

Diseño, construcción y explotación de diques de abrigo portuario en España desde finales del siglo XX.

Gutierrez Serret, Ramón, José M^a Grassa Garrido. Centro de Estudios de Puertos y Costas. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Ministerio de Fomento. C/ Antonio López nº 86, 28026, Madrid, España. E-mail: Ramon.M.Gutierrez@cedex.es; Jose.M.Grassa@cedex.es

Resumen

El objeto de este artículo es el de presentar una panorámica del desarrollo en materia de diques portuarios que ha tenido lugar en España desde finales del siglo XX, presentando de forma específica algunos de los más importantes, como son los de los puertos de Gijón, Ferrol, Coruña, Algeciras, Cartagena y Barcelona. Asimismo se incluyen referencias a los ensayos en modelo físico realizados en el CEDEX para el diseño y la construcción de estos diques.

The aim of this paper is to provide an overview of the port breakwaters development that have taken place in Spain from the end of the XX century, including the detail of those of the ports of: Gijón, Ferrol, Coruña, Algeciras, Cartagena and Barcelona. References are also made to the physical models tests conducted at CEDEX for its design and construction.

Palabras clave: diques portuarios, desarrollo portuario, España.

1. INTRODUCCIÓN

El objeto de este artículo es ofrecer una panorámica general del importante desarrollo portuario y concretamente el relativo al diseño, la construcción y la explotación de diques, que ha tenido lugar en España desde finales de los años 90 del siglo XX.

En este contexto, se presentan las realizaciones más significativas del Sistema Portuario Estatal, constituido por 28 Autoridades Portuarias que gestionan 44 puertos bajo la coordinación del Organismo Público Puertos del Estado. El detalle pormenorizado de las actuaciones que se muestran y la inclusión de otras, también de relevancia, tanto del Sistema Estatal como del de las Comunidades Autónomas -10 Comunidades con costa que gestionan múltiples puertos menores- o de los privados, excede la extensión de este artículo.

Con los ejemplos que se exponen, se ha buscado ofrecer una selección de los problemas más importantes e innovadores con los que se ha enfrentado la ingeniería portuaria española en los últimos años -grandes calados, fuertes oleajes, problemas geotécnicos singulares y procedimientos constructivos innovadores-, los cuales, con carácter general, han estado determinados por la necesidad de acometer los nuevos desarrollos portuarios en aguas exteriores. Y ello no sólo por la ausencia general de zonas con abrigo natural de la costa española, sino también por aspectos ambientales, que determinan una gran dificultad para poder llevar a cabo estos desarrollos en bahías, estuarios o en desembocaduras de ríos, zonas en las que históricamente se fueron implantando los grandes puertos del mundo.

Esta circunstancia, de carencia de abrigo natural -puertos exteriores-, no ha sido una novedad en España. Aunque desde antiguo, los puertos españoles se han ido ubicando en bahías y estuarios, en zonas litorales contiguas a playas o en tramos fluviales; la particularidad de la costa española, ya mencionada, de escasez de abrigo natural e inexistencia de ríos navegables, así como las mayores exigencias y dimensiones de los buques, fueron determinando la necesidad de diques de abrigo. En este sentido, cabe citar el dique romano de escollera del puerto de Bares en el NW peninsular, de unos 300 m en profundidades de 4-5 m; y los de los puertos de Santander (1575), Gijón (1635) y los de Málaga, Valencia y Barcelona en el siglo XVIII (figura 1). En el siglo XIX la necesidad de ampliar los puertos determinó el aumento en la construcción de diques, progresando mucho en el tercio final del XX^[1].



Figura 1. Diques de los puertos de Santander (1575), Gijón (1635) y Málaga (1720).

En las últimas décadas del pasado siglo, sobresalen los diques de los puertos de: Bilbao (Punta Lucero, 1985), Gijón (Príncipe de Asturias, 1976), Las Palmas (Reina Sofía, 1972 y posteriores) y Tenerife (Los Llanos, 1980 y anteriores). En relación con ellos, como antecedente próximo de los construidos más recientemente, en el siguiente apartado, se incluye una sucinta descripción de los mismos.

Por el contrario, lo que sí ha sido una novedad y un reto para la ingeniería portuaria española, en estos últimos años, es la magnitud y la singularidad de las ampliaciones portuarias que se han acometido y los problemas que estas circunstancias han planteando; derivados, como se ha mencionado, de los grandes calados en los que se han construido estas estructuras, de los fuertes oleajes que han de resistir o de la escasa capacidad portante de los fondos marinos dónde han de cimentarse, todo lo cual ha determinado importantes avances en los métodos de diseño de diques y en procesos constructivos novedosos.

En el ámbito del Sistema Portuario Estatal, es de destacar la gran envergadura, de los diques de abrigo de los nuevos puertos exteriores de Gijón, Ferrol y Coruña, en el océano Atlántico, con longitudes de 3,8; 1 y 3,4 km, alturas máximas de 48, 49 y 64 m, oleajes de diseño de 9,5; 7,6 y 15 m de altura significativa y tipologías estructurales en talud y de cajones; la ampliación del puerto de Algeciras, con un dique vertical de baja reflexión de 2 km de longitud en calados de 30 a 40 m; la ampliación del puerto de Cartagena en su dársena de Escombreras, con un dique vertical en profundidades de 50 m y 1 km de longitud y los problemas geotécnicos derivados de los fangos existentes en la cimentación de los dos diques de la ampliación del puerto de Barcelona.

Junto a ellos, aunque con menores dimensiones pero, en cualquier caso, muy importantes, se encuentran los diques de las ampliaciones de los puertos de: Málaga, Motril, Alicante, Valencia, Sagunto, Castellón, Tarragona, Barcelona (Bocana Norte), Ibiza y Las Palmas (Reina Sofía y la Esfinge). En total, desde finales del pasado siglo se han construido unos 32,2 km de grandes diques, de ellos 15,4 km son estructuras en talud y 16,8 km verticales.

De todas estas estructuras, como más relevantes, se presentan, de forma específica, los diques mencionados de: Gijón, Ferrol, Coruña, Algeciras, Cartagena y Barcelona, incluyendo algunos detalles de los ensayos en modelo físicos realizados en el CEDEX para su diseño y construcción. No obstante, en la tabla 1 se resumen las principales características de todos los diques citados, mostrándose en la figura 2 la nomenclatura utilizada y su emplazamiento.

Actualmente, el desarrollo portuario, tras del importante avance que ha tenido en los últimos años, prácticamente ha finalizado, aunque otro dique está en construcción en el puerto de Bilbao, el dique de Punta Sollana con una longitud de 330 m y 40 m de altura máxima y recientemente se han terminado el dique Oeste del Puerto Exterior de Coruña y la 1ª fase del dique de Poniente del puerto de Almería, con longitudes de 1.500 m y 417 m respectivamente, el primero con tipología en talud y el segundo vertical con celdas abiertas de baja reflexión.

Además, en el ámbito regional, las Comunidades Autónomas, también han construido diques destacables en los puertos a su cargo, principalmente en el litoral Cantábrico, entre ellos que se encuentran los de los puertos de Bermeo, Laredo, Llanes y San Esteban de Pravia.

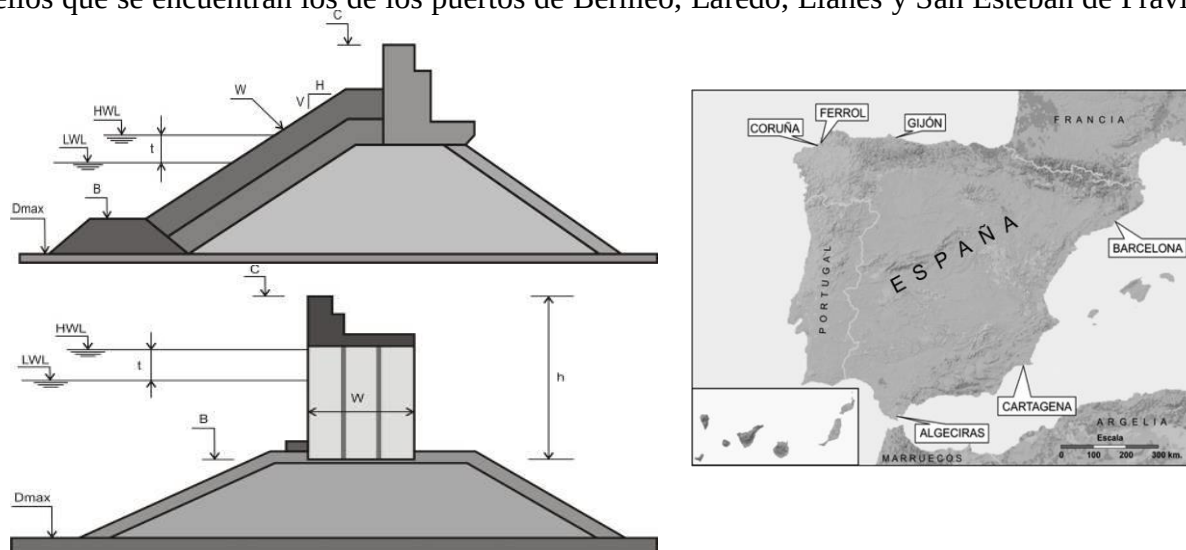


Figura 2. Diques en talud y verticales incluidos en el artículo. Nomenclatura y ubicación.

DIQUES EN TALUD CONSTRUIDOS DESDE FINALES DEL SIGLO XX									
Denominación	L (m)	D _{max} (m)	B (m)	C (m)	H (m)	W (t)	S (H/V)	H _{Sdiseño} (m)	t (m)
Torres. Gijón.	1.416	-22	-	22	44	145*	2:1	9,5	4,6
Ferrol. Puerto Exterior	1.100	-33	-15	18	51	90	3,5:2	7,60	4,5
Coruña. Puerto Exterior. Dique Principal	4.000	-42	-28	25	67	150	2:1	15,1	5,0
Coruña. Puerto Exterior. Dique Oeste	1.500	-34	-10	17	22	Cubípodos 15-25-30-45	1,5:1	8,75	5,0
Valencia. Ampliación Norte	1.123	-16	-9	12	28	35	3:2	6,3	1
Este. Barcelona.	2.165	-20	-10	12	32	50	3,5:2	7,3	0
Sur. Tramos 1-3. Barcelona	3.100	-23/-27	-14	11		40	1,75:1	7,3	0
Bocana Norte. Barcelona	1.000	-25,2	-10	11	35,2	40	3:2	6,4	0
Alicante	1.200	-16	-8	7,5	23,5	20	3:2	4,4	0
Esfinje. Las Palmas	302	-39	-10	15	54	56	3:2	7,3	3,0
*Bloques paralelepípicos o cúbicos. Longitud total: 16.806 m									
DIQUES VERTICALES CONSTRUIDOS DESDE FINALES DEL SIGLO XX									
Denominación	L (m)	D _{max} (m)	B (m)	C (m)	W (m)	H (m)	H _{Sdiseño} (m)	h (m)	
Norte. Gijón	1.566	-30	-24,75	24	32,01	48,75	9,5	4,6	
Isla Verde. Algeciras	1.750	-43	32,5	7,5	21,4	40	4,8	1,3	
Levante. Málaga	1.200	-20	-20	10	21,1	30	6,3	0,8	
Motril	550	-20	-12	7,5	21,1	91,5	6,3		
Ampliación Escombreras	1.955	-52	-28	8	24	32	8,1	0,6	
Valencia. Ampliación Norte	2.271	-16	-	13	19,17	29	6,3	1	
Sagunto	1.204	-15	-	9	19,6	24	6,4	0	
Levante. Castellón	440	-12	-13	12	19,6	25	7,3	0,5	
Levante Prolongación. Castellón	358	-15	-13	12	19,6	25	7,3	0,5	
Sur. Castellón	819	-16	-12,5	12	15	5,20	7,3	0,5	
Prolongación. Tarragona	736	-30	-21,5	8	24	29,5	7	0	
Sur. Tramo 2. Barcelona	1.700	-20	-15	11	24,4	26	7,6	0	
Bocana Norte. Barcelona	450	-29	-17,5	6	19,6	25,5	6,4	0	
Botafoc. Ibiza	615	-25	-20	7	21,1	27	6,3	0	
Reina Sofía. Las Palmas	490	-40	-26	12,2	24	38,2	7,3	3,0	
Esfinje. Las Palmas	664	-33	-26	12,2	24,6	38,2	7,3	3,0	
Poniente 1ª fase. Almería	417	-26	-24	7	21	31	5,7	1,4	
Longitud total: 17.225 m									

Tabla 1. Diques construidos en España desde finales del siglo XX. Sistema Portuario Estatal.

Asimismo, aunque fuera de la geografía española, es de destacar, como realización singular, el dique flotante del puerto de La Condamine (Principado de Mónaco)^[2], que con dimensiones de 352 x 28 x 19 m, fue construido, por dos empresas españolas, en el puerto de la Bahía de Algeciras y remolcado hasta su emplazamiento, dónde quedó unido a tierra mediante un cajón-estribo con una rótula de 2,60 m de diámetro y fondeado mediante ocho cadenas a pilotes de acero hincados a profundidades entre 50 y 80 m (figura 3).



Dique seco. Puerto Algeciras (España)

Remolque Algeciras-Mónaco.

Ubicación. Mónaco

Figura 3. Dique flotante. Puerto de la Condamine, Mónaco. (Cortesía de FCC Construcción).

De este desarrollo de diques portuarios, como aspectos sobresalientes cabe destacar los siguientes: crecimiento de las estructuras verticales; construcción de soluciones en talud de gran envergadura con bloques de 150 y, 90 t (200 t en zonas puntuales); procedimientos constructivos innovadores -por ejemplo para el fondeo de cajones y colocación de grandes bloques-; introducción de diques verticales de baja reflexión y avances en la instrumentación estructural y geotécnica y en los sistemas de predicción del oleaje.

Una circunstancia determinante, que ha facilitado, este desarrollo, ha sido la existencia, desde el año 1982, de las redes de Puertos del Estado de observación del medio marino (www.puertos.es/oceanografía_y_meteorología^[3]: Red Costera de Medida y Registro de Oleaje (REMRO), Red de Aguas Profundas, Red de Correntímetros y Red de Mareógrafos), merced a las cuales se ha dispuesto de una valiosa información sobre temporales para el diseño y la construcción de estos nuevos diques. Asimismo otro factor que ha ayudado en este desarrollo ha sido la normativa que, desde el año 1987, viene elaborando Puertos del Estado a través de sus Recomendaciones para Obras Marítimas (ROM)^[2].

2. CONSTRUCCIÓN DE DIQUES EN EL ÚLTIMO TERCIO DEL SIGLO XX.^[4 y 5]

Según se ha indicado, como antecedente del desarrollo habido en el último tercio del siglo xx, se presenta, por su importancia, un resumen de las características de los diques: Príncipe de Asturias (Gijón, 1976), Punta Lucero (Bilbao, 1985), Reina Sofía (Las Palmas, 1.972 y posteriores) y Los Llanos (Tenerife, 1980 y anteriores).

Dique “Príncipe de Asturias”. Puerto de Gijón.

Se trata de un dique en talud con una altura máxima de 40,35 m y una longitud total de 2.145 m, que consta de 5 tramos con longitudes de: 490, 525, 885, 100 y 145 m. Tiene la particularidad de que su núcleo está formado por bloques de 90 t, lo que le confiere una permeabilidad grande.

El tramo 1 data de finales del siglo XIX, el 2 se construyó entre los años 1950 y 1963 y el resto entre 1969 y 1976. En la figura 4 se muestra una panorámica del dique y la sección tipo de su tramo 3, representativa de la mayor parte de la estructura. En la actualidad el dique ha quedado parcialmente incorporado a la ampliación del puerto (figura 8)

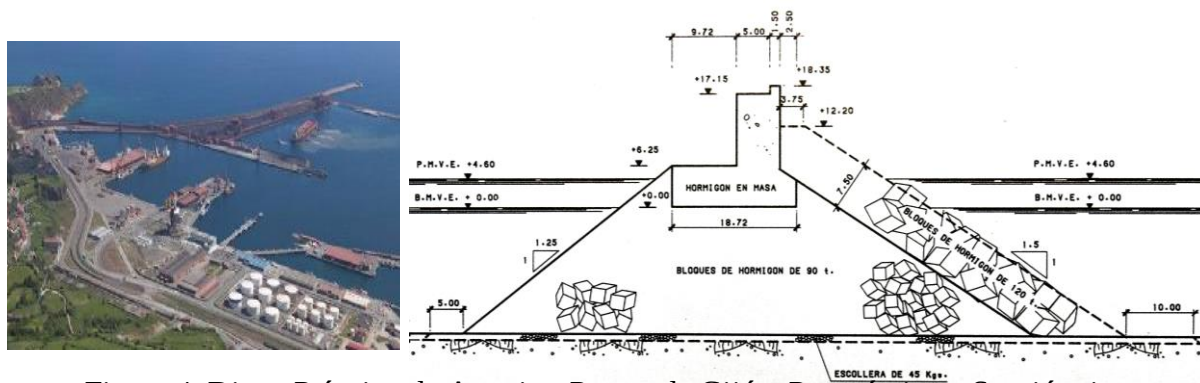


Figura 4. Dique Príncipe de Asturias. Puerto de Gijón. Panorámica y Sección tipo.

La altura de la ola de cálculo es de 9,60 m y la carrera de marea de 4,60 m. Su comportamiento, en general, ha sido bueno, habiendo sufrido algunas averías en el tramo 1 y algún deterioro de bloques en el 2; detectándose en una inspección en 1983, un talud más vertical que el de proyecto y un pie de dique escaso en los tramos 4 y 5.

Dique de “Punta Lucero”. Puerto de Bilbao.

Se trata también de un dique en talud con una altura máxima de 54 m y una longitud de 2.498 m, que consta de 3 tramos con longitudes de: 540, 1.510 y 373 m. Su construcción se realizó entre 1.971 y 1976, sufriendo, en ese año, importantes averías que determinaron la necesidad de reforzar el dique, lo que se realizó entre 1.980 y 1.985.

En la figura 5 se muestra una panorámica del dique en su situación actual y del estado en el que quedó tras la gran avería de diciembre de 1976 y en la 6, las secciones tipo -primitiva y reforzada- de su tramo 2.

La altura de la ola de cálculo es de 10,1 m en inicio de avería (4% de daños) y de 14,5 m en rotura (36% de daños) y la carrera de marea de 5,2 m. Las averías mencionadas, se produjeron en marzo de 1976 (12-14/03/1976) y en diciembre (1-5/12/1976). En el primer temporal se ya se ocasionaron averías importantes, llegándose en el segundo prácticamente a la rotura del dique en unos 140 m de su tramo 2.

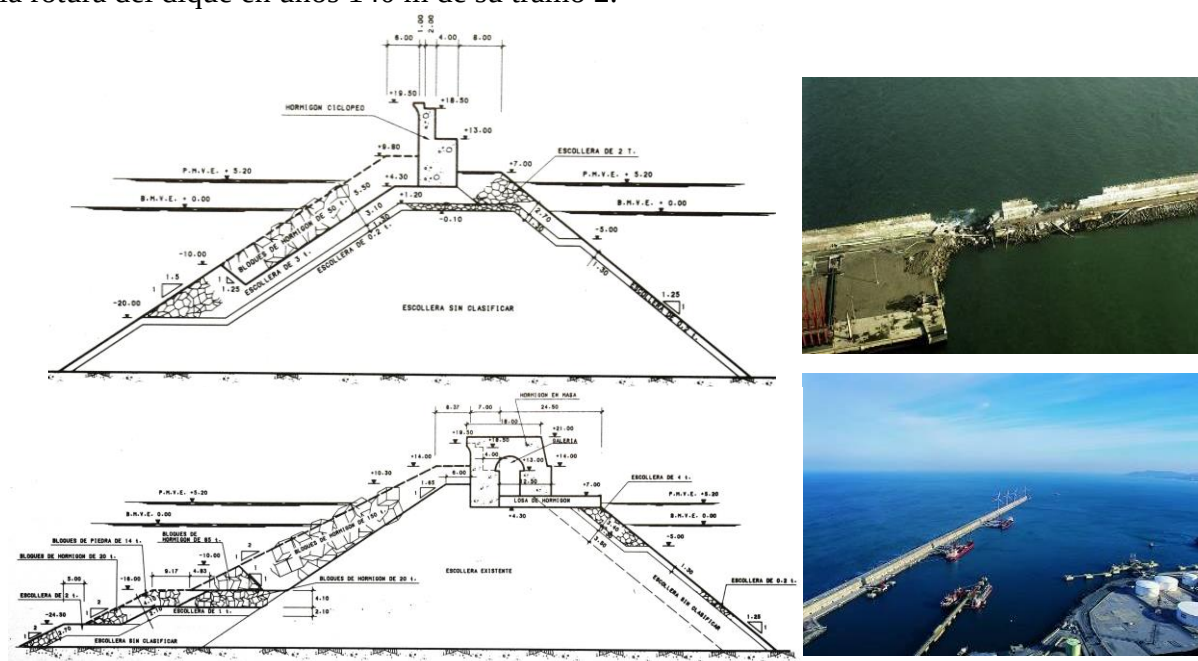
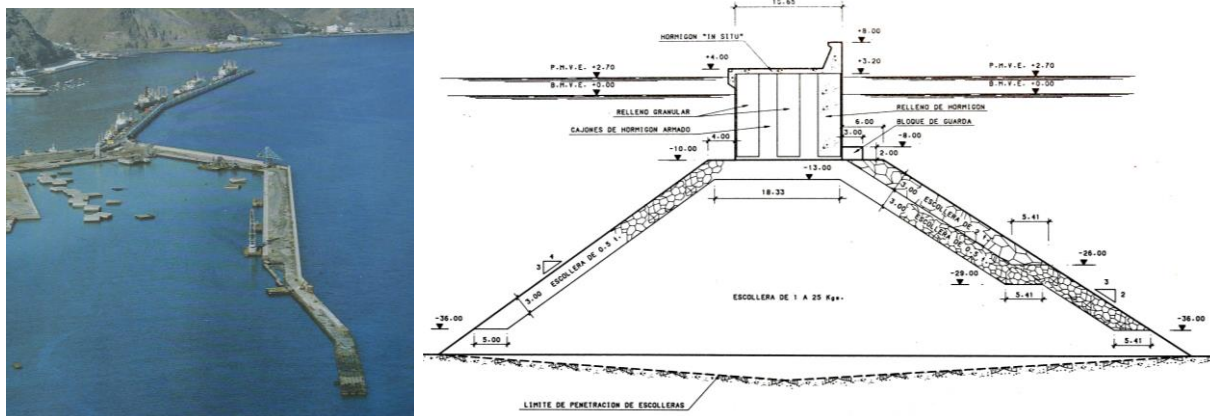


Figura 5. Dique Punta Lucero. Puerto de Bilbao. Secciones tipo: primitiva y reforzada.
Panorámicas: avería y estado actual.

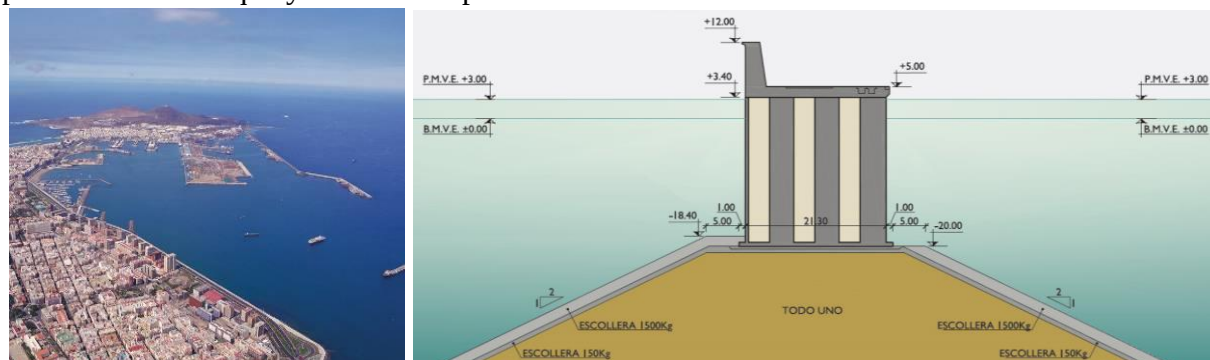
Las causas de las averías se debió a la inestabilidad el espaldón para una altura de ola de 7 m y a que la profundidad del manto principal (-10 m) era insuficiente.

En este caso se trata de un dique en vertical con una altura máxima de 60 m y una longitud total de 1.519 m, que consta de 3 tramos con longitudes de: 779, 710 y 30 m. Su construcción se realizó entre los años 1.971 y 1980 (tramos 1 y 2) y 1983 y 1987 (tramo 3). En la figura 7 se muestra una panorámica del dique y la sección tipo de su tramo 2.



La altura de la ola de cálculo es de 4,6 m y la carrera de marea de 4,6 m. Su comportamiento ha sido bueno, sin que se hayan detectado averías una vez terminado. No obstante, durante las obras, debido a un fuerte temporal los días 16 y 17 de enero de 1979, se produjeron daños en 8 cajones que estaban fondeados sin rellenar, destruyéndose las paredes exteriores de 4 de ellos y algunas interiores en otros 3, apareciendo grietas en el octavo.

Se trata de un dique en vertical con una altura máxima de 58,30 m y una longitud total de 3.108 m, que consta de 2 tramos con longitudes de: 2.417 y 691 m. Su construcción se realizó entre los años 1.967 y 1972 (tramo 1) y 1975 y 1979 (tramo 2). En la figura 8 se muestra una panorámica del dique y la sección tipo de su tramo 1



La altura de la ola de cálculo es de 6,4 m y la carrera de marea de 2,7 m. Su comportamiento ha sido bueno, sin que se hayan detectado averías, aunque se ha registrado un asiento uniforme de 0,5 m a lo largo del tramo 1, llegando a 1 m en el morro.

3. CONSTRUCCIÓN DE DIQUES DESDE FINALES DEL SIGLO XX. EJEMPLOS RELEVANTES.^[6]

Conforme a lo mencionado, como ejemplos relevantes de los diques construidos desde los años 90 del siglo pasado, se presenta un resumen de las características de los construidos en las ampliaciones de los puertos de: Gijón, Ferrol, Coruña, Algeciras, Cartagena y Barcelona.

3.1. Dique de la ampliación del puerto de Gijón.^[7]

La ocupación del puerto antes de la ampliación era superior a la de diseño y una limitación en el calado de los barcos, determinaron que la Autoridad Portuaria acometiera su ampliación, quedando configurada por un puerto exterior, contiguo al existente, al este del cabo de Torres.

La ampliación (figura 8) está constituida por un dique de 3.834 m, un muelle de 1.250 m con calados entre 23 y 27 m, que permite el atraque simultáneo de tres bulcarriers de 230.000 TPM y 20 m de calado. Abriga 145 ha de agua y dispone de 145 ha de explanadas.



Figura 8. Ampliación en ejecución y finalizada, con el puerto antiguo al fondo.

Las condiciones de clima marítimo para las que se ha diseñado el dique están determinadas por los temporales del NNW y del N, resultando una altura de ola significativa de diseño de 8,75 m para el Dique Torres y 9,50 m para el Norte, con periodo de pico de 19 s.

El dique de abrigo parte del cabo de Torres y consta de tres alineaciones con diferente tipología estructural, denominadas: Dique Torres, Dique Norte y Contradique. El Dique Torres, con una longitud de 1.488 m, es una estructura en talud, situada en profundidades de 10 a 22 m, con un manto principal de bloques de 10 a 145 t y con su espaldón coronado entre las cotas +14 y +24. En la figura 9 se muestra la sección tipo del tramo final del dique.

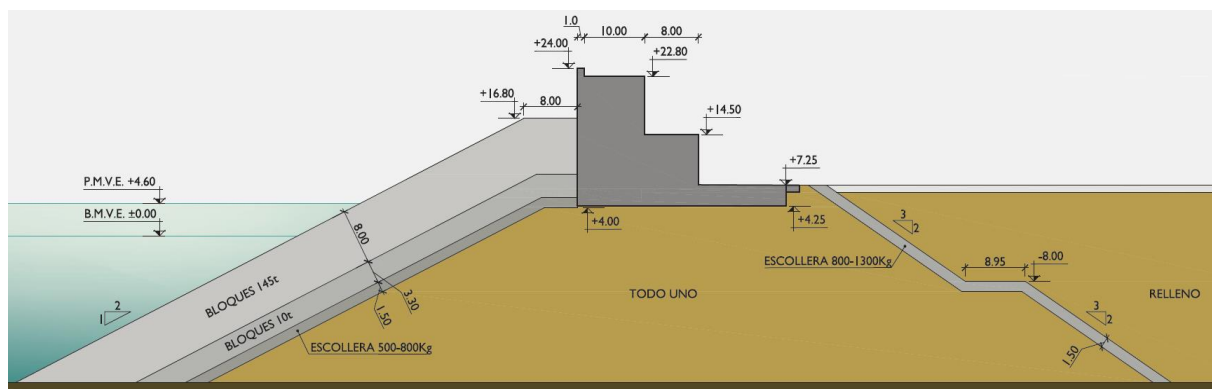


Figura 9. Dique Torres. Sección tipo del tramo final.

El Dique Norte es vertical, y está compuesto por 33 cajones de 51,8 m de eslora, 32 m de manga y 32 m de puntal, cimentado a la cota - 24,75 y coronado a la +24. Su longitud es de 1.593 m y se sitúa en profundidades de -25 a -30 m. En la figura 10 se muestra su sección tipo.

El contradique que arranca en el morro del Dique Norte, es una estructura en talud con un manto de bloques de 90 t y 815 m de longitud. Una zona singular del dique es el entronque entre el Dique Torres y el Norte. La solución para este cambio de tipología consiste en la disposición de dos cajones transversales al Dique Norte, protegidos por bloques de 200 y 90 t.

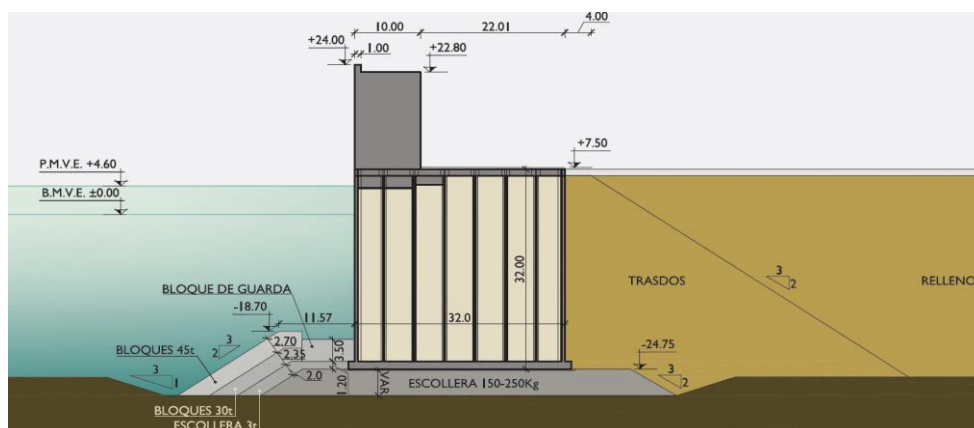


Figura 10. Dique Norte. Sección tipo.

Para el diseño final de cada uno de estos tramos se realizaron múltiples ensayos en modelo físico en varios laboratorios europeos, tanto para los diseños como para la ejecución de las obras. En el caso del CEDEX, se ensayó el Contradique (figura 12).

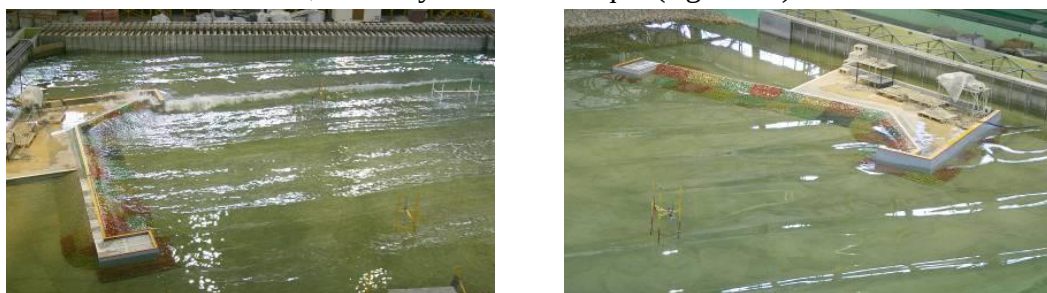


Figura 12. Ensayo en modelo físico del Contradique (E: 1/60). CEDEX.

Las obras se iniciaron en febrero de 2005 y finalizarán en octubre de 2010. La construcción del Dique Torres se realizó a sección completa, en su mayor parte mediante medios marinos, utilizando medios terrestres en los veranos: dumpers y grúas de grandes dimensiones. La construcción del Dique Norte comenzó con el dragado del fondo arenoso hasta llegar a la roca, procediendo después a ejecutar la banqueta de apoyo de los cajones, a la fabricación de estos y a su fondeo, lo que ha sido una de las innovaciones y uno de los retos mayores de esta obra, por ser la primera vez que unos cajones de esta envergadura se fondean en el mar Cantábrico. En la figura 14 se muestran diversas etapas de la construcción del dique.



Figura 14. Estado de las obras. Veranos 2006, 2007 y 2008.

Todo el proceso constructivo y la seguridad, fue planificado en función del sistema de predicción de oleaje desarrollado específicamente para la obra, el cual informaba de la superación de umbrales: altura de ola significativa (H_s), periodo de pico (T_p) y velocidad de viento, estando el avance por tierra condicionado por $H_s > 1,5$ m

La obra ha soportado múltiples temporales con $H_s > 5$ m, en tres con $H_s > 7$ m y uno extraordinario por sus tres días de duración, $H_s \sim 6,6$ m y $H_{m\acute{a}xima} \sim 11,2$ m, $T_p \sim 18$ s y marea 5,5 m. En todos los daños fueron localizados en las secciones en construcción y en las protecciones provisionales de los taludes interiores, no sufriendo daños los taludes exteriores.

3.2. Dique del nuevo puerto exterior de Ferrol.^[5]

Las expectativas de crecimiento del tráfico, junto con una estrategia de diversificación, determinaron que la Autoridad Portuaria planteara la necesidad de nuevas instalaciones, las cuales constituyen el actual puerto exterior, situado en la entrada de la ría en el cabo Prioriño.

El nuevo puerto está constituido por: un dique en talud de 1.040 m con un martillo vertical próximo a su morro de 172 m de longitud, un muelle de 1.515 m con calado de 20 m. Dispone de 90 ha de explanada. En la figura 15 se muestra una panorámica del puerto.

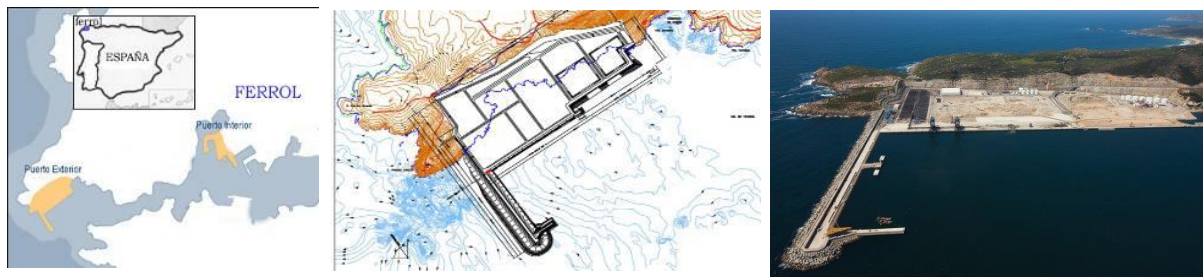


Figura 15. Emplazamiento y vista general del puerto.

El dique es una estructura en talud, con una única alineación, conformado por un manto principal de bloques de 90 t y pendiente 1,75H/1V, con su espaldón coronado a la cota +18 m. El morro es también en talud y bloques de 90 t con pendiente 2H/1V, alcanzando profundidades máximas de 32 m. El martillo está formado por cajones fondeados a la cota -15 m. En la figura 16 se muestra la sección tipo del dique y del martillo

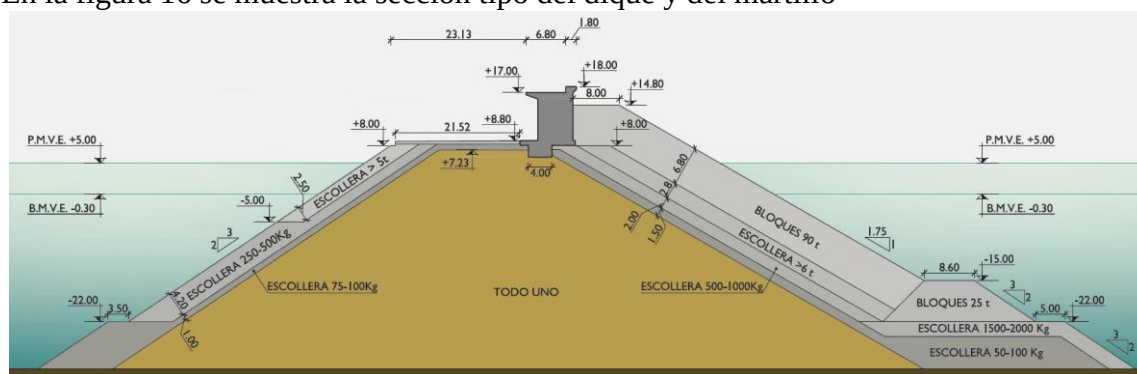


Figura 16. Sección tipo.

El abrigo que ofrece el cabo Prioriño hace que el oleaje de cálculo, del W, tenga altura de ola significativa de 7,6 m y un periodo de pico de 18 s, para un periodo de retorno de 280 años.

Para su diseño se han realizado diversos ensayos en el CEDEX en 2D (E: 1°/43 y 1/15) y 3D (E: 1/ 38,5). En la figura 17 se muestra el ensayo 2D en el Canal de Oleaje de Grandes Dimensiones y el 3D en el Tanque de Oleaje Multidireccional.



Figura 16. Ensayos en modelo físico. 2D (E: 1/38,5 y 1/ 15,85) y 3D (E: 1/60). CEDEX.

Las obras comenzaron en 2001, finalizando en 2004. Previo a la ejecución del dique se construyó un puerto auxiliar con un dique de escollera de 6 t y un muelle de 150 m. para los trabajos marítimos, que permitieron el avance del dique hasta la cota -8 m, a partir de la cual comenzaron los terrestres mediante dumperes, bulldozers y grúas de colocación de bloques.

El dique ya ha soportado varios temporales importantes sin daños apreciables. En la figura 17 se muestra el parque de bloques, la grúa colocándolos y la ejecución del espaldón.



Figura 17. Parque de fabricación de bloques. Grúa de colocación y ejecución del espaldón.

3.3. Dique del nuevo puerto exterior de Coruña.^[7]

La insuficiencia de los espacios portuarios -marítimos y terrestres- del puerto interior existente, su ubicación en el centro urbano, con los consiguientes problemas ambientales derivados del manejo de los graneles sólidos y líquidos y la necesidad de eliminar las conducciones de productos petrolíferos que unen el puerto con una refinería situada a unos 3 km de la ciudad, atravesando parte de ella por su subsuelo, determinaron que, en los años 90, la Autoridad Portuaria planteara la necesidad de la ampliación del puerto fuera de la ciudad.

Tras los correspondientes estudios, el nuevo puerto ha quedado situado en Punta Langosteira a unos 8 km al suroeste del puerto interior, estando constituido por: un dique en talud de 3.354 m de longitud con un martillo vertical próximo a su morro de 391 m, un muelle transversal de 921,5 m con calado de 22 m y un contradique, también en talud, de 579 m, próximo a contruirse.

El nuevo puerto abriga 230,5 ha de agua y dispone de 143, 5 ha de explanadas, estando dotado de atraques en el dique para nueve petroleros de 200.000 TPM y en los muelles para otras mercancías, pudiendo ampliarse la línea de atraque con otro muelle de ribera de 3.000 m y 230 ha de explanadas. En la figura 19, se muestra una panorámica del nuevo puerto.



Figura 19. Ubicación y panorámica del nuevo puerto.

El dique de abrigo, según se ha indicado, es una estructura en talud de 3.354 m, con 3 alineaciones, la de arranque y dos en su tramo principal, tiene una profundidad máxima de 40 m y está coronado a la cota +25 en su tramo principal y a la +19 en su arranque. Su morro se ha construido en talud con bloques de 200 t en hormigón armado. En este tramo, a 230 m del morro, se sitúa un martillo con cajones de 26 m de puntal, que permite el atraque de petroleros. En la figura 20 se muestran las secciones tipo del tramo principal y del martillo.

Como zona singular del dique destaca el manto de su trasdós, en el que se han dispuesto bloques perforados concertados de 150 t entre el morro y el martillo y de 50 t en el resto, para poder resistir los rebases.

Las importantes condiciones de clima marítimo para las que se ha diseñado el dique corresponden a un periodo de retorno de 140 años, resultando una altura de ola significativa máxima de 15,1 m y periodo de pico de 18 s

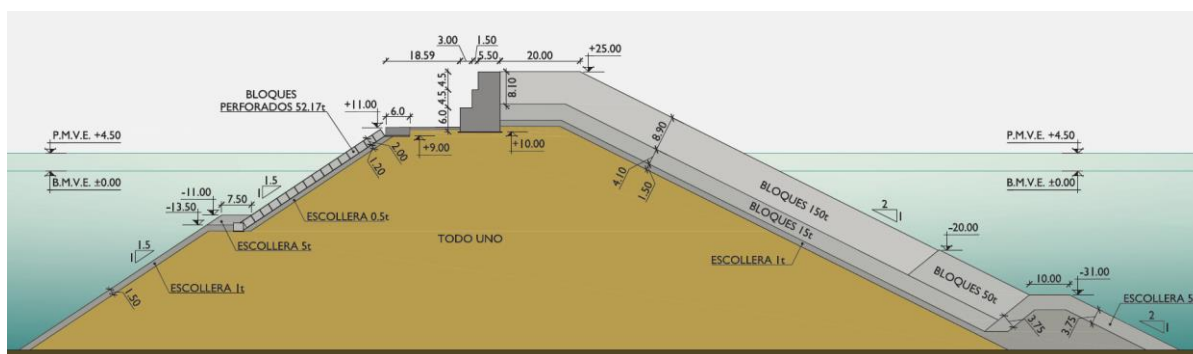


Figura 20. Secciones tipo del tramo principal.

Para el diseño final del dique se han realizado múltiples ensayos en modelo físico en varios laboratorios. En el caso del CEDEX, se han ejecutado ensayos 2D de la sección del tramo de arranque (E: 1/45) y de la principal (E: 1/25 y 1/30), así como 3D de este tramo (E: 1/60). En la figura 21 se muestran los 2D de la sección del tramo principal y los 3D de este tramo.



Figura C4. Ensayos en modelo físico. 2D (E 1/25) y 3D (E: 1/60). CEDEX.

Las obras se iniciaron en marzo de 2005, habiendo finalizado en septiembre de 2011. Los dos primeros años se dedicaron a trabajos preparatorios: accesos, canteras, plantas de áridos y hormigón, parque de fabricación de bloques y construcción de un puerto auxiliar, formado por un dique en talud de 503 m con bloques de 50 t y un muelle de 350 m para la carga a los gánguiles de material de núcleo, escolleras y bloques. En la figura 22 se muestra el parque de bloques del manto principal y el puerto auxiliar.



Figura 22. Parque de bloques principal y puerto auxiliar.

La construcción del dique avanzó, desde mar con el vertido del núcleo guiado por sendas motas laterales y posterior protección con escollera de 1 t y bloques de 15 t, sobre los que se colocaron las dos capas de bloques de 150 t del manto principal, utilizando dos grúas de orugas de las mayores del mundo, capaces de colocar los bloques de 150 t a 115 m. El espaldón se construyó con encofrados deslizantes, colocando el hormigón con cintas.

Durante los inviernos el avance general del dique se detuvo, previa ejecución del correspondiente morro de internada, continuando sólo con el vertido mediante gánguil del núcleo y la escollera. En la figura 23 se muestra el avance de la obra al final de la campaña de 2007, en julio de 2008 y en mayo de 2009.

Un aspecto destacado del proceso constructivo es el sistema de seguridad implantado, con el cual a partir de alturas de ola significativa superiores a 1,3 m se detenía la actividad en la plataforma de trabajo. Para ello se desarrolló un sistema de predicción de oleaje (SPOL).



Figura 23. Estado de las obras. Final campaña 2007, julio 2008 y mayo 2009.

Hasta la fecha el dique se ha comportado conforme a lo esperado. Los 1.600 m construidos en 2007 y 2008, han soportado varios temporales, en especial los del 10 de marzo de 2008 y el 20 de enero de 2009, sin que se hayan detectado daños más que en protecciones temporales. En la figura 24 se muestra la estructura durante esos dos temporales y la relación de temporales soportado hasta la actualidad.

Year	Date	H _s (m)	H _{max} (m)	T _p (s)
1998	29/11/98	7.42	13.18	17.24
1999	18/1/99	7.58	13.54	14.30
2000	06/11/00	9.61	14.76	13.40
2001	28/1/01	11.91	18.06	14.30
2002	22/11/02	8.02	10.69	14.30
2003	21/1/03	8.76	13.80	15.30
2004	18/4/04	6.80	10.65	12.50
2005	01/1/05	9.36	14.65	16.70
2006	08/12/06	7.81	13.24	15.30
2007	10/2/07	9.04	13.77	16.70
2008	10/3/08	10.40	15.30	16.70
2009(*)	20/1/09	8.84	13.47	14.30
2009	05/11/09	7.46	11.21	13.20
2010	09/11/10	10.41	16.56	13.40
2011	15/2/11	9.93	15.75	16.70

(*) Buoy failure



Figura 24. Relación temporales. Vistas zona del morro de internada 10/3/2008 y 20/1/2009.

3.4. Dique de la ampliación del puerto de Algeciras en Isla Verde.

El puerto de la Bahía de Algeciras, situado junto al estrecho de Gibraltar, líder en el Mediterráneo en el tráfico de contenedores, comenzó al final de los 90 a estar saturado. Para su solución se planteó su ampliación, en la zona denominada “Isla Verde” (figura 25).

Esta ampliación está formada por un dique vertical exento de 2.060 m, que abriga dos muelles: el Norte de 680 m y 17,5 m de calado y el Este de 1.540 m y calado de 18,5 m, existiendo en su lado sur otro dique en talud de 890 m y una explanada de 100 ha (figura 25).



Figura 25. Ampliación del puerto de Algeciras en Isla Verde. Planta y vista general.

El dique es una estructura vertical con 43 cajones antirreflejantes y una única alineación, separada del muelle Este 413 m, coronada a la +7,5 y cimentada sobre una banqueta de escollera a la cota -35 m y, que se apoya en el fondo en profundidades de -43 m a -28 m. La reducción de la reflexión del oleaje, se produce mediante la parte superior de las celdas de los cajones y del espaldón, que en su primera línea están abiertas (figura 26).

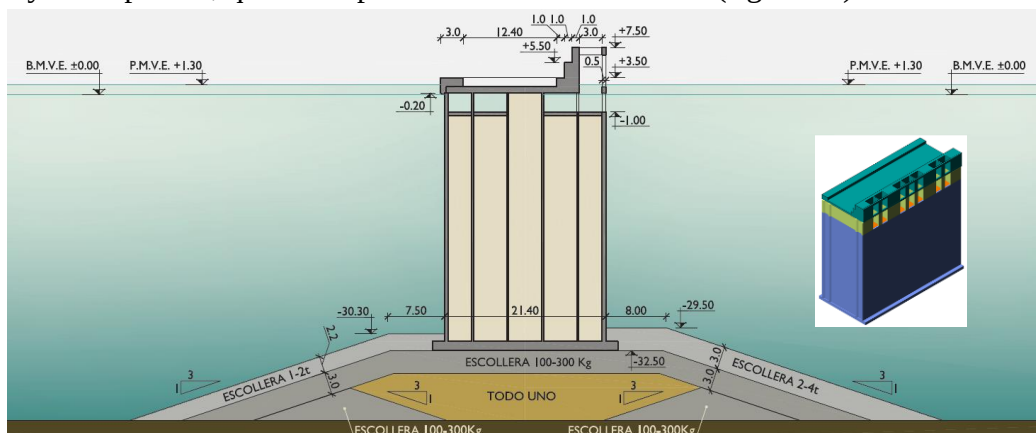


Figura 26. Sección tipo.

Las condiciones de clima marítimo de diseño, corresponden a un periodo de retorno de 275 años, resultando una altura de ola significativa de 4,8 m y un periodo de pico de 9 s

Para el diseño de la tipología antirreflejante, el CEDEX realizó diversos ensayos, llegándose a reducciones en el coeficiente de reflexión respecto a un dique vertical del 60% para periodos cortos (< 8 s) y H_s de 0,5 y 1 m y del 40-20 % para oleajes mayores (figura 27).



Figura 27. Ensayos en modelo físico 2D (E 1:18,33). CEDEX.

Las obras se iniciaron en 2006, estando actualmente finalizadas. En la figura 27, se muestra el avance de la obra en septiembre de 2006 y en su situación actual.



Figura 27. Etapas constructivas y obra finalizada.

Hasta la fecha ha soportado un temporal del E (11/10/2008), con H_s en aguas profundas de 7 m y en el dique 3 m, habiéndose apreciado sólo pequeños asientos de los cajones (< 10 cm).

3.5. Dique de la ampliación del puerto de Cartagena en la dársena de Escombreras.^[10]

El puerto de Cartagena, situado en el Mediterráneo suroriental de España, está formado por dos dársenas, la interior en la bahía de Cartagena y la exterior, denominada de Escombreras, donde se localiza la mayoría del tráfico, especializada en graneles líquidos y sólidos. En los años 90 su capacidad prácticamente se agotó y la Autoridad Portuaria decidió su ampliación.

Esta ampliación quedó configurada por: un dique de 2.157 m, un muelle de 900 m y calado de 20 m, incrementando así la superficie terrestre en 60 ha y las aguas abrigadas en 70 ha. En la figura 27 se muestra una panorámica del puerto y una vista de la dársena de Escombreras.



Figura 27. Panorámica del puerto de Cartagena. Dársenas Cartagena y Escombreras. El dique consta de 4 tramos con profundidad máxima de 52 m. Sus características son:

- Tramo de arranque: 202 m de longitud; estructura en talud con manto de bloques de 45 t
- Dique Sur: 401 m; tipología vertical con 10 cajones de 43, 5 m de eslora, 18,5 m de manga y puntales variables entre 11 y 19 m.
- Dique perimetral: 516 m; rodea a una pequeña isla existente en la traza del dique, el Islote de Escombreras, que por su valor medioambiental se decidió preservar, dejando en su contorno un canal; su tipología es vertical con 12 cajones de 43 x 10 x 9 a 13 m.
- Dique Suroeste: 1038 m; tipología vertical con 20 cajones con esloras de 43,5 y 66,85, manga de 26 m y puntal de 29 m (figura 28).

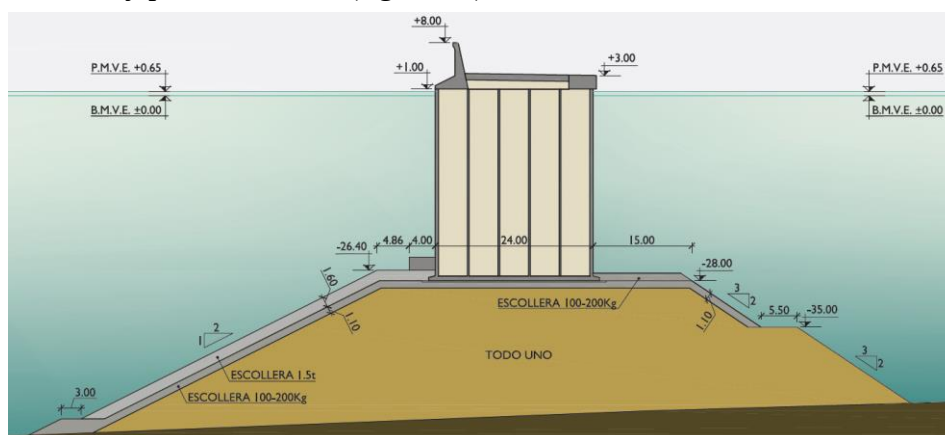


Figura 28. Dique Suroeste. Sección tipo.

Las condiciones de clima marítimo para las que se diseñó el dique corresponden a una altura de ola significativa de 8,1 m un periodo de pico de 13 s. Para el diseño final del dique se acometieron diversos ensayos, mostrándose en la figura 29 el del Dique Perimetral.



Figura 29. Ensayo en modelo físico 3D Dique Perimetral del Islote de Escombreras (E: 1/35).

Las obras se iniciaron en 2003, estando actualmente finalizadas. En la figura 30 se muestra la obra finalizada y diversas etapas constructivas.



Figura 30. Obra finalizada y Etapas constructivas: cajonero y colocación de bloques.

Desde su finalización ha soportado, sin sufrir daños, varios temporales, correspondiendo el mayor de ellos -diciembre de 2005- a una $H_s = 5$ m y un $T_p = 9$ s.

3.6. Diques de la ampliación del puerto de Barcelona. ^[11 y 12]

A finales de los años 80 del siglo pasado, la Autoridad Portuaria, ante la necesidad de atender el crecimiento del tráfico -número y mayor calado-, satisfacer la demanda de nuevas superficies terrestres y resolver la relación puerto-ciudad, planteó el denominado “Plan Delta”. En el Plan, dada su gran envergadura, participaron organismos nacionales, regionales y locales, figurando entre sus actuaciones, además de la ampliación del puerto, el desvío de río Llobregat, la ampliación del aeropuerto (ambos situados al sur del puerto), la ampliación de la zona de actividades logísticas y la creación de nuevas infraestructuras viarias y ferroviarias.

Las obras, comenzaron en diciembre de 2001, consistiendo en la construcción de dos diques: el Sur de 4.800 m y el Este de 2.170 m, una terminal de contenedores con 1.500 m de atraque y calado mínimo de 16 m, así como otras líneas de atraque, aumentando la superficie terrestre en 208 ha. En la figura 32 se muestra una panorámica de la ampliación.



Figura 31. Vista aérea de la ampliación.

Los diques tienen profundidades máximas de 23 a 27 m, habiendo estado su construcción condicionada por la baja capacidad portante de los fondos marinos, que tienen una capa de 50 a 70 m de limos y arcillas blandas, antes de llegar al estrato firme. Sus características son:

- Dique Sur (4.800 m). Consta de tres tramos:
 - Tramo 1 (2.000 m): su tipología es en talud, con manto principal de bloques de 8 a 60 t, coronados con un espaldón a la cota +12 m.. Para garantizar su estabilidad frente al deslizamiento, se dispusieron en sus dos lados amplias bermas de escollera (figura 32).
 - Tramos 2 (1.700 m): su tipología es vertical, constituida por 47 cajones, de 33 m de manga y 21,5 de puntal, cimentados en una amplia banqueta de escollera de 73 m de ancho, con un espaldón coronado a la cota +12 m, (figura 33).
 - Tramo 3 (1.100 m): su tipología es en talud, con manto principal de bloques de 40 t en su tronco, configurándose su morro mediante dos cajones

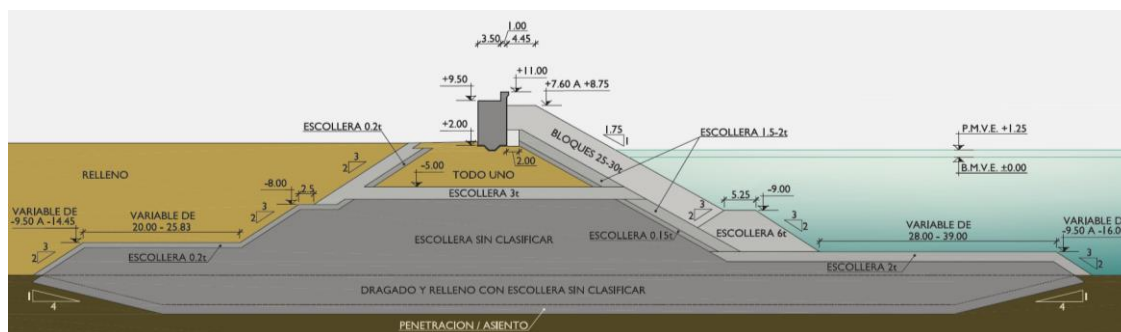


Figura 32. Dique Sur. Tramo 1. Sección tipo.



Figura 33. Dique Sur. Tramo 2. Sección tipo.

- Dique Este (2.165 m). Es una estructura en talud cimentada directamente sobre el fondo, previo dragado de una zanja de 3 m de espesor (figura 34)

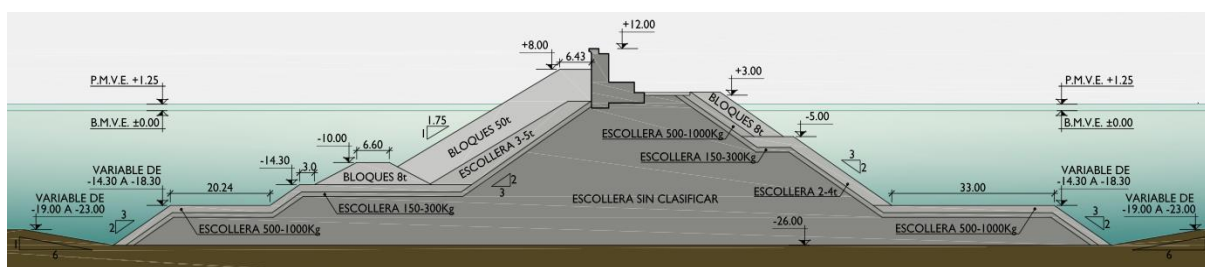


Figura 34. Dique Este. Sección tipo.

Las condiciones de clima marítimo para las que se han diseñado los diques corresponden a una altura de ola significativa de 7,6 m en el tramo 2 (vertical) del Dique Sur y a 7,3 m en el tramo 3 (en talud) y en el Dique Este, adoptándose un periodo de pico de 13 s.

Para el diseño final de ambos diques, en el CEDEX se realizaron múltiples ensayos -2D y 3D- tanto de su configuración final, como de sus fases constructivas, mostrándose en la figura 35, el ensayo 3D del tramo 3 del Dique Sur y del tramo final del Dique Este, así como el 2D de la fase constructiva del Dique del Este con los cajones fondeados sin losa de cubierta.



Figura 35. Ensayos: 3D Diques Este y Sur (E: 1/43) y fase constructiva Dique Este (E: 1/10).

La baja resistencia del terreno (limos y arcillas), determinaron que la resistencia necesaria para la construcción, sólo fuera posible mediante su consolidación y disipación de tensiones intersticiales, por efecto de la carga que la progresiva construcción de los diques transmitía.

Para garantizar que la construcción se adaptaba a las hipótesis de diseño, se instrumentaron 4 secciones en cada dique. Ello permitió: conocer el comportamiento del terreno durante la construcción, calibrar los modelos de cálculo y valorar la seguridad en cada etapa.

La figura 36 muestra la instrumentación de las secciones en talud y la 37 algunas fases constructivas. Se midieron: asientos totales, deformaciones laterales y presiones intersticiales.

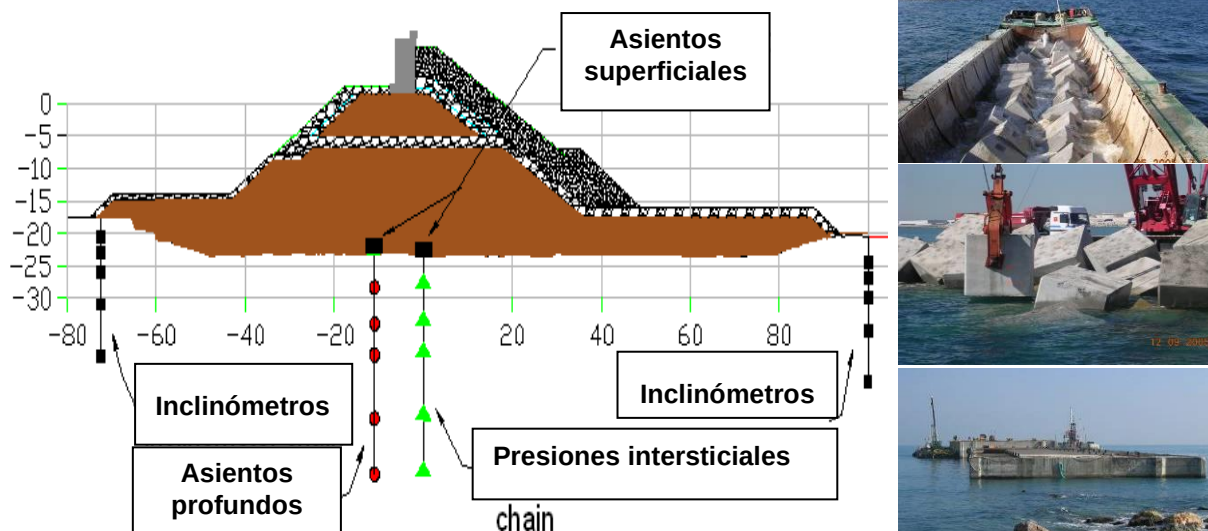


Figura 36. Instrumentación dique en talud y fases constructivas de los diques.

Agradecimientos

Se agradece al Organismo Público Puertos del Estado y a las Autoridades Portuarias citadas en el texto, la confianza depositada en el CEDEX para el desarrollo de los ensayos mencionados en este artículo, así como la información recibida para su elaboración.

Referencias

- [1] CEHOPU (1994). *Puertos Españoles en la Historia*. Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo. CEDEX. Madrid, España.
- [2] Hormigón y acero (2002). El dique flotante de Mónaco. Revista Hormigón y Acero. Números 223 a 226, 2002. Madrid, España.
- [3] ROM. *Recomendaciones de Obras Marítimas*. Puertos del Estado, Madrid, España
- [4] MOPU (1988). *Diques de abrigo en España, tomos 1 y 2*. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid, España.
- [5] CEHOPU (1991). *Los puertos españoles en el siglo XIX*. Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas. CEDEX. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Madrid, España.
- [6]. Puertos del Estado (2012). *Diques de abrigo en los puertos de interés general. Años 1986 a 2011*. Ministerio de Fomento. Madrid, España.
- [7] Díaz Rato J.L., Moyano J. y de Miguel M. (2008). *Extension to the port of Gijón, Spain*. Maritime Engineering, ICE, Vol 161, diciembre 2008, pp. 153-186.
- [8] Grassa, J.M. et al. (2009). *Ferrol outer port : experimental and in situ design studies*. Maritime Engineering, ICE, Vol 162, junio 2008, pp. 57-72.
- [9] Noya, f. (2008). *New port facilities at Punta langosteira, Spain*. Maritime Engineering, ICE, Vol 161, Septiembre 2008, pp. 101-106.
- [10] Castro, D y Cebrián, J. (2003). *aqmpliación de la dársena de Escombreras*. Revista de Obras Públicas, nº 150, pp. 39-46. Madrid, España.
- [11] Puertos del Estado. *Atlas geotécnico del puerto de Barcelona*. Ministerio de Fomento, España.
- [12] Uzcanga, J. et al. (2007). *Case history: Instrumentation of Barcelona Harbour breakwaters*. PIANC, issue 127. Mayo, 2007.

ANEXO: Videos de ensayos en modelo físico y de temporales (puerto exterior de Coruña).