

Introducción a los Diques de Abrigo

Apuntes de Clase

María Clavero & Miguel Ortega-Sánchez

Grado en Ingeniería Civil

ETSI Caminos, Canales y Puertos

Universidad de Granada

Índice general

Índice general	III
1. Proyecto de un dique de abrigo	1
2. Estudio general de la sección	3
2.1. Conservación de la energía en la sección	4
2.2. Elementos de la tipología y eficiencia energética frente al movimiento oscilatorio . .	6
2.2.1. Reflexión	6
2.2.2. Transmisión	6
2.2.3. Disipación	7
2.2.4. Altura de ola a pie de dique y en presencia de él	8
2.3. Talud, rugosidad y porosidad	9
2.4. Evolución espacial de la sección de un dique de abrigo	9
2.5. Efectos de la incidencia oblicua y del oleaje irregular	11
3. Secciones tipo	13
4. Diques verticales	15
4.1. Tipologías de diques verticales	18
4.1.1. Dique vertical con paramento especial	19
4.1.2. Dique vertical con manto de protección	19
4.2. Proceso constructivo	20
5. Dique mixto	23
6. Dique en talud	25
6.1. Dimensiones de la superestructura	27
6.2. Dique en talud sin superestructura	28
6.3. Procedimiento constructivo	29
7. Dique berma	31
7.1. Dique berma con núcleo y manto	31
7.2. Dique berma con núcleo y varios mantos	31
8. Dique sumergido	33
8.1. Dique sumergido en talud	33
9. Dique flotante	35
10. Diques de sección delgada y sistemas múltiples	37

11. Criterios para la selección de la tipología	39
11.1. Comportamiento frente a los agentes climáticos marítimos	39
11.2. Comportamiento del terreno	40
11.3. Idoneidad frente a los condicionantes de los materiales y los procesos constructivos .	41
11.4. Idoneidad frente a los requerimientos climáticos durante el uso y explotación	42
11.5. Idoneidad frente a los requerimientos de conservación, reparación y desmantelamiento	43
11.6. Idoneidad frente a los requerimientos ambientales	44

Proyecto de un dique de abrigo

Para controlar las oscilaciones del mar, en particular el oleaje, puede ser necesaria la construcción de obras marítimas de abrigo, o diques de abrigo, cuya presencia interfiere con aquéllas.

La superposición de las oscilaciones incidentes, y las generadas y transformadas por la presencia de la obra, constituye el conjunto de oscilaciones que afecta al área abrigada y condiciona sus niveles de uso y explotación, seguridad y servicio.

El proyecto de un área abrigada y de las obras de abrigo necesarias deberá ser el resultado de, al menos, la siguiente secuencia de actividades:

1. Especificar los criterios generales definiendo la finalidad de la obra, los condicionantes funcionales, los plazos temporales y unidades espaciales (tramos) de la obra y, en cada fase de proyecto, el carácter general y el carácter operativo de la obra y de cada uno de sus tramos, así como los requisitos de proyecto.
2. Describir y caracterizar en el emplazamiento el área abrigada.
3. Describir y caracterizar los factores de proyecto en el emplazamiento que definen la geometría, el medio físico, el terreno y los materiales, identificando y valorando los agentes y acciones y sus escalas temporales y espaciales, especificando, en su caso, los años meteorológicos y los ciclos de solicitud y operatividad.

A partir de las actividades anteriores se recomienda:

1. Realizar los Estudios Previos con el objetivo de definir diferentes alternativas para las disposiciones en planta del área abrigada y para la tipología de los diques de abrigo en función tanto de los requerimientos del uso y explotación como de los condicionantes del terreno, morfológicos, climáticos, medioambientales, de los materiales y los métodos constructivos, de conservación y mantenimiento existentes localmente y la aptitud de desmantelamiento.
2. Predimensionar en planta y alzado la obra y determinar sus escalas espaciales (tramos).
3. Estudiar el comportamiento hidrodinámico, geotécnico, estructural y constructivo de la obra y de sus tramos frente a los factores de proyecto, así como su interacción con el entorno litoral, identificando los modos de fallo frente a la seguridad y el servicio, y los modos de parada frente al uso y la explotación.
4. Verificar que en el conjunto de la obra, sus tramos y elementos se cumplen los requisitos de proyecto en cada una de las fases para todos los modos de fallo y parada.
5. Optimizar funcional, económica y ambientalmente el área abrigada y los diques de abrigo teniendo en cuenta tanto los costes de primera construcción como los de conservación y, eventualmente, reparación en la vida útil y de desmantelamiento, seleccionando alternativas.

Estudio general de la sección

Una vez que se han expuesto los aspectos generales de las obras marítimas, a continuación se estudiarán los diques de abrigo. Este estudio comenzará con el análisis de la sección, para lo cual se partirá de la siguiente hipótesis: *se va a considerar la sección del dique de abrigo como si fuese la sección de un canal de longitud y anchura indefinidas*. Mediante esta hipótesis se fija que la sollicitación sobre la estructura se debe únicamente al tren incidente y al tren resultante de la interacción entre la obra y dicha onda incidente.

La sección representativa (alzado) vendrá caracterizada, según su función, por 3 partes fundamentales: cimentación, cuerpo central y coronación (figura 2.1). A continuación se van a describir los aspectos más importantes de cada una de ellas.

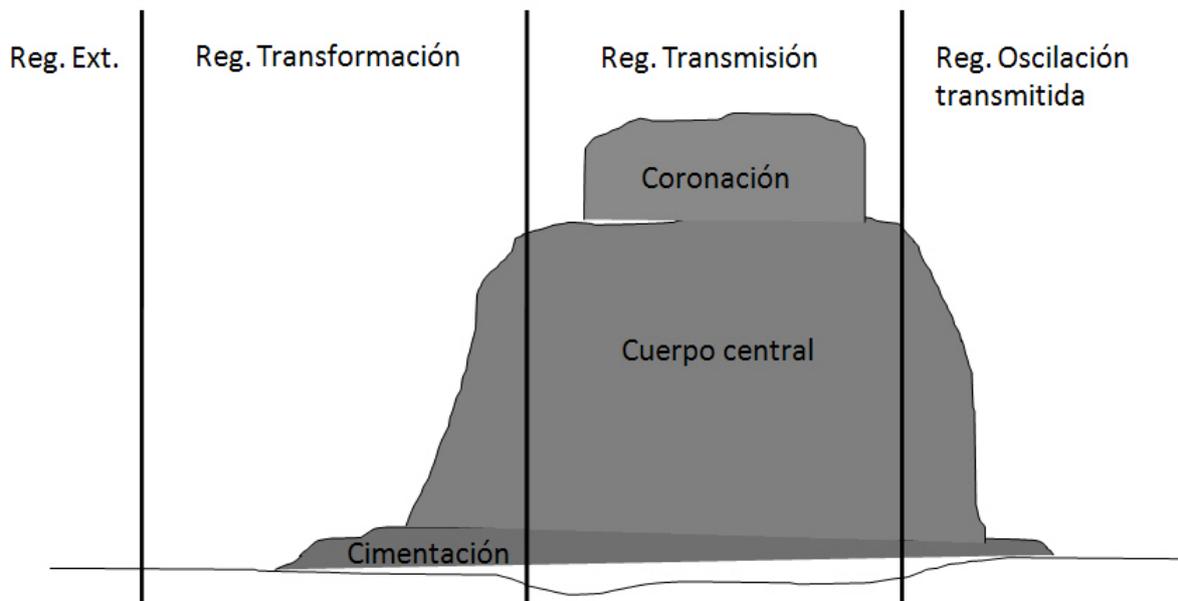


Figura 2.1: Sección representativa de una obra marítima fija de gravedad, en la que se pueden distinguir sus diferentes partes, así como las distintas regiones asociadas a la propagación del oleaje y su comportamiento al interaccionar con la estructura.

- Cimentación: es la parte más baja de la obra, en unión con el terreno. Su función es transmitir los esfuerzos al terreno. Sus características dependen del tipo de obra (tipología de dique) y del material que compone el terreno (características geotécnicas).
- Cuerpo central: es el elemento resistente principal frente a la acción del oleaje. Controla la transformación del flujo de energía del oleaje incidente y transmite a la cimentación la resultante de las acciones

- Superestructura: es la parte superior de la obra. Sus 2 funciones básicas son **proteger** frente al rebase y **dar servicio** (camino de rodadura, atraques, etc.).

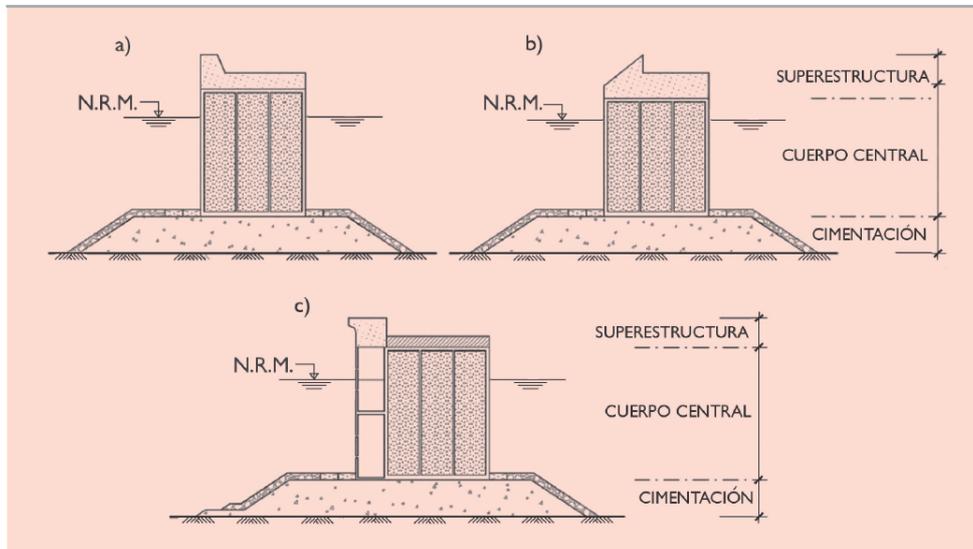


Figura 2.2: Partes de la sección de un dique [tomada de la ROM 1.0].

Cuando se analiza la sección transversal de una obra marítima (figura 2.1) se aprecia la existencia de cuatro regiones claramente diferenciadas en relación con la dinámica marina:

1. Región exterior (I): es la zona de generación y comienzo de la propagación del oleaje. No afecta directamente a la obra marítima.
2. Región de transformación (II): es la zona en la que la onda se transforma como consecuencia de los procesos asociados a la propagación del oleaje y finalmente comienza su interacción con la estructura.
3. Región de transmisión (III): es la zona en la que toda o parte de la energía se puede transmitir a través de la obra, bien por rebase por encima de la estructura o bien por transmisión a través de su estructura porosa.
4. Región de oscilación transmitida (IV): es la zona en la que puede actuar la energía que haya sido transmitida a sotamar de la obra marítima.

Para el estudio de la sección con frecuencia se hará uso de 3 variables del clima marítimo cuya función será caracterizar el clima marítimo, en función de las cuales se analizará el comportamiento de las distintas tipologías. Estos valores serán la altura de ola significativa, el periodo asociado y la dirección de procedencia del oleaje (se obtienen del análisis del régimen extremal del oleaje).

2.1. Conservación de la energía en la sección

Conforme a lo expuesto anteriormente, la energía incidente se distribuye al interaccionar con la sección del dique en, (a) energía reflejada y devuelta hacia el mar, (b) energía transmitida, a través o por encima de la sección propagándose a sotamar del dique, (c) energía disipada y por tanto extinguida y (d) energía transferida a otros modos oscilatorios o generadora de otros movimientos circulatorios (en el marco de la asignatura se despreciará).

Esta transformación de energía se puede analizar definiendo un volumen de control con anchura transversal unidad, que contenga la sección, y en el que se evalúan los flujos de energía entrante y saliente de él y los procesos de disipación en su interior. La ecuación de conservación de la energía del movimiento oscilatorio en el volumen de control, se puede escribir:

$$F_I - F_R - F_T - D'_* = 0 \quad (2.1)$$

donde $F_{I,R,T}$ representan los flujos medios de energía incidente, reflejada y transmitida por las secciones de barloamar y sotamar respectivamente, y D'_* evalúa la disipación por unidad de tiempo en el interior del volumen de control provocada por la presencia de la obra y del terreno. Los signos negativos (o positivos) indican extracción (o aportación) de energía al volumen de control.

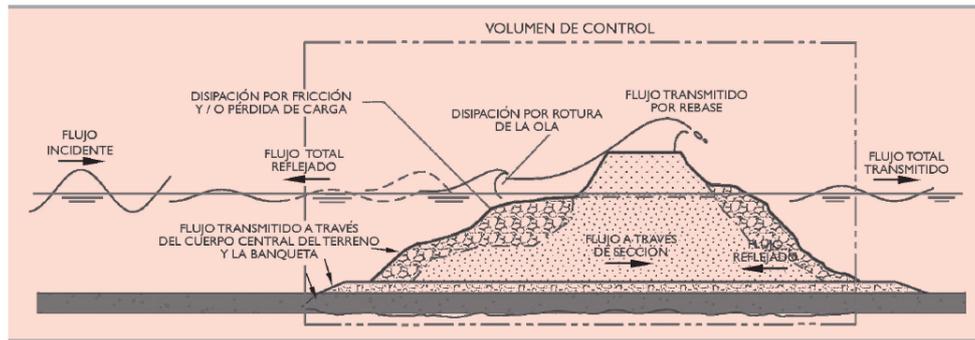


Figura 2.3: Flujo de energía en presencia de la obra [tomada de la ROM 1.0].

Aplicando teoría lineal de ondas y considerando un tren de ondas incidente de altura de ola H_I y periodo $T_{z,I}$, el flujo medio de energía incidente (es decir, la energía media que incide perpendicularmente sobre la cara de barloamar del volumen de control en la unidad de tiempo) con velocidad $C_{g,I}$ es:

$$F_I = E_I C_{g,I} = \frac{1}{8} \rho_w g H_I^2 C_{g,I} \quad (2.2)$$

De forma análoga se definen los flujos de energía salientes del volumen de control, reflejado y transmitido:

$$F_R = E_R C_{g,R} = \frac{1}{8} \rho_w g H_R^2 C_{g,R} \quad (2.3)$$

$$F_T = E_T C_{g,T} = \frac{1}{8} \rho_w g H_T^2 C_{g,T} \quad (2.4)$$

Cuando los procesos de transformación del tren de ondas se describen por teoría lineal y en ausencia de corriente, no hay cambio de periodo o de frecuencia angular, y si además no hay cambio de la profundidad a ambos lados del dique, el número de onda y las celeridades del tren incidente no cambian al reflejarse o transmitirse, y se puede escribir, por tanto, $k_I = k_R = k_T = k$ y de forma análoga las tres celeridades de fase y las tres de grupo.

Si se definen los siguientes coeficientes de transformación del tren de ondas:

- Coeficiente de reflexión $K_R = \frac{H_R}{H_I}$
- Coeficiente de reflexión $K_T = \frac{H_T}{H_I}$
- Coeficiente de disipación $D_* = \frac{D'_*}{F_I}$ (por unidad de energía incidente)

la ecuación de conservación de la energía en el volumen de control (en el que se producen los procesos de transformación por presencia de la sección del dique) se puede escribir

$$K_R^2 + K_T^2 + D_* = 1 \quad (2.5)$$

Estos coeficientes dependen de la tipología de la sección y de la disposición en planta de la obra. En el marco de la teoría lineal, la altura de ola incidente es el factor de escala de las transformaciones.

Comentario 1.

En el ámbito de la ingeniería aplicada, el reparto de energía incidente obtenido mediante la aplicación de la teoría lineal suele ser suficiente, aunque es conveniente recordar que no se tienen en cuenta los procesos de transferencia de energía a otras frecuencias por interacción no lineal entre componentes, ni otros procesos no lineales. Éstos pueden ser importantes cuando se dimensionan diques sumergidos sobre los que se produce la rotura de la ola y diques flotantes cuya amplitud de oscilación es del mismo orden que la amplitud del tren incidente.

2.2. Elementos de la tipología y eficiencia energética frente al movimiento oscilatorio

Según sean la geometría y la disposición de los elementos que conforman la sección de un dique de abrigo, se pueden potenciar unos procesos de transformación del movimiento oscilatorio frente a otros. En los subapartados siguientes se analizan brevemente estos procesos y su dependencia de los elementos tipológicos.

2.2.1. Reflexión

Siempre que haya un cambio brusco de las propiedades geométricas del medio en el que se propaga el tren de ondas con el resultado de la modificación de la celeridad de fase del tren y, en consecuencia, del número de onda y de la dirección de propagación, se produce reflexión de la energía oscilatoria. Así, los cambios bruscos de la profundidad de agua en una berma de pie o de las características hidráulicas del núcleo en un dique de escollera, o la presencia de una pared impermeable de un dique vertical, entre otros, provocan la reflexión hacia el mar de cierta parte de la energía incidente. Análogamente, cuando el tren de ondas se transmite a través del dique, lo abandona o se propaga por un canal de navegación, se refleja parte de la energía propagante tanto en la sección aguas arriba como en la sección aguas abajo.

En este nivel de análisis se puede considerar que la reflexión es un proceso esencialmente lineal que depende de las características geométricas (cambio de profundidad o pendiente del talud) e hidráulicas (porosidad, permeabilidad, fricción equivalente y rugosidad del lecho) de la sección y del contorno, y de las características del oleaje incidente. La cuantificación de la reflexión ya se vio en la primera parte de la asignatura.

2.2.2. Transmisión

La transmisión de la energía oscilatoria a sotamar del dique se puede producir por rebase de su coronación, propagación a través del cuerpo central, como es el caso de los diques granulares, y por el terreno y cimentación cuando éstos sean permeables.

En el primer caso, la magnitud de la energía transmitida depende de la relación entre la altura de la coronación o francobordo y la altura de la lámina de agua en coronación, es decir, del francobordo relativo F_c/H_* .

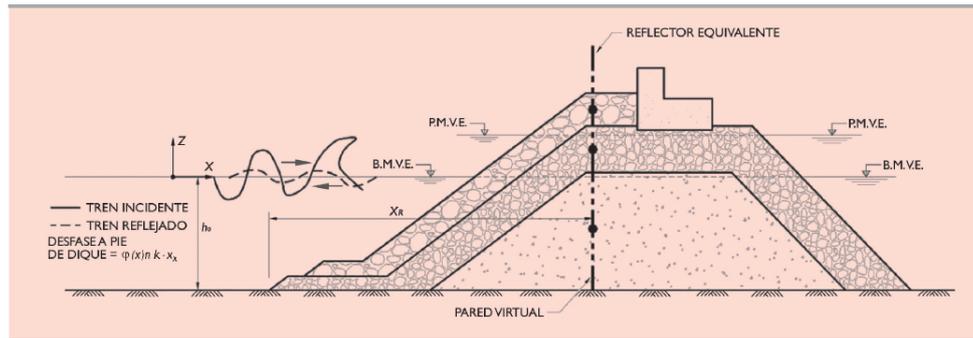


Figura 2.4: Esquema de reflexión en dique en talud [tomada de la ROM 1.0].

En el segundo caso depende de las propiedades hidráulicas del medio y de la anchura o longitud de su propagación B , expresada en función de la longitud de onda o su equivalente el número de onda (kB o B/L). Durante su propagación a través del dique o la cimentación, el movimiento oscilatorio va consumiendo parte de su energía. Si la anchura del dique es suficiente la disipación puede ser total; en estas circunstancias la energía oscilatoria transmitida a través de la sección es despreciable.

Comentario 2.

La permeabilidad (o impermeabilidad) de una obra frente a la transmisión del oleaje se puede conseguir por medio de una combinación de materiales de características determinadas y de las dimensiones geométricas de la sección. Así por ejemplo, un pantalla vertical delgada (de espesor mucho menor que la longitud de onda) y de acero, que se extiende en toda la vertical, es impermeable al oleaje; esa pantalla perforada es permeable desde el punto de vista hidráulico y a través de los orificios se produce transmisión de energía.

2.2.3. Disipación

La disipación de la energía oscilatoria se produce principalmente por dos mecanismos, (1) la rotura y (2) la fricción por los contornos (superficie y fondo) e interior del medio por el que se propaga. El mecanismo más eficaz de disipación es la rotura de la ola en decrestamiento y en voluta, por el que se puede conseguir que se disipe más del 90 % de la energía incidente. Por otro lado, las roturas de ola en colapso y en oscilación son menos eficientes y, en general, no disipan más del 60 % de la energía. El destino de la energía remanente es la reflexión, la disipación interna por fricción o la transmisión a sotomar.

Aunque no es la única manera posible, la rotura de la ola se produce por el incremento del peralte al propagarse por un talud. El tipo de rotura que se produce en el talud se puede identificar a través del número de Iribarren, ya estudiado. La cantidad de energía disipada mediante el mecanismo de fricción depende de su régimen hidráulico. Si éste es laminar, la disipación es proporcional al cuadrado de la velocidad de las partículas de agua con respecto al contorno o los elementos que provocan la fricción. Si el régimen es turbulento, la disipación es proporcional al cubo de la velocidad y varía considerablemente en función del número de Reynolds, ya que una parte sustancial de la disipación está asociada principalmente a los procesos de convergencia y divergencia, a la separación del flujo alrededor de los obstáculos, a la formación de remolinos y estelas y a la transmisión de cantidad de movimiento relacionada con la cascada turbulenta que eventualmente finaliza en calor.

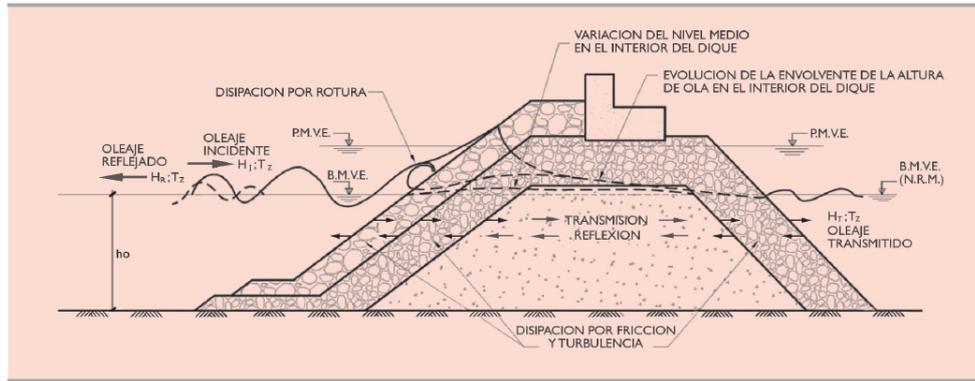


Figura 2.5: Procesos de transformación de la energía incidente en un dique en talud [tomada de la ROM 1.0].

En general, la energía disipada por el proceso de fricción depende del número de Reynolds, de la porosidad del medio y del tamaño de los elementos que lo forman (diámetro de los granos, del agujero, del pilote, etc.).

La evaluación de la disipación por rotura de ola en decrecimiento se determina con suficiente aproximación asemejándola a la disipación que se produce en un resalto hidráulico. Sin embargo, si la forma de la rotura de la ola es en voluta, colapso u oscilación por un talud de pendiente fuerte, la evaluación de la tasa de disipación del movimiento oscilatorio que se produce en el proceso es harto complicada e incierta. Una manera indirecta de obtener la energía disipada que se puede aplicar a los diques de abrigo es resolver la ecuación de la conservación de la energía una vez que se han evaluado los flujos de energía reflejado y transmitido irradiados desde del volumen de control.

2.2.4. Altura de ola a pie de dique y en presencia de él

De forma general, se puede admitir que la presencia del dique provoca la reflexión de una parte de la energía del tren de ondas incidente. Debido a la interferencia de los trenes incidente y reflejado a pie de dique el movimiento oscilatorio es parcialmente estacionario. Considerando teoría lineal, el periodo de los trenes incidente, reflejado será parcialmente estacionario. Sin embargo, si se define H_* como la altura de ola a pie de dique y en presencia de él, su valor dependerá de la geometría del dique y del desfase entre ambos trenes. De forma general, se puede escribir $H_* = \mu H_I$, donde μ es un coeficiente que cuantifica la magnitud de la interferencia lineal de los trenes incidente y reflejado.

Comentario 3.

Para un dique vertical de paramento liso e impermeable, construido sobre un fondo horizontal y cuya cimentación es de espesor despreciable frente a la profundidad, si es irrebasable, $\mu \sim 2$. Si es rebasable y la pared es rugosa, en ese caso $\mu < 2$. Si la ola puede romper sobre la berma del dique vertical, puede darse $\mu > 2$. Para un dique en talud con tipología Iribarren su valor puede ser $0 \leq \mu \leq 1,8$. El valor de este coeficiente también depende del tramo de obra y de la disposición en planta, entre otros factores.

2.3. Talud, rugosidad y porosidad

Cuando el tren de ondas se propaga por un talud, un fondo rugoso o a través de un medio poroso se produce la disipación de una parte de su energía. No se debe olvidar que simultáneamente a este efecto disipador se produce el proceso de reflexión, que incluye un cambio de la fase del tren reflejado, ya que, al propagarse el tren oscilatorio en los tres casos hay un cambio de las condiciones de propagación. La energía remanente se transmite.

Cuando el oleaje incide sobre un talud de fuerte pendiente tal que $I_r \geq 2,3$, el tren de ondas se debe adaptar bruscamente al cambio de profundidad al mismo tiempo que se produce el peraltamiento por lo que simultáneamente se produce la reflexión de la energía incidente. La interacción de los trenes incidente y reflejado, y la reducción de la profundidad se combinan para que la ola se desmorone por su base, denominada rotura en colapso, o bien oscile sobre el talud con un frente de onda turbulento, denominada rotura en oscilación. En estas condiciones la presencia del dique provoca que se refleje entre el 35–85 % de la altura de ola incidente, dependiendo del tipo de rotura evaluado por I_r , la porosidad de los mantos y del núcleo.

Una de las posibles maneras de incentivar la disipación por los contornos consiste en disponer en ellos, elementos de rugosidad de altura variada irregularmente repartidos, por ejemplo en la coronación del dique o en el fondo a barlomar del mismo. Análogamente, la disipación por el interior del cuerpo central o en la superestructura del dique se puede magnificar disponiendo paredes porosas o con ranuras para que aumente el número de contracciones, expansiones y separaciones de lámina que debe superar el movimiento oscilatorio en su propagación. Este es el proceso que se produce de forma natural un incontable número de veces en un medio granular permeable, por ejemplo, en los mantos y núcleo de un dique de escollera.

2.4. Evolución espacial de la sección de un dique de abrigo

Para controlar y transformar la energía incidente se puede diseñar un dique de abrigo formado con diferentes elementos y dispuestos con diferentes configuraciones; el resultado final es el predominio de unos procesos de transformación sobre otros. En la siguiente figura se presenta la evolución espacial de un dique de abrigo en función de su forma de transformar la energía incidente. En consecuencia, el objetivo de abrigar un área se puede alcanzar mediante diferentes tipologías.

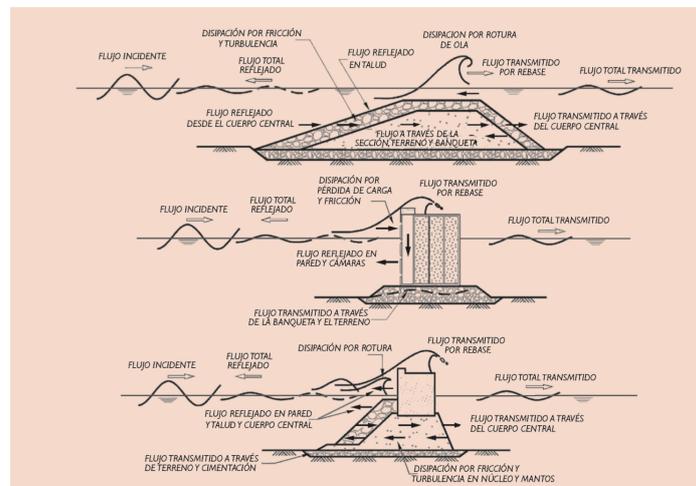


Figura 2.6: Evolución espacial de las partes de la sección y transformación de la energía incidente (I) [tomada de la ROM 1.0].

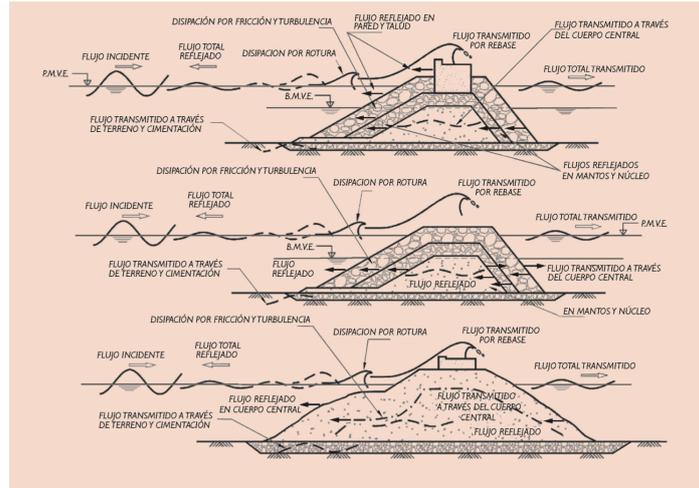


Figura 2.7: Evolución espacial de las partes de la sección y transformación de la energía incidente (II) [tomada de la ROM 1.0].

En las figuras anteriores se pueden diferenciar las siguientes situaciones tipo:

- Se puede construir un dique sumergido cuya coronación se encuentre a la profundidad d , con una anchura B . La construcción puede realizarse mediante material natural (p.ej. escollera) o artificial (p.ej. hormigón). La partición de la energía incidente depende principalmente de d/h , B/L_d , H_*/h , y si además el dique es de material granular, de la porosidad y la granulometría de los granos. L_d es la longitud de onda sobre el dique. Dependiendo de sus dimensiones la ola puede romper a pie de dique, sobre él, o propagarse a sotamar sin percibir la presencia del dique o con altura reducida por el efecto de la fricción.
- Si el nivel de protección no es suficiente, a modo de cimentación, se puede colocar sobre el dique anterior un cajón prefabricado de pared vertical impermeable que emerja ligeramente, que actúa como cuerpo central del dique aumentando el control de la energía incidente a costa de incrementar la energía reflejada. Esta configuración es la tradicional de dique mixto. Si el rebase por la coronación es excesivo, se puede construir sobre el cuerpo central una superestructura cuyo francobordo sea del orden de la altura de ola a pie de dique y en presencia de él H_* . El dique es entonces irrebalsable y la transmisión de energía sólo ocurre bajo el cajón a través de la cimentación porosa. Con ella, de nuevo, se vuelve a aumentar la energía reflejada.
- Si la energía reflejada desde el dique crea condiciones inaceptables en el entorno o en otras zonas o infraestructuras del área portuaria, entonces es necesario modificar la pared de barlomar del cajón para aumentar la disipación. Para ello se puede considerar, entre otras, las siguientes disposiciones: (1) incrementar la rugosidad de la pared de barlomar para incrementar la rugosidad por el contorno, (2) inclinar la pared de barlomar para provocar la rotura de la ola, (3) permeabilizar la pared y crear una cámara interior que aumente las pérdidas por fricción y desfase la reflexión, (4) construir un manto de piezas a barlomar del dique, etc.
- Si no hay disponibilidad de materiales granulares o las acciones asociadas a la energía reflejada desde el dique no son relevantes, se puede extender el cajón hasta el fondo, apoyado en una banqueta de enrase, convirtiendo la tipología en la tradicional de dique vertical, que a los efectos prácticos es totalmente reflejante. En los casos cuando se deba tener cierto control de la energía reflejada se puede proceder de forma análoga a la descrita para el dique mixto. La magnitud del rebase depende del francobordo relativo.

- En algunos casos no es estrictamente necesario construir una tipología tradicional, sino que es más conveniente recurrir a nuevas tipologías que potencien un reparto energético diferente. Así por ejemplo, (a) una hilera de pilotes de diámetro D , con separación entre ejes de pilotes $s/D \approx 2$, provoca la radiación (reflexión) de parte de la energía incidente en las paredes de los pilotes, la disipación de la energía por fricción y por pérdida de carga asociada al paso de la ola a través; si se disponen dos filas de pilotes este efecto se incrementa; (b) una pantalla perforada vertical o ligeramente inclinada, llegando hasta el fondo o hasta una cierta profundidad, tiene efectos análogos. Dependiendo de los requisitos de proyecto se pueden combinar tipologías, por ejemplo, un conjunto de bloques que provocan la disipación por rotura y fricción, e hileras de pilotes o pantallas perforadas o cajón perforado a sotomar que en su trasdós tiene un muelle, etc.

2.5. Efectos de la incidencia oblicua y del oleaje irregular

El análisis anterior se ha realizado suponiendo que el movimiento oscilatorio es un tren monocromático de ondas que incide perpendicularmente a la sección. En general, sobre todo en profundidades grandes, el oleaje incide con oblicuidad a los diques de abrigo y su estructura se puede representar por la superposición lineal de un gran número de componentes con frecuencia, dirección y contenido energético diferentes y fase aleatoria. En general, la magnitud de los procesos de transformación de la energía del oleaje incidente tales como la reflexión, transmisión, ascenso del agua por el talud, rebase, etc, se reducen al aumentar el ángulo de incidencia. La incidencia se mide por el ángulo que forman la normal a la cresta de la ola y la normal al obstáculo.

La representación de los fenómenos de transformación un tren irregular mediante por medio de un descriptor estadístico es una información “sintetizada” del conjunto de las transformaciones que experimenta cada una de las olas individuales del tren, pero no informa adecuadamente del comportamiento de cada una de las olas individuales, en particular de las más altas. No conviene olvidar que, a los efectos de la seguridad, éstas son las que cuentan. Por ello, en general, los resultados espaciales de los procesos de transformación que se obtienen aplicando las descripciones estadística o espectral del oleaje suelen ser más “suaves” que los obtenidos de la aplicación de un tren regular de ondas.

Capítulo 3

Secciones tipo

Una vez expuestas las características generales de la sección, se van a estudiar las tipologías o secciones tipo más importantes. La clasificación de las tipologías se hace, fundamentalmente, según los siguientes criterios:

- Geometría de la sección (vertical, en talud, ...).
- Forma de resistir y controlar la energía de la onda incidente según lo expuesto en el apartado anterior.

Teniendo en cuenta los aspectos anteriores, se distinguen las siguientes secciones tipo:

1. Dique vertical
2. Dique mixto
3. Dique en talud
4. Dique berma
5. Dique pantalla
6. Dique flotante

A continuación se van a exponer las características más importantes de cada uno de ellos, así como se incluirán algunos comentarios adicionales y complementarios.

Capítulo 4

Diques verticales

La figura 4.1 muestra el esquema geométrico simplificado de un dique vertical. Las figuras 4.2 y 4.3 muestran ejemplos reales. Desde la parte inferior hasta la parte superior, los principales componentes de la sección son:

- **Cajeado:** cuando el material del fondo no tiene la suficiente calidad (capacidad portante y/o estabilidad) se elimina dicho material (cajeado) y se sustituye por un material de mejor calidad (como el que compone la banqueta de enrase).
- **Cuerpo central:** la parte central del dique vertical se suele constituir en forma de cajones de hormigón (huecos) que son fabricados en un cajonero y posteriormente transportados hasta su ubicación final, donde se funden y se rellenan para aumentar su capacidad portante. Antiguamente se hacían apilando cubos de hormigón o escollera, en cuyo caso las juntas debían estar adecuadamente resueltas.
- **Camino de rodadura:** finalmente encima del cajón se ubica el camino de rodadura, que permitirá que la estructura pueda proporcionar servicio.
- **Botaolas:** en caso de ser necesario se dispone un botaolas para disminuir los efectos del rebase.

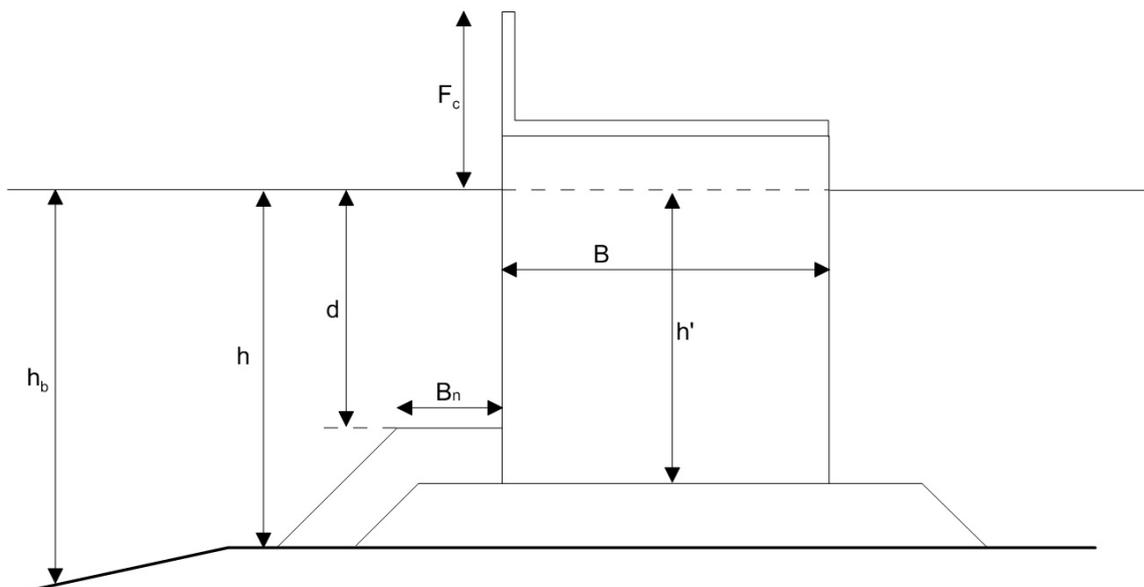


Figura 4.1: Sección tipo de un dique vertical.

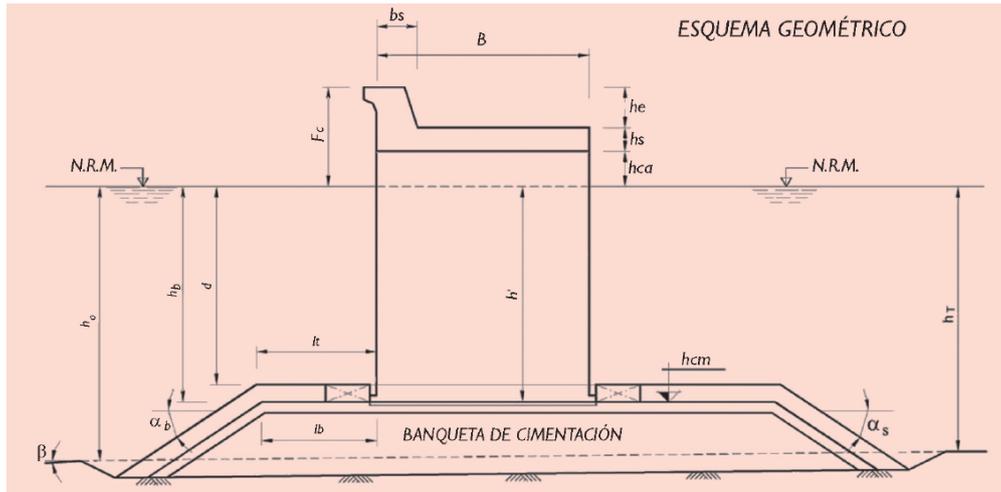


Figura 4.2: Dique vertical (I) [tomada de la ROM 1.0].

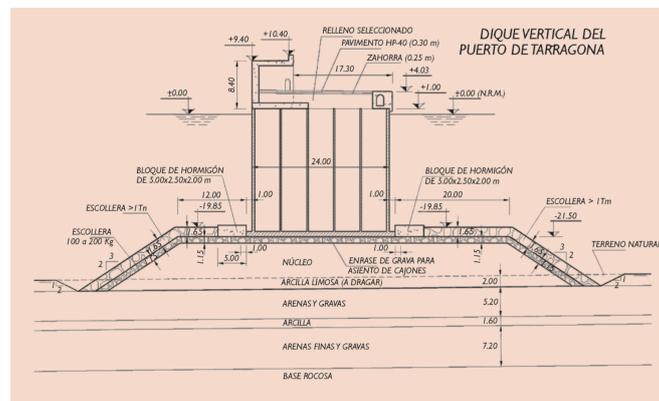


Figura 4.3: Dique vertical (II) [tomada de la ROM 1.0].

Un elemento común a casi todas las tipologías de diques es la **berma de pie**, cuyo objetivo es proteger a la estructura de posibles socavaciones que afecten a su estabilidad y comportamiento estructural.

Conforme a la figura, los principales parámetros geométricos son:

- Francobordo
- Anchura del cajón
- Anchura de la berma
- Profundidad a pie de dique
- Profundidad sobre la berma
- Profundidad hasta la banqueta de enrase

Esta tipología de diques debe estar convenientemente diseñada para garantizar que, a ser posible, el dique esté solicitado por trenes estacionarios o parcialmente estacionarios sin rotura de oleaje. Es decir, con carácter general se recomienda la tipología de dique vertical allí donde sea muy poco

probable la rotura de las olas contra el paramento. Por ello, el fenómeno que domina es la reflexión, de forma que en el paramento del dique se forma una onda estacionaria o parcialmente estacionaria. A tal efecto se deben cumplir las siguientes condiciones:

$$\frac{d}{h} \geq 0,85 \quad (4.1)$$

$$\frac{l_t(B_n)}{L} < \frac{1}{20} \quad (4.2)$$

$$\frac{H_I}{L} \leq \left(0,11 + 0,03 \frac{1 - K_R}{1 + K_R} \right) \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (4.3)$$

$$H_* \simeq (1 + K_R)H_I \quad (4.4)$$

Los diques verticales se pueden clasificar atendiendo a los siguientes criterios:

- Según (1) las características hidráulicas del material y según (2) el cociente relativo entre B/L , se distinguen
 - Diques impermeables: son aquellos en los que se asume que el coeficiente de reflexión toma valor 1, asumiendo por tanto que el paramento es impermeable. En la realidad casi siempre el coeficiente de reflexión es menor que la unidad.
 - Diques permeables: son aquellos en los que el paramento es permeable. Se puede producir transmisión de una parte de la energía incidente, de forma que el módulo del coeficiente de reflexión toma valores < 1 .
- Según el cociente relativo entre F_c/H_*
 - Diques no rebasables: no se produce transmisión de energía por rebase.
 - Diques rebasables: se transmite una parte de la energía por encima de la estructura.

Si los diques son irrebasables y de paramento vertical e impermeable, se asume que la reflexión es perfecta. En esos casos se recomienda comenzar el predimensionamiento con una anchura mínima de $B \sim H_*$. En el caso de que la probabilidad de rotura sobre el paramento no sea despreciable, se debe comenzar el predimensionamiento con $B \sim 1,5H_*$.

Comentario 4.

Como se vio en la parte de oleaje, $H_I \sim (1,6 - 1,8)H_{s,I}$, por lo que $H_* \simeq 2H_I = (3,2 - 3,6)H_{s,I}$

Comentario 5.

Las presiones debidas al impacto de la ola son de gran importancia para el cálculo de los diques verticales. Sea un dique vertical en cuyo paramento se pone un sensor que mide la presión. Si se considera teoría lineal, se obtienen las presiones que muestra la figura 4.4.

En el pico de la gráfica se aprecia que la presión dinámica es máxima cuando la ola está en la cresta, o sea, la cresta sobre el paramento (es decir, cuando se forma una onda estacionaria); se va a denominar a este valor máximo como p_d^* . Supóngase ahora que sobre el mismo dique impacto una ola rota, y que nuevamente se mide la presión dinámica adimensionalizada con p_d^* . Se observa que si impacta una ola rota la presión dinámica es muy superior (hasta 3 veces superior e incluso más según el tipo de rotura que se produzca sobre el paramento). Este es uno de los motivos fundamentales por los que hay que evitar dicho impacto de la ola rota y, en ese caso de que se puede producir, incorporarlo en el dimensionamiento del dique.

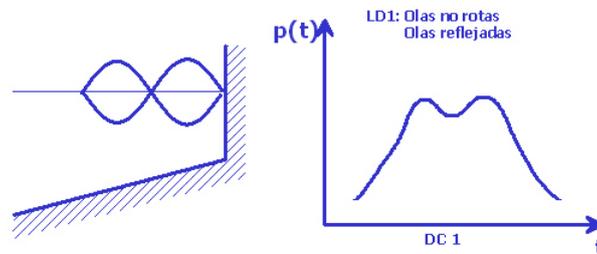


Figura 4.4: Distribución de presiones sobre el paramento de un dique vertical (onda estacionaria).

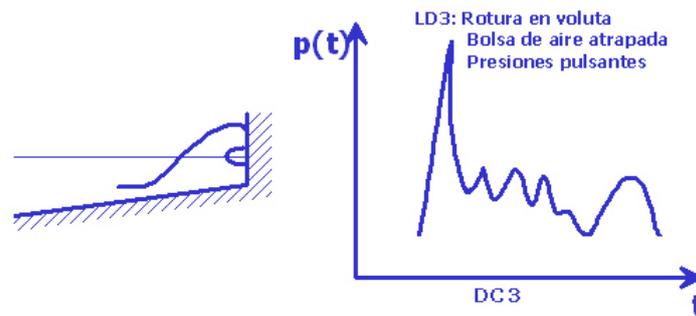


Figura 4.5: Distribución de presiones sobre el paramento de un dique vertical (ola rota).

Aparte de la tipología genérica que se ha expuesto anteriormente, existen distintas modificaciones que a continuación pasamos a exponer.

4.1. Tipologías de diques verticales

Dentro del dique vertical genérico que se ha expuesto anteriormente, se pueden encontrar variantes del mismo.

4.1.1. Dique vertical con paramento especial

Al objeto de reducir la reflexión del oleaje, en los últimos años se ha explorado la construcción de diques verticales de paramento inclinado, perforado o ranurado con cámaras de oscilación, en toda o a partir de cierta profundidad. Con estas modificaciones del paramento a barlomar se desfasan los trenes incidente y reflejado y se aumenta la disipación por fricción, con el resultado de que para algunos periodos se reduce la altura de ola H_* a pié de dique y en presencia de él. La cámara de oscilación ayuda en este cometido, no obstante se debe prestar especial a su anchura B_c y profundidad h_c ya que el proceso de reflexión depende de B_c/L_c donde L_c es la longitud de onda en el interior de la cámara. La oscilación de la lámina de agua en el interior de la cámara puede tener una gran amplitud y, en los casos en los que esté cubierta, las presiones sobre ésta pueden ser muy importantes.

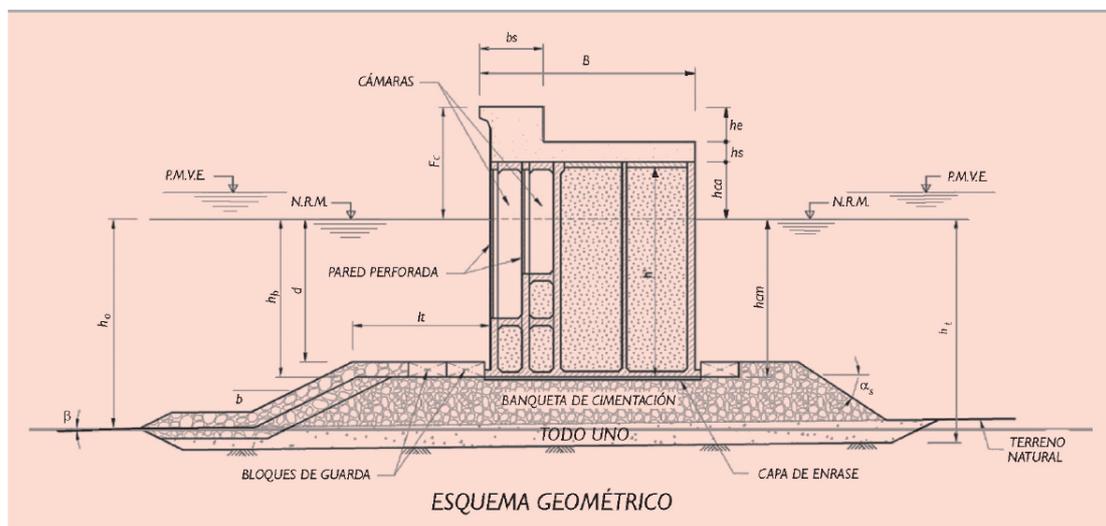


Figura 4.6: Dique vertical con cámaras disipadoras y resonantes [tomada de la ROM 1.0].

4.1.2. Dique vertical con manto de protección

Son diques verticales protegidos con un talud de elementos granulares. En este caso el tramo central está formado por dos elementos estructurales, el talud de piezas y el paramento vertical. Ambos elementos estructurales suelen prolongarse por encima de la superficie del agua; en este caso el paramento vertical continua formando la superestructura. La presencia del talud transforma el dique reflejante en parcialmente reflejante y disipativo, predominando uno u otro modo de trabajo en función de las características del oleaje incidente y de las dimensiones geométricas del talud. Dado que tras el talud granular se encuentra una pared impermeable, el nivel de reflexión de esta sección y las condiciones de estabilidad de las piezas del manto son diferentes a los de un dique rompeolas con núcleo de todo uno de cantera.

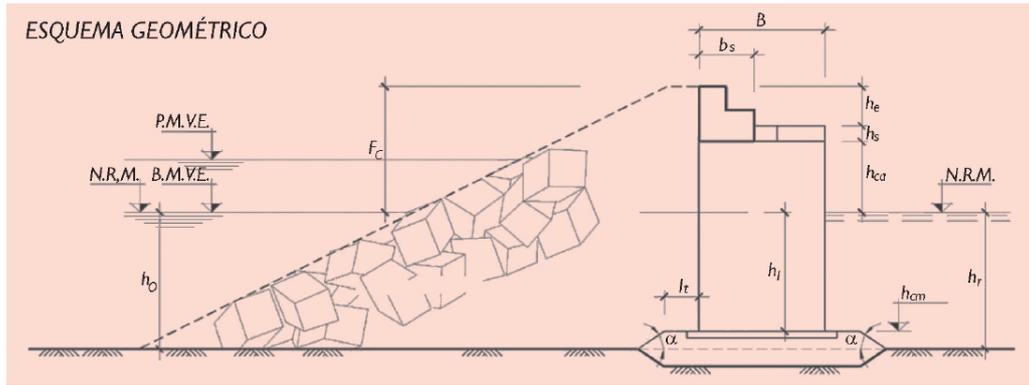


Figura 4.7: Dique vertical con manto de protección [tomada de la ROM 1.0].

4.2. Proceso constructivo

En la actualidad la principal tipología de dique vertical es la de cajones verticales. En relación con los aspectos constructivos:

- Si la calidad del terreno no es la adecuada, se procede al dragado del **cajeado**, que se rellena con material todo uno de cantera con peso de entre 5 y 50-100kg, y donde se deben controlar especialmente los tamaños pequeños para evitar pérdidas.
- Encima del cajeado se ubica la banqueta de enrase: capa de material uniforme y pequeño con dimensiones de 3-5 cm (grava) que constituirá el apoyo de los cajones. Este material debe garantizar un reparto uniforme de las cargas sobre el terreno, horizontalidad así como un coeficiente de rozamiento elevado (superior a 0.5) para garantizar la estabilidad frente al deslizamiento.
- Sobre esta capa se ubican los cajones, que son estructuras reticulares verticales y armadas, que inicialmente se encuentran huecas para que se puedan transportar flotando. Una vez que se encuentran en posición, se rellenan de agua para hundirlos (posteriormente el agua se sustituye por material sólido). Interesa que los cajones sean de las mayores dimensiones posibles, tanto por costes como para que el reparto de cargas sobre el mismo sea lo más uniforme posible.
- Finalmente, encima de los cajones se ubica la superestructura, habitualmente también de hormigón y caracterizada por el botaolas y el camino de rodadura.

Teniendo en cuenta los conceptos anteriores, las fases del proceso constructivo serían:

1. En primer lugar se hace la operación de dragado del material de mala calidad, dejando pendientes laterales del orden de 7:1 para garantizar su estabilidad. De forma casi simultánea al dragado se procede al relleno (generalmente con barcazas) con espesores por tongadas del orden de 0.3-0.5m y en anchuras del orden de 10m. Así pues, se va avanzando en anchuras del orden de 10m y espesores del orden del medio metro.
2. Posteriormente se procede a colocar el material de enrase (macadam; banqueta de enrase). El procedimiento igualmente suele ser vertido desde barco y posterior enrase.
3. Después se coloca el cajón, que se suele transportar flotando y se hunde mediante apertura de válvulas y llenado con agua. Una vez ubicado de forma final, se rellena de material sólido.

4. Tras colocar el cajón, se hormigona in-situ la superestructura, que debe estar solidariamente unida a los cajones.
5. Finalmente, se construye un manto de protección cuyo objetivo es evitar la salida de material de la cimentación e incrementar la estabilidad y seguridad de la obra.

A modo de resumen, se puede decir que las fases constructivas de un dique vertical son: (1) dragado, (2) sustitución, (3) macadam, (4) estructuras y (5) superestructura.

La construcción de la superestructura se puede hacer al final o durante la ejecución de la misma. Si se hace durante la obra, permitirá proteger los medios constructivos e incrementará los ritmos de ejecución (mejor camino de rodadura para camiones), aunque sufrirá por el paso de maquinaria, etc. Por el contrario, si se hace al final puede que su coste (de la superestructura) sea menor y no sean necesarias reparaciones. La decisión suele ser económica.

Dique mixto

Cuando la cimentación del dique vertical ocupa una proporción notable de la profundidad tal que su presencia modifica significativamente la cinemática y dinámica de las oscilaciones del mar, la tipología se denomina dique mixto. La función protectora se comparte entre el tramo inferior, ampliando su función de cimentación, y el tramo central, que se extiende por encima del plano de agua proporcionando los servicios de una superestructura. Las variaciones principales respecto a los diques verticales se encuentran en:

- Se sube la cota de coronación de la cimentación.
- Se reduce el cuerpo central.
- Se dispone un manto de protección.

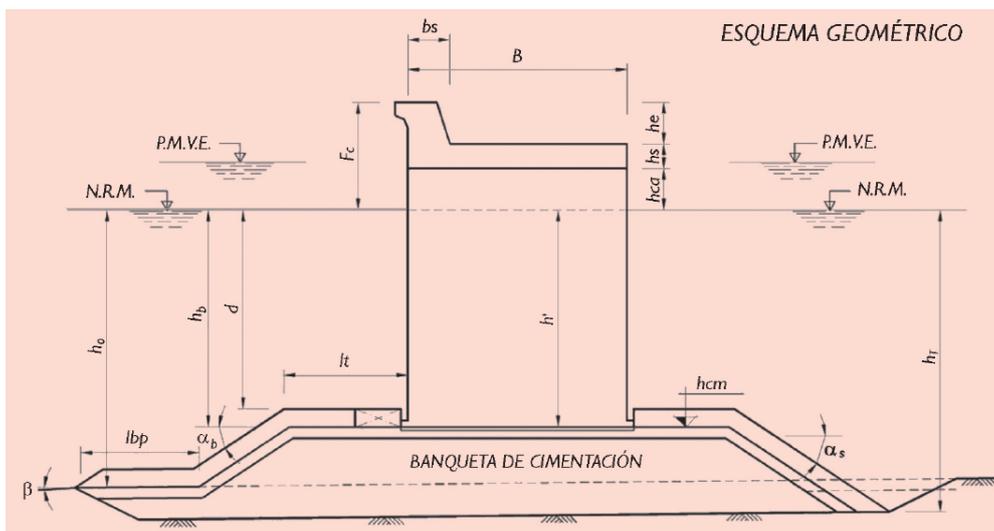


Figura 5.1: Dique mixto (I) [tomada de la ROM 1.0].

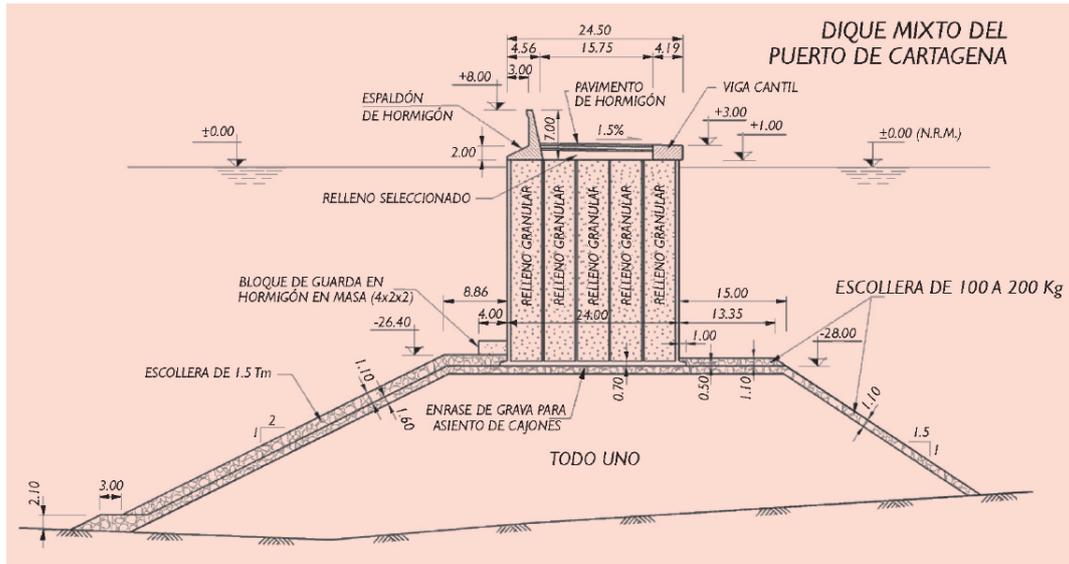


Figura 5.2: Dique mixto (II) [tomada de la ROM 1.0].

La función protectora se comparte entre el tramo inferior, que amplía su función de cimentación, y el cuerpo central, que se extiende. Por ello, su comportamiento es intermedio entre un dique vertical y uno en talud (que se expondrá posteriormente).

Al igual que el dique vertical, el paramento de la superestructura puede ser inclinado en toda su altura o a partir de cierta cota, perforado, ranurado, con cámaras, etc. y dotado o no de un botaolas.

Dependiendo del nivel de agua y de las características del oleaje incidente en relación con las dimensiones geométricas del dique, éste puede trabajar predominantemente como dique reflejante, disipativo o mixto, es decir, parcialmente reflejante y disipativo. La transmisión de energía a sotamar del dique se produce por rebase de la coronación o a través de la cimentación que, de no cuidarse adecuadamente construyendo mantos que actúen de filtro, podrá ser significativa. Para el predimensionamiento de la anchura del cuerpo central del dique mixto se recomienda aplicar los criterios correspondientes a diques verticales, teniendo en cuenta la probabilidad de rotura de la ola contra el paramento. En todos los casos se deberá prestar especial atención a la transformación de la ola por la presencia de la cimentación y la berma.

Dique en talud

Tradicionalmente se llaman también rompeolas o dique de escollera. La figura 6.1 muestra un esquema geométrico de la sección tipo de estos diques. Se componen de los siguientes elementos esenciales (algunos de los elementos geométricos son comunes a los expuestos en las tipologías anteriores):

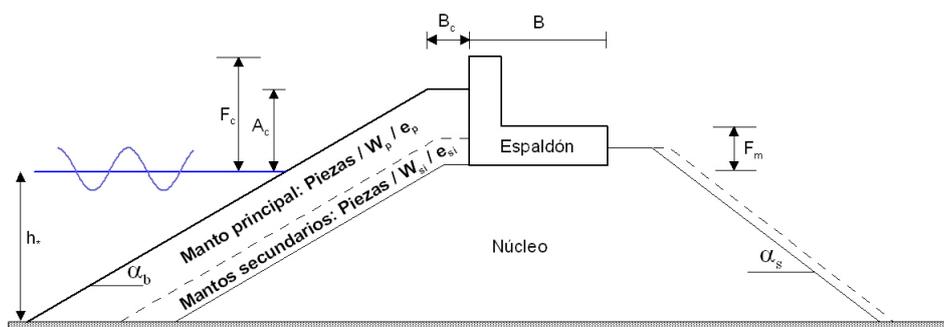


Figura 6.1: Sección tipo de un dique en talud.

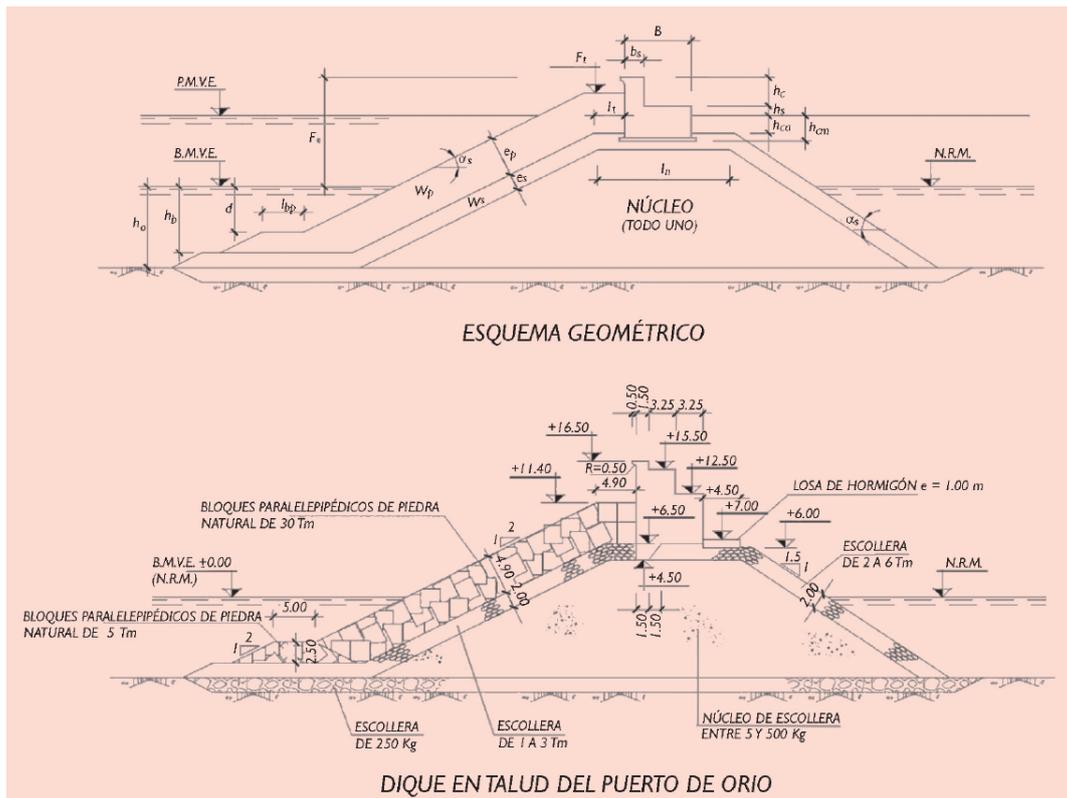


Figura 6.2: Dique en talud tipología Iribarren [tomada de la ROM 1.0].

- Núcleo: es la parte central del dique, compuesto de todo uno de cantera (entre 5-25 y 100 kg sin finos). Sobre ella se apoyarán los distintos mantos que tendrán la principal función portante. A su vez el núcleo apoyará directamente sobre el terreno si este tiene una buena capacidad portante; en su caso será necesario realizar un cajeadado para eliminar el material de mala calidad y sustituirlo por un material (todo uno de cantera) de buena calidad.
- Mantos: los mantos se disponen sobre el núcleo, y son los que tienen la principal capacidad portante de la estructura, haciendo que el oleaje rompa y disipe la mayor parte de la energía. Se componen en principal (manto exterior) y secundarios (entre el principal y el núcleo). Su número y características técnicas dependen de los condicionantes de proyecto.
- Espaldón: enrasado sobre el núcleo y dispuesto de tal forma que los mantos se apoyan sobre él se dispone el espaldón, cuya misión fundamental es proporcionar servicio y limitar la cantidad de agua que rebasa.

Excepto en el caso de fondo rocoso, para asegurar la estabilidad y la forma del talud es necesario construir una berma de pie que proteja adecuadamente el terreno, la cimentación y, además, proporcione apoyo a los mantos secundarios y principal. El dique en talud puede tener o no superestructura.

Dependiendo de las características del oleaje incidente, en particular el peralte de la ola y el talud del manto principal, cuyo cociente define el número de Iribarren, el dique puede actuar tanto como parcialmente reflejante como disipativo. La transmisión de energía a sotamar del dique se puede producir por rebase de las olas por la coronación del espaldón y a través de la cimentación y cuerpo central del dique, pudiendo ser significativa en el caso de no cuidarse adecuadamente mediante la construcción de mantos que actúen de filtro del flujo de energía.

Con carácter general un dique en talud se puede construir para abrigar frente a cualquier régimen de oleaje: olas sin romper, rompiendo o rotas. Siempre que sea posible se recomienda utilizar piedra natural como elemento del manto principal y adoptando un ángulo del talud α del lado de barloomar tal que se encuentre en el intervalo ($1,5 \leq \cot \alpha \leq 3,0$). En su defecto, sin perjuicio de que puedan utilizarse otro tipo de piezas artificiales, se recomienda utilizar piezas cúbicas o ligeramente paralelepípedicas ($a * a * 1,3a$) de hormigón en masa. En este caso, se recomienda adoptar taludes con ángulos que cumplan ($1,5 \leq \cot \alpha \leq 2,0$). Para piezas artificiales de hormigón, cúbicas o paralelepípedicas, se recomienda iniciar los tanteos de predimensionamiento “a inicio de avería” con un peso mínimo de la pieza en el intervalo:

$$\frac{W}{\gamma_w R_s H_*^3} \gtrsim 0,020 \quad (6.1)$$

$$H_* \simeq 1,5H_I \quad (6.2)$$

$$\cot \alpha \simeq 1,5 \quad (6.3)$$

$$R_s = \frac{S_s}{(S_s - 1)^3}; \quad S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (6.4)$$

6.1. Dimensiones de la superestructura

Las dimensiones de la superestructura o espaldón pueden influir de manera notable en el modo de controlar el flujo de energía. Así, es posible encontrar diques en talud con una superestructura de pequeñas dimensiones y ubicado en un nivel en el que la acción del oleaje es despreciable. En España, es habitual dimensionar el dique en talud con una superestructura de grandes dimensiones que controla una parte sustancial de la energía incidente; para facilitar su construcción se suele apoyar por encima de la bajamar, pudiendo, en ese caso, disponer de tacones o zarpas. El espaldón se suele coronar con un parapeto y botaolas. Si el espaldón se apoya por debajo de la bajamar, el dique rompeolas se asemeja a un dique mixto con manto de protección. Hasta la fecha, es raro encontrar espaldones contruidos con paramento exterior inclinado, perforado, ranurado o con cámaras.

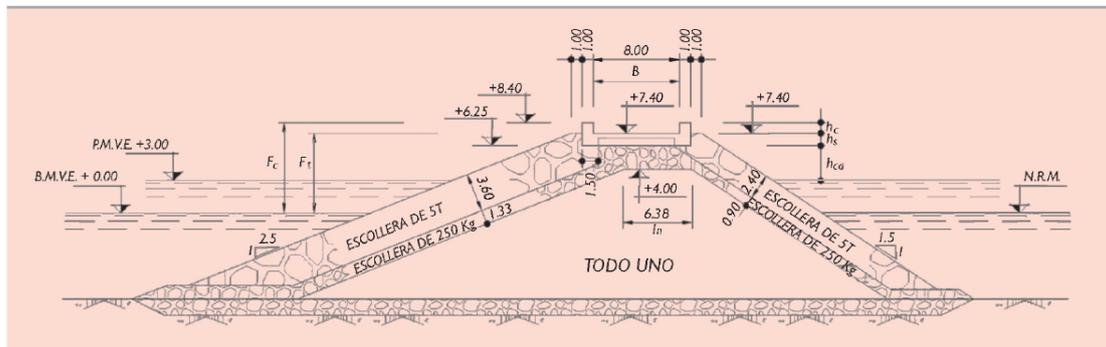


Figura 6.3: Dique en talud con camino de rodadura [tomada de la ROM 1.0].

En el caso de disponer de un espaldón, para que el dique sea “irrebasable” es recomendable que las cotas de coronación del manto principal y del espaldón medidas sobre el nivel del mar del cálculo, satisfagan las condiciones: $F_t \gtrsim 0,6H_*$ y $F_c \gtrsim 0,6H_*$, donde los francobordos F_t y F_c están

medidos en vertical con respecto al nivel del mar simultáneo y compatible con el estado de mar en el que se puede presentar la altura de ola H_* .

Las dimensiones de las diferentes partes de un dique en talud, en particular la extensión del manto principal y la cota de apoyo del espaldón, pueden variar en un amplio rango para que, satisfaciendo los requisitos de proyecto, se optimicen la disponibilidad de materiales y los medios constructivos y los costes económicos.

6.2. Dique en talud sin superestructura

Esta tipología no es habitual en diques principales pero sí en contradiques y espigones.

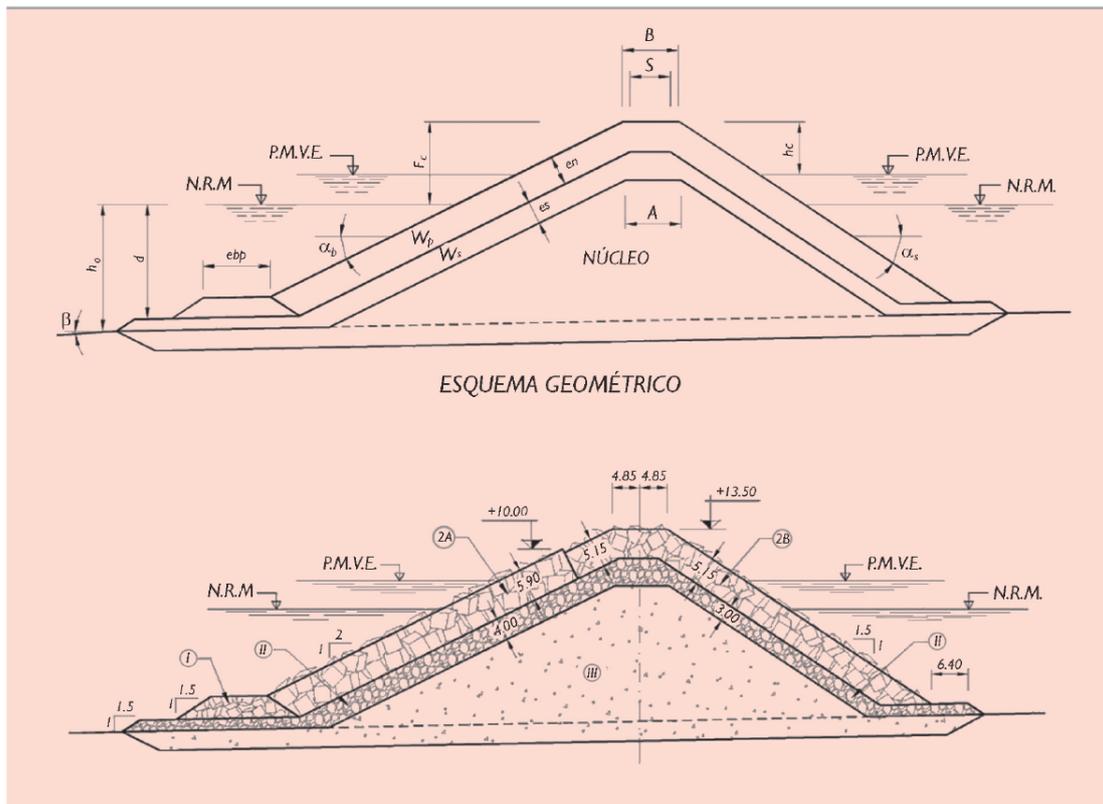


Figura 6.4: Dique en talud sin superestructura [tomada de la ROM 1.0].

Para que estos diques sean irrebasables es recomendable que la cota de coronación del manto principal satisfaga $F_t > 0,9 * H_*$, medida en vertical con respecto al nivel del mar simultáneo y compatible con el estado de mar en el que se puede presentar la altura de ola. En caso de que el dique sea rebasable, el flujo de energía transmitido a sotamar depende de los valores de los monomios F_t/H_* , H_*/h , H_*/L y B_c/L .

Esta tipología es la que habitualmente se emplea en la construcción de espigones perpendiculares a la costa para el control del transporte de sedimentos en la zona de rompientes en playas, o en las desembocaduras de los ríos, actuando también, en este caso, como espigones de encauzamiento, diques exentos para proteger de la acción del oleaje un tramo de costa, etc. En general, estos espigones no llevan superestructura; en algunas ocasiones se coloca una placa de hormigón para facilitar el acceso sobre ellos.

6.3. Procedimiento constructivo

Los diques rompeolas suelen llevar como piezas del manto principal cubos de hormigón. Estos cubos se fabrican en tierra, en plantas destinadas a tal efecto, donde se apilan y almacenan. Posteriormente son trasladadas al dique, generalmente por barco, para su puesta en obra mediante grúa. Es por ello que la grúa suele ser uno de los principales elementos limitantes en lo referente al procedimiento constructivo. La grúa debe tener una vía de rodadura de al menos 3-4m de anchura, lo cual no es siempre fácil y debe compaginarse con los ritmos de avance de la obra. Lo habitual es que las grúas sean de 1000-2000T.m, en caso de que hagan falta grúas de 3000-6000T.m es necesario ampliar la anchura necesaria a unos 7m.

Este tipo de diques se construyen desde tierra. Por ello, estas obras inicialmente suelen ser más baratas y tener una menor dependencia con las ventanas climáticas. El ritmo de avance de la obra es simultáneo en los diferentes tajos: (1) zanja o cajeadado, (2) todo uno, (3) bloques que protegen y (4) banquetta de enrase en coronación para cimentar el espaldón.

Pueden surgir problemas relacionados con los bloques: son necesarias grandes cantidades de hormigón, así como garantizar que el fraguado del hormigón es correcto (es necesario evitar que aparezcan fisuras donde puede crecer la vegetación y vida animal, con la consiguiente disminución de peso, rozamiento y estabilidad de las piezas).

La construcción del núcleo se suele hacer mediante vertidos, bien arrancando desde tierra o bien con barcazas y luego camiones una vez que ha emergido. Conforme avanza el núcleo se ponen los mantos, la coronación se puede cerrar con los propios mantos (dique sin superestructura) o se puede situar el espaldón. El espaldón es una estructura vertical (en general), rígida e impermeable que se construye para controlar el flujo de agua (rebase), proporcionar un camino de rodadura y durante una parte del proceso constructivo para abaratar costes.

Veamos otras consideraciones generales:

- Uno de los problemas principales surge, por tanto, de la unión del sistema granular, deformable y permeable constituido por núcleo y mantos, con el sistema rígido, no permeable y no deformable constituido por el espaldón. El problema sería entonces como el de un dique vertical, por lo que es necesario disponer una banquetta de enrase que garantice nuevamente una transmisión uniforme de cargas y un adecuado coeficiente de fricción.
- Los mantos no se deben apoyar directamente sobre el terreno cuando éste no tiene la calidad suficiente (p.ej. limos), en ese caso lo que se hace es disponer unos mantos sobre otros, de forma que los mantos superiores apoyen sobre los inferiores.
- Los mantos no se deben hacer de un espesor menor de 0.5m, de forma que se eviten deslizamientos no deseados.

Se caracteriza porque la parte central es una continuación de la cimentación y está formado por materiales granulares con una granulometría no uniforme que, en el ámbito marítimo, se conoce con el nombre de riprap. La geometría de la sección se asemeja a una “S tumbada” con la pendiente más suave alrededor del nivel medio del mar para provocar la rotura del oleaje.

7.1. Dique berma con núcleo y manto

El conjunto de la sección del dique, núcleo y mantos exteriores se construye con tamaños de piedra distribuidos según la misma curva granulométrica. El talud de la S es muy tendido al objeto de minimizar la desestabilización por la acción gravitatoria. El dique se puede deformar notablemente, experimentando las piezas alrededor del nivel medio grandes movimientos al igual que los granos de arena en un perfil de playa. Estos movimientos afectan su durabilidad. Su construcción requiere grandes cantidades de material.

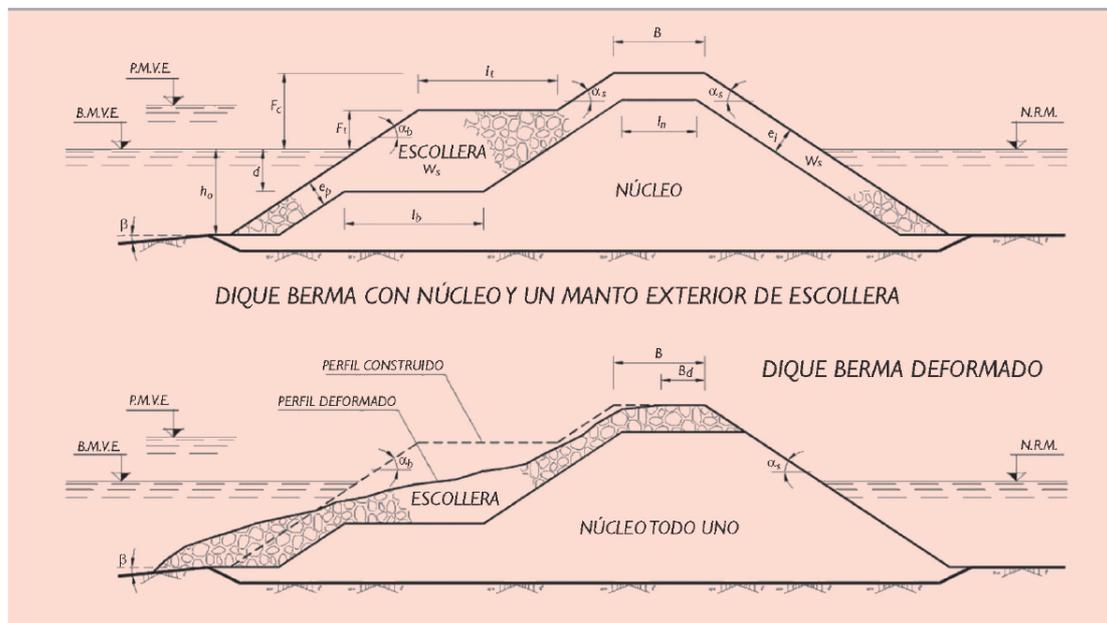


Figura 7.1: Dique berma construido y deformado [tomada de la ROM 1.0].

7.2. Dique berma con núcleo y varios mantos

En la figura 7.2 se representa un dique berma con un manto principal de escollera con tamaños seleccionados que satisfacen una determinada curva granulométrica tal y como se construye. Estos

tamaños deben satisfacer la condición filtro para todos los tamaños de las capas adyacentes. Su movilidad frente a la acción del oleaje es más reducida que la de las piedras del dique sin mantos aunque, excedido un estado de mar umbral, pueden experimentar grandes movimientos que modifican sustancialmente la geometría del dique y la aparición de las piedras del núcleo. Estos movimientos afectan a la durabilidad de la piedra, y su construcción, al igual que el dique sin mantos, requiere grandes cantidades de piedras, aunque en menor proporción que aquél.

No es habitual en España construir estos tipos de dique berma debido a la cantidad de material que se requiere y el espacio que ocupa. Sin embargo, es habitual su utilización en diques provisionales en la fase de construcción abrigando cargaderos de mineral o creando “motas” de invernada.

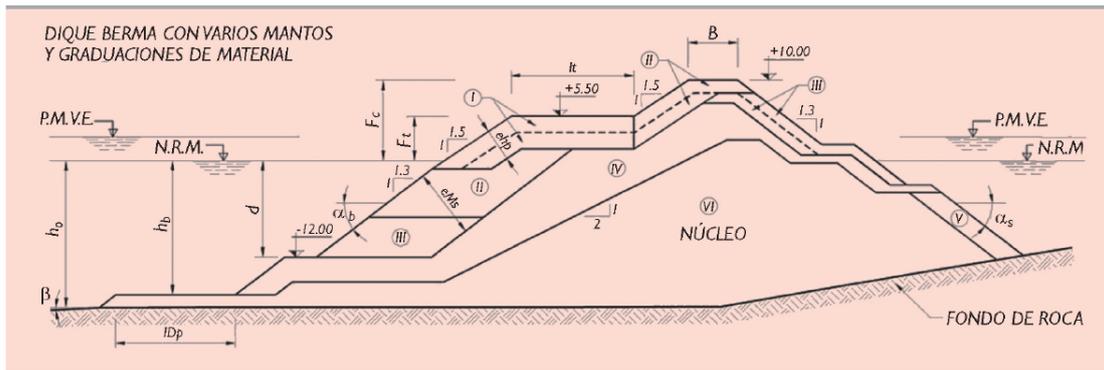


Figura 7.2: Dique berma con mantos de escollera [tomada de la ROM 1.0].

Capítulo 8

Dique sumergido

La cota de coronación de la superestructura permite definir si el dique es o no sumergido. Si ésta se encuentra por encima del nivel medio del mar de referencia se dice que el dique es emergido; en otro caso se denomina dique sumergido. En el primer caso la cota de la coronación se denomina francobordo, F_c ; en el dique sumergido la profundidad de agua sobre la cresta del dique se denomina profundidad de sumergimiento o de inmersión, identificada habitualmente por la letra d .

En diques cuya cota de coronación se encuentre próxima al nivel medio del mar puede cambiar el carácter de emergido o sumergido del dique dependiendo del nivel de marea meteorológica o astronómica que puede actuar.

Es habitual que los espigones construidos para contención lateral de arenas en playas y en desembocaduras tengan una parte emergida, en general sin superestructura, y otra sumergida que se prolonga hacia el mar, como se muestra en la siguiente figura.

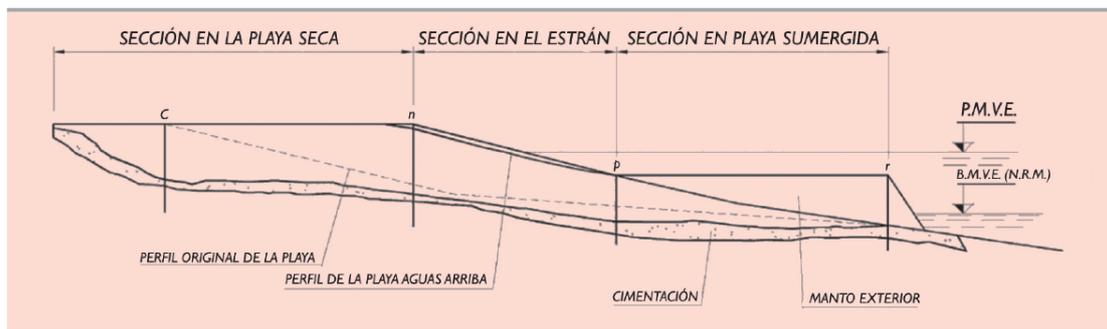


Figura 8.1: Dique de escollera: espigón de playa [tomada de la ROM 1.0].

8.1. Dique sumergido en talud

La geometría de la sección de estos diques es muy similar a la del dique emergido sin espaldón, puesto que a partir de un núcleo de todo uno de cantera se construye una secuencia de mantos hasta alcanzar el manto exterior o principal, el cual se debe prolongar por la coronación y, dependiendo de su anchura, extenderse por el manto de sotamar.

En la figura 8.2 se representa el alzado de un dique en talud sumergido. Algunas veces, el dique solo tiene núcleo y manto principal e incluso se construye con un único material. En general, esta sección se construye sin superestructura y sólo consta de cimentación y cuerpo central y las características de la cimentación dependen de la naturaleza del fondo. Excepto en el caso de fondo rocoso, para garantizar la estabilidad y la posición del dique es necesario construir y proteger adecuadamente la cimentación y el perímetro del dique.

La transmisión de energía en diques sumergidos se produce por el paso de las olas por encima de la coronación del dique y a través de su cuerpo granular. Ésta última puede ser pequeña siempre que se construyan las capas de filtro necesarias.

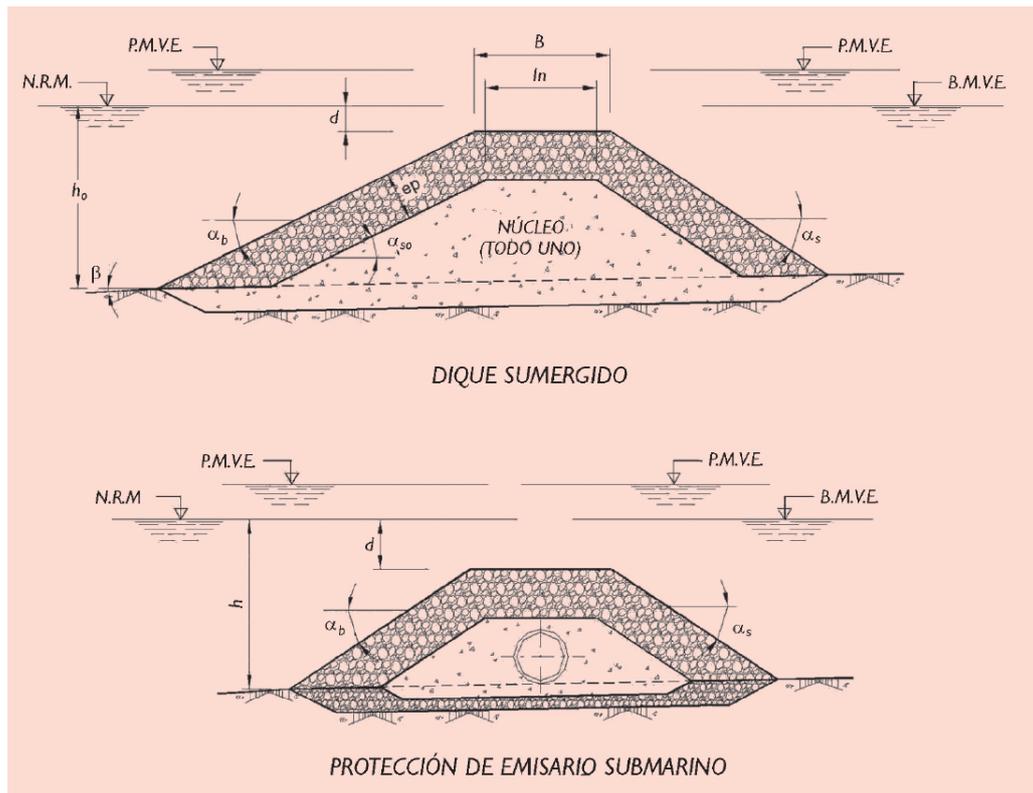


Figura 8.2: Dique sumergido en talud [tomada de la ROM 1.0].

En algunas ocasiones, por facilidad constructiva, el dique sumergido se construye con elementos prefabricados, por ejemplo piezas de hormigón en masa, perforadas o no, con forma cúbica, triangular, trapezoidal, etc. En otras, el dique se construye imitando la forma de un arrecife con la finalidad de provocar la rotura de las olas más altas y disipar su energía, permitiendo el paso de olas de menor contenido energético.

Capítulo 9

Dique flotante

La sección tipo de un dique flotante (figura 9.1), suele estar formada por un cuerpo central flotante habitualmente paralelepípedo de altura h_f y anchura B_c . La profundidad de flotación d y el francobordo F_c dependen del estado de carga del flotador, satisfaciendo la relación que $h_f = d + F_c$.

La fijación del cuerpo central se puede obtener mediante cadenas ancladas al fondo y a muertos de hormigón en masa o a otras estructuras fijas, o arriostradas a pilotes hincados en el fondo mediante elementos que, en este caso, facilitan el deslizamiento vertical a lo largo de ellos, pero que impiden los desplazamientos horizontales y los giros del flotador. No suele ser habitual construir una superestructura, aunque en algunas ocasiones es posible disponer un botaolas sobre el cuerpo central. En general, éste suele construirse de fibra de vidrio impermeable y estanca. No obstante, dependiendo de la importancia de la zona a resguardar se pueden construir diques flotantes con muy diversos elementos, p.ej. tubos, neumáticos, cajones de acero o de hormigón armado y pretensado, etc.

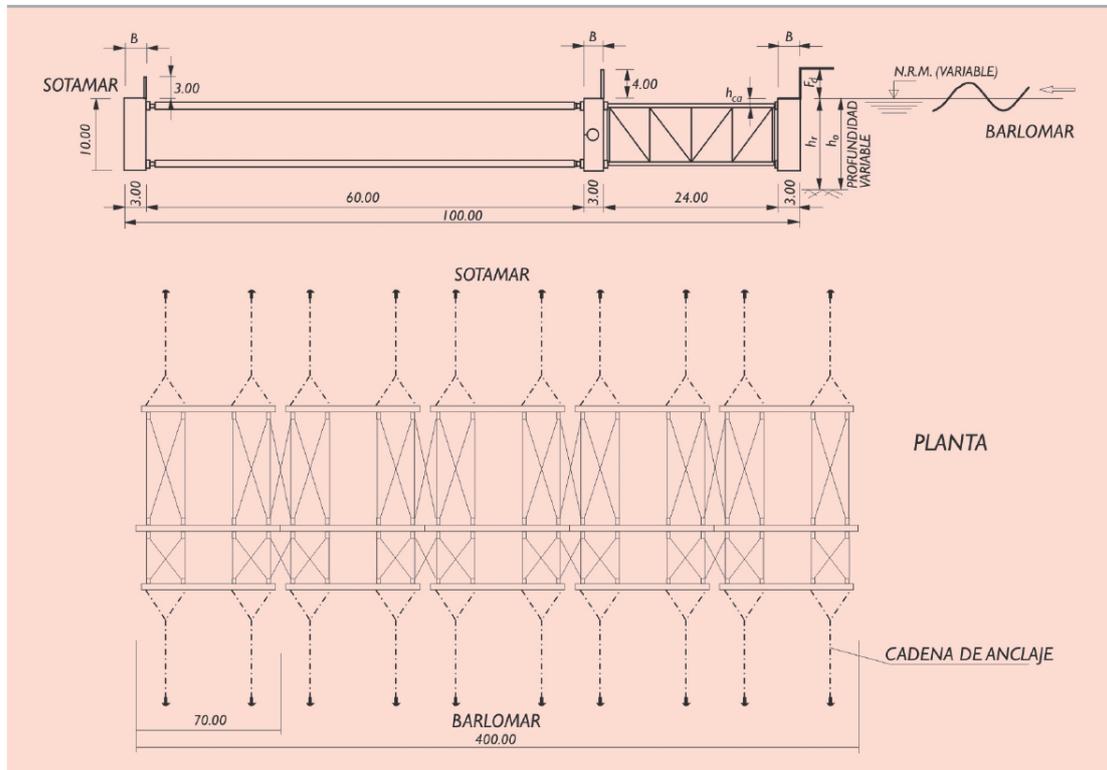


Figura 9.1: Dique flotante [tomada de la ROM 1.0].

En general la principal aplicación de estos diques es el control de olas de pequeña altura y periodo corto que no rompan. En general, los diques flotantes son muy poco eficaces para el control

de oleaje de periodo largo. No obstante, en la actualidad se han realizado algunas experiencias de obras de abrigo flotantes frente a estados de oleaje importantes, utilizando cajones de acero o de hormigón armado y pretensado como una solución en emplazamientos con condicionantes morfológicos o ambientales exigentes (figura 9.2).

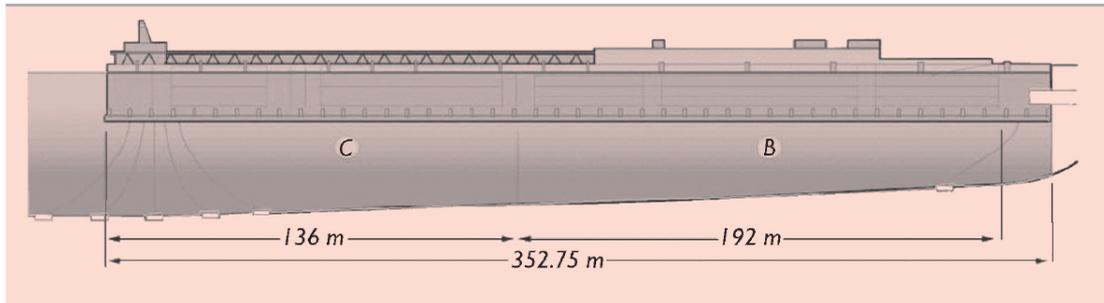


Figura 9.2: Dique flotante de grandes dimensiones (Monte Carlo, Mónaco) [tomada de la ROM 1.0].

Diques de sección delgada y sistemas múltiples

Cuando el oleaje no es importante (altura de ola inferiores a los 2m y periodos inferiores a los 7s) y no hay rotura de la ola tal y como ocurre en el interior de dársenas, rías, estuarios y en mares confinados, se puede crear un área abrigada disponiendo diques de sección delgada, formados por pantallas de hormigón armado o de elementos prefabricados sujetos a pilotes, bloques de hormigón, etc. (figura 10.1).

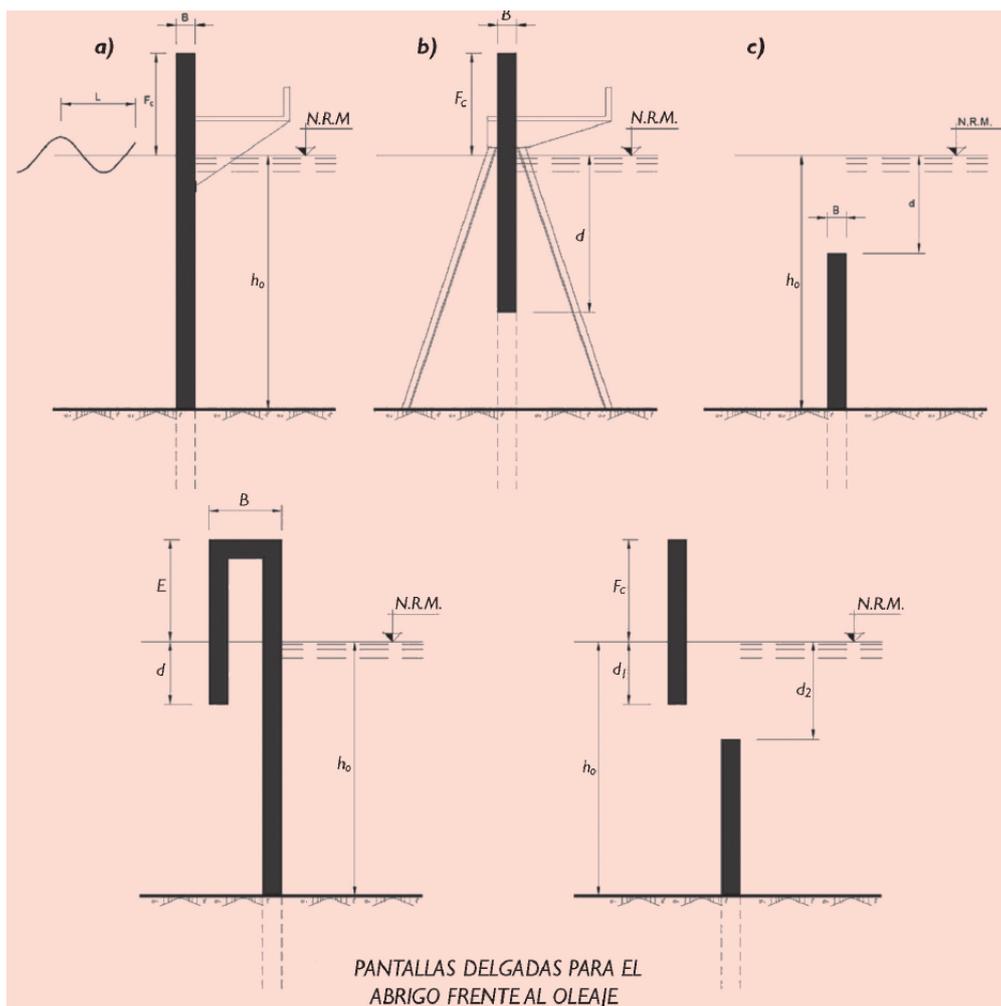


Figura 10.1: Dique de pantallas delgadas [tomada de la ROM 1.0].

Dependiendo de las características del oleaje a proteger, se puede sumergir la pantalla hasta una profundidad d , dotarle de ranuras, o que se extienda desde el fondo hasta una profundidad d sin emerger. En general, si no hay ranuras, la disipación es despreciable y la ecuación de conservación de la energía permite relacionar los coeficientes de reflexión y transmisión.

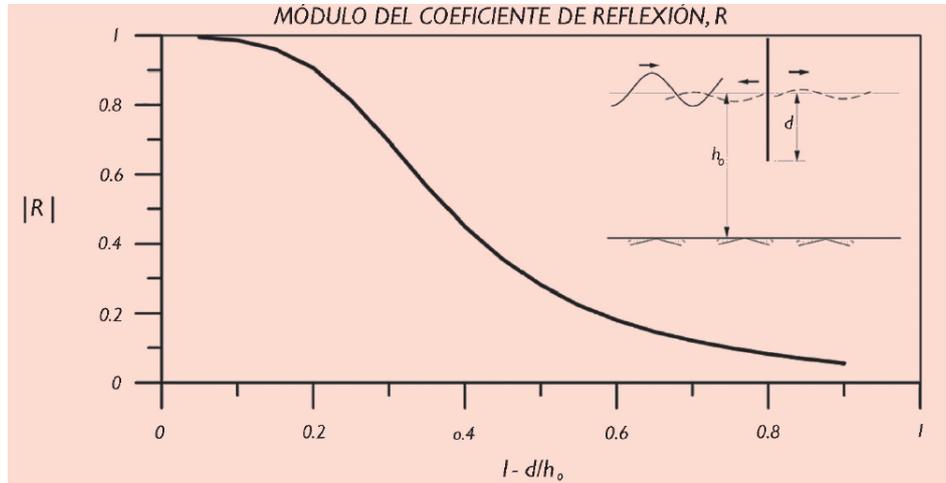


Figura 10.2: Coeficientes de reflexión de una pantalla delgada [tomada de la ROM 1.0].

En la ROM 1.0 aparecen otras disposiciones cuya descripción puede ser consultada por el alumno si le interesa.

Criterios para la selección de la tipología

Para seleccionar la tipología del dique de abrigo más adecuada a cada tramo se recomienda tener en cuenta los siguientes factores de adecuación de la tipología frente a:

- los agentes del medio físico, del terreno, de uso y explotación, de los materiales y de los métodos y procedimientos constructivos.
- los requerimientos de uso y explotación y a los condicionantes morfológicos, medioambientales, constructivos y de los materiales de mantenimiento, reparación y desmantelamiento existentes localmente.
- la morfodinámica litoral, la calidad de las aguas y el entorno ambiental.

En general, deberá optarse por la tipología más económica de entre las posibles que satisfagan los dos primeros criterios, siempre que se cumplan las exigencias ambientales establecidas en el tercero. Para dicha valoración económica deberán considerarse tanto la inversión inicial y los costes, en su caso, de los trabajos de mantenimiento y de reparación, como los efectos de los mismos en la operativa portuaria. Debido a las severas condiciones ambientales y climáticas en las que se encuentran los diques de abrigo, en general, suele ser mucho más económico adoptar tipologías estructurales robustas, simples y durables, que exijan el mínimo mantenimiento durante su vida útil y tengan fáciles procesos constructivos y, en su caso, de reparación.

11.1. Comportamiento frente a los agentes climáticos marítimos

El comportamiento del dique frente a los agentes climáticos marítimos depende de su geometría y de la disposición de sus partes y elementos relativas a las características del oleaje, en particular el oleaje a pié de dique y en presencia de él, (es decir, teniendo en cuenta su mutua interacción, y si rompe, o no) y la profundidad de agua h . Obviamente, hasta que no se calculen los regímenes de los agentes climáticos en el emplazamiento y no se dimensionen la planta y alzado del dique, no se puede determinar aquel.

Tipología dique	Oleaje en presencia del dique	Profundidad (m)
En talud	Todos	$0 \leq h_s < 35 - 45$
Vertical	No rotura	$15 \leq h_s < 40 - 50$
Mixto	No rotura	$20 \leq h_s < 60 - 80$
Berma	Todos	$0 \leq h_s < 35 - 40$
Sumergido	Todos	Todas
Flotante y pantallas	Pequeño, periodo corto, no rotura	Todas

Figura 11.1: Tipología conveniente en función de los agentes climáticos [tomada de la ROM 1.0].

11.2. Comportamiento del terreno

Un factor fundamental para la elección de la tipología es la adecuación del suelo marino para soportar los esfuerzos transmitidos por el dique y las oscilaciones del mar, es decir su: (1) compresibilidad, o capacidad de deformarse variando su volumen al aplicar cargas de compresión en su superficie, (2) resistencia al esfuerzo cortante o capacidad del suelo de resistirse al deslizamiento relativo entre partículas adyacentes cuando es sometido a un esfuerzo de corte y (3) la capacidad de las partículas de fondo para permanecer en él en presencia de la dinámica marina.

Roca y suelos granulares. Los fondos de roca, independientemente de su grado de deterioro, en general son aptos para recibir cualquier tipología de dique de abrigo. Los suelos y rellenos de materiales sueltos no cohesivos, arenas gruesas y gravas, son también aptos para recibir cualquier tipo de dique por poseer una alta permeabilidad, lo que les permite drenar el fluido intersticial con relativa facilidad cuando son sometidos a cargas cíclicas. Aun así, debe tenerse en cuenta el tiempo que necesita el suelo para expulsar el agua intersticial, en presencia de la obra, y que se puede crear un exceso de presión intersticial en el interior del suelo. Esta sobrepresión intersticial puede tener como consecuencia una variación en las tensiones efectivas del suelo. En suelos granulares flojos se deberá prestar especial atención a los efectos dinámicos asociados a los movimientos oscilatorios marinos por su posible licuefacción.

Suelos cohesivos blandos. La resistencia al corte de los suelos con abundancia de fracción fina y muy fina, debido a su baja permeabilidad y, en general, a la elevada compresibilidad, está muy influenciada por las condiciones de drenaje, la velocidad de aplicación de la acción y la historia tensional del suelo. En estos casos será necesario estudiar la acumulación y el exceso de presión intersticial en el interior del suelo, ya que puede provocar una disminución en el módulo de rigidez del mismo si se trata de una arcilla NC, o su aumento si se trata de una arcilla SC. Este tipo de suelos no es el más adecuado para recibir cargas concentradas y controlar los asentos.

Interacción suelo-dique. En cualquier caso se debe tener en cuenta que la presencia de la obra puede modificar las propiedades resistentes del suelo, así como los regímenes oscilatorios en el exterior e interior del mismo. Es conveniente evitar los diques verticales en suelos y rellenos cohesivos o de baja calidad, pues pueden producir una importante concentración de cargas y asentos diferenciales debido a la acción del oleaje, y requieren por ello una cimentación más resistente y menos deformable. Además, por su geometría y forma constructiva son impermeables al flujo, pudiendo modificar sustancialmente el patrón de drenaje del suelo y rellenos. Este efecto será más perjudicial cuanto menos permeable sea el terreno.

Banquetas y rellenos. En general, los diques de abrigo se construyen sobre una cimentación formada por banquetas y materiales de relleno de granulometría gruesa y alta permeabilidad, que facilita el reparto de cargas y la liberación de presiones intersticiales ofreciendo una buena resistencia al esfuerzo cortante y una baja deformabilidad. En el caso de fondos de roca, se podrá enrasar con hormigón sumergido. Cuanto más apto sea el suelo para cumplir esta función menores serán los espesores de la cimentación necesarios; si el suelo satisface los requisitos geotécnicos (ROM 0.5-05), excepto en condiciones de grandes profundidades, los espesores de las banquetas y los rellenos serán los estrictamente necesarios para homogeneizar y enrasar los apoyos y las cimentaciones.

Erosión superficial. La erosión del suelo superficial depende esencialmente de su composición y granulometría, y del régimen oscilatorio superficial y profundo. La presencia de la obra modifica sustancialmente este régimen, por lo que, en general, excepto en el caso de roca, es necesaria la protección del suelo frente a la erosión, independientemente de la tipología.

Tipo de suelo	Tipología
Roca	Todas
Granulares flojos	Algunas
Granulares duros	Todas
Cohesivos blandos o rellenos de baja calidad	Evitar diques verticales
rellenos homogéneos y permeables	Todas

Figura 11.2: Tipología más adecuada en función de las propiedades del terreno [tomada de la ROM 1.0].

11.3. Idoneidad frente a los condicionantes de los materiales y los procesos constructivos

Materiales de préstamo. La falta de todo uno de cantera para el núcleo, de piedras para las escolleras de los mantos interiores y, en su caso, del principal, descarta, en la práctica la construcción de un dique del tipo granular, en talud o berma. Por el contrario, la existencia de ellos en las proximidades de la obra, prácticamente deciden su selección, excepto si las profundidades son muy grandes, $h > 40\text{--}50\text{m}$ o no hay medios constructivos adecuados.

Cajones prefabricados - dimensiones. Cuando por razones constructivas o ambientales los diques en talud son inadecuados, una solución conveniente puede ser el dique vertical construido con cajones prefabricados, transportados hasta el emplazamiento y fondeados en su ubicación, o dique mixto con cota de enrase del cajón tal que permita su fondeo. Las dimensiones de los cajones prefabricados han crecido considerablemente en los últimos años. En la actualidad se está trabajando con dimensiones máximas de cajón del orden de 60m de eslora, 40m de manga y 35m de puntal en transporte. Para fondear estos cajones es necesario que no se superen ciertos valores umbral de los agentes climáticos, marinos y atmosféricos, los cuales dependen de las dimensiones del cajón, del confinamiento de las aguas y, sobre todo, de los medios utilizados para el control y el desarrollo de la operación, por lo que su uso puede incidir en los plazos de construcción en función de las ventanas climáticas disponibles a lo largo del año. Los valores umbral dependen de las dimensiones y del desplazamiento del cajón.

Capacidad y dimensiones de la grúa. Las dimensiones de las piezas y su disposición en el manto principal, berma y morro son condicionantes también de la tipología, pues definen las dimensiones de la grúa, su capacidad de izada y brazo. Estas dimensiones condicionan a su vez la anchura de avance en la coronación del dique para poder proceder al suministro y la colocación de las piezas, sin perjuicio del resto de las unidades de obras. En España es habitual disponer de grúas hasta 4000 t·m y suele ser necesario contratar o construir grúas especiales cuando se requiere un tamaño mayor, p.ej. 7000 t·m. En la actualidad, la capacidad de izada y lanzamiento supera las 10000 t·m.

Paradas forzosas y esperas constructivas. Finalmente, en la construcción de cualquier obra marítima es necesario tener en cuenta la necesidad de paradas “técnicas” en las que la sección no está finalizada pero se puede ver sometida a la acción de los agentes climáticos, para la cual no está preparada. Estas esperas pueden ser previstas, p.ej paradas invernales, o imprevistas, p.ej. por la presentación de un temporal. Dada la información meteorológica disponible estas últimas hacen referencia a que el contratista tiene un tiempo pequeño de respuesta. En ambos casos es necesario preparar la obra con un refuerzo provisional para resistir la acción marina sin daños relevantes o con daños acotados. Algunas tipologías son más aptas para realizar estas acciones preventivas que otras. En general, la protección temporal de un dique granular es fácil, con bajo coste y de recuperación rápida. Por el contrario, los diques vertical y mixto,

especialmente éste, no tienen una protección sencilla, tanto del cuerpo central como de la cimentación.

La protección prevista es a todos los efectos un morro provisional cuyo comportamiento hidrodinámico es análogo al de un morro definitivo. En consecuencia, aunque sea provisional, se recomienda que para su dimensionamiento y construcción se consideren el apartado específico de morros del capítulo de diques en talud.

Antes de iniciar la obra se deben especificar los estados de oleaje umbrales para los cuales no es recomendable continuar con la construcción, en función de los medios constructivos, la disponibilidad de materiales, el estado de la obra y de los elementos y partes a proteger.

Tipología	Vol. Préstamo	Medios constructivos	Adaptabilidad
En talud	Muy grande	Carga, vertido; grúa importante	Posible
Vertical	Pequeño	Fondeo cajón y vertido	Difícil
Mixto	Grande	Carga, vertido; grúa y fondeo	Muy difícil
Berma	Muy grande	Vertido y grúa	Posible
Sumergido	Según objetivo	Vertido	Posible
Flotante	Nulo	Flotantes e hinca	Posible
Pantallas	Nulo	Flotantes e hinca	Posible

Figura 11.3: Tipología más adecuada en función del volumen del material y los procedimientos constructivos [tomada de la ROM 1.0].

11.4. Idoneidad frente a los requerimientos climáticos durante el uso y explotación

En este apartado se analiza la idoneidad de la obra para controlar el flujo de energía incidente y sus implicaciones durante el uso y explotación del área portuaria.

El reparto del flujo de energía incidente del oleaje en flujos reflejado, transmitido y disipado puede ser indicativo de la influencia que una u otra tipología puede tener en el uso y la explotación. En general, la solución ideal es que el flujo incidente sea totalmente disipado por el dique. Esta situación no se alcanza con ninguna de las tipologías actuales de diques de abrigo. En general, cuanto menor sea la energía disipada y mayores sean los flujos de energía reflejada y transmitida, mayores pueden ser las interferencias de las oscilaciones del mar con el uso y la explotación, bien a barlomar en canales de acceso y bocanas haciendo más complicada la navegación, bien aumentando la agitación en el interior del puerto por rebase o por transmisión a través del dique.

El dique vertical, excepto por rebase es que el menos energía transmite a través del cuerpo central y es el que más energía refleja. Los diques en talud y berma son los que menos energía reflejan y los que más disipan, transmitiendo en general poca energía excepto por rebase. El dique mixto tiene un comportamiento intermedio entre los diques granulares y el vertical. La funcionalidad del dique flotante depende de su calado relativo con respecto a la longitud de onda. Si éste es el adecuado la mayor parte de la energía incidente es reflejada; por el contrario si el calado es insuficiente la mayor parte de la energía es transmitido a sotamar.

Tramo de la obra. Es importante tener en cuenta la función principal de cada uno de los tramos de obra y la repercusión que en dicha función tienen los mecanismos predominantes de interacción de la obra y las oscilaciones del mar. A este respecto, debe ser objeto de especial consideración la influencia en el acceso al área abrigada de la energía radiada desde los cambios de alineación y la bocana y los flujos de energía reflejada desde las diferentes alineaciones de la obra.

Tipología	Partición de la energía
En talud	Disipación y reflexión
Vertical	Reflexión
Mixto	Disipación y reflexión
Berma	Disipación
Sumergido	Disipación, reflexión y transmisión
Flotante	Reflexión y transmisión
Pantallas	Reflexión y transmisión

Figura 11.4: Tipología más adecuada en función de los requerimientos climáticos en el uso y explotación [tomada de la ROM 1.0].

11.5. Idoneidad frente a los requerimientos de conservación, reparación y desmantelamiento

Durante la fase de selección de la tipología del dique de abrigo es importante analizar los costes de conservación necesarios para asegurar la durabilidad de la obra a lo largo de su vida útil, los costes de reparación considerando en el proyecto la posibilidad de que se produzca un cierto nivel de daños reparables en la fase de servicio, y finalmente los costes de desmantelamiento y restauración del litoral.

Conservación. La posibilidad y el coste de conservación están relacionados con el número de elementos que forman cada una de las partes del dique, ya que el número de posibles modos de fallo y de transiciones entre elementos y partes (zonas débiles) depende de aquel número. El dique vertical es el que menos elementos puede tener, mientras que los diques en talud con espaldón y mixto son los que tienen más elementos y transiciones entre ellos.

Reparación. La posibilidad de reparación depende de la importancia del modo de fallo en la estabilidad global de la obra, de la posible correlación (concatenación, inducción o colapso progresivo) entre modos de fallo, del tiempo de reparación y de las condiciones de operatividad una vez ocurrido el fallo.

En general, los diques granulares, en talud y berma ofrecen una mayor resistencia a la destrucción aunque la reparación del modo de fallo principal, extracción de piezas del talud, suele ser lenta y requiere los mismos medios constructivos utilizados en la construcción por lo que suele ser costosa. Sin embargo, en general, la operatividad del área portuaria o litoral no suele quedar muy afectada. Por otra parte, los modos de fallo vuelco o deslizamiento completo del dique vertical tienen serias dificultades para su reparación y en general debe procederse a su desmantelamiento para reconstruir la sección. En estas condiciones es probable que se reduzca significativamente la operatividad del área.

Desmantelamiento. Desmantelamiento. No es práctica habitual el desmantelamiento de grandes diques de abrigo, por lo que la experiencia es escasa y de difícil evaluación. En particular, el desmantelamiento de los diques granulares es complicado por la cantidad de material que los forman, y la mayoría de las veces difícil por la precariedad durante su realización. La secuencia de los trabajos durante el desmantelamiento de las diferentes partes desempeña un papel esencial en la seguridad de la obra. A priori parece que la reflotamiento de un cajón, una vez liberado de la losa superior y el vaciado de las celdas, es una tarea viable.

Tipología	Conservación	Reparación	Interacción	Desmantelamiento
En talud	Factible	Lenta, cara	Alta	Complicado, difícil
Vertical	Compleja	Rápida, cara	Baja	Sencillo
Mixto	Compleja	Lenta, cara	Baja/Media	Complicado, difícil
Berma	Sencilla	Lenta	Alta	Complicado
Sumergido	Sencilla	Rápida	Baja	Sencillo
Flotante	Sencilla	Rápida	Alta	Muy sencillo
Pantallas	Sencilla	Rápida	Alta	Sencillo

Figura 11.5: Tipología más adecuada en función de la conservación, la reparación y el desmantelamiento [tomada de la ROM 1.0].

11.6. Idoneidad frente a los requerimientos ambientales

La construcción de un dique de abrigo puede provocar alteraciones significativas del entorno terrestre y marítimo relacionadas con la apertura y explotación de canteras, el transporte y vertido de materiales de construcción, o con la remoción y vertido de productos de dragado pudiendo, en su caso, condicionar la selección de tipologías que necesiten grandes volúmenes de materiales de préstamo o realizar grandes volúmenes de dragado hasta alcanzar niveles de cimentación competentes. El dique vertical, salvo cuando requieren importantes volúmenes de dragado o sustitución, es una de las tipologías que tiene un menor impacto ambiental. En general, los diques flotantes producen un impacto ambiental pequeño; no obstante se debe analizar su efecto en la morfodinámica litoral que, en algunas ocasiones, puede llegar a ser significativo.

Por otra parte, la construcción de un área portuaria o litoral interacciona con el litoral modificando los procesos morfodinámicos y la calidad de las aguas litorales. La magnitud de la modificación depende principalmente de la forma en planta del área y del grado de abrigo frente al oleaje.

Alteración del sistema circulatorio. La forma en planta modifica el patrón de las corrientes mareales y oceánicas y las características del oleaje, principalmente, altura y dirección. La consecuencia es que, al alterar su principal mecanismo generador, se modifican sustancialmente los sistemas circulatorios del litoral.

Alteración del transporte de sedimentos y sustancias. Si bien el oleaje es el principal mecanismo movilizador del sedimento del fondo, no tiene por qué ser el principal mecanismo de transporte de sedimentos y sustancias que, en el medio marino, se debe principalmente al sistema circulatorio. Un área abrigada genera amplias zonas de intensificación y amortiguamiento de la dinámica marina, y, en consecuencia, altera sustancialmente los procesos de erosión, transporte y depósito de sedimentos y sustancias. En general, todas las tipologías producen efectos parecidos, aunque las más reflejantes intensifican y difunden más ampliamente este efecto con respecto a las más disipativas. En los suelos de arena se pueden producir barras paralelas a la línea de crestas que se propagan radialmente al morro del dique formando lentejones de arena; este efecto es tanto más relevante cuanto mayor es la reflexión del oleaje en el dique.

Efectos de la porosidad de las partes de la obra. La porosidad de algunas partes de las diferentes tipologías puede dar lugar a algunas diferencias relevantes. En concreto, los diques granulares pueden actuar como sumideros de arena, colmuntando los mantos y alterando significativamente la profundidad a pie de dique. Los diques verticales pueden actuar como barreras impermeables y, por tanto de retención de la arena, produciendo cambios en la profundidad pero de más fácil dragado que los casos de los diques granulares.

Por otra parte, la porosidad tiene aspectos beneficiosos al aumentar la oxigenación de las aguas y ofrecer nichos ecológicos a multitud de especies.

Tipología	Volumen de materiales	Interacción con el entorno	Oxigenación agua nichos ecológicos
En talud	Grande	Significativa	Alta-muchos, diversos
Vertical	Pequeño	Significativa	Baja-pocos
Mixto	Intermedio	Significativa	Media-algunos
Berma	Máximo	Significativa	Alta-muchos
Sumergido	Según objetivo	Significativa	Alta
Flotante	Mínimo	Poco significativa	Baja-algunos
Pantallas	Mínimo	Significativa	Baja

Figura 11.6: Tipología más adecuada en función de los requerimientos ambientales [tomada de la ROM 1.0].