

Anejo 9: Estudio de soluciones y dimensionamiento de las estructuras de abrigo

Estudio de soluciones para la reordenación interior y ampliación del puerto deportivo de la Vila Joiosa (T.M. La Vila Joiosa)

Álvaro Olmos Pérez

París, junio del 2023



Índice

1.	Objeto.....	5
2.	Tipología de las obras de abrigo.....	6
2.1.	Componentes del manto.....	7
3.	Tipología del manto a escoger.....	9
3.1.	Descripción de los tipos de escollera.....	9
3.2.	Criterios de cálculo del peso de los diferentes elementos.....	10
3.2.1.	Peso del manto principal.....	10
3.2.2.	Comprobación del diámetro nominal de cubípedo.....	11
4.	Criterios de elección.....	13
5.	Evaluación de las propuestas.....	14
6.	Dimensionamiento de las obras de abrigo.....	15
6.1.	Determinación del peso y espesor del manto principal.....	15
6.2.	Determinación del peso y espesor de las capas de filtro.....	16
6.3.	Dimensionamiento de la berma de pie.....	17
6.4.	Cota de coronación.....	19
6.5.	Cálculo del espaldón.....	20
7.	Bibliografía.....	24

Índice de figuras

Figura 1:	Partes de un dique en talud.....	7
Figura 2:	Tipos de piezas de manto en hormigón.....	8
Figura 3:	Datos a considerar en el diseño de mantos de cubípodos.....	12
Figura 4:	Secciones significativas a estudiar (M: Morro; T: Tronco; C: Contradique)...	15
Figura 5:	Sección de dique monocapa en talud.....	17
Figura 6:	Esquema de presiones y subpresiones que actúan sobre el espaldón.....	20
Figura 7:	Dimensiones del espaldón.....	23

Índice de tablas

Tabla 1:	Cálculo de pesos y diámetro nominal en tronco de dique.....	11
Tabla 2:	Cálculo de pesos y diámetro nominal por material.....	11
Tabla 3:	Comprobación del diámetro mínimo para mantos de cubípedo.....	12
Tabla 4:	Matriz de puntuaciones.....	14
Tabla 5:	Matriz de puntuaciones ponderada.....	14
Tabla 6:	Rotura de oleaje y cálculo de altura de ola significativa.....	15
Tabla 7:	Diámetro nominal del manto principal por sección.....	16
Tabla 8:	Diámetro nominal y peso de las capas de filtro por sección.....	16
Tabla 9:	Cálculo de la altura de ola resistente de la berma por sección.....	18



1. Objeto

El presente anejo tiene como objetivo principal la selección de la tipología de obras de abrigo más adecuadas para el Puerto de la Vila Joiosa. Específicamente, se enfoca en la elección de la pieza que conformará el manto del dique, ya que, como se mencionará en detalle en este anejo, esta decisión representa un porcentaje significativo del costo total de la obra.

Para determinar las características del dique, se deben llevar a cabo los siguientes pasos: en primer lugar, seleccionar la pieza que conformará el manto principal del dique. Además, será necesario determinar el número de capas que se utilizarán en la construcción del manto. Por último, se deberá calcular el peso de los bloques que conformarán el dique utilizando la fórmula de Hudson.

La elección adecuada de la tipología de las obras de abrigo, en particular la selección de la pieza del manto del dique es de suma importancia, ya que garantizará la efectividad y la durabilidad de la estructura en el Puerto de la Vila Joiosa. Se realizarán análisis y consideraciones técnicas para tomar la mejor decisión en cuanto a la elección de los materiales y la configuración del dique, con el objetivo de lograr un resultado óptimo en términos de protección costera y costos de construcción.

2. Tipología de las obras de abrigo

Las obras de abrigo desempeñan un papel crucial al proporcionar protección contra las fuerzas del oleaje, especialmente en nuestro caso, donde su objetivo es permitir un acceso seguro y fácil a las embarcaciones, así como establecer líneas de atraque. Existen dos tipos principales de diques en función de su interacción con el oleaje: aquellos que amortiguan el oleaje y aquellos que lo bloquean por completo. Dentro de este último grupo, podemos distinguir entre diques en talud, que rompen el oleaje; diques verticales, que lo reflejan; y diques mixtos, que combinan características de ambos tipos.

En el contexto de los puertos deportivos, un aspecto crucial al diseñar un dique de abrigo es asegurar que la altura de la coronación sea lo más baja posible. Esto tiene como objetivo facilitar la visibilidad y evitar cualquier efecto de confinamiento visual. Como resultado, la tipología de diques más comúnmente utilizada en estos casos es la de diques en talud. A continuación, profundizaremos en el estudio de esta tipología en particular.

El diseño adecuado de los diques de abrigo en puertos deportivos es de gran importancia, ya que garantiza la seguridad de las embarcaciones y crea un entorno visualmente agradable. Durante el proceso de estudio, se analizarán detalladamente las características de los diques en talud, teniendo en cuenta factores como la estabilidad, la eficacia en la protección contra el oleaje y los requisitos específicos del entorno marítimo en el Puerto de la Vila Joiosa. Se evaluarán múltiples variables y se llevarán a cabo cálculos precisos para asegurar la selección adecuada de la tipología de dique que mejor se adapte a las necesidades del proyecto.

La misión primordial de un dique en talud es reducir la acción del oleaje en una determinada área con el fin de facilitar las operaciones de atraque, amarre, carga y descarga de embarcaciones.

El funcionamiento de un dique en talud se basa en provocar la ruptura del oleaje al chocar contra el talud compuesto por escolleras o piezas especiales que conforman su manto principal.

Además de contar con un manto resistente, el dique puede tener una estructura de soporte, también conocida como cuerpo, que es de igual importancia. Esta estructura central y las capas de filtro desempeñan un papel fundamental. En España, es común construir un espaldón de hormigón en la coronación del dique, el cual ofrece resistencia frente a la acción del oleaje durante temporales. Además de su función protectora, este espaldón proporciona una excelente vía de acceso a las instalaciones del puerto e incluso puede albergar galerías de servicio.

Los elementos que componen la estructura de un dique en talud son los siguientes:

El núcleo la parte central del dique y se encarga de soportar los mantos de escollera, posibilitando su construcción. El núcleo debe ser capaz de tolerar deformaciones y generalmente está compuesto por materiales provenientes de canteras o por escollera de peso reducido.

La capa de filtro es la parte intermedia del dique en talud y se sitúa en el exterior del núcleo. Por lo general, está formada por una o varias capas de escollera de tamaño progresivamente mayor desde el núcleo hacia el exterior. Esta gradación en el tamaño de las escolleras evita que las partículas del núcleo se desplacen hacia el exterior del dique.

El manto principal es una parte fundamental del dique en talud y se sitúa sobre la capa externa del filtro. Está compuesto por elementos, ya sean escolleras naturales o artificiales, de mayor tamaño cuya función principal es resistir la acción del oleaje que actúa sobre ellos.

La banquetta, por su parte, cumple el papel de servir como apoyo inferior al manto principal, brindando estabilidad adicional a la estructura.

En la coronación del dique, es común disponer de un espaldón de hormigón, el cual tiene como objetivo eliminar o reducir los rebases del oleaje, ofreciendo una protección adicional al dique.

Además, se puede encontrar una losa de hormigón en el dique, la cual desempeña un doble propósito: sirve como camino de rodadura para el acceso y mantenimiento de la estructura, y al mismo tiempo protege el núcleo del dique frente a posibles rebases del oleaje.

Por último, el manto interior tiene la función de proteger el talud interior del dique frente a la agitación del agua y posibles rebases, brindando una mayor estabilidad y resistencia a la estructura en su conjunto.

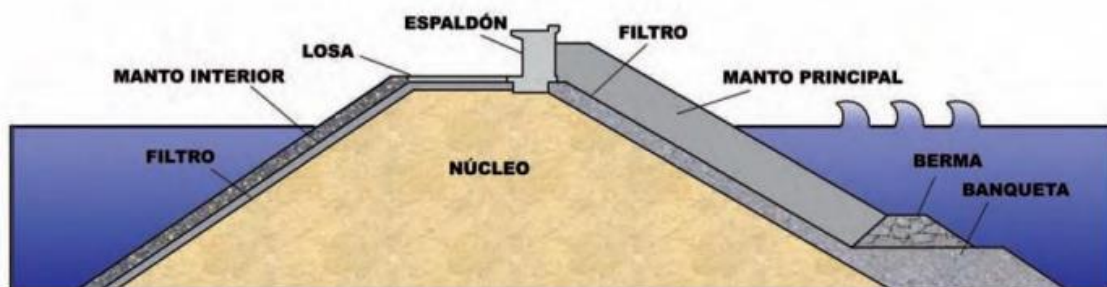


Figura 1: Partes de un dique en talud

2.1. Componentes del manto

Como se ha mencionado previamente, el manto principal de un dique en talud juega un papel fundamental al resistir la acción del oleaje. Esto se logra gracias al peso propio unitario de las piezas que lo componen y a la interconexión y trabazón entre ellas. Dichas piezas pueden ser escolleras naturales, cuyo efecto de trabazón depende directamente de la naturaleza de la roca, o bien, piezas especiales de hormigón que, debido a su forma,

proporcionan una mayor rugosidad y trabazón. A continuación, se presentan algunas tipologías en la imagen adjunta:

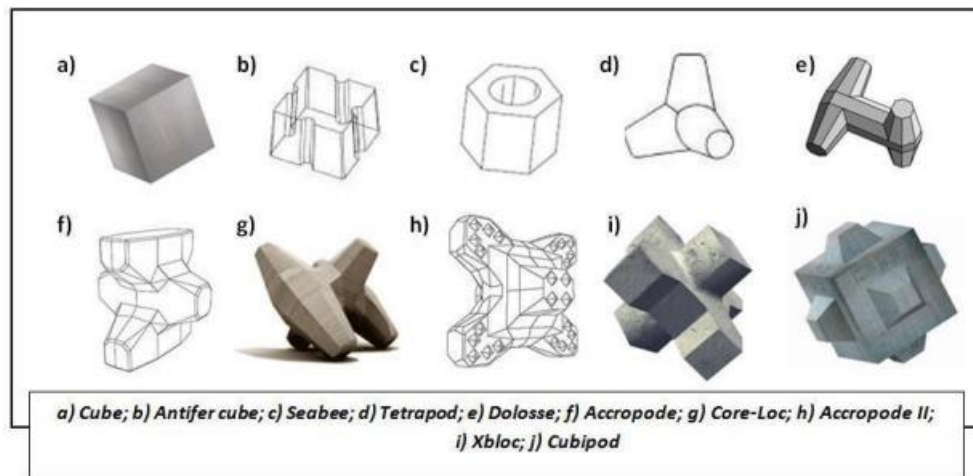


Figura 2: Tipos de piezas de manto en hormigón

3. Tipología del manto a escoger

Es crucial tener en cuenta que el manto principal representa una proporción significativa del costo total del dique. Por lo tanto, la selección de las piezas y capas que forman el manto principal tendrá un impacto considerable en el aspecto económico de la obra.

En este sentido, se llevará a cabo un estudio detallado de las siguientes tipologías de manto con el fin de determinar cuál es la más adecuada:

- Dique con escollera bicapa.
- Dique con cubos bicapa.
- Dique con cubípodos monocapa.
- Dique con cubípodos bicapa.
- Dique con acrópodos monocapa

3.1. Descripción de los tipos de escollera

Existen varias tipologías de piezas utilizadas en los mantos principales de los diques en talud, cada una con sus características y ventajas. A continuación, se describen algunas de estas tipologías y se analiza su idoneidad:

1. Escollera natural: Se trata de piezas obtenidas directamente de canteras y tienen una alta resistencia estructural. Sin embargo, su tamaño está limitado por la capacidad de extracción y transporte, siendo usualmente de hasta 6 toneladas. Aunque son efectivas, su colocación y transporte suelen ser costosos (aproximadamente 225€/t) y presentan un bajo coeficiente de estabilidad hidráulica, lo que requiere bloques de gran tamaño difíciles de manejar.

2. Cubos: Estas piezas masivas tienen forma cúbica y están fabricadas con hormigón en masa. Son resistentes, pero presentan un coeficiente de estabilidad hidráulica bajo y tienden a sufrir daños y rebases durante temporales intensos, ya que se acomodan cara contra cara. Sin embargo, su manipulación con pinzas de presión y la posibilidad de almacenamiento en el parque de construcción con baja porosidad reducen los costes logísticos.

3. Cubípodos: Estas piezas masivas también tienen forma cúbica, pero cuentan con protuberancias que evitan el acoplamiento entre caras y aumentan la fricción con la capa inferior. Tienen una resistencia estructural superior a los cubos y presentan menos daños en caída libre y volteos. Los cubípodos pueden utilizarse en mantos monocapa y bicapa, con coeficientes de estabilidad hidráulica más altos ya que el coeficiente de estabilidad

hidráulica del Cubípodo es muy superior al del cubo bicapa ($KD = 6$), siendo $KD = 12$ en mantos monocapa y $KD = 28$ en mantos bicapa, lo cual permite, para el mismo temporal de cálculo, utilizar piezas de peso mucho menor y por tanto reducir en gran medida el consumo de hormigón. Además, eliminan los problemas de adoquinamiento y rebase. Su diseño permite una colocación aleatoria en el manto y se autoposicionan sobre el talud, manteniendo una porosidad uniforme a lo largo de su vida útil.

La fabricación y almacenamiento en parque del Cubípodo presenta un rendimiento similar al de los cubos. Se utilizan encofrados articulados tipo flanera, que permiten alcanzar ritmos de producción de hasta 3,5 piezas por día. Asimismo, la manipulación de las piezas se lleva a cabo utilizando pinzas de presión, al igual que ocurre con los cubos, en contraposición al uso de eslingas que se requiere para el Acrópodo.

4. Acrópodos: Estas piezas masivas tienen una forma especial diseñada específicamente para taludes monocapa. Su mecanismo de resistencia se basa en la trabazón entre las piezas, que debe garantizarse mediante una colocación precisa en el talud. Los acrópodos tienen un coeficiente de reflexión superior a otras piezas de manto bicapa y proporcionan niveles superiores de protección contra el oleaje. Sin embargo, su mayor coste de fabricación y colocación en obra, el posible fallo rígido y la necesidad de piezas para el filtro del doble de tamaño deben ser considerados en términos económicos.

3.2. Criterios de cálculo del peso de los diferentes elementos

3.2.1. Peso del manto principal

Para garantizar la resistencia del manto principal ante el impacto del oleaje, es fundamental que cada componente de este sea evaluado de acuerdo con la fórmula de Hudson, la cual permite determinar su peso:

$$W = \frac{1}{K_D} * \frac{H^3}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)^3} * \frac{\rho_s}{\cot \alpha}$$

Donde:

- W es el peso de la pieza
- KD es el coeficiente de estabilidad, para considerar la estabilidad hidráulica de cada forma geométrica
- H es la altura de ola
- ρ_s es el peso específico del material estudiado
- ρ_w es el peso específico del agua del mar
- α es el ángulo que forma el talud del manto con la horizontal

Para calcular el espesor de cada pieza en función del peso obtenido, se empleará la siguiente fórmula

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

Donde:

- D_n el diámetro nominal.
- W el peso de la pieza
- ρ_s el peso específico del material estudiado

A continuación, se calcularán estos parámetros para el tronco del dique. El resultado obtenido se muestra en la siguiente tabla:

	KD	cot α	ps (t/m3)	pw (t/m3)	H	W(t)	Capas (n°)	Dn (m)
Escollera	4	1,5	2,65	1,025	5,9	22,765	2	2,05
Cubos	6	1,5	2,35	1,025	5,9	24,826	2	2,19
Cubipodos monocapa	12	1,5	2,35	1,025	5,9	12,413	1	1,74
Cubipodos bicapa	28	1,5	2,35	1,025	5,9	5,320	2	1,31
Acrópodos	15	1,33	2,35	1,025	5,9	11,200	1	1,68

Tabla 1: Cálculo de pesos y diámetro nominal en tronco de dique

De igual manera podemos calcularlo para los diferentes materiales:

	KD	cot α	ps (t/m3)	pw (t/m3)	H	W(t)	Capas (n°)	Dn (m)
Escollera	2	1,5	2,65	1,025	5,9	45,529	2	2,58
Cubipodos monocapa	5	1,5	2,35	1,025	5,9	29,791	1	2,33
Cubipodos bicapa	7	1,5	2,35	1,025	5,9	21,279	2	2,08

Tabla 2: Cálculo de pesos y diámetro nominal por material

3.2.2. Comprobación del diámetro nominal de cubípodo

De acuerdo con la referencia "Manual del cubípodo 2015", se establece que, para diseñar mantos estables frente a roturas por el fondo, con un talud cot $\alpha = 1.5$ y en cualquier condición climática marítima, se recomienda utilizar cubípodos para mantos monocapa:

$$D_n > \frac{h}{7 * \Delta} = \frac{h_s * (1 + 3 \tan \beta)}{7 * \Delta}$$

Mientras que en el caso de mantos bicapa:

$$D_n > \frac{h}{6.2 * \Delta} = \frac{h_s * (1 + 3 \tan \beta)}{6.2 * \Delta}$$

En donde:

- h_s es la profundidad a pie de dique

- β es el ángulo que forma el fondo con la horizontal
- $\Delta = (\rho_s / \rho_w - 1)$
- $h = h_s (1 + 3 \tan \beta)$

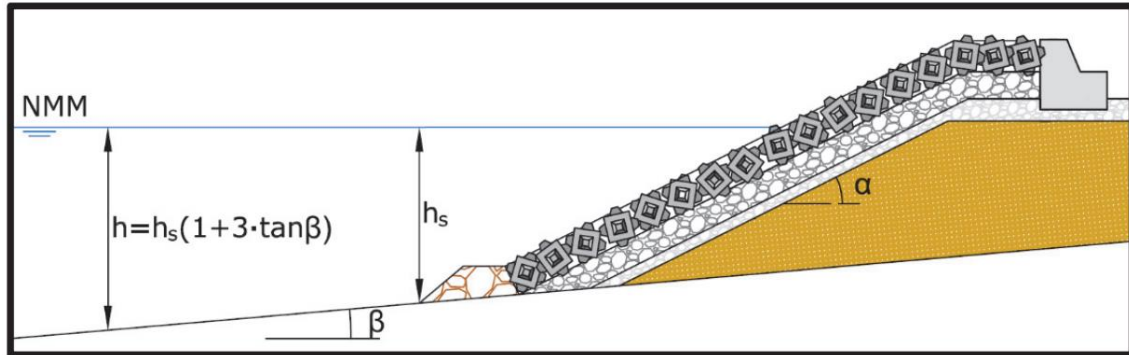


Figura 3: Datos a considerar en el diseño de mantos de cubípodos

Comprobémoslo:

	h_s	β	h	ρ_s (t/m ³)	ρ_w (t/m ³)	Δ	D_n
Cubípodos monocapa	9,5	1,9	10,45	2,35	1,025	1,29	1,157
Cubípodos bicapa	9,5	1,9	10,45	2,35	1,025	1,29	1,307

Tabla 3: Comprobación del diámetro mínimo para mantos de cubípodos.

Es posible verificar que los cubípodos calculados anteriormente presentan un espesor mayor al obtenido, confirmando así que cumplen con dicha condición.

4. Criterios de elección

En esta sección se describirán los diversos criterios utilizados para la selección de la mejor solución, junto con la asignación de un coeficiente de ponderación que refleje su importancia relativa. Estos coeficientes van desde 1 hasta 5, donde 1 representa el menor grado de importancia y 5 el mayor.

Criterios económicos:

Estos criterios engloban los costos de construcción y mantenimiento. Dado que son de vital importancia en los diques en talud, como se mencionó anteriormente, se les asigna un coeficiente de ponderación de 5.

Criterios ambientales:

Se evaluará el impacto ambiental tanto durante la construcción como en la etapa de operación. Dado que el impacto no varía significativamente entre las diferentes alternativas debido a la necesidad de explotación de canteras en todos los casos, se les asigna un coeficiente de ponderación de 2.

Criterios funcionales:

Este criterio se basa en consideraciones estructurales, incluyendo la fiabilidad a largo plazo, la resistencia estructural y la capacidad de resistir el remonte y el rebase. Dado su carácter fundamental en la construcción del manto, se les asigna un coeficiente de ponderación de 5.

Criterios estéticos:

Se tomará en cuenta el impacto visual generado por las diferentes opciones. Algunos materiales permiten una menor altura de coronación del dique, lo cual será valorado positivamente en estos criterios. Se les asigna un coeficiente de ponderación de 4.

5. Evaluación de las propuestas

A continuación, se presenta una matriz que muestra los valores asignados a cada material en función de los diferentes criterios:

	Escollera	Cubos	Cubípodos	Acrópodos
Condicionantes económicos	5	3	4	3
Condicionantes funcionales	3	3	5	5
Condicionantes ambientales	5	3	4	4
Condicionantes estéticos	4	2	5	4

Tabla 4: Matriz de puntuaciones

Lo que multiplicado por sus ponderaciones nos arroja el siguiente resultado:

	Escollera	Cubos	Cubípodos	Acrópodos
Condicionantes económicos	5	3	4	3
Condicionantes funcionales	3	3	5	5
Condicionantes ambientales	5	3	4	4
Condicionantes estéticos	4	2	5	4
TOTAL	68	46	71	64

Tabla 5: Matriz de puntuaciones ponderada

En resumen, tras realizar un análisis multicriterio, se determinó que la mejor opción para la construcción del manto del dique es utilizar cubípodos. Se ha decidido emplear cubípodos monocapa para el tronco del dique y cubípodos bicapa para el morro, con un talud de 3/2 en ambos casos.

6. Dimensionamiento de las obras de abrigo

6.1. Determinación del peso y espesor del manto principal

Vamos a prestar una particular atención a las 3 secciones significativas del dique, que concretamente son la del morro, la del contradique y la del tronco.

Para poder realizar el cálculo del dique será necesario realizar un análisis del peso del manto principal, por lo que comprobaremos la altura de ola de diseño para las diferentes secciones:

	H propagada (m)	Rotura del oleaje	Altura de ola en profundidad d
d	$H_{s0} \cdot K_s \cdot K_r$	$H_b = 0.78 \cdot d$	Hd
10	5,9	7,8	5,9
8	5,8	6,2	5,8
6	5,9	4,7	4,7
4	6,2	3,1	3,1

Tabla 6: Rotura de oleaje y cálculo de altura de ola significativa

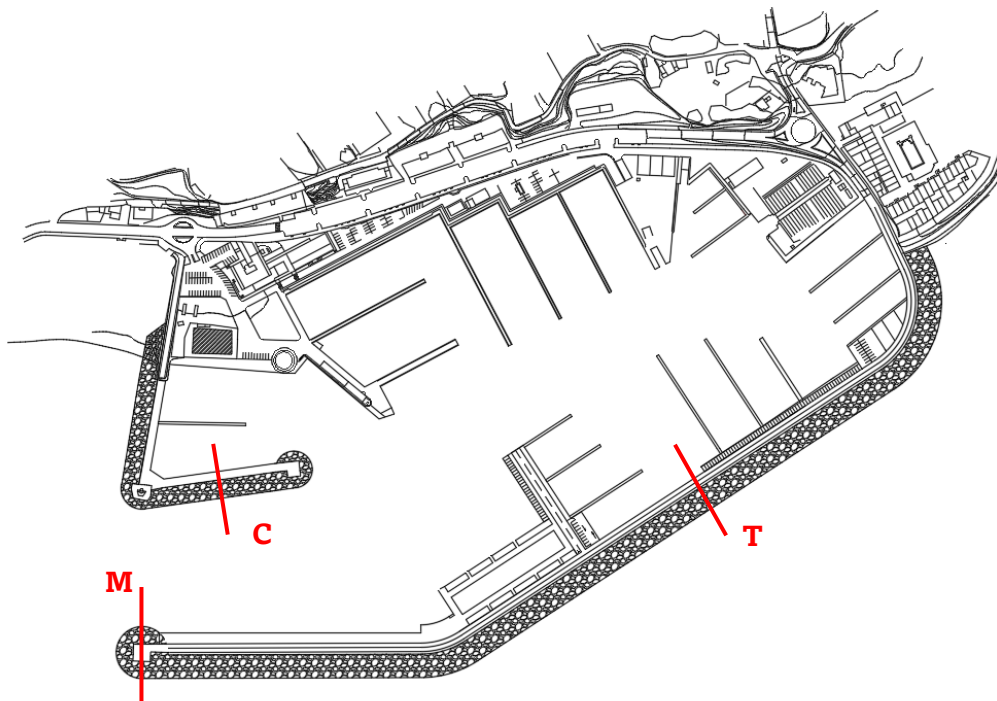


Figura 4: Secciones significativas a estudiar (M: Morro; T: Tronco; C: Contradique)

Cabe destacar que se ha optado por emplear escollera natural en el contradique, cubípodos bicapa para el morro y monocapa para el tronco.

Para determinar tanto el peso como el espesor, seguiremos el mismo procedimiento detallado en la sección previa. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada segmento. Para el contradique se emplearán los datos correspondientes a la profundidad de 4 m de la altura de ola de diseño recogidas en el Anejo nº5: *Clima marítimo y dinámica litoral*; pues esta estructura solo puede recibir oleaje significativo de componente suroeste.

Sección	KD	cot α	ps (t/m ³)	pw (t/m ³)	H	W(t)	Capas (nº)	Dn (m)
Contradique	2	1,5	2,65	1,025	3	5,985	2	1,31
Tronco	5	1,5	2,35	1,025	5,9	29,791	1	2,33
Bocana	7	1,5	2,35	1,025	5,9	21,279	2	2,08

Tabla 7: Diámetro nominal del manto principal por sección

6.2. Determinación del peso y espesor de las capas de filtro.

La práctica habitual al diseñar las capas intermedias de los diques en talud consiste en aplicar una condición de filtrado que impide que el tamaño de las piedras o componentes de la capa superior exceda 2.5 veces el tamaño de las piedras de la capa inferior. Como consecuencia, la proporción de pesos en el filtro variará entre $W/10$ y $W/20$, donde W representa el peso del manto.

Además de esto, es esencial que las capas de filtrado sean confiables y aseguren al menos una capa de filtro granular. Para las capas de filtrado compuestas de escollera, se debe considerar un espesor mínimo de un metro o el doble de la longitud del lado del cubo equivalente.

Siempre que sea viable, se preferirá el uso de escollera como material principal en la construcción del dique. En la etapa de establecer el filtro, se empleará escollera extraída de la cantera SODIRA, situada a 33 km por carretera desde el Puerto de la Vila Joiosa.

Dado W_1 como el peso del componente del filtro, y utilizando W , el peso del manto determinado en la sección 6.1 para los distintos elementos analizados, se derivan los siguientes resultados:

Sección	W (t)	W ₁ , mín (t)	W ₁ , máx (t)	W ₁ (t)	Nº capas	Dn (m)
Contradique	6	0,3	0,6	0,4	2	0,53
Tronco	30	1,5	3	2	2	0,95
Bocana	21,5	1,075	2,15	2	2	0,95

Tabla 8: Diámetro nominal y peso de las capas de filtro por sección

6.3. Dimensionamiento de la berma de pie

Cuando se trata de un manto monocapa, es esencial que el manto principal se apoye sobre una plataforma elevada conocida como "berma de pie". Usualmente, esta berma de pie adopta una forma trapezoidal, y su carga de escollera representa entre el 10% y el 20% del peso de las piezas que conforman el manto. Esta proporción varía en función de la profundidad del dique y de la altura de la berma.

En términos generales, la berma de pie es una porción relativamente pequeña dentro de la estructura en su conjunto y suele tener un costo reducido. Por esta razón, se diseña con un nivel de seguridad superior al aplicado al manto principal.

Dado que el impacto del oleaje se encuentra limitado por la profundidad del lecho marino, la berma de pie se coloca en el lecho, justo junto a la banquetta, para prevenir la socavación. Para estimar los posibles daños que podrían surgir en una berma de pie particular, se puede emplear la fórmula de Van der Meer.

La ilustración que se presenta a continuación muestra la sección de que se utiliza para calcular la configuración de la berma de pie:

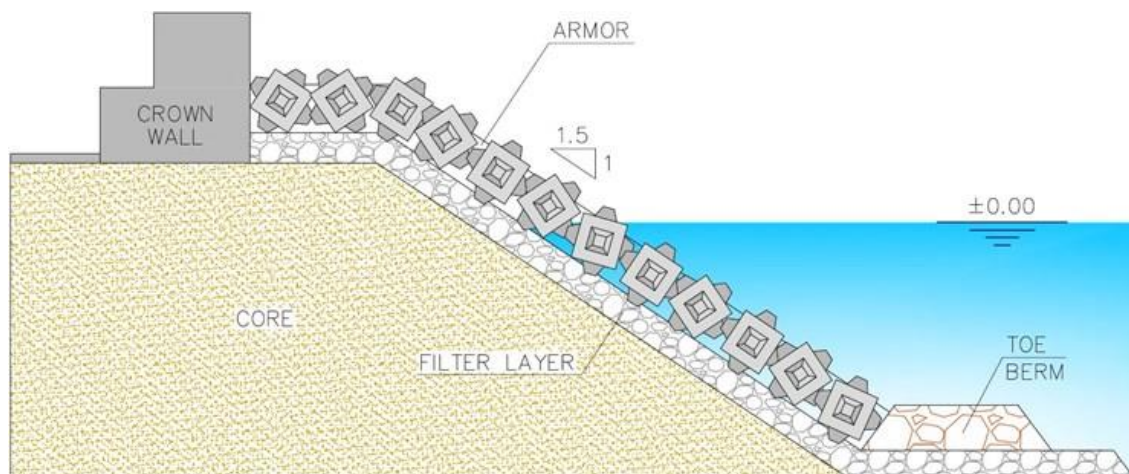


Figura 5: Sección de dique monocapa en talud.

Para calcular las dimensiones adecuadas de la berma, se aplicará la siguiente ecuación:

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = \left(2 + 6,2 \left(\frac{ht}{h_s} \right)^{2.7} \right) * Nod^{0,15}$$

Donde:

- H_s es la altura de ola significativa.

- $Dn50$ es el diámetro nominal de la escollera de la berma de pie, el cual se obtiene considerando que su peso es el 10% del peso de los elementos del manto.
- Δ es una constante dependiente de la relación entre las densidades de los materiales involucrados, de valor 1,59.
- h_t es la profundidad de la berma de pie, en este caso tomaremos el espesor de la capa correspondiente al de la capa de filtro correspondiente.
- h_s es la profundidad al pie del dique.
- N_{od} es una variable que indica el nivel de daño en la berma (en este caso se considera daño despreciable, por lo que su valor es 1).

Sección	W (t)	Dn50 (m)	hs (m)	ht (m)	Δ	Nod	Hs (m)
Contradique	6	0,61	4	0,48	1,59	1	7,95
Tronco	30	1,08	10	0,95	1,59	1	14,15
Bocana	21,5	0,97	10	0,95	1,59	1	12,66

Tabla 9: Cálculo de la altura de ola resistente de la berma por sección.

Se empleará como material de la berma el empleado en las capas intermedias. Podemos comprobar que la altura de ola significativa que resisten es mucho mayor que la de diseño, por lo que aceptaremos este resultado por estar de la mano de la seguridad.

Las dimensiones de la berma para cada una de las secciones mencionadas se detallan de la siguiente manera:

Sección de Contradique

- Escollera: Se empleará la misma escollera que se usó para el filtro en esta misma sección.
- Ancho en coronación: Será de 4 veces el diámetro nominal de la escollera ($4 \cdot Dn50$), lo que equivale a 2.4 metros.
- Espesor: Se establecerá en 2 veces el diámetro nominal de la escollera ($2 \cdot Dn50$), lo que corresponde a 1,2 metros.

Secciones de tronco y morro

- Escollera: Se utilizará escollera con un peso de 2 toneladas.
- Ancho en coronación: Será de 4 veces el diámetro nominal de la escollera ($4Dn50$), lo que se traduce en 4,4 metros.
- Espesor: Se establecerá en 2 veces el diámetro nominal de la escollera $2Dn50$, lo que equivale a 2.2 metros.

Estas dimensiones garantizan la adecuada resistencia y estabilidad de las bermas en las diferentes secciones, tomando en cuenta los materiales utilizados y las características específicas de cada área del dique.

6.4. Cota de coronación

Para determinar la elevación necesaria en la cota de coronación con el fin de garantizar condiciones seguras, se debe llevar a cabo un proceso de dimensionamiento que considera una variedad de factores esenciales. Entre estos factores clave se incluye la altura de ola de diseño, que refleja la magnitud de las olas más extremas que el dique puede enfrentar en situaciones adversas. Además, se debe tener en cuenta la carrera de marea, que se toma en consideración a través del mareógrafo de Gandía, proporcionando datos con una amplitud de alrededor de medio metro en condiciones extremas. Por último, también se considera el posible impacto del cambio climático, que podría contribuir al aumento del nivel del mar. Todos estos elementos se incluirán en el proceso de dimensionamiento para determinar la elevación de la coronación que garantiza la seguridad y la protección a lo largo del tiempo.

De esta manera, y considerando un aumento muy desfavorable del nivel del mar en 10 cm a causa del cambio climático, la cota de coronación del dique principal será de 10 m (profundidad del mar) + 5,9 m (altura de ola de diseño) + 1.03 m (carrera de marea) + 0,1 m, lo que nos arroja una cota de coronación de 17.03 m o de 7.03 m sobre el nivel del mar. En el caso del contradique, y por un procedimiento análogo, la cota de coronación será de 4 m + 3,1 m + 1.03 m + 0,1 m, que nos proporciona un resultado de 8.23 m o de 4.23 sobre el nivel del mar.

En el proceso de construcción del dique utilizando equipos terrestres, es necesario crear una mota de trabajo. Por consiguiente, la altura de la coronación del núcleo debe estar ubicada al menos 1 metro por encima del PMVE, para asegurar una distancia adecuada entre la estructura y las fluctuaciones marítimas.

En los casos en que los mantos se compongan de cubípodos, se recomienda que la porción superior tenga un espesor de al menos 2 veces el diámetro nominal de los cubípodos ($2 \times D_n$), ya sea un manto de una sola capa o de dos capas, es decir, 4.66 m.

Por lo tanto, la elevación mínima de la cota de coronación del manto del dique se calcula de la siguiente manera: 2,32 m (espesor del manto) + 0.95 m (espesor del filtro) + 1.03 m (carrera de marea) + 1 = 4.3m.

La elevación mínima de la cota de coronación del manto del contradique se calcula de igual manera: 1,31 m (espesor del manto) + 0,53 m (espesor del filtro) + 1.03 m (carrera de marea) + 1 = 3,87 m.

En resumen, al ser más desfavorable la situación para el primer caso en ambas situaciones, se emplearán los valores de 8.23 m y 4.23 m sobre el nivel del mar, para el manto principal.

Para el espaldón y que no se produzcan rebases, la altura del mismo en Pleamar Viva Equinoccial debe ser superior a 1,5 veces H_s , lo que nos da un resultado de $8.85 \text{ m} + 1,03 = 9.88 \text{ m}$

6.5. Cálculo del espaldón

Para calcular las fuerzas que actúan sobre el espaldón de un dique en talud con cubípodos, se ha empleado el método propuesto en el "Manual del Cubípodo" elaborado por Gomez-Martín y Medina en 2016. Este enfoque se basa en las fórmulas desarrolladas por Molines en 2016 para estimar tanto la fuerza horizontal máxima (F_h) como las fuerzas verticales (subpresiones) correspondientes a la ola que ha generado la fuerza horizontal máxima ($F_v(F_h)$). A pesar de que estas fuerzas ocurren en momentos diferentes, se asume que coinciden en el mismo instante, garantizando así un margen de seguridad.

La figura siguiente ilustra el esquema de presiones y subpresiones sobre el espaldón:

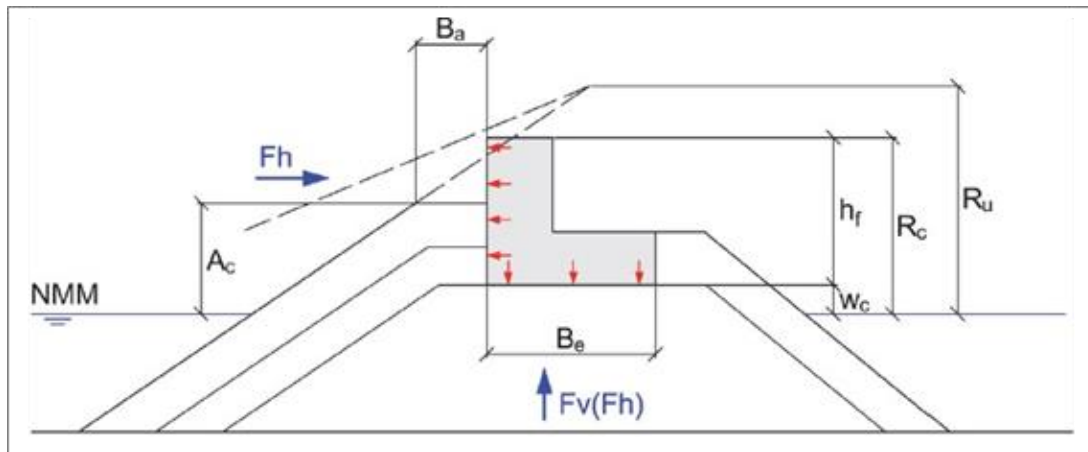


Figura 6: Esquema de presiones y subpresiones que actúan sobre el espaldón.

Para calcular F_h y $F_v(F_h)$, Molines (2011) presenta las siguientes fórmulas:

$$F_h = 0.5\rho wghf^2 \left(-1.29 + 1.80 \frac{\gamma f}{R_c} \cdot Ru + 0.93 \left(\frac{R_c - A_c}{hf} \right) + 0.16 \sqrt{\frac{Lm}{Ba}} \right)^2$$

$$F_v(F_h) = 0.5\rho wghfBe \left(-0.86 + 0.75 \frac{\gamma f}{R_c} \cdot Ru + 0.41 \left(\frac{R_c - A_c}{hf} \right) + 0.17 \sqrt{\frac{Lm}{Ba}} - 0.9 \frac{wc}{hf} \right)^2$$

Las variables y sus significados son los siguientes:

ρw : densidad del agua.

g : aceleración debido a la gravedad.

hf: altura del espaldón.

γf : factor de rugosidad. Para cubos bicapa ($\gamma f = 0.50$), para cubípodos monocapa ($\gamma f = 0.46$) y para cubípodos bicapa ($\gamma f = 0.44$).

$Ru = Ru\{0.1\% \} = 1.34 * Hs * Irm^{0.55}$, para valores de $Irm > 1.5$. Se debe cumplir la condición $Ru < 2.58 Hs$.

$$Irm = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi Hs}{g T_{01}^2}}}$$

Hs es la altura de ola significativa a pie de dique

$$T_{01} = \frac{T_P}{1.20}$$

Rc es el francobordo de la estructura

Ac es el francobordo de la berma superior del manto

Lm es la longitud de onda local. Se calcula con la ecuación $Lm = \frac{g T_{01}^2}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi h_s}{Lm} \right)$

Ba es el ancho de la berma superior

Be es la anchura de la base del espaldón

wc es la cota de cimentación del espaldón,

Los rangos aceptables para estas variables son los siguientes:

$$\begin{aligned} 0.31 < \gamma f \frac{Ru}{Rc} < 0.94 \\ 0.07 < \frac{Rc - Ac}{hf} < 0.59 \\ 0.01 < \frac{Wc}{hf} < 0.27 \\ 3.13 < \sqrt{\frac{Lm}{Ba}} < 6.54 \end{aligned}$$

Se realizará el cálculo de presiones y subpresiones para las secciones de tronco y morro del dique principal:

Para un valor de $\tan \alpha = 0.667$

$Hs = 5.9$ m

$T_{01} = 9.42$ s

$Irm = 2.819$

Con este dato podemos obtener el valor de R_u

$$R_u = 13.292$$

Esta variable además cumple con las dos condiciones que se le exigían.

Calculamos de igual manera el valor de L_m

$$L_m = 60.21 \text{ m}$$

Definamos las variables como resumen:

$$\rho_w: 1,025 \text{ t/m}^3$$

$$g: 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$R_c: 9.88 \text{ m}$$

$$W_c: 2 \text{ m}$$

$$h_f: 7.88 \text{ m}$$

$$\gamma_f = 0.46$$

$$R_u: 13.292$$

$$I_{rm}: 2.819$$

$$H_s: 5.9 \text{ m}$$

$$T_{01}: 9,42 \text{ s}$$

$$A_c: 4.43 \text{ min, tomamos } 8.23 \text{ m por calculo}$$

$$L_m: 60.21 \text{ m}$$

$$B_a: 4.66 \text{ m}$$

$$B_e: 8 \text{ m}$$

Realizando el cálculo:

$$F_h \approx 39.8 \text{ toneladas por metro lineal}$$

$$F_v(F_h) \approx 68.96 \text{ toneladas por metro lineal}$$

Por lo que para dimensionar el espaldón para que cumpla las condiciones de deslizamiento y vuelco deberá tener las siguientes dimensiones:

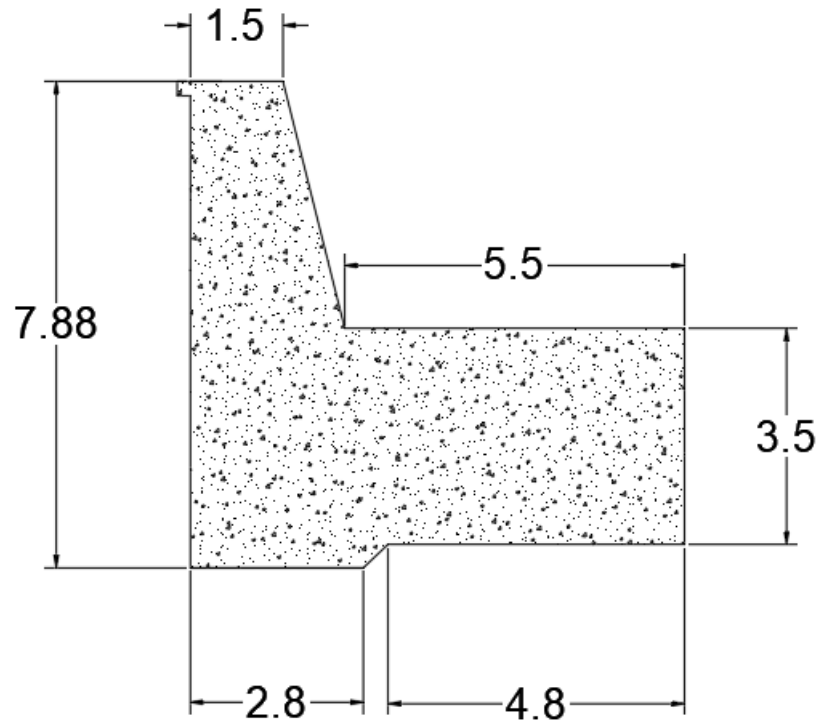


Figura 7: Dimensiones del espaldón



7. Bibliografía

ROM 0.2-90

ROM 0.5-05

ROM 2.0-11

media.ohla-group.com/wpcontent/uploads/sites/5/2022/04/06092416/MANUAL-DEL-CUBIPODO-ES.pdf