

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DIQUE OESTE EN EL PUERTO EXTERIOR DE A CORUÑA EN PUNTA LANGOSTEIRA (ESPAÑA)

M. Santos¹, A. Corredor¹, E. Maciñeira², M.E. Gómez-Martín³, J.R. Medina⁴

¹SATO (Grupo OHL), Paseo de la Castellana 259-D, 28046 Madrid, mo.santos@ciccp.es, acorred@ohl.es

²Autoridad Portuaria de A Coruña, Avda. de la Marina 3, 15001, A Coruña. emacine@puertocoruna.com

³Universidad de Alicante, Carretera San Vicent del Raspeig s/n, 03690 Alicante, esther.gomez@ua.es

⁴Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, jrmedina@upv.es

RESUMEN

En este artículo se describe el proceso de diseño y construcción del Dique Oeste (contradique) del Puerto Exterior de A Coruña en Punta Langosteira. El dique Oeste, actualmente en construcción, tiene la función de completar el abrigo ofrecido por el dique principal del Puerto Exterior de A Coruña en Punta Langosteira para garantizar una elevada operatividad de las nuevas instalaciones portuarias. El contradique tiene una longitud de 1,35 km y está protegido por un manto monocapa de Cubípodos de 25 t y 30 t en el tronco y un manto bicapa de Cubípodos de 45 t en el morro. La profundidad en el morro es de 22 m y la carrera de marea es de 5,0 m. La licitación de la obra admitiendo variantes al Proyecto Base del concurso público ha permitido en la fase de licitación plantear el posible uso de diferentes tipos de piezas y finalmente la utilización de Cubípodos en el manto principal. Esta solución variante de Cubípodos resiste temporales superiores a los estados límite definidos, $H_s=8,75$ m en tronco, reduciendo 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 para justificar la solución del Proyecto Base. En el Dique Oeste se han reutilizado 1.360 Cubípodos de 15 t y 25 t de los mantos de los diques Norte y Sur que han quedado abrigados por el nuevo Dique Oeste y se ha construido una transición monocapa-bicapa, con cuñas opuestas de colocación y 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.

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 1ª, correspondiente al Dique Sur de 0,45 km de longitud construido en 2012, y la fase 2ª, correspondiente al Dique Oeste que continúa la traza del Dique Sur hasta alcanzar 1,35 km y una profundidad $h=22$ m (BMVE) en el morro, con carrera de marea $\Delta h(m)=5$. El contradique se extiende a lo largo de dos alineaciones, una primera alineación de unos 0,85 km y orientación ESE-WNW, y una segunda alineación de unos 0,50 km con alineación SSE-NNW.



Figura 1. Planta del Puerto Exterior de A Coruña en Punta Langosteira

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 $T_p=18$, 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. La figura 2 muestra uno de los casos típicos de agitación del puerto con oleaje del NW.

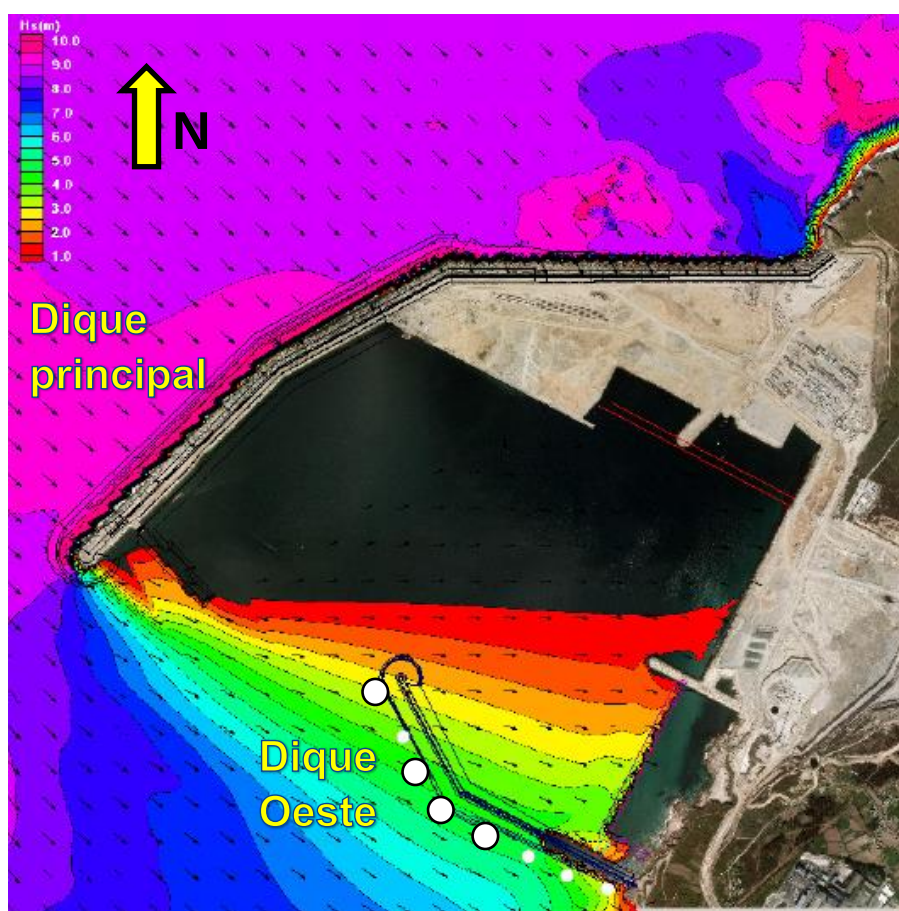


Figura 2. Contradique afectado por la difracción del oleaje en el dique principal.

Para el diseño inicial del contradique (Niveles de diseño I y III) se aplicaron los criterios de la ROM 1.0-09 [2] en cuatro tramos diferentes del dique: (1) Primera alineación, (2) Quiebro, (3) Segunda alineación y (4) Morro (ver figuras 2 y 6). 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

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), tiende a generar conflictos entre la Administración promotora y el adjudicatario por los errores de proyecto y no permite optimizar significativamente lo ya diseñado; la depresión del mercado de la construcción agrava la situación, empujando algunos licitadores a realizar ofertas económicas muy bajas que, sin modificaciones relevantes, se traducen en pérdidas o beneficios muy pequeños que explican en parte la quiebra económica de algunas empresas relevantes del sector en los últimos años. 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, que no se moviliza si siguen siendo frecuentes las licitaciones “sin variante”. En resumen, hacer buenos proyectos base y licitar “con variante”, con tiempo suficiente para estudiar los proyectos y, en su caso, validar las variantes con ensayos físicos, es la mejor forma de reducir costes económicos y ambientales dentro del país y ganar competitividad internacional.

En el caso del Puerto Exterior de A Coruña, todas las obras recientes de diques se han licitado “con variante”, tanto el Dique Norte y Dique Sur (fase 1ª del contradique) en 2012, como el Dique Oeste (fase 2ª del contradique) en 2014. En los dos concursos públicos, la solución variante ganadora fue la diseñada con mantos principales de Cubípodos. Manto monocapa en tronco y morro para los diques Norte y Sur y manto monocapa en tronco y bicapa en morro para el Dique Oeste; en los tres diques se consiguieron grandes ahorros económicos y ambientales. La solución variante de Cubípodos del Dique Oeste, optimiza la solución del Proyecto Base mediante un manto monocapa de Cubípodos ($H/V=1,5$) de 25 t y 30 t en tronco y quiebro, respectivamente, y manto bicapa de Cubípodos de 45 t en el morro, con berma de pie de escollera de 4 t. Esta solución ha propiciado grandes ahorros económicos (consumiendo la mitad de hormigón en el manto) y una ejecución de las obras sin incidencias significativas hasta la fecha [4]. Además, como los diques Sur y Norte, ejecutados en 2012 y 2013, quedan abrigados por el nuevo contradique, la mayoría de los Cubípodos de 15 t y 25 t de los mantos de estos diques se reutilizan en el manto del Dique Oeste.

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, Xboc, 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 [5]. El cambio del tipo de pieza y número de capas, del talud o de la 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.

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 1ª del futuro contradique del nuevo puerto. Así pues, las obras del Dique Oeste arrancan del Dique Sur (fase 1ª) y completan el contradique del puerto con una longitud total de 1,35 km, hasta alcanzar una profundidad de $h=22$ m en el morro.

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 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 no requieren un hormigón de tanta resistencia, reduciéndose costes de fabricación e incrementando la viabilidad constructiva y la fiabilidad a largo plazo.
- (2) la gran robustez de la pieza y tendencia a la auto-colocación aleatoria en el talud, lo que permite garantizar la integridad estructural (con hormigón de $f_{ck}=30$ MPa se pueden fabricar Cubípodos de hasta $W[t]=140$), permitiendo reducir 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 y el 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 3,5 puestas/día (rendimiento máximo verificado en el parque de bloques del Dique Oeste). Comparado con las piezas más esbeltas (1 puesta/día y desplazamiento horizontal), los Cubípodos requieren menos de la mitad de encofrados y áreas de producción mucho menores.
- (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.
- (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 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 25 t colocados en el Dique Sur, el cual queda integrado y abrigado por el Dique Oeste. Así mismo, los coeficientes de estabilidad del morro para mantos bicapa de cubos y Cubípodos son $K_D=5,0$ 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 (CITEEC) que la solución del Proyecto Base con modelos físicos a escala 1/51; los tamaños disponibles de los modelos de piezas Cubípodo 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 (ver 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 berma de pie de escollera de 4 t en toda su longitud. La figura 4 muestra la sección tipo con manto monocapa de Cubípodos de 25 t correspondiente a la primera alineación, quiebro y segunda alineación de la solución variante del Dique Oeste. La figura 5 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.

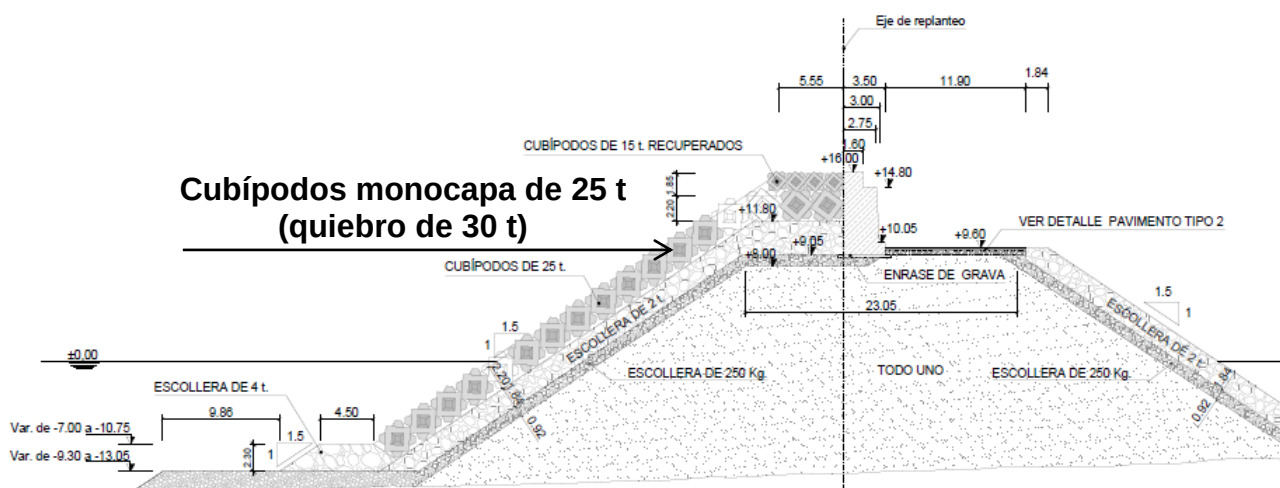


Figura 4. Sección tipo correspondiente al tronco y quiebro del Dique Oeste en la solución variante (manto monocapa de Cubípodos, cotas en metros).

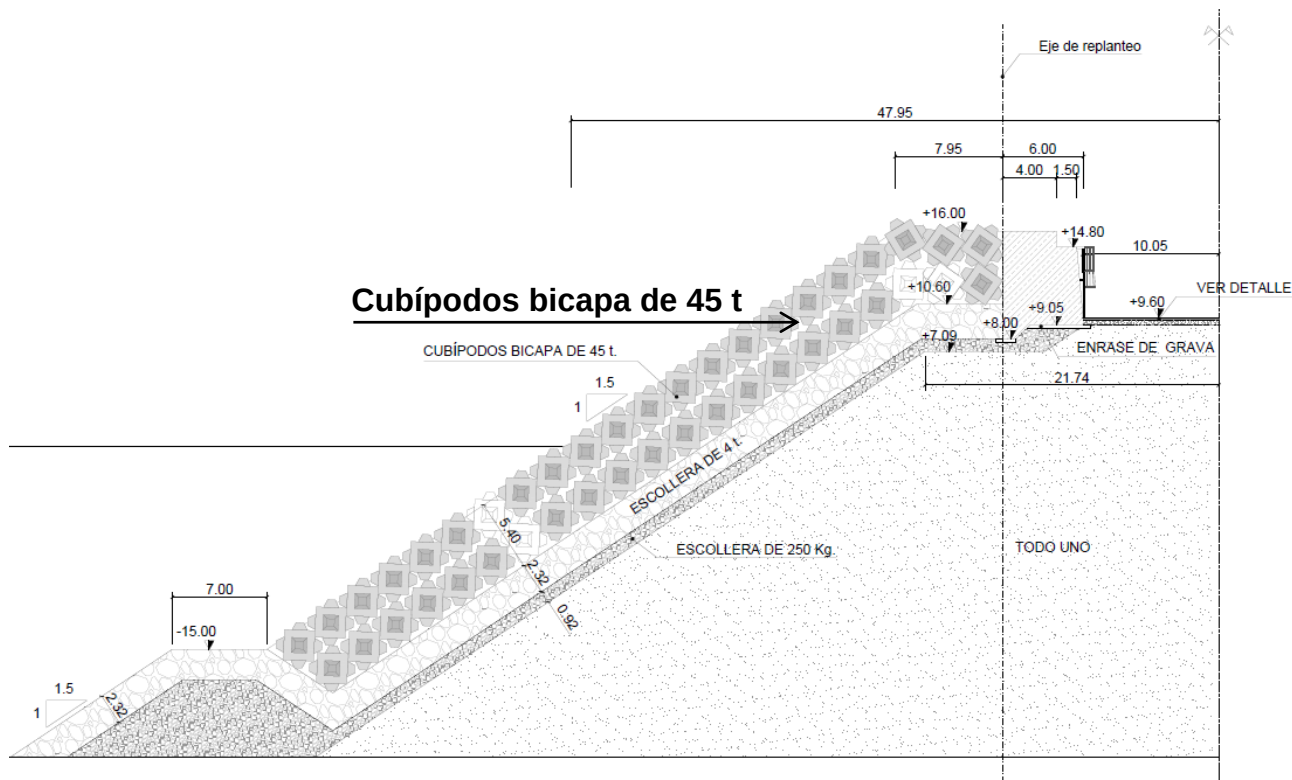


Figura 5. Sección tipo correspondiente al morro del Dique Oeste en la solución variante (manto bicapa de Cubípodos, cotas en metros).

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. 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).

La figura 6 muestra la planta del contradique con la fase 1ª (Dique Sur) y la fase 2ª (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 al quiebro y alineaciones 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.

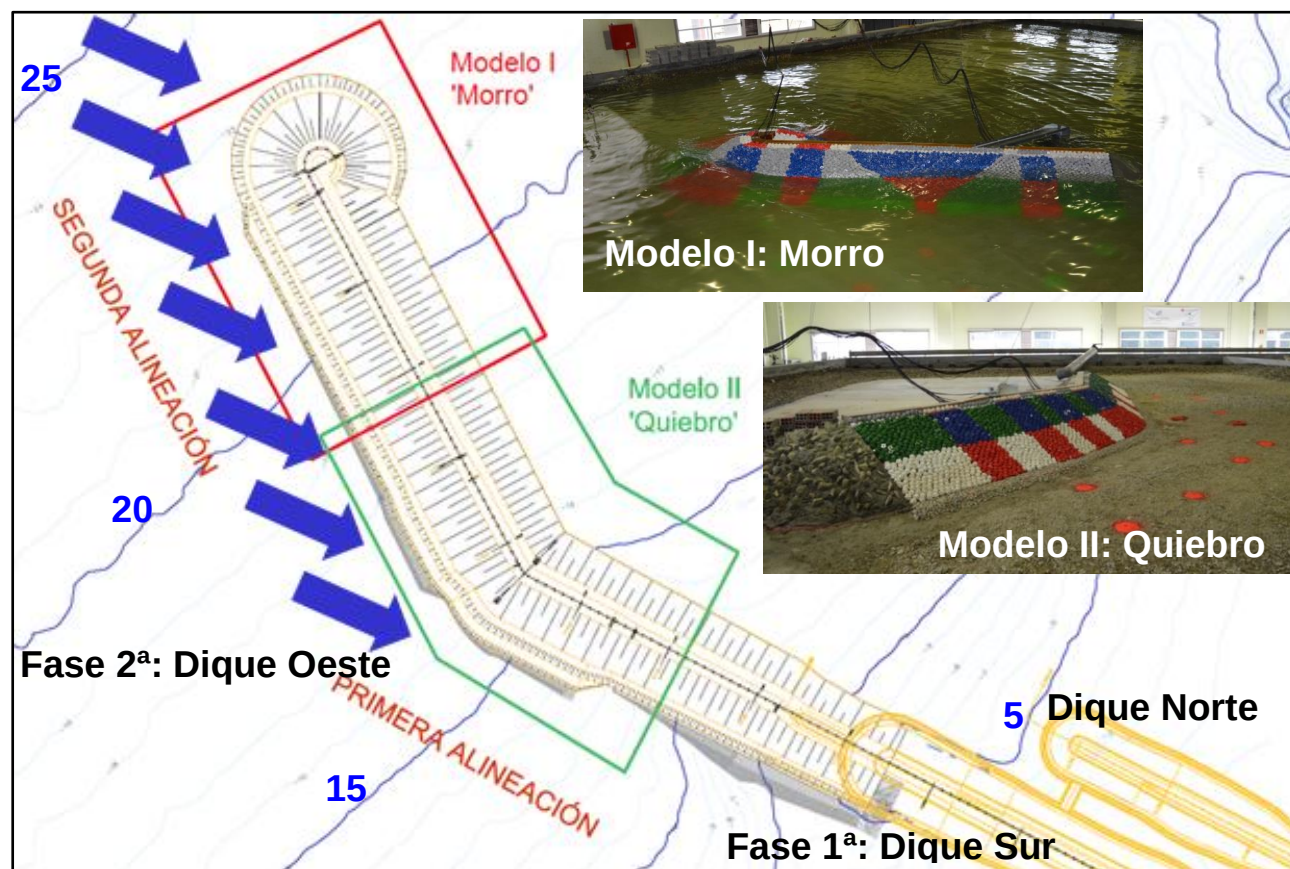


Figura 6. Planta del contradique (Fases 1ª y 2ª) y vista de los Modelos I (morro) y II (quiebro).

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 horas 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 del tronco, (2) Quiebro, (3) Segunda alineación del tronco y (4) Morro. Las alturas de ola significativa máximas ensayadas debían ser superiores a los valores de altura de ola de diseño definidos en la Tabla 1. La Tabla 2 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.

Tabla 1. 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: 2ª alineación	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: 1ª alineación	manto	ELS (IA)	6,75	83°
		ELU (ID)	8,75	
	berma de pie	ELS (IA)	7,50	
		ELU (ID)	9,00	

Tabla 2. 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

En los mantos monocapa y bicapa de Cubípodos, el IA se alcanza cuando unos pocos Cubípodos aislados son extraídos creando huecos que se auto-reparan, por lo que el daño local no progresa al elevarse H_s [10]. 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 el Inicio de Destrucción (ID), cuando se produce la extracción de varios Cubípodos próximos entre sí, creando huecos grandes que ya no se auto-reparan 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 ya que debido a la capacidad de auto-reparación de los Cubípodos, es

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).

Los sectores del morro más solicitados por el oleaje (marcados en rojo en la figura 7) se protegieron con un manto bicapa reforzado, estando constituida la capa superior del manto con Cubípodos de 42 t. La figura 7 muestra el esquema de detalle de los sectores del morro reforzados en la capa superior del manto, así como el modelo ensayado con piezas de diferentes colores en cada sector para poder identificar los daños locales.

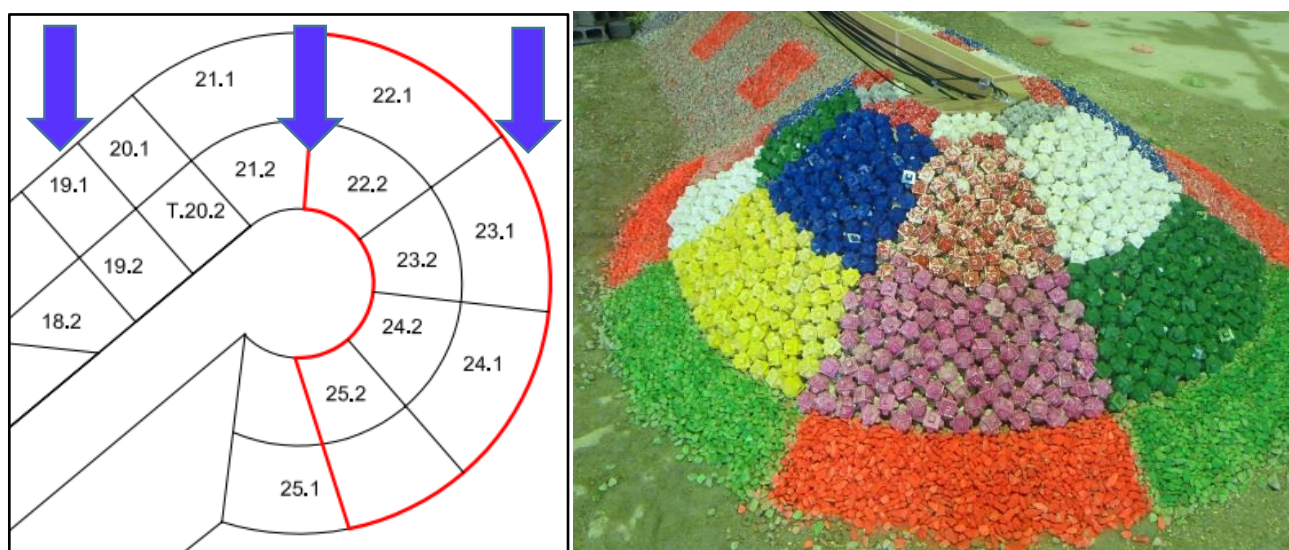


Figura 7. Sectores reforzados del morro y vista del morro de Cubípodos bicapa ensayado.



Figura 8. Modelo I “Morro” con la transición monocapa-bicapa de Cubípodos de 24 t.

La figura 8 muestra 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.

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 2ª 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 9 muestra la zona más solicitada del manto monocapa (quiebro) en la cual no se produjeron daños 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.

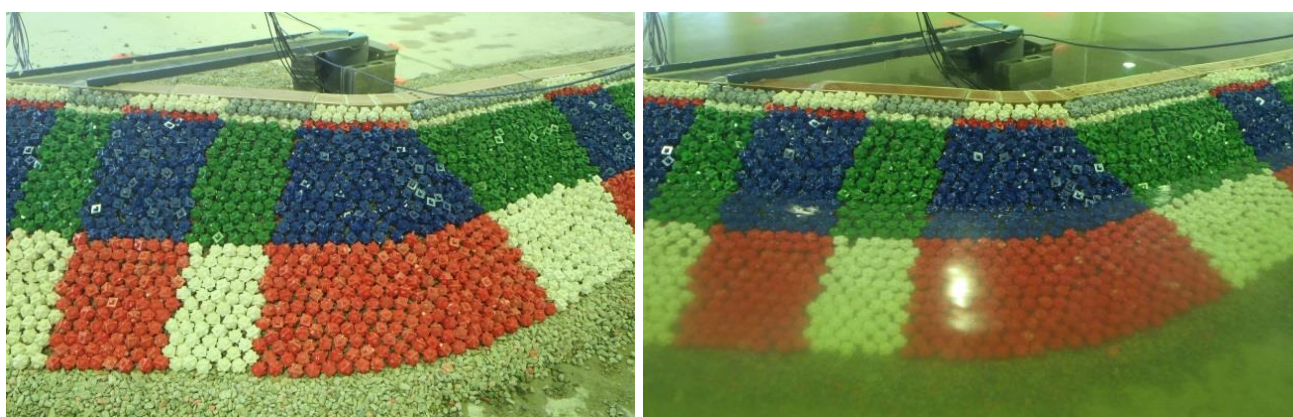


Figura 9. Modelo II “Quiebro” con manto monocapa de Cubípodos de 24 t, recién construido y tras el ataque del temporal $H_s(m)=9,2$ y $T_p(s)=18$ en PMVE ($\Delta h(m)=+5,0$)

En los ensayos del quiebro en bajamar y pleamar superaron ampliamente los valores de altura de ola significativa 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).

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 inicio de averías ($D=1\%$ en el morro y $N_{od}=0,5$ en el tronco) y $T_R[\text{años}] > 5000$ 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 y la estabilidad del espaldón mejoraban comparados con los del Proyecto Base. Se concluyó finalmente que los ensayos físicos realizados validaban claramente el diseño de Cubípodos finalmente propuesto, que tenía piezas algo mayores que las ensayadas (lado de la seguridad).

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

Las obras actuales del Dique Oeste constituyen la fase 2ª de construcción del contradique; la fase 1ª fue el Dique Sur, construido en 2012, formado 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 nuevo dique. La construcción del dique Oeste se ha caracteriza por la reutilización de 1.360 Cubípodos de los Diques Norte y Sur, que quedan abrigados por el nuevo Dique Oeste, y por la celeridad en la construcción. 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 en el periodo estival de 2015. Iniciadas las obras en abril de 2015 (parque de bloques), el manto del contradique **se completó en octubre de 2015.**

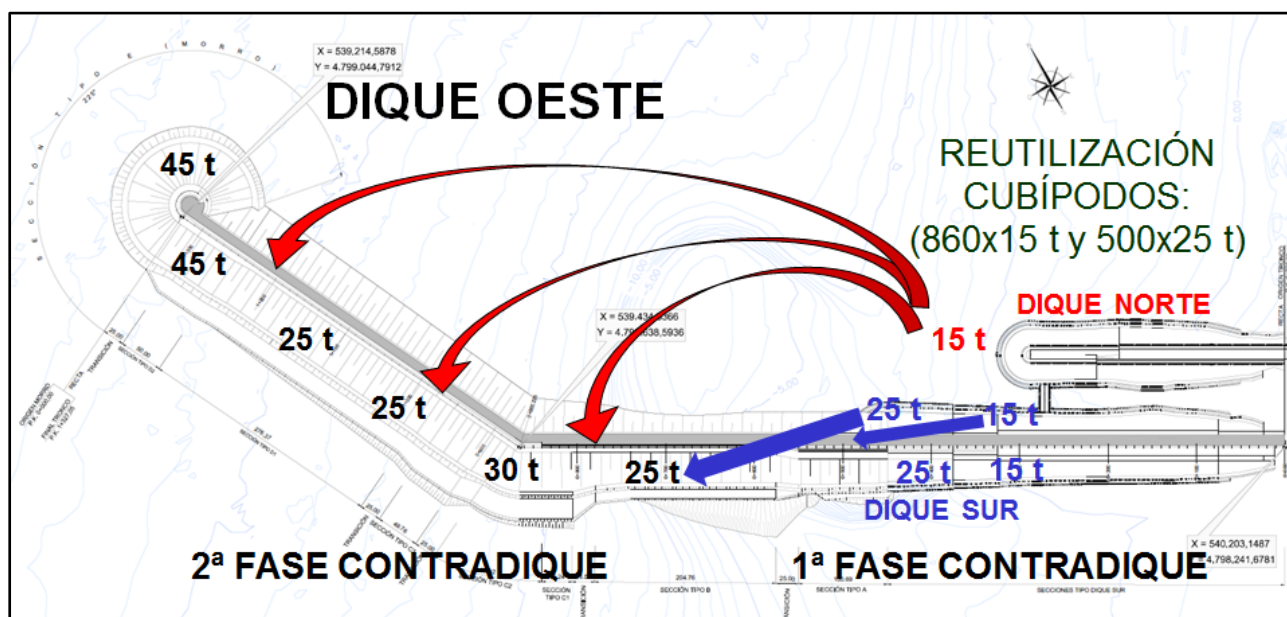


Figura 10. Reutilización de Cubípodos en el Dique Oeste.

La figura 10 muestra una planta del contradique indicado 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 sollicitación 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 horas, produciendo una media de 3,5 Cubípodos por encofrado vertical y día, en ciclos de trabajo de 24 horas/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 11 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 (superior-derecha); se observan las zanjas realizadas en el terreno para el apoyo de la primera capa de Cubípodos.



Figura 11. Vista aérea del parque de Cubípodos del Dique Oeste (29/05/2015).



Figura 12. Línea de producción de Cubípodos de 45 t y acopio a 5 alturas (29/05/2015).

La figura 12 (izquierda) muestra la línea de producción con los encofrados de Cubípodos de 45 t, con el izado de un encofrado vertical (6 horas desde hormigonado) y Cubípodos esperando en las bases a cumplir las 24 h desde su hormigonado para ser trasladado al acopio; la figura 12 (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.



Figura 13. Vista de la transición monocapa-bicapa de Cubípodos de 25 t (1/10/2015).



Figura 14. Aspecto exterior del Dique oeste en construcción (1/10/2015).

La figura 15 muestra una vista aérea del Dique Oeste con el manto de Cubípodos en construcción. Las obras se han desarrollado sin incidencias relevantes siguiendo el plan previsto; **el manto del contradique se terminó (excepto remates en la coronación del manto) en octubre de 2015**, antes de la llegada de los temporales de invierno. 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 terminación del dique está previsto realizarlo en la temporada estival de 2016.



Figura 15. Vista aérea de del Dique Oeste en construcción (29/9/2015).

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: el Dique Sur de 0,45 km de longitud construido en 2012 (fase 1ª) y el Dique Oeste que continua la traza del Dique Sur hasta alcanzar 1,35 km y una profundidad de 22 m en BMVE (fase 2ª) construido en la temporada estival de 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 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 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, 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

propuesta por la UTE Dique Oeste (SATO, Dragados, Arias Hermanos y Drace). Esta solución dispone un manto monocapa de Cubípodos de 25 t en el tronco (30 t en el quiebro) y manto bicapa de Cubípodos de 45 t y 25 t en el morro y los 75 metros de tronco adyacente; el manto se apoya en una berma de pie de escollera de 4 t en toda la traza del dique. Además de reducir a la mitad el consumo de hormigón en el manto, este proyecto destaca ambientalmente por la reutilización de 1.360 Cubípodos de 15 t y 25 t procedentes del Dique Norte y Dique Sur, abrigados por el nuevo Dique Oeste.

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 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 octubre de 2015**, antes de la llegada de los grandes temporales invernales a la fachada atlántica española. En el parque de bloques se han fabricado 6.700 nuevos Cubípodos de 25, 30 y 45 toneladas, en ciclo de trabajo de 24 horas/día, con un consumo de hormigón que ha alcanzado los $1.100 \text{ m}^3/\text{día}$. Se han fabricado una media de 3,5 Cubípodos/encofrado vertical y día, desmoldando a las 6 horas y trasladando los Cubípodos al parque de almacenamiento a las 24 horas. La construcción se ha desarrollado con la programación prevista sin incidencias reseñables.

El desarrollo del proyecto y ejecución del Dique Oeste es un ejemplo de cómo la licitación “con variante” permite obtener, frente a la licitación “sin variante”, grandes ahorros económicos y ambientales al promotor sin perjudicar a las empresas adjudicatarias, que pueden obtener un razonable beneficio optimizando las obras con la mejor tecnología y validándola con los ensayos físicos correspondientes. Las licitaciones públicas “con variante” y con tiempo suficiente para proponer y validar diferentes soluciones, debería ser la forma habitual de licitar las grandes obras marítimas por los beneficios económicos y ambientales que se generan.

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).

REFERENCIAS

- [1] Burcharth, H.F., Maciñeira, E. y Noya, F. (2015). *Design, construction and performance of the main breakwater of the new outer port at Punta Langosteira, A Coruña, Spain*, in Design of Coastal Structures and Sea Defenses, Ed. Y.C. Kim, World Scientific, pp. 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. y Grassa-Garrido, J.M. (2015). *Diseño, construcción y explotación de diques de abrigo portuario en España desde finales del siglo XX*. RIBAGUA-Revista Iberoamericana del Agua 2 (2015): 80-96.
- [4] Santos, M., Corredor, A., Maciñeira, E., Gómez-Martín, M.E. y Medina, J.R. (2015). *Diseño y construcción del contradique de Cubípodos en el Puerto exterior de A Coruña en Punta Langosteira*. Libro de Ponencias de las XIII Jornadas Españolas de Costas y Puertos, 24-25 Jun. 2015, Avilés, Asturias (ISBN 978-84-608-4359-7).
- [5] Medina, J.R. y Vidal, C. (2014). *Diseño y construcción de diques rompeolas*. Ingeniería del Agua, IWA Publishing-Editorial UPV, 18.1 (2014): 28-37.
- [6] Corredor, A., Santos, M., Peña, E., Maciñeira, E., Gómez-Martín, M.E. y Medina, J.R. (2014). *Single-layer Cubipod armored breakwaters in Punta Langosteira (Spain)*. Proc. of 34th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, 34(2014): structures.12.
- [7] Maciñeira, E., Peña, E., Bajo, V. Sande, J. y Noya, F. (2015). *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, 9-11 Sep. 2015, Boston-Mass. (in press).
- [8] Medina, J.R. y Gómez-Martín, M.E. (2015). *Manual del Cubípedo® 2015*. Valencia: Universitat Politècnica de València. DOI: <http://hdl.handle.net/10251/5387>
- [9] Medina, J.R. y Gómez-Martín, M.E. (2012). *K_D and safety factors of concrete armor units*. Coastal Engineering Proceedings, 1(33), structures.29.
- [10] Gómez-Martín, M.E., Peña, E., Sande, J., Figuero, A. Castro, A y Medina, J.R. (2015). *Ensayos físicos 3D de la variante con Cubípodos del Dique Oeste del Puerto exterior de*

A Coruña en Punta Langosteira. Libro de Ponencias de las XIII Jornadas Españolas de Costas y Puertos, 24-25 Jun. 2015, Avilés, Asturias (ISBN 978-84-608-4359-7).