daño admisibles a inicio de averías y destrucción

Pleamar y bajar con $T_p[s]=15$ y 18			
Localización	Modo fallo	Nivel daño	H_s [m] prototipo
Morro	Manto	ELS	5,2; 6,3; 6,8; 6,8
		ELU	7,2; 7,3; 7,7; 7,8
	Berma	ELS	Todos > 9,5
		ELU	Todos > 9,5
Tronco, segunda alineación (tramo)	Manto	ELS	Todos > 9,6
		ELU	Todos > 9,6
	Berma	ELS	Todos > 9,5
		ELU	Todos > 9,5
Quiebro	Manto	ELS	Todos > 9,6
		ELU	Todos > 9,6
	Berma	ELS	Todos > 9,5
		ELU	Todos > 9,5
Tronco, primera alineación (tramo)	Manto	ELS	Todos > 9,6
		ELU	Todos > 9,6
	Berma	ELS	Todos > 9,5
		ELU	Todos > 9,5

Fuente: elaboración propia.

En los ensayos realizados en ambos modelos se alcanzaron oleajes superiores a los exigidos, correspondientes a periodos de retorno $T_R[\text{años}] > 200$ para ELS ($D=1\%$ en el morro y $N_{od}=0,5$ en el tronco) y $T_R[\text{años}] > 5.000$ para ELU ($D=10\%$ en el morro y $N_{od}=4,5$ en el tronco). Además, durante los ensayos se comprobó la elevada estabilidad hidráulica de la berma de pie de escollera de 4 t y se midió el rebase y las presiones sobre el espaldón, verificándose que los caudales de rebase ($q < 1$ l/s/m para ELS y $q < 10$ l/s/m para ELU) y la estabilidad del espaldón ($P_f=0,01$) mejoraban comparados con los del proyecto base.

Para tener un prototipo equivalente (del lado de la seguridad) a los modelos de cubípodos ensayados por el GEAMA-UDC (escala 1/51), la variante podía construirse con cubípodos de 25 t (encontrados de 10,6 m³) en todos los tramos y secciones, excepto en los cuadrantes 1.º y 2.º de la capa superior del morro, donde se utilizarían cubípodos de 45 t (encontrados de 19,1 m³), piezas algo mayores que las utilizadas en el modelo de cubípodos ensayado. Se concluye que, en la variante presentada, tanto la berma de escollera de 4 t como el manto monocapa de cubípodos de 25 t (10,6 m³) en

el tronco recto del dique y 30 t (12,8 m³) en el quiebro, como el manto bicapa de cubípodos de 25 t (10,6 m³) en los últimos 75 m del tronco y 45 t (19,1 m³) en el morro, cumplen ampliamente las especificaciones de validación definidas en el PCP.

4. Construcción del dique Oeste

El dique sur (fase 1.^a del contradique) estaba protegido por un manto monocapa de cubípodos de 15 t y 25 t en tronco y de 25 t en morro que se ha desmontado en buena parte para reutilizar los cubípodos en el dique Oeste (fase 2.^a). La construcción del dique Oeste se ha caracterizado por la reutilización de 1.360 cubípodos de los diques norte y sur, que han quedado abrigados por el nuevo dique Oeste. A partir del dique sur (0,45 km) que alcanzó los 8,3 m de profundidad, se ha completado el contradique (1,35 km) hasta los 22 m de profundidad. Las obras se iniciaron en abril de 2015 (parque de bloques) y el manto del contradique se completó (excepto remates) en diciembre de 2015.

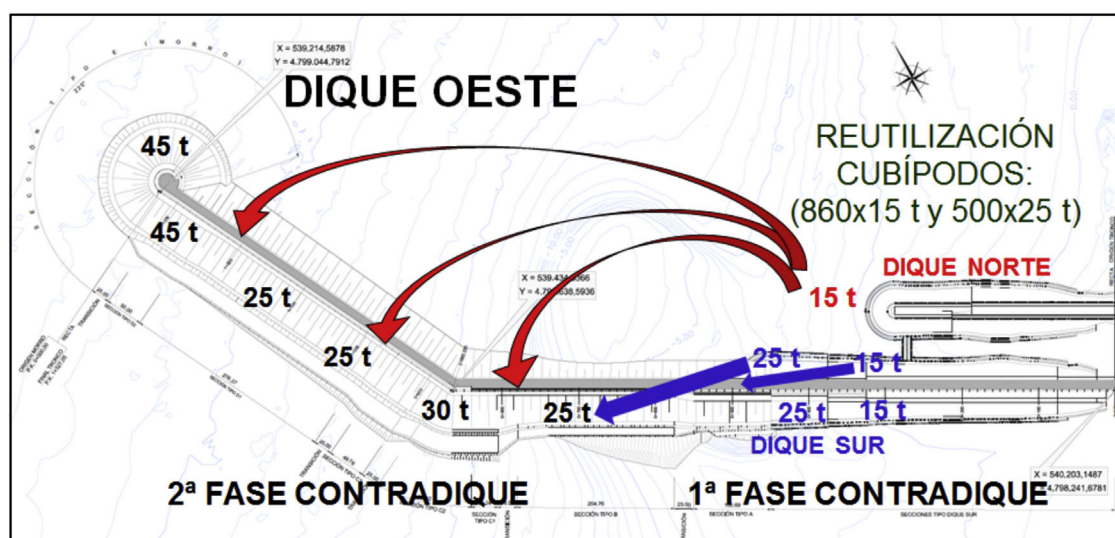


Figura 11. Reutilización de cubípodos en el dique Oeste. Fuente: elaboración propia.



Figura 12. Vista aérea del parque de cubípodos del dique Oeste (29/05/2015). Fuente: UTE dique Oeste.



Figura 13. Vista de la transición monocapa-bicapa de cubípodos de 25 t (1/10/2015). Fuente: elaboración propia.

La [figura 11](#) muestra una planta del contradique indicando los movimientos de reutilización de cubípodos de los diques norte y sur. En total, 500 cubípodos de 25 t y 860 cubípodos de 15 t están siendo reutilizarlos en el dique Oeste. Los cubípodos de 25 t se recuperaron del morro y trasdós del dique sur y se han utilizado en la primera alineación del dique Oeste. Los cubípodos de 15 t se han recuperado del dique norte y del trasdós del dique sur, y se colocarán en la coronación del nuevo dique, donde la solicitud es menor, cuando se haya completado el espaldón (verano de 2016).

En el parque de bloques se han fabricado 6.760 nuevos cubípodos de 25 t, 30 t y 45 t, para lo cual se dispuso de un andén elevado y muelle de hormigonado por el que circulaban los camiones para que llegaron a verter una media de 1.100 m³/día en los meses de máxima producción. Se utilizaron 14, 5 y 6 encofrados verticales para fabricar los cubípodos de 25, 30 y 45 toneladas, respectivamente, con 3,5 bases/encofrado. Se desencofraba a las 6 h, produciendo una media de 3,5 cubípodos por encofrado vertical y día, en ciclos de trabajo de 24 h/día. La fabricación se intensificó en los meses de mayo a julio de 2015 y el acopio de piezas se realizó hasta 5 alturas.

La [figura 12](#) muestra una vista aérea del parque de bloques del dique Oeste con los primeros cubípodos de 30 t y 45 t fabricados

y acopiados (inferior-izquierda) y el acopio principal de cubípodos de 25 t a 5 alturas (superior-derecha), optimizando el parque; se observan las zanjas realizadas en el terreno para el apoyo de la primera capa de cubípodos. La [figura 5](#) (izquierda) muestra la línea de producción con los encofrados de cubípodos de 45 t, el izado de un encofrado vertical (6 h desde hormigonado) y cubípodos esperando en las bases a cumplir las 24 h desde su hormigonado para ser trasladados al acopio; la [figura 5](#) (derecha) muestra el acopio a 5 alturas de cubípodos de 25 t.

La transición de manto monocapa a bicapa de cubípodos se realiza internamente aumentando el grosor del filtro en el tramo de tronco próximo al morro, para mantener la continuidad y homogeneidad del talud externo del dique. La [figura 13](#) muestra la transición monocapa bicapa de cubípodos de 25 t y la [figura 14](#) el aspecto exterior del dique Oeste en construcción.

La [figura 15](#) muestra una vista aérea del dique Oeste con el manto de cubípodos finalizado, a falta de construir el espaldón. Las obras se han desarrollado sin incidencias relevantes siguiendo el plan previsto. Aunque falta el espaldón y terminar la coronación del dique, el contradique está protegido frente a los temporales ordinarios y la dársena del puerto ya está correctamente abrigada. El espaldón y la coronación del dique está previsto realizarlo en la temporada estival de 2016.



Figura 14. Aspecto exterior del dique Oeste en construcción (1/10/2015). Fuente: elaboración propia.



Figura 15. Vista aérea de del dique Oeste (15/01/2016).). Fuente: UTE dique Oeste.

5. Conclusiones y discusión

El dique de abrigo principal del puerto exterior de A Coruña en Punta Langosteira (España) se terminó en 2011; el abrigo del puerto se ha completado con el contradique de 1,35 km, construido en dos fases: 1) el dique sur (fase 1.^a) de 0,45 km de longitud construido en 2012 y 2) el dique Oeste (fase 2.^a) que continúa la traza del dique sur hasta alcanzar 1,35 km y una profundidad de 22 m en BMVE. El dique Oeste se ha terminado en 2015, a excepción del espaldón y coronación del dique que está previsto que se complete en el verano de 2016.

El proyecto base del dique Oeste, diseñado a nivel I y III y validado con ensayos físicos, propuso un dique tradicional con berma de pie y manto bicapa de bloques cúbicos. Una vez optimizada y validada la solución inicial del proyecto base con ensayos físicos, la autoridad portuaria de A Coruña sacó las obras a licitación «con variante», pudiendo las ofertas proponer cambios en el talud, tipo de pieza, número de capas (excepto el morro que tenía que ser bicapa), berma de pie, etc., que también debían ser validadas con los correspondientes ensayos físicos. La licitación «con variante» ha permitido proponer alternativas de diseño que reducen considerablemente los costes de construcción y el impacto ambiental, mejorando al mismo tiempo la seguridad y funcionalidad de la obra.

Siguiendo las directrices de diseño y validación impuestas por el PCP y las condiciones de la licitación «con variante», en este artículo se describe la solución ganadora de cubípodos. Además, este proyecto destaca ambientalmente por la reutilización de 1.360 cubípodos procedentes del dique norte y dique sur. El desarrollo del proyecto y ejecución del dique Oeste es un ejemplo de cómo la licitación «con variante» permite obtener grandes ahorros económicos (reducción del presupuesto de ejecución del dique Oeste

del 15,5%) y ambientales (reducción del consumo de hormigón del 50%), frente a la licitación «sin variante».

Resulta especialmente novedosa la construcción de una transición monocapa-bicapa cerca del morro para mantener la homogeneidad de la superficie exterior del manto, manteniendo el avance en cuña y el criterio de apoyar siempre las piezas pequeñas sobre las grandes. Todo el diseño del dique Oeste ha sido validado a escala reducida 1/51 con ocho ensayos físicos 3D desarrollados por el GEAMA (UDC) en el tanque del CITEEC (UDC), con dos modelos diferentes: 1) modelo I para la zona del morro y tronco adyacente (incluida transición) y 2) modelo II para la zona del tronco correspondiente al quiebro y alineaciones primera y segunda. Estos modelos han resistido muy por encima de los estados límites establecidos, $H_s[m]=6,75$ y $8,75$ en el quiebro para ELS (IA) y ELU (ID), respectivamente.

La construcción del dique Oeste se empezó en abril de 2015 y, a excepción del espaldón y la coronación del dique, se terminó en diciembre de 2015. En el parque de bloques se han fabricado 6.700 nuevos cubípodos de 25, 30 y 45 toneladas, en ciclo de trabajo de 24 h/día, con un consumo de hormigón que ha alcanzado los 1.100 m³/día. Se han fabricado una media de 3,5 cubípodos/encofrado vertical y día, desmoldando a las 6 h y trasladando los cubípodos al parque de almacenamiento a las 24 h. La construcción se ha desarrollado con la programación prevista sin incidencias reseñables.

Agradecimientos

Los autores agradecen la información suministrada por la autoridad portuaria de A Coruña, la UTE Dique Oeste (SATO, Dragados, Arias Hermanos y Drace) y el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA) de la Universidade da Coruña (UDC).

Bibliografía

- [1] Burcharth HF, Maciñeira E, Noya F. Design, construction and performance of the main breakwater of the new outer port at Punta Langosteira, A Coruña, Spain. En: Kim YC, editor. *Design of Coastal Structures and Sea Defenses*. World Scientific; 2015. p. 23–76.
- [2] ROM 1.0-09 (2009). ROM 1.0-09 Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo. (Parte 1ª. Bases y factores para el proyecto. Agentes climáticos). Puertos del Estado. Ministerio de Fomento, Gobierno de España. 708 pp.
- [3] Gutiérrez-Serret R, Grassa-Garrido JM. Diseño, construcción y explotación de diques de abrigo portuario en España desde finales del siglo XX. *RIBAGUA-Revista Iberoamericana del Agua* 2015;2(2015):80–96.
- [4] Medina JR, Vidal C. Diseño y construcción de diques rompeolas. *Ingeniería del Agua, IWA Publishing-Editorial UPV* 2014;18.1(2014):28–37.
- [5] Dupray S, Roberts J. Review of the use of concrete in the manufacture of concrete armour units. *Proc. of Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2009*, Institution of Civil Engineers (ICE), Thomas Telford Ltd., 2009; Vol. 1, pp. 245–259.
- [6] Corredor A, Santos M, Peña E, Maciñeira E, Gómez-Martín ME, Medina JR. Single-layer Cubipod armored breakwaters in Punta Langosteira (Spain). *Proc. of 34th International Conference on Coastal Engineering*. ASCE 2014;34(2014):12, structures.
- [7] Maciñeira E, Peña E, Bajo V, Sande J, Noya F. Probabilistic design of the secondary breakwater in the new harbour basin of the outer port of A Coruña. *Proc. Coastal Structures and Solutions to Coastal Disasters Joint Conference*, ASCE 2015, 9–11 Sep. 2015, Boston-Mass. (en prensa).
- [8] Medina JR, Gómez-Martín ME. Manual del Cubípodo® 2015. Valencia: Universitat Politècnica de València; 2015. DOI: <http://hdl.handle.net/10251/5387>
- [9] Medina JR, Gómez-Martín ME. K_D and safety factors of concrete armor units. *Coastal Engineering Proceedings* 2012;1(33):29, structures.
- [10] Santos M, Corredor A, Maciñeira E, Gómez-Martín ME, Medina JR. Diseño y construcción del contradique de Cubípodos en el Puerto exterior de A Coruña en Punta Langosteira. Avilés, Asturias: Libro de Ponencias de las XIII Jornadas Españolas de Costas y Puertos; 2015, 24–25 Jun. 2015, (ISBN 978-84-608-4359-7).
- [11] Gómez-Martín ME, Peña E, Sande J, Figuero A, Castro A, Medina JR. Ensayos físicos 3D de la variante con cubípodos del dique Oeste del puerto exterior de A Coruña en Punta Langosteira. Avilés, Asturias: Libro de Ponencias de las XIII Jornadas Españolas de Costas y Puertos; 2015, 24–25 Jun. 2015, (ISBN 978-84-608-4359-7).