



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

ESTUDIO DE SOLUCIONES PARA LA ADECUACIÓN DEL DIQUE DE ABRIGO DE PORT FÒRUM (BARCELONA)

ANEJO 5. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

Autor: Alejandro Folch Ruiz

Tutora: María Esther Gómez Martín

Valencia, septiembre de 2019

ÍNDICE

1.	OBJETO	1
2.	DESCRIPCIÓN DEL DIQUE EXISTENTE	2
2.1.	DESCRIPCIÓN DEL DIQUE EN TALUD CON CUENCO AMORTIGUADOR	2
2.2.	VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL DIQUE EN TALUD CON CUENCO AMORTIGUADOR RESPECTO A UN DIQUE EN TALUD TRADICIONAL	3
2.3.	DIQUES CON CUENCO AMORTIGUADOR CONSTRUIDOS EN ESPAÑA .	3
2.4.	COMPARACIÓN DEL DIQUE EN TALUD CON CUENCO AMORTIGUADOR EL DIQUES EN TALUD TRADICIONAL.....	5
3.	CASOS SIMILARES	7
4.	ALTERNATIVAS ESTUDIADAS.....	9
4.1.	METODOLOGÍA DE ESTUDIO	9
4.1.1.	Prediseño	9
4.1.2.	Estimación de costes	10
4.1.3.	Valoración	10
5.	ALTERNATIVA A: DESMANTELAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DE UN NUEVO DIQUE DE ABRIGO	12
5.1.	DESCRIPCIÓN.....	12
5.2.	PREDISEÑO	12
5.3.	ESTIMACIÓN DE COSTES.....	14
5.4.	VALORACIÓN	14
5.4.1.	Criterios económicos.....	14
5.4.2.	Criterios funcionales.....	14
5.4.3.	Criterios ambientales.....	14
5.4.4.	Criterios estéticos.....	14
6.	ALTERNATIVA B: RECRECIMIENTO ESPALDÓN	15
6.1.	DESCRIPCIÓN.....	15
6.2.	PREDISEÑO	15
6.3.	ESTIMACIÓN DE COSTES.....	15
6.4.	VALORACIÓN	16
6.4.1.	Criterios económicos.....	16
6.4.2.	Criterios ambientales.....	16
6.4.3.	Criterios funcionales.....	16
6.4.4.	Criterios estéticos.....	17
7.	ALTERNATIVA C: TALUD DE ESCOLLERA.....	18
7.1.	DESCRIPCIÓN.....	18
7.2.	PREDISEÑO	18

8.	ALTERNATIVA D: TALUD DE CUBOS.....	20
8.1.	DESCRIPCIÓN.....	20
8.2.	PREDISEÑO	20
8.3.	ESTIMACIÓN DE COSTES.....	22
8.4.	VALORACIÓN	23
8.4.1.	Criterios económicos.....	23
8.4.2.	Criterios ambientales.....	23
8.4.3.	Criterios funcionales.....	23
8.4.4.	Criterios estéticos.....	23
9.	ALTERNATIVA E: TALUD CON CUBÍPODOS	24
9.1.	DESCRIPCIÓN.....	24
9.2.	PREDISEÑO	25
9.3.	ESTIMACIÓN DE COSTES.....	26
9.4.	VALORACIÓN	27
9.4.1.	Criterios económicos.....	27
9.4.2.	Criterios ambientales.....	27
9.4.3.	Criterios funcionales.....	28
9.4.4.	Criterios estéticos.....	28
10.	ALTERNATIVA F: NUEVO CUENCO AMORTIGUADOR CON TALUD DE CUBÍPODOS.....	29
10.1.	DESCRIPCIÓN.....	29
10.2.	PREDISEÑO	29
10.2.1.	Capas del dique.....	29
10.2.2.	Cuenco amortiguador	30
10.3.	ESTIMACIÓN DE COSTES	33
10.4.	VALORACIÓN	34
10.4.1.	Criterios económicos	34
10.4.2.	Criterios ambientales	34
10.4.3.	Criterios funcionales	34
10.4.4.	Criterios estéticos	34
11.	VALORACIÓN FINAL.....	35
12.	REFERENCIAS	36

1. OBJETO

La finalidad de este anejo es la elección de la alternativa más adecuada para la reforma del dique de abrigo vertical existente. En primer lugar, se analizarán las diferentes alternativas de reforma que pueden realizarse, realizando un prediseño, una estimación de costes y una valoración multicriterio.

Tras haber valorado cada una de las alternativas, se procederá a valorar conjuntamente todas ellas y determinar la alternativa elegida, que se ampliará en el *Anejo 7. Desarrollo de la solución adoptada*.

Este anejo se fundamenta en los datos y condicionantes obtenidos en los anejos:

- *Anejo 1. Antecedentes y estado actual.*
- *Anejo 2. Estudios previos.*
- *Anejo 4. Clima marítimo y dinámica litoral.*
- *Anejo 5. Ensayos con modelo físico de dique en talud con cuenco amortiguador.*

2. DESCRIPCIÓN DEL DIQUE EXISTENTE

Actualmente, en Port Fòrum hay un dique vertical fondeado a una profundidad de aproximadamente 7 m. Como se ha descrito en anejos previos, es extraño encontrar esta tipología de diques a tal profundidad. Se trata de un dique con un doble espaldón; el interior es más alto que el exterior y forman un cuenco amortiguador. Cuando rebasan las olas, la pendiente de la plataforma del dique dirige el agua hacia unos desagües que hay en el espaldón interior situados cada 5 m.

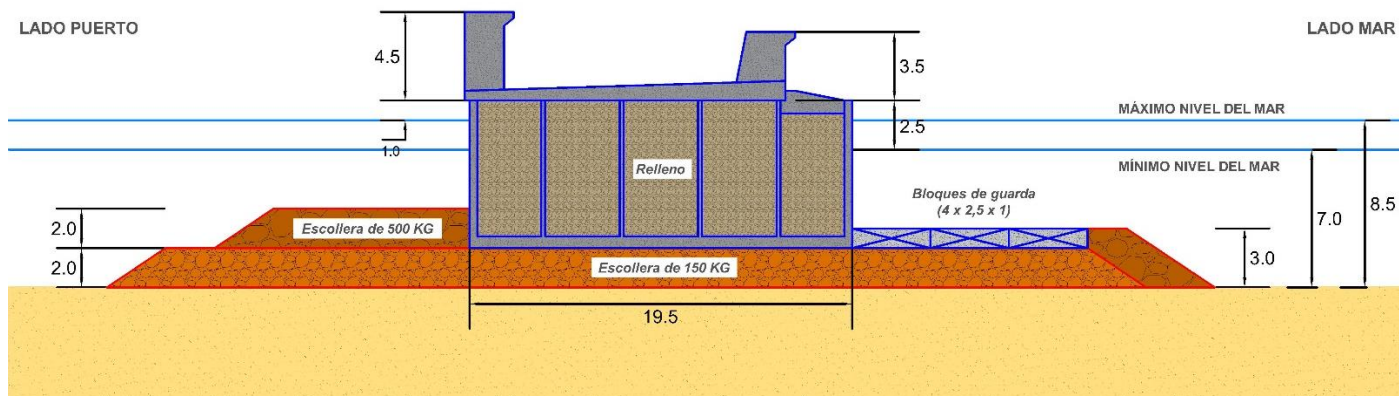


Figura 1. Sección tipo del dique actual.

Para ver la sección con mayor detalle, se debe consultar el *Plano 3. Sección tipo del dique de abrigo actual*.

A continuación, se realiza una descripción más minuciosa de los diques en talud con cuenco amortiguador y su presencia en España.

2.1. DESCRIPCIÓN DEL DIQUE EN TALUD CON CUENCO AMORTIGUADOR

Se trata de un dique donde la superficie expuesta al oleaje está formada por un manto de protección y se remata en coronación con un espaldón. La singularidad de este dique consiste en adelantar el manto dejando un espacio entre este y el espaldón. Esta disposición particular provoca que la parte de la ola que sobrepasa la defensa caiga sobre el cuenco, produciéndose turbulencias que disipan la energía.

Además, el efecto que supone el aumento de anchura del dique produce que la parte de la ola que alcanza el espaldón produce fuerzas menores que en las condiciones tradicionales. Por lo tanto, se puede disminuir la cota del espaldón respecto al tradicional para la misma ola de cálculo.

Seguidamente aparece una sección tipo de un dique en talud con cuenco amortiguador.

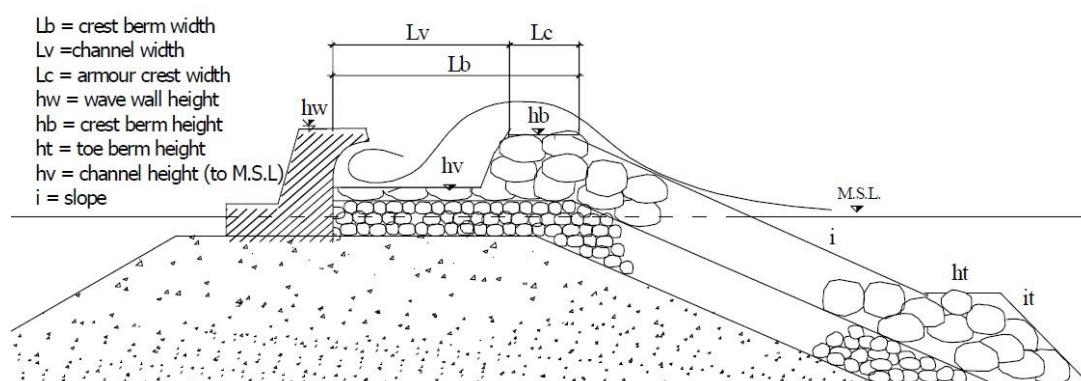


Figura 2. Sección tipo de un dique en talud con cuenco amortiguador.

Normalmente estos diques están contruidos en puertos deportivos de zonas turísticas donde los aspectos estéticos y la posibilidad de que el usuario pueda ver el mar desde el área abrigada adquiere una gran importancia.

2.2. VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL DIQUE EN TALUD CON CUENCO AMORTIGUADOR RESPECTO A UN DIQUE EN TALUD TRADICIONAL

Por un lado, estas son las ventajas de la tipología de cuenco amortiguador:

- la reducción de la cota de coronación
- la reducción de las fuerzas sobre el espaldón
- la disminución de la reflexión del oleaje
- la reducción de los asientos del dique
- una mayor plataforma de trabajo
- una mejora la estabilidad hidrodinámica de los elementos del manto

Por otro lado, estas son las desventajas de la tipología de cuenco amortiguador:

- un mayor coste por el volumen de materiales y espacio utilizado
- un control de construcción más complejo
- una mayor profundidad al tener mayor anchura
- una selección de materiales más compleja
- un menor conocimiento de la sección con cuenco amortiguador (efectos 3-D, morros, etc.)

Finalmente, la tipología del cuenco amortiguador parece apropiada en tres supuestos: por la exigencia de baja cota de coronación, por la necesidad de reforzar un dique vertical infradimensionado y para construir a poca profundidad y con malos cimientos.

2.3. DIQUES CON CUENCO AMORTIGUADOR CONSTRUIDOS EN ESPAÑA

En España hay muchos puertos deportivos cuyos diques de abrigo son de la tipología de cuenco amortiguador. A continuación, se muestra una tabla con las principales características de cada uno de ellos. Hay que señalar que las cotas de coronación están referidas en metros sobre la Bajamar Viva Equinoccial.

Localización	Ola de cálculo (m)	Cota de coronación (m)			Talud frontal
		Manto	Espaldón	Cuenco	
Fuengirola (Málaga)	6,00	4,50	6,20	1,50	3:2

Marbella (Málaga)	4,85	4,00	5,20	1,50	3:2
Torre del Mar (Málaga)	4,65	3,80	5,00	1,50	3:2
Calpe (Alicante)	7,00	4,50	6,20	1,50	3:2
Denia (Alicante)	6,00	4,50	6,20	1,50	3:2
Ceuta	4,00	5,00	7,20	4,00	3:2
El Balis (Barcelona)	4,85	4,10	3,35	1,70	3:2
Sotogrande (Cádiz)	6,00	4,80	3,30	1,50	2,5:1
Agaete (Las Palmas de Gran Canaria)	-	-	-	-	-

Tabla 1. Características de los diques en talud con cuenco amortiguador españoles.

Con el objetivo de conocer mejor este tipo de dique, se van a ofrecer algunas secciones tipo de los diques previamente expuestos.

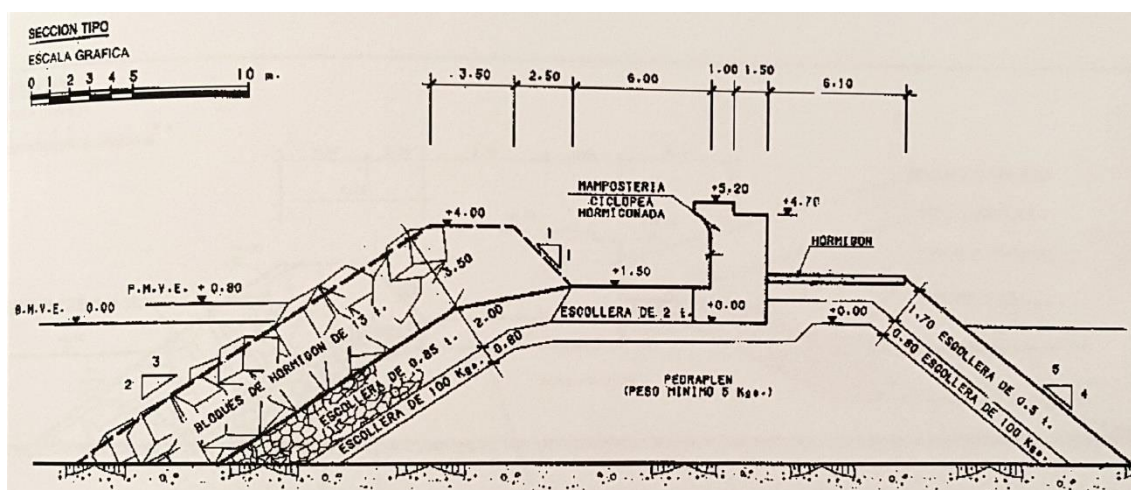


Figura 3. Sección tipo del dique de Marbella.

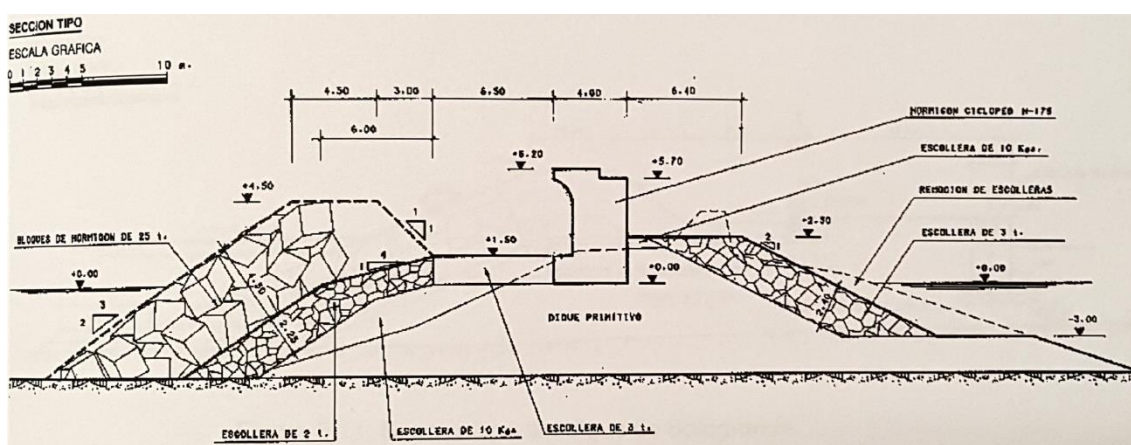


Figura 4. Sección tipo del dique de Denia.

2.4. COMPARACIÓN DEL DIQUE EN TALUD CON CUENCO AMORTIGUADOR EL DIQUES EN TALUD TRADICIONAL

- Cota de coronación de la berma: $0,75 \cdot H_c$
- Cota de coronación del espaldón: $1,50 \cdot H_c$

Localización	Ola de cálculo (m)	Cota de coronación (m) - Tipología Iribarren		Cota de coronación (m) – Tipología cuenco	
		Manto	Espaldón	Manto	Espaldón
Fuengirola (Málaga)	6,00	5,30	9,80	4,50	6,20
Marbella (Málaga)	4,85	4,44	8,08	4,00	5,20
Torre del Mar (Málaga)	4,65	4,29	7,77	3,80	5,00
Calpe (Alicante)	7,00	5,25	10,5	4,50	6,20
Denia (Alicante)	6,00	4,50	9,00	4,50	6,20
Ceuta	4,00	4,40	7,40	5,00	7,20
El Balis (Barcelona)	4,85	3,64	7,28	4,10	3,35
Sotogrande (Cádiz)	6,00	5,30	9,80	4,80	3,30
Agaete (Las Palmas de Gran Canaria)	-	-	-	-	-

5

El aspecto económico es una cuestión importante que se plantea al comparar las distintas tipologías. El aumento de la anchura supone mayor cantidad de materiales que, en contraposición, se ahorran por la reducción de la cota de coronación y al construir un espaldón más pequeño, que es una de las unidades más caras al tratarse de hormigón.

A continuación se expone un ejemplo del dique de Fuengirola (Málaga). En la tabla se presentan las superficies de cada elemento de la sección de manera aproximada y se obtiene el porcentaje de incremento respecto a la sección tradicional.

	Sección tradicional (m ²)	Sección con cuenco (m ²)	
Manto de bloques	93,40	94,10	=
Filtro de escollera	68,30	83,00	+ 20%
Núcleo (todo uno)	112,20	167,40	+ 50%
Espaldón	40,00	20,00	- 50%

Figura 6. Comparación se secciones entre distintas tipologías en el caso de Fuengirola.

Por lo tanto, se requiere mayor volumen de material todo uno en el núcleo (50% más), así como de escollera en la capa del filtro (20% más), siendo similar para los bloques. En cambio, el volumen de hormigón es mucho menor (50% menos). La figura siguiente muestra la comparación gráfica del dique de Fuengirola.

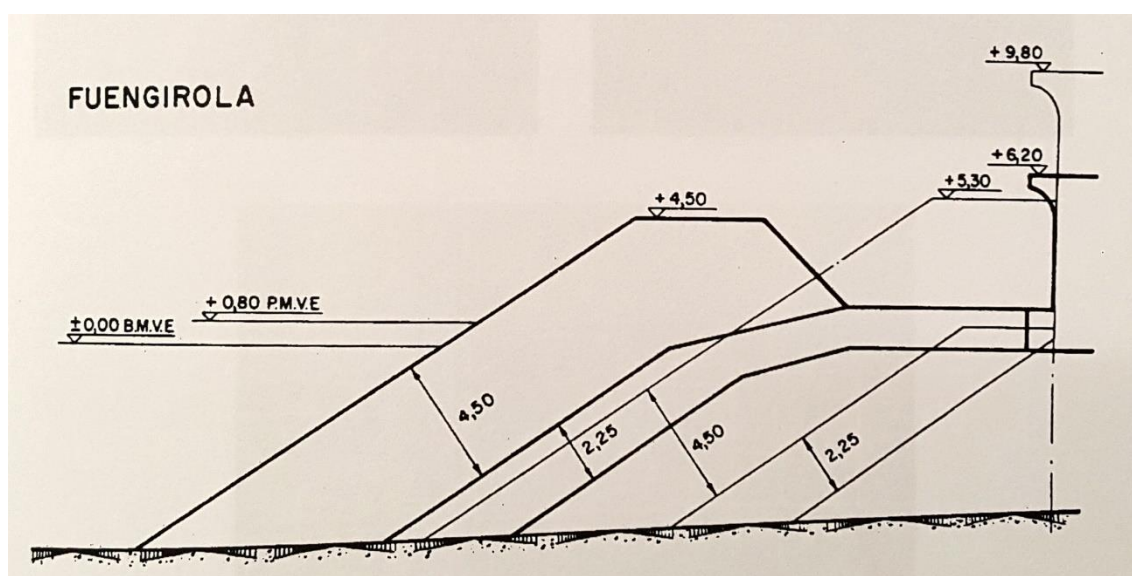


Figura 7. Comparación gráfica de la sección del dique con cuenco amortiguador y del dique tradicional.

En el aspecto constructivo, como ventaja se dispone de una plataforma de trabajo más amplia, que facilita la coordinación de los medios y el trabajo en los distintos tajos. El aumento de anchura requerirá irse a fondos más profundos, pero supondrá una ventaja si el terreno es inconsistente al repartir las cargas con presiones menores que causarán menores asentos.

3. CASOS SIMILARES

El caso que afronta el estudio es particular porque no se trata de construir un dique desde cero, sino que se trata de reformar el dique de abrigo existente para evitar los grandes rebases en épocas de fuertes temporales.

En el año 1999, el dique vertical de Gela (Italia), que entonces tenía 35 años, necesitaba ser protegido para reducir los riesgos de fallo tanto estructural como funcional debido al gran rebase de las olas sobre el espaldón. El dique estaba formado por 60 cajones, tenía 1.200 m de longitud y servía para proporcionar abrigo a buques petroleros.

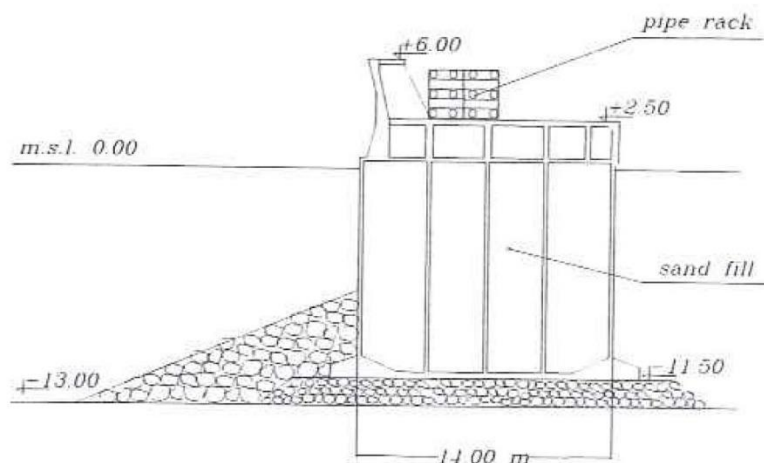


Figura 8. Sección construida del dique de abrigo vertical de Gela (Italia).

Se probaron hasta 28 diferentes secciones con cambios en la geometría y en los elementos que forman el manto principal. Todas estaban basadas en la construcción de un talud adjunto al dique vertical existente. La sección definitiva muestra una berma relativamente baja protegida por bloques Core-loc con un canal de drenaje disipador del rebase antes del espaldón del dique existente, denominado “cuenco amortiguador”. Esta estructura proporcionó la mejor respuesta al rebase con una gran estabilidad, reduciendo las cargas en los cajones y en el lecho marino.

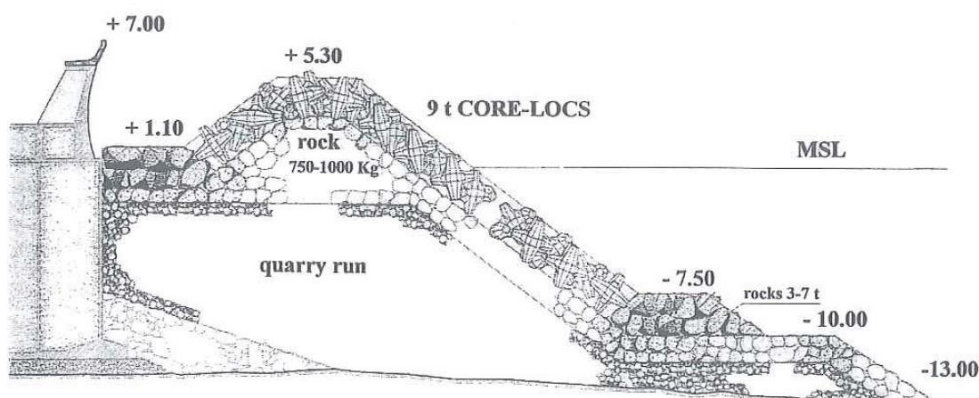


Figura 9. Sección definitiva para el refuerzo del dique de abrigo vertical de Gela (Italia).

Seguidamente se muestra una imagen de la construcción del refuerzo del dique utilizando medios marítimos.



Figura 10. Construcción del refuerzo del dique de abrigo de Gela (Italia).

4. ALTERNATIVAS ESTUDIADAS

La elección de una alternativa está condicionada por la existencia de un dique vertical. En este puerto, es peculiar la presencia de este tipo de dique en profundidades que rondan los 7 m ya que suelen utilizarse con profundidades mayores a 20 m. Sin embargo, como se explica en el *Anejo 1. Antecedentes y estado actual*, el proyecto inicial de dique en talud se modificó por motivos estéticos.

En los sucesivos apartados se valorarán diferentes alternativas posibles para llevar a cabo en Port Fòrum con el objetivo de crear un puerto más seguro frente a los rebases y atractivo para las personas.

Estas son las alternativas que se considerarán:

ALTERNATIVA	DESCRIPCIÓN
A	Desmantelamiento del dique y construcción de uno nuevo
B	Recrecimiento del espaldón del dique actual
C	Refuerzo del dique actual con un talud de escollera
D	Refuerzo del dique actual con un talud de cubos de hormigón
E	Refuerzo del dique actual con un talud de cubípodos
F	Refuerzo del dique actual mediante la creación de un nuevo cuenco amortiguador con talud de cubípodos y la demolición del espaldón interior

Tabla 3. Alternativas estudiadas.

4.1. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

En primer lugar, se realizará una descripción de la alternativa. En segundo lugar, se realizarán algunos cálculos de diseño a grandes rasgos y se valorarán diferentes criterios, realizando una estimación de costes de cada alternativa.

4.1.1. Prediseño

En aquellos casos en los que se pretenda reforzar el dique existente será necesario obtener el peso de los elementos que forman el manto principal porque es un factor de diseño clave en los diques a partir del cual se obtienen el resto de las capas.

El manto principal debe ser capaz de mantener su integridad frente a las acciones del oleaje. Para calcular el peso de las piezas que formarán el manto se utilizará la fórmula de Hudson (1959), basada en la de Iribarren (1938).

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

Donde:

- W es el peso de la pieza
- K_D es el coeficiente de estabilidad
- H es la altura de ola
- γ es el peso específico de la pieza

- γ_w es el peso específico del agua de mar
- α es el ángulo que forma el talud del manto con la horizontal

Por otra parte, se obtendrá el lado del cubo equivalente de cada pieza, en función del peso obtenido, mediante la fórmula siguiente:

$$D_n = \left(\frac{W}{\gamma} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Donde:

- D_n es el diámetro nominal de la pieza
- W es el peso de la pieza
- γ es el peso específico del material estudiado

También será necesario obtener el tamaño y el peso de los elementos de la berma de pie. Se utiliza la fórmula siguiente, obtenida también del *Manual del Cubípodo* ® 2015.

$$\frac{H_s}{\Delta \cdot D_{n50}} = \left[2 + 2,62 \cdot \left(\frac{h_t}{h_s} \right)^{2,7} \right] \cdot N_{od}^{0,15}$$

Donde:

- H_s es la altura de ola significativa
- $\Delta = \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1$
- D_{n50} es el diámetro nominal de la escollera de la berma de pie
- h_t es la profundidad de la berma de pie
- h_s es la profundidad a pie de dique
- N_{od} es la variable que indica el daño de la berma

4.1.2. Estimación de costes

Se obtendrá un coste aproximado de cada alternativa. Para ello únicamente se tendrán en cuenta las unidades de obra más importantes. Los precios unitarios serán muy orientativos y se obtendrán de otros trabajos académicos, páginas web de generación de precios y el *Manual del Cubípodo* ® 2015.

Finalmente, se ofrecerá un presupuesto de licitación muy orinetativo para cada alternativa, que podrá variar con respecto al definitivo en el caso de la solución adoptada.

4.1.3. Valoración

Con el objetivo de elegir una alternativa de las definidas anteriormente se realizará un análisis multicriterio siguiendo los criterios que se definen posteriormente.

- Criterios económicos

Estos criterios incluyen los costes de construcción y de mantenimiento. Este criterio es importante en los diques en talud porque el manto supone gran parte del coste. Se le asigna un coeficiente de ponderación de 3.

- Criterios ambientales

Se considerará tanto el impacto ambiental durante la construcción como durante la explotación. Como en todos los casos es necesaria la explotación de canteras, se le asigna un coeficiente de ponderación de 3.

- **Criterios funcionales**

Este criterio se basa en el punto de vista estructural. Se valorará la fiabilidad a largo plazo, la resistencia estructural, el remonte y el rebase. El coeficiente de ponderación que se le asigna es un 5, ya que es un aspecto fundamental para la adecuación del dique de abrigo de Port Fòrum.

- **Criterios estéticos**

Se tendrá en cuenta el impacto visual que produzca, la cota de coronación del dique y el atractivo hacia las personas. Se asigna un coeficiente de ponderación de 4 a estos criterios.

Por lo tanto, así queda el reparto de coeficientes para cada uno de los criterios expuestos anteriormente.

Criterio	Coeficiente de ponderación
Económico	3
Ambiental	3
Funcional	5
Estético	4

Tabla 4. Coeficientes de ponderación para cada uno de los criterios.

Finalmente, con la finalidad de realizar la valoración final de las distintas alternativas, se les asignará subjetivamente un valor de 1 a 5 a cada uno de los diferentes criterios, siendo 5 el mejor valor y 1 el peor valor.

Valoración	Puntuación
Muy bueno	5
Bueno	4
Regular	3
Malo	2
Muy malo	1
No afecta	0

Tabla 5. Puntuación para cada valoración.

5. ALTERNATIVA A: DESMANTELAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DE UN NUEVO DIQUE DE ABRIGO

5.1. DESCRIPCIÓN

Esta alternativa consiste en la construcción de un nuevo dique de abrigo en Port Fòrum, que conlleva el desmantelamiento del dique vertical existente. Para evitar el cierre temporal del puerto durante la construcción, se establecería una nueva alineación del dique que serviría de ampliación del puerto. Posteriormente ya se podría retirar el dique vertical.

5.2. PREDISEÑO

Tras realizar un prediseño gráfico muy básico, se ha determinado que sería necesaria la construcción de aproximadamente 1.300 m de un nuevo dique de abrigo para Port Fòrum.

Seguidamente se muestra una imagen del puerto en el estado actual y otra imagen de cómo quedaría tras llevar cabo esta alternativa.

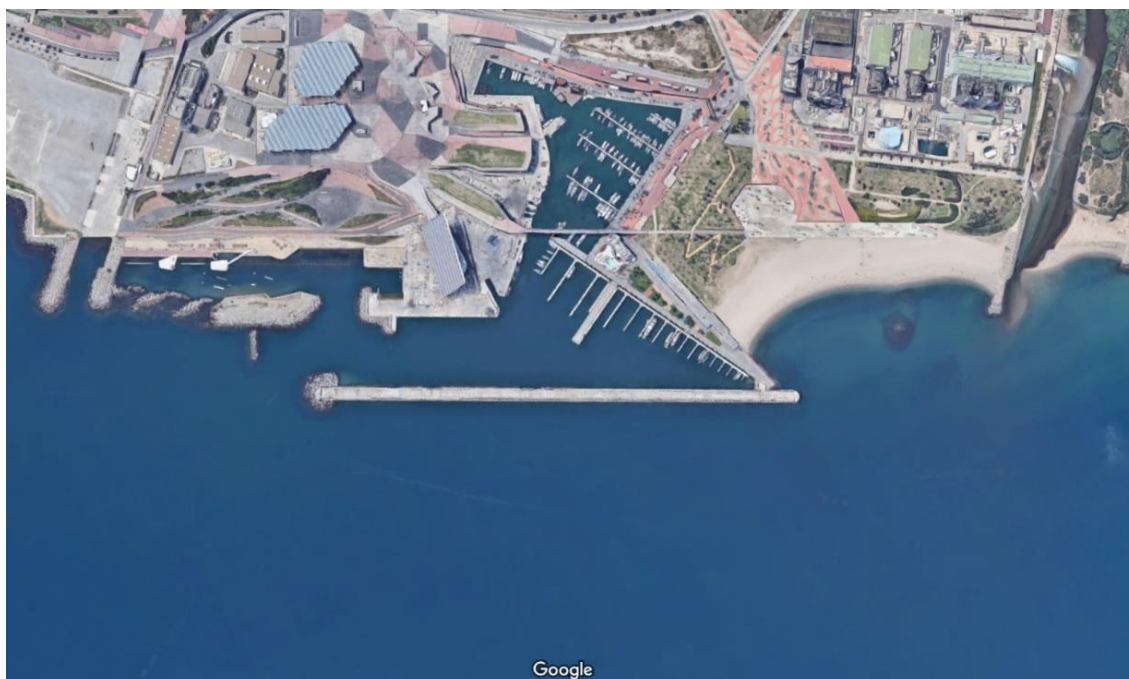


Figura 11. Imagen de Port Fòrum en la actualidad (2019).



Figura 12. Imagen del aspecto de la Alternativa A.

El aspecto de la sección tipo de esta alternativa sería el siguiente.

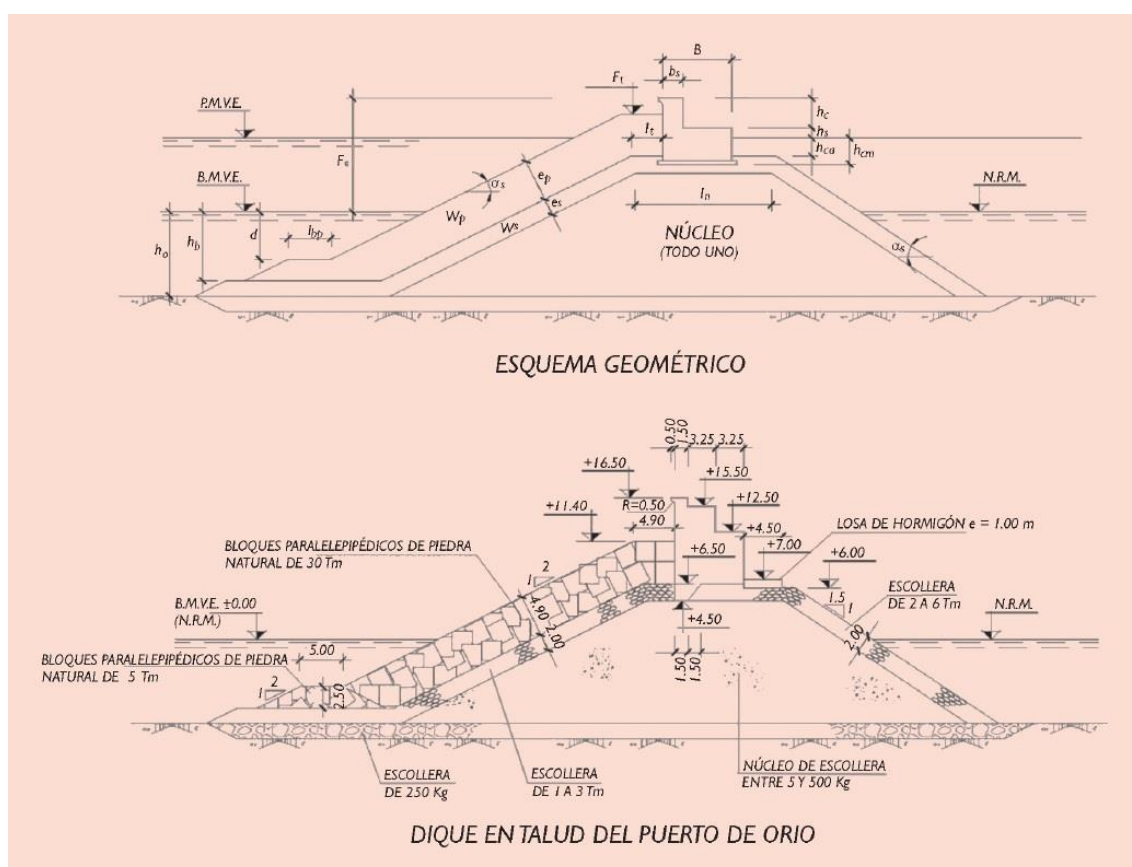


Figura 13. Sección tipo de un dique en talud de tipología Iribarren. Fuente: ROM 1.0-09.

5.3. ESTIMACIÓN DE COSTES

Para esta alternativa no se va a realizar una estimación de costes porque no se pretende dismantelar el dique y construir uno nuevo al tratarse de un puerto relativamente nuevo (2004). En cambio, sí que se realizará una valoración.

5.4. VALORACIÓN

5.4.1. Criterios económicos

Esta alternativa consiste en la construcción de aproximadamente 1.300 m de dique de abrigo. Además, hay que dismantelar el dique vertical que existe. Por lo tanto, esta será presumiblemente la alternativa más cara comparada con el resto. Se asigna un valor de 2.

5.4.2. Criterios funcionales

En este aspecto, será una alternativa muy buena porque permitirá la reducción de los rebases y aumentará la seguridad y la vida útil del puerto. Se asigna un valor de 4.

5.4.3. Criterios ambientales

Ambientalmente, habrá que recurrir a un mayor número de materiales de cantera que además de encarecer la obra, supondrán un impacto medioambiental durante la construcción. Por otro lado, la construcción de un dique a mayor profundidad tendrá un impacto considerable en el transporte sólido litoral. Se asigna un valor de 2.

5.4.4. Criterios estéticos

En cuanto a la estética, esta alternativa aumentará la cota de coronación al encontrarse el dique a una mayor profundidad. Sin embargo, el puerto quedará renovado, con un mayor número de atraques. Se asigna un valor de 5.

6. ALTERNATIVA B: RECRECIMIENTO ESPALDÓN

6.1. DESCRIPCIÓN

Esta segunda alternativa se basa en el aumento de la cota de coronación del espaldón exterior del dique de abrigo de Port Fòrum, al menos a la misma cota que el espaldón interior, para no reducir la visibilidad. Para llevar a cabo esta solución, habría que demoler el espaldón exterior y construir uno nuevo, de mayores dimensiones.

6.2. PREDISEÑO

Se plantea el recrecimiento del espaldón exterior a la misma cota que el espaldón interior. Esto supone el aumento de 1 m de altura y 2,60 m² de sección del espaldón exterior, manteniendo unas dimensiones proporcionales.

El hormigón que se utilizará, según las especificaciones de la EHE, será de tipo HA-30/B/20/IIIa+Qb, ya que se encuentra en un ambiente marino.

Seguidamente se muestra una imagen de la sección tipo del dique con el nuevo espaldón exterior.

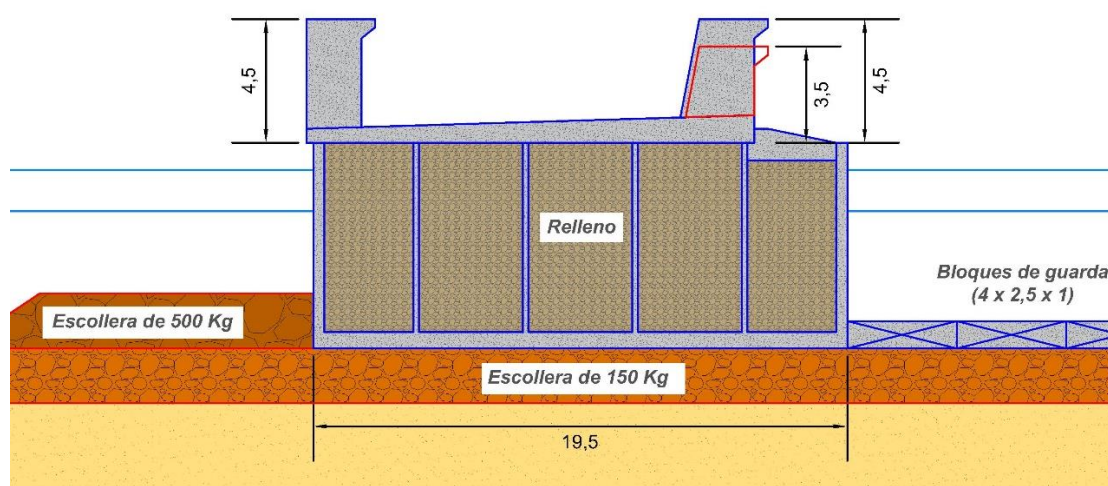


Figura 14. Sección tipo de la Alternativa B. Cotas en metros.

Para ver la sección con mayor detalle se debe consultar el *Plano 4. Alternativa B*.

6.3. ESTIMACIÓN DE COSTES

En este caso las principales unidades de obra son la demolición de espaldón exterior antiguo y la construcción de uno nuevo de mayores dimensiones.

El coste estimado de la alternativa B es 2.500.000 €.

ESTIMACIÓN DE COSTES – ALTERNATIVA B					
CÓDIGO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO (€)	TOTAL (€)
UO1	m³	Demolición de espaldón de hormigón armado con medios mecánicos.	4.585	63	289.978
UO2	m³	Construcción de espaldón de hormigón armado, incluso materiales, equipo, maquinaria y mano de obra.	6.588	159	1.048.277
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL					1.338.255
GASTOS GENERALES (GI)			16	% (s/PEM)	214.121
BENEFICIO INDUSTRIAL (BI)			6	% (s/PEM)	80.295
PEM + GG + BI					1.632.671
I.V.A.			21	% (s/PEM + GG + BI)	342.861
PEM + GG + BI + IVA					1.975.532
IMPREVISTOS			20	% (s/PEM + GG + BI + IVA)	395.106
COSTE TOTAL - ALTERNATIVA B					2.370.638

Tabla 6. Estimación de costes de la Alternativa B.

6.4. VALORACIÓN

6.4.1. Criterios económicos

Esta opción es la más barata porque requiere el menor número de materiales. Sin embargo, los costes de mantenimiento podrían ser elevados debido a los antecedentes de rotura del espaldón ocurridos en épocas de fuertes temporales. Se asigna un valor 4.

6.4.2. Criterios ambientales

La ejecución de esta alternativa va a producir muy poco impacto medioambiental porque no se va a recurrir a la extracción de material de cantera y el medio marino no se verá afectado. Se asigna un valor de 4.

6.4.3. Criterios funcionales

Funcionalmente, es probable que los rebases no se solucionen únicamente aumentando la cota de coronación del espaldón exterior a la misma cota que el espaldón interior. Se asigna un valor de 2.

6.4.4. Criterios estéticos

Si esta opción se lleva a cabo, el puerto seguirá prácticamente igual, sin ninguna renovación estética y un dique de abrigo aparentemente igual. Se asigna un valor de 3.

7. ALTERNATIVA C: TALUD DE ESCOLLERA

7.1. DESCRIPCIÓN

La escollera es un material natural procedente de la explotación de una cantera, que posee una resistencia estructural muy elevada. Su coeficiente de estabilidad es bajo ($K_D=4$).



Figura 15. Imagen de un talud de escollera.

La alternativa C consiste en el refuerzo del dique vertical mediante la colocación de un talud de dos capas de escollera con el correspondiente relleno. La idea es mantener el dique existente con el cuenco amortiguador, pero provocando que las olas rompan directamente en el talud de escollera, reduciendo así el rebase.

7.2. PREDISEÑO

Como se ha explicado en el apartado 3.1., hay que calcular el peso de la escollera empleando la fórmula de Hudson.

Sección	K_D	H (m)	γ (kg/m ³)	γ_w (kg/m ³)	cot α	W_{manto} (kg)	D_n (m)
Tronco	4	6,6	2.650	1.025	1,50	32.000	2,30

Tabla 7. Cálculo del peso de la escollera en el manto principal.

A la vista de estos resultados, esta alternativa queda descartada porque las canteras normales proporcionan escollera de hasta 6 toneladas, haciendo inviable la posibilidad de encontrar escollera de 32 toneladas. Por lo tanto, no se realizará ni estimación de costes ni valoración de esta alternativa.

De todas formas, seguidamente se muestra una imagen de la sección tipo del tronco del dique reforzado con un talud de dos capas de escollera.

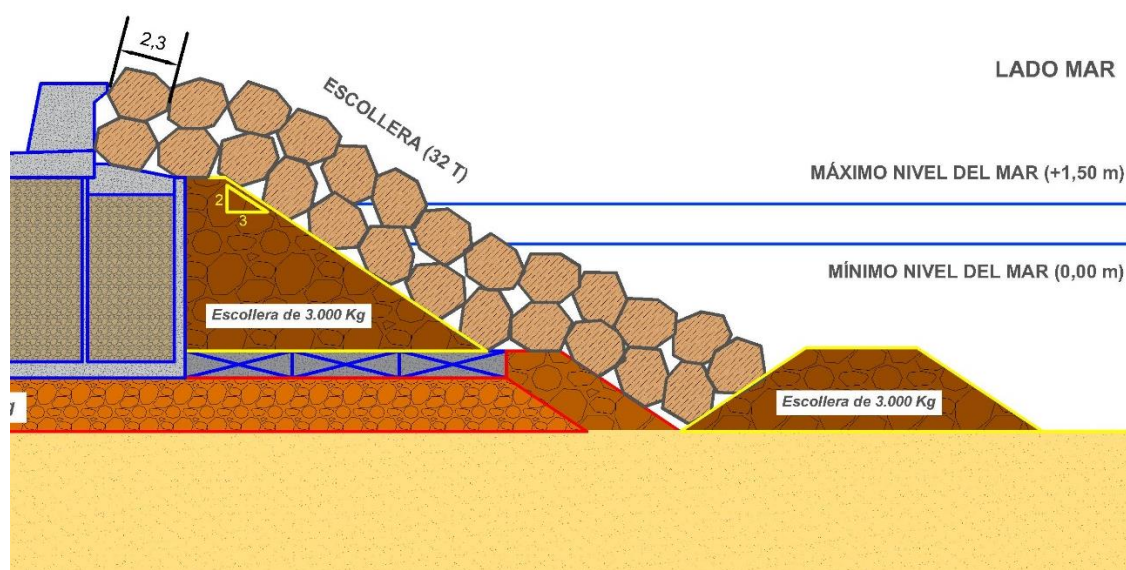


Figura 16. Sección tipo de la Alternativa C. Cotas en metros.

Para ver la sección con mayor detalle se debe consultar el *Plano 5. Alternativa C*.

8. ALTERNATIVA D: TALUD DE CUBOS

8.1. DESCRIPCIÓN

Los cubos son elementos masivos prefabricados de hormigón. Tienen forma cúbica, se utilizan en mantos bicapa y poseen una elevada resistencia estructural. El coeficiente de estabilidad tanto en el tronco como en el morro es bajo ($K_D=6$). Tienen la desventaja de que en los temporales tienden a colocarse cara contra cara, favoreciendo el remonte y rebase de las olas.



Figura 17. Imagen de un manto de cubos.

Por lo tanto, la alternativa D consiste en el refuerzo del dique vertical mediante la colocación de un talud de elementos prefabricados de hormigón, en este caso con el manto exterior formado por dos capas de cubos con el correspondiente relleno. La idea es mantener el dique existente con el cuenco amortiguador, pero provocando que las olas rompan directamente en el talud de cubos, reduciendo así el rebase.

8.2. PREDISEÑO

Como se ha explicado en el apartado 3.1., se debe calcular el peso de los cubos, como factor de diseño básico. Se emplea el talud recomendado de 3H:2V.

Sección	K_D	H (m)	γ (kg/m ³)	γ_w (kg/m ³)	cot α	W_{manto} (kg)	D_n (m)
Tronco	6	6,60	2.350	1.025	1,50	35.000	2,45
Morro	5	6,60	2.350	1.025	1,50	42.000	2,61

Tabla 8. Cálculo del peso de los cubos del manto principal.

Sección	W_{manto} (kg)	$W_{\text{min_filtro}}$ (kg)	$W_{\text{max_filtro}}$ (kg)	W_{filtro} (kg)	D_n (m)
Tronco	35.000	1.750	3.500	3.000	1,04
Morro	42.000	2.100	4.200	3.000	1,04

Tabla 9. Cálculo del peso la escollera de la capa de filtro.

Por un lado, se ha decidido usar esta capa de filtro como núcleo porque debido al poco espacio, el núcleo sería de reducidas dimensiones.

Se realizará una única sección tipo con cubos de 2,61 m debido a la poca diferencia entre los cubos del tronco y del manto.

También es necesario calcular el peso y el tamaño de los elementos de la berma de pie, que suelen ser de 10% al 20% del peso de las piezas del manto.

Sección	Δ	W (kg)	D_{n50} (m)	h_s (m)	h_t (m)	N_{od}	H (m)
Tronco	1,59	4.000	1,15	8,50	6,21	0,50	7,6
Morro	1,59	4.000	1,15	8,50	6,21	0,50	7,6

Tabla 10. Cálculo de la berma de pie.

Con escollera de 4.000 kg, aproximadamente el 10% del peso de las piezas del manto, se obtiene una berma capaz de soportar olas de hasta 7,6 m que son superiores a la ola de cálculo.

Por lo tanto, esta alternativa se basaría en el refuerzo del dique de abrigo con un talud bicapa de cubos de 42 toneladas sobre escollera de 3 toneladas que actúa de como capa de filtro y núcleo. Además, los cubos se apoyan en una berma de escollera de 4 toneladas.

A continuación se muestra una sección tipo de esta alternativa.

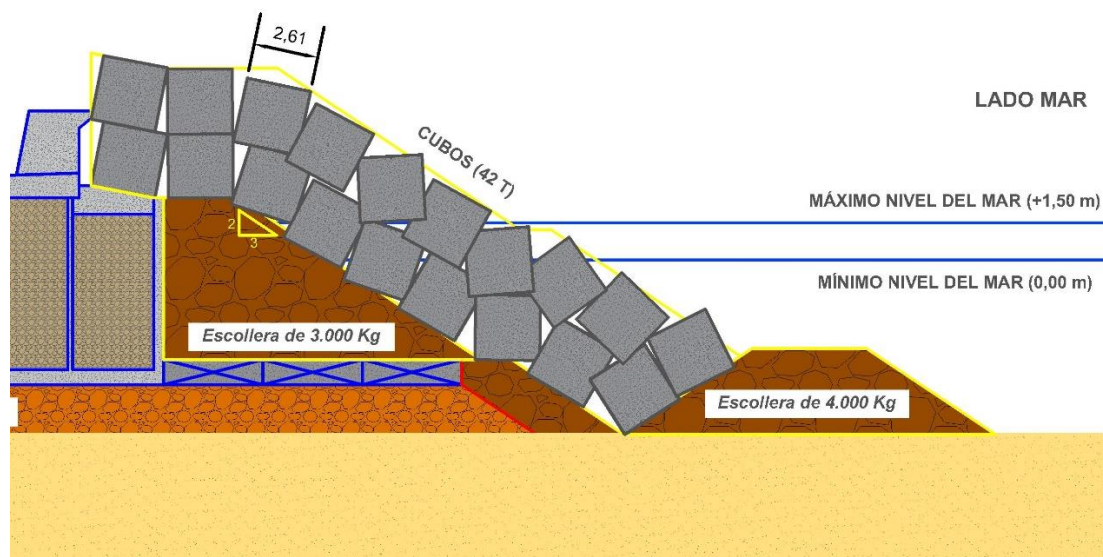


Figura 18. Sección tipo de la alternativa D. Cotas en m.

Para ver la sección con mayor detalle se debe consultar el *Plano 6. Alternativa D*.

8.3. ESTIMACIÓN DE COSTES

Para simplificar la estimación de costes, se considerará la construcción de un talud con manto bicapa de cubos de 42 toneladas a lo largo de todo el dique, un núcleo formado por escollera de 3 toneladas y una berma formada por escollera de 4 toneladas.

El coste de construcción en €/m³ de los cubos (C_B) se ha calculado con la fórmula que ofrece el *Manual del Cubípodo* ® 2015.

$$C_B = (205 + HOR) + 0,75 \cdot \left[10^5 \cdot \left(\frac{1}{\ln(V_B \cdot W_B)} \right)^2 - 10^4 \left(\frac{1}{\ln(V_B \cdot W_B)} \right) \right]$$

Donde:

- HOR (€/m³) es el coste del hormigón suministrado
- W_B (t) es el peso de los cubos
- V_B (m³) es el volumen total de hormigón utilizado con cubos

Según *Corredor y otros* (2008), el coste de suministro de hormigón a pie de obra en España se estimó en un valor de HOR = 60 €/m³.

Por lo tanto, teniendo en cuenta todas las especificaciones anteriores se obtiene un coste aproximado de 33.000.000 €.

ESTIMACIÓN DE COSTES – ALTERNATIVA D					
CÓDIGO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO (€)	TOTAL (€)
UO1	t	Escollera de 3 toneladas como capa de filtro y núcleo del dique de abrigo. Incluso suministro, transporte y colocación con medios terrestres.	67.891	100	6.789.126
UO2	t	Escollera de 4 toneladas para berma de pie del dique de abrigo. Incluso suministro, transporte y colocación con medios terrestres.	44.729	120	5.367.446
UO3	Ud	Cubos de 42 t de HM-30/B/20/IIIa+Qb para colocación en el manto principal del dique de abrigo. Incluso fabricación, acopio y colocación en su posición prefijada en el manto.	3.452	1.796	6.201.199
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL					18.357.772
GASTOS GENERALES (GI)			16	% (s/PEM)	2.937.243
BENEFICIO INDUSTRIAL (BI)			6	% (s/PEM)	1.101.466
PEM + GG + BI					22.396.482
I.V.A.			21	% (s/PEM + GG + BI)	4.703.261
PEM + GG + BI + IVA					27.099.743

IMPREVISTOS	20	% (s/PEM + GG + BI + IVA.)	5.419.949
COSTE TOTAL - ALTERNATIVA D			32.519.691

Tabla 11. Estimación de costes de la Alternativa D.

8.4. VALORACIÓN

8.4.1. Criterios económicos

En esta alternativa el gasto por la construcción de cada cubo es bastante elevado porque se gasta mucho hormigón. Por lo tanto, se encarece la obra. Se le asigna un valor de 3.

8.4.2. Criterios ambientales

Se considera que habrá un impacto ambiental moderado porque es necesaria la extracción de piedra de cantera, además de su vertido al mar, afectando a posibles especies que vivan a los pies del dique existente. Se le asigna un valor de 2.

8.4.3. Criterios funcionales

Funcionalmente, esta alternativa reducirá el rebase porque las olas impactan y rompen en el talud de cubos. Como contrapartida, los cubos tienen la desventaja de que con el paso del tiempo se ordenan, colocándose cara contra cara, quedando un talud sensiblemente liso, que favorece el remonte y rebase de las olas. Se le asigna un valor de 3.

8.4.4. Criterios estéticos

En cuanto a los criterios estéticos, los cubos sobresalen por encima de los espaldones del dique vertical y disminuyen la visibilidad. Se asigna un valor de 2.

9. ALTERNATIVA E: TALUD CON CUBÍPODOS

9.1. DESCRIPCIÓN

El cubípodo es una pieza masiva de la familia del bloque cúbico con una elevada resistencia estructural, de colocación aleatoria y porosidad uniforme en el talud, que permite la colocación en una o dos capas.



Figura 19. Imagen de un dique de cubípodos en el Puerto de Málaga.

Por lo tanto, la alternativa E consiste en el refuerzo del dique vertical mediante la colocación de un talud de elementos prefabricados de hormigón, en este caso el manto exterior formado por una capa de cubípodos en el tronco del dique y dos en el morro. La idea es mantener el dique existente con el cuenco amortiguador, pero provocando que las olas rompan directamente en el talud de cubípodos, reduciendo así el rebase.

Un manto de cubípodos ofrece las siguientes ventajas respecto a un manto bicapa de cubos:

- Es una buena solución con manto monocapa fiable
- Mucha mayor estabilidad hidráulica
- Menor remonte y rebase
- No hay acoplamientos cara a cara
- La fricción con el filtro es elevada
- La escollera de la capa de filtro es menor
- El consumo de hormigón se reduce
- La huella energética y del carbono es baja

- Porosidad homogénea del manto

9.2. PREDISEÑO

Para prediseñar esta alternativa se calculará en primer lugar el peso de los cubípodos tanto en el manto como en el morro del dique de abrigo. Se emplea el talud recomendado en el *Manual del Cubípedo* ® 2015 de 3H:2V.

Sección	Capas	K _D	H (m)	γ (kg/m ³)	γ _w (kg/m ³)	cot α	W _{manto} (kg)	D _n (m)
Tronco	1	12	6,60	2.350	1.025	1,50	18.000	1,97
Morro	2	7	6,60	2.350	1.025	1,50	30.000	2,34

Tabla 12. Cálculo del peso de los cubípodos del manto principal

Sección	W _{manto} (kg)	W _{min_filtro} (kg)	W _{max_filtro} (kg)	W _{filtro} (kg)	D _n (m)
Tronco	18.000	900	1.800	2.000	0,91
Morro	30.000	1.500	3.000	2.000	0,91

Tabla 13. Cálculo del peso de la escollera de la capa de filtro.

Como en la alternativa anterior, se usará la escollera como capa de filtro y núcleo debido al reducido espacio que queda tras las capas de filtro.

En este caso, la diferencia entre los cubípodos del tronco y del morro es considerable por lo que será necesarios dos tipos de cubípodos.

Como anteriormente, es necesario calcular el peso y el tamaño de los elementos de la berma de pie, que suelen ser de 10% al 20% del peso de las piezas del manto.

Sección	Δ	W (kg)	D _{n50} (m)	h _s (m)	h _t (m)	N _{od}	H (m)
Tronco	1,59	3.000	1,04	8,50	6,42	0,50	7,3
Morro	1,59	3.000	1,04	8,50	6,42	0,50	7,3

Tabla 14. Cálculo de la berma de pie.

Como se puede apreciar, una berma de escollera de 3 toneladas aguanta una ola de 7,3 m que es superior a la ola de cálculo.

Por lo tanto, esta alternativa consistirá en el refuerzo del dique de abrigo con un manto monocapa de cubípodos de 18 toneladas sobre escollera de 2 toneladas que actúa como capa de filtro y núcleo. Además, los cubípodos se apoyan en una berma de pie de escollera de 3 toneladas.

Seguidamente aparece una sección tipo del tronco del dique de abrigo con el manto monocapa de cubípodos.

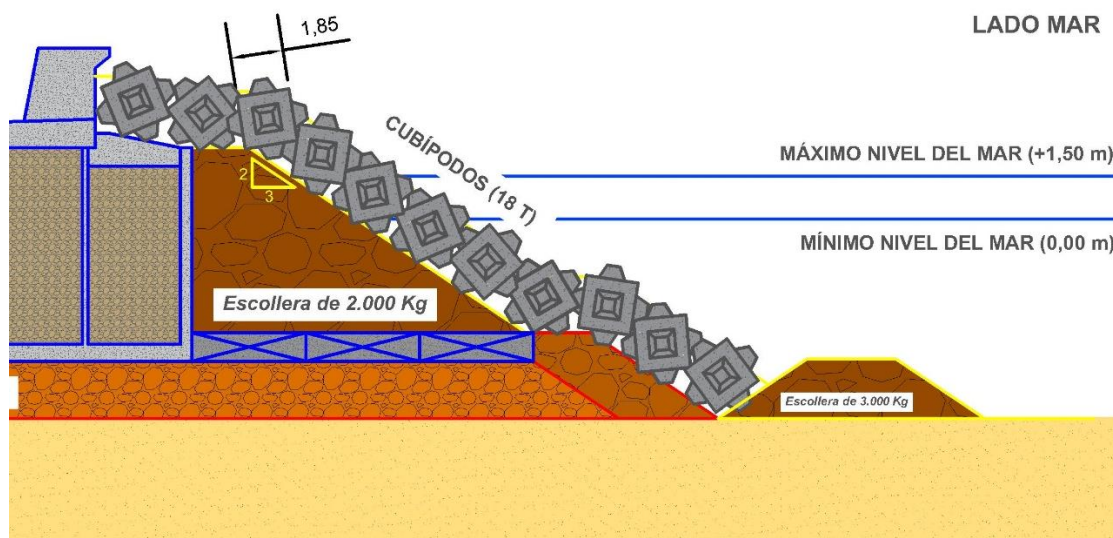


Figura 20. Sección tipo de la alternativa E. Cotas en metros.

Para ver la sección con mayor detalle se debe consultar el *Plano 7. Alternativa E*.

9.3. ESTIMACIÓN DE COSTES

Con el objetivo de simplificar la estimación de costes, se considerará la construcción de un talud con manto monocapa de cubípodos de 18 toneladas a lo largo de todo el dique, un núcleo formado por esollera de 2 toneladas y una berma formada por esollera de 2 toneladas.

El coste de construcción en €/m³ de los cubípodos (C_c) se ha calculado con la fórmula que ofrece el *Manual del Cubípedo* © 2015.

$$C_c = (265 + HOR) + 1 \cdot \left[10^5 \cdot \left(\frac{1}{\ln(V_c \cdot W_c)} \right)^2 - 10^4 \left(\frac{1}{\ln(V_c \cdot W_c)} \right) \right]$$

Donde:

- HOR (€/m³) es el coste del hormigón suministrado
- W_c (t) es el peso de los cubípodos
- V_c (m³) es el volumen total de hormigón utilizado con cubípodos

Según *Corredor y otros* (2008), el coste de suministro de hormigón a pie de obra en España se estimó en un valor de HOR = 60 €/m³.

Por lo tanto, teniendo en cuenta todas las especificaciones anteriores se obtiene un coste aproximado de 17.000.000 €.

ESTIMACIÓN DE COSTES – ALTERNATIVA E					
CÓDIGO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO (€)	TOTAL (€)
UO1	t	Esollera de 2 toneladas como capa de filtro y núcleo del dique de abrigo. Incluso suministro, transporte y	59.270	70	4.148.910

		colocación con medios terrestres.			
UO2	t	Escollera de 3 toneladas como berma de pie del dique de abrigo, incluso suministro, transporte y colocación con medios terrestres.	17.215	70	1.205.025
UO3	Ud	Cubípodos de 18 t de HM-30/B/20/IIIa+Qb para colocación en el manto principal del tronco del dique de abrigo. Incluso fabricación, acopio y colocación en su posición prefijada en el manto.	3.748	1.101	4.128.602
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL					9.482.537
GASTOS GENERALES (GI)			16	% (s/PEM)	1.517.206
BENEFICIO INDUSTRIAL (BI)			6	% (s/PEM)	568.952
PEM + GG + BI					11.568.696
I.V.A.			21	% (s/PEM + GG + BI)	2.429.426
PEM + GG + BI + IVA					13.998.122
IMPREVISTOS			20	% (s/PEM + GG + BI + IVA.)	2.799.624
COSTE TOTAL - ALTERNATIVA E					16.797.746

Tabla 15. Estimación de costes de la Alternativa E.

9.4. VALORACIÓN

9.4.1. Criterios económicos

La valoración económica de esta alternativa es bastante buena. Se reduce el coste del hormigón y como consecuencia se disminuye el coste respecto a la alternativa con cubos. Se asigna un valor de 4.

9.4.2. Criterios ambientales

Se considera que habrá un impacto ambiental moderado porque es necesaria la extracción de piedra de cantera, además de su vertido al mar, afectando a posibles especies que vivan a los pies del dique existente. Sin embargo, la huella energética de esta alternativa es baja porque se reduce el consumo de hormigón, obteniéndose los mismos resultados. Se asigna un valor de 4.

9.4.3. Criterios funcionales

La ejecución de esta alternativa minorará el problema de rebase que sufre Port Fòrum porque las olas romperán en el talud de cubípodos y el rebase será controlado por el cuenco amortiguador. Además, los cubípodos mantienen su porosidad constante. Se asigna un valor de 4.

9.4.4. Criterios estéticos

En términos estéticos, como los cubípodos permiten la colocación en una capa, no se va a reducir la visibilidad porque quedan por debajo de la cota de coronación de ambos espaldones. Se asigna un valor de 3.

10. ALTERNATIVA F: NUEVO CUENCO AMORTIGUADOR CON TALUD DE CUBÍPODOS

10.1. DESCRIPCIÓN

La alternativa F consiste en el refuerzo del dique vertical mediante la colocación de un talud de elementos prefabricados de hormigón: un manto exterior formado por una capa de cubípodos en el tronco del dique y dos en el morro. Además, se pretende crear un nuevo cuenco amortiguador que se situaría delante del dique existente, como en el caso de Gela (Italia) presentado en el *Apartado 3. Casos Similares*. De esta manera se podría demoler el espaldón interior y formar un dique transitable para los visitantes del puerto que haría más atractivas sus instalaciones. Este es el aspecto positivo que diferencia esta alternativa del resto.

Además, hay que destacar que esta tipología solo se valorará con cubípodos porque es el elemento más adecuado de los que se ha considerado anteriormente.

10.2. PREDISEÑO

Para prediseñar esta alternativa, se van a emplear de los ensayos realizados en el *Laboratorio de Puertos y Costas* de la *Universidad Politécnica de Valencia* descritos en el *Anejo 5. Ensayos con modelo físico de dique en talud con cuenco amortiguador*, que se encuentran dentro del proyecto ESBEKO.

La parte más compleja de esta alternativa es el diseño del cuenco, que estará acorde al modelo diseñado para la realización de los ensayos en el laboratorio.

En primer lugar, hay que señalar que los ensayos han sido realizados con una pendiente de fondo del 4%, que no coincide con la pendiente del 2% considerada en el fondo marino de la zona de Port Fòrum.

10.2.1. Capas del dique

Así pues, primero hay que diseñar el manto principal, como si fuera un dique en talud para obtener un diámetro nominal de las piezas y poder realizar la comparación con algún ensayo. Se emplea el talud recomendado en el *Manual del Cubípodo* © 2015 de 3H:2V.

Sección	Capas	K _D	H (m)	γ (kg/m ³)	γ _w (kg/m ³)	cot α	W _{manto} (kg)	D _n (m)
Tronco	1	12	6,60	2.350	1.025	1,50	18.000	1,97
Morro	2	7	6,60	2.350	1.025	1,50	30.000	2,34

Tabla 16. Cálculo del peso de los cubípodos del manto principal.

La diferencia entre los cubípodos del tronco y del morro es considerable por lo que será necesarios dos tipos de encofrado para los cubípodos.

En este caso, se utilizarán dos capas de filtros de la escollera calculada a continuación.

Sección	W _{manto} (kg)	W _{min_filtro} (kg)	W _{max_filtro} (kg)	W _{filtro} (kg)	D _n (m)
Tronco	18.000	900	1.800	2.000	0,91

Morro	30.000	1.500	3.000	2.000	0,91
--------------	--------	-------	-------	--------------	------

Tabla 17. Cálculo del peso de la escollera de la capa de filtro.

Hay que destacar que, en esta alternativa, a diferencia de las otras, se va a emplear núcleo debido a que, al adelantar el cuenco amortiguador, habrá más volumen a cubrir y la necesidad de un núcleo es evidente.

El peso del material del núcleo estará comprendido entre W/4000 y W/200, con respecto al peso de los elementos del manto principal.

Sección	W _{filtro} (kg)	W _{min_núcleo} (kg)	W _{max_núcleo} (kg)
Tronco	18.000	4,50	90,00
Morro	30.000	7,50	150,00

Tabla 18. Cálculo del peso del material del núcleo.

Así pues, queda un peso de material todo-uno para el núcleo de entre 5 kg y 100 kg.

También es necesario calcular el peso y el tamaño de los elementos de la berma de pie.

Sección	Δ	W (kg)	D _{n50} (m)	h _s (m)	h _t (m)	N _{od}	H (m)
Tronco	1,59	3.000	1,04	8,50	6,42	0,50	7,3
Morro	1,59	3.000	1,04	8,50	6,42	0,50	7,3

Tabla 19. Cálculo de la berma de pie.

Como se puede apreciar, una berma de escollera de 3 toneladas aguanta una ola de 7,3 m que es superior a la ola de cálculo.

Por lo tanto, esta alternativa consistirá principalmente en el refuerzo del dique de abrigo con un manto monocapa de cubípodos de 18 toneladas sobre escollera de 2 toneladas como capa de filtro y un núcleo de material todo uno de peso comprendido entre 5 kg y 100 kg. Además, los cubípodos se apoyan en una berma de escollera de 3 toneladas.

10.2.2. Cuenco amortiguador

Para poder comenzar, hay que basarse en algún ensayo realizado. Por lo tanto, se usará el número de estabilidad y el número de Iribarren para establecer cuál es el ensayo más parecido. Las fórmulas son la siguientes:

- **Número de estabilidad:**

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta \cdot D_n}$$

Donde:

- N_s: es el número de estabilidad
- H_s: es la altura de ola significativa
- $\Delta = \frac{\rho_c}{\rho_w} - 1$; es el peso específico relativo sumergido

- $D_n = \left(\frac{W}{\rho_c}\right)^{\frac{1}{3}}$; es el diámetro nominal de la pieza
- **Número de Iribarren:**

$$Ir = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{H}{L_o}}}$$

Donde:

- α : es el ángulo que forma el fondo marino con la horizontal
- H es la altura de ola en aguas profundas
- L_o es la longitud de onda en aguas profundas

Así pues, se van a comparar los valores de ambas fórmulas para elegir el ensayo más parecido en el que poder basarse y extraer los resultados.

PROTOTIPO	
α (°)	1,15
h_s (m)	7
H_s (m)	6,6
D_n (m)	1,97
ρ_c (t/m ³)	2,35
ρ_w (t/m ³)	1,025
Δ	1,29
N_s	2,59
g (m/s ²)	9,81
T (s)	11,61
L (m)	210,45
Ir	0,11

Tabla 20. Cálculo del número de estabilidad y el número de Iribarren para el prototipo.

Ahora ya se conoce tanto el número de estabilidad como el número de Iribarren para el prototipo y se va a determinar cuál es el ensayo que más se parece a las condiciones del proyecto.

MODELO					
Ensayo	AS01_2110	AS01_2112	AS01_3112	AS01_2212	AS01_3212
α (°)	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29
h_s (m)	0,26	0,26	0,26	0,30	0,30
H_s (m)	0,1	0,12	0,12	0,12	0,12
D_n (m)	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038

Tabla 21. Comparación de los resultados de diferentes ensayos.

El número de estabilidad coincide con aquellos ensayos en los que la altura de ola significativa es de 0,12 m. Como en las condiciones reales, el calado puede llegar a ser alto, se tomará como ensayo de referencia el AS01_2212 porque tiene mayor calado a pie de dique ($h_s = 0,3$ m) y periodo ($T = 2,60$ s).

Una vez definidos estos parámetros a tener en cuenta, el cuenco amortiguador se va a diseñar proporcionalmente al modelo. En cuanto a las dimensiones horizontales, el diseño se basará en el diámetro nominal (D_n). En cuanto a las dimensiones verticales, se tendrá en cuenta el hecho de no superar la cota de coronación del antiguo espaldón exterior de manera que no se reduzca la visibilidad existente.



Estudio de soluciones para la adecuación del dique de abrigo de Port Fòrum

10.3. ESTIMACIÓN DE COSTES

Como se ha hecho con alternativas anteriores, para simplificar la estimación de costes, se considerará la construcción de un nuevo cuenco amortiguador con un talud monocapa de cubípodos de 18 toneladas a lo largo de todo el dique, dos capas de filtro formadas por escollera de 2 toneladas, un núcleo de material todo-uno entre 0,5 y 10 kg y una berma formada por escollera de 3 toneladas.

Nuevamente, el coste de construcción en €/m³ de los cubípodos (C_c) se ha calculado con la fórmula que ofrece el *Manual del Cubípodo* ® 2015.

$$C_c = (265 + HOR) + 1 \cdot \left[10^5 \cdot \left(\frac{1}{\ln(V_c \cdot W_c)} \right)^2 - 10^4 \left(\frac{1}{\ln(V_c \cdot W_c)} \right) \right]$$

Donde:

- HOR (€/m³) es el coste del hormigón suministrado
- W_c (t) es el peso de los cubípodos
- V_c (m³) es el volumen total de hormigón utilizado con cubípodos

Según *Corredor* y otros (2008), el coste de suministro de hormigón a pie de obra en España se estimó en un valor de HOR = 60 €/m³.

Por lo tanto, teniendo en cuenta todas las especificaciones anteriores se obtiene un coste aproximado de 33.500.000 €.

ESTIMACIÓN DE COSTES – ALTERNATIVA F					
CÓDIGO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO (€)	TOTAL (€)
UO1	m ³	Demolición de espaldón de hormigón armado con medios mecánicos.	6.305	63	398.752
UO2	t	Relleno con todo-uno de cantera de entre 5 y 100 kg, para formación del núcleo del dique y banquetta. Incluso adquisición, carga, transporte, vertido, extensión y nivelación con medios mecánicos	317.725	10	3.177.246
UO3	t	Escollera de 3 toneladas para berma de pie del dique de abrigo, incluso suministro, transporte y colocación con medios terrestres.	17.215	100	1.721.464
UO4	t	Escollera de 2 toneladas para capa de filtro del dique de abrigo, incluso suministro, transporte y colocación con medios terrestres.	111.065	70	7.774.522
UO5	Ud	Cubípodos de 18 t de HM-30/B/20/IIIa+Qb para colocación en el manto principal del tronco del dique de abrigo. Incluso fabricación, acopio y colocación en su	5.718	1.011	5.779.379

		posición prefijada en el manto.			
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL					18.851.362
GASTOS GENERALES (GI)			16	% (s/PEM)	3.016.218
BENEFICIO INDUSTRIAL (BI)			6	% (s/PEM)	1.131.082
PEM + GG + BI					22.998.662
I.V.A.			21	% (s/PEM + GG + BI)	4.829.719
PEM + GG + BI + IVA					27.828.381
IMPREVISTOS			20	% (s/PEM + GG + BI + IVA.)	5.565.676
COSTE TOTAL - ALTERNATIVA F					33.394.057

Tabla 22. Estimación de costes de la Alternativa F.

10.4. VALORACIÓN

10.4.1. Criterios económicos

Esta es la alternativa más cara tras la opción de dismantelar el dique y construir uno nuevo. Sin embargo, es la más segura y la que representa una mejor inversión. Además, al emplear cubípodos se reduce el consumo de hormigón frente a otros elementos prefabricados que se colocan en el manto del dique de abrigo. Se asigna un valor de 2.

10.4.2. Criterios ambientales

Se considera que habrá un impacto ambiental importante porque es necesaria la extracción de piedra de cantera, además de su vertido al mar, afectando a posibles especies que vivan a los pies del dique existente. Sin embargo, la huella energética de esta alternativa es baja porque se reduce el consumo de hormigón, obteniéndose los mismos resultados. Por otra parte, se plantea colocar vegetación en el dique al crear un espacio transitable. Se asigna un valor de 3.

10.4.3. Criterios funcionales

Funcionalmente, la gran ventaja de esta alternativa es que eliminará prácticamente el problema de rebase, el dique estará protegido al adelantar el cuenco amortiguador y el puerto será mucho más seguro. De esta manera, las olas romperán en el talud de cubípodos y el rebase será controlado por el cuenco amortiguador. Además, los cubípodos mantienen su porosidad constante. Se asigna un valor de 5.

10.4.4. Criterios estéticos

En términos estéticos, se creará un puerto más atractivo. La cota de coronación no se va a aumentar y se demolerá el espaldón exterior para crear un espacio transitable a las personas que visiten el puerto, dotado de árboles y bancos. Se asigna un valor de 5.

11. VALORACIÓN FINAL

La siguiente tabla muestra los valores asignados a cada uno de los diferentes elementos del manto en función de los criterios.

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS						
CRITERIOS	A	B	C	D	E	F
Económicos	2	4	0	3	4	2
Ambientales	4	4	0	2	4	3
Funcionales	2	2	0	3	4	5
Estéticos	5	3	0	2	3	5

Tabla 23. Valoración de cada alternativa.

Finalmente, se multiplica cada uno de los valores de la tabla anterior por el coeficiente de ponderación correspondiente, obteniéndose así la matriz multicriterio definitiva que permitirá elegir la mejor alternativa.

VALORACIÓN FINAL						
CRITERIOS	A	B	C	D	E	F
Económicos	6	12	0	9	12	6
Ambientales	12	12	0	6	12	9
Funcionales	10	10	0	15	20	25
Estéticos	20	12	0	8	12	20
TOTAL	48	46	0	38	56	60

Tabla 24. Valoración final del conjunto de alternativas.

Finalmente, se determina que la mejor solución para la reforma del dique de abrigo es la *Alternativa F*, consistente en la creación de un nuevo cuenco amortiguador delante del dique existente con un manto de cubípodos, además de la demolición del espaldón interior para crear un dique transitable.

12. REFERENCIAS

- AGUADO GALLEGO, A. y SÁNCHEZ NAVERAC, V. (1978). "Nuevo tipo de sección para diques en talud con espaldón" en *Revista de Obras Públicas*, 125, (3157): 353-359. [Consulta: 17/07/2019]
- CAVANI, A., FRANCO, L y NAPOLITANO, M. (1999). "Design optimization with model tests for the protection of Gela caisson (1999)" en Losada, I. *Coastal structures '99*. Santander: A.A. Balkema 2000. [Consulta: 17/07/2019]
- CENICEROS, J. y MEDINA, J.R. (2001). "Redes neuronales para el diseño de diques con baja cota de coronación". [Consulta: 17/07/2019]
- AMINTI, P. y FRANCO, L. (2001). "Performance of overspill basin on top of breakwaters" en *International Conference in Ocean Engineering, December 11-14, 2001*. [Consulta: 17/07/2019]
- MEDINA, J.R. y GÓMEZ-MARTÍN, M.E. (2015). *Manual del Cubípedo @2015*. Valencia: Universitat Politècnica de València. [Consulta: 10/08/2019]
- CENICEROS, J. (1999). *Diseño de diques con baja cota de coronación. Dique con cuenco amortiguador no rebasable*. Trabajo Final de Carrera. Valencia: Universitat Politècnica de València. [Consulta: 12/08/2019]
- PUERTOS DEL ESTADO (2009). *ROM 1.0-09, Diques de Abrigo contra las Oscilaciones del Mar (Parte I): Bases y Factores del Proyecto*. Madrid: V.A. Impresores S.A. <http://www.puertos.es/es-es/BibliotecaV2/ROM%201.0-09.pdf> [Consulta: 12/08/2019]
- CYPE INGENIEROS, S.A. *Generador de precios de la construcción*. <<http://www.generadordeprecios.info/>> [Consulta 15/08/2019]