

ANEJO Nº8 – CÁLCULO PARA LAS OBRAS DE PROTECCIÓN

Índice

1.	Introducción.	177
2.	Diques exentos sumergidos.	178
2.1.	Parámetros de diseño de los diques.	178
2.1.1.	Orientación respecto a la orilla.	178
2.1.2.	Separación de la costa.	178
2.1.3.	Número, longitud y separación entre diques.	178
2.1.4.	Cota de coronación de los diques.	178
2.2.	Materiales y geometría de la sección transversal.	179
2.3.	Cálculo previo de los diques exentos.	179
2.4.	Altura de ola de cálculo (HCAL).	180
2.4.1.	Altura de ola significativa en aguas profundas (HS0).	180
2.4.2.	Altura de ola en condiciones de rotura (HB).	184
2.4.3.	Discusión de “HCAL”.	186
2.5.	Distribución en planta.	186
2.5.1.	Orientación.	187
2.5.2.	Distancia a la costa y calado.	188
2.5.3.	Número, longitud y separación.	189
2.6.	Transmisión del oleaje.	190
2.6.1.	Cota de coronación.	190
2.6.2.	Coeficiente de transmisión de altura de ola.	191
2.6.2.1.	Ensayos de Seeling (Cerc, 1980)	191
2.6.2.2.	Altura de ola transmitida.	191
2.7.	Material y geometría de la sección transversal.	192
2.8.	Análisis de estabilidad. Cálculo pesos de las escolleras.	193
2.8.1.	Evolución de la formulación.	193
2.8.2.	Estabilidad.	194
2.8.2.2.	Criterios de avería.	195
2.8.3.	Pesos de las piezas y espesores de las capas.	195
2.8.3.1.	Manto principal.	198
2.8.3.2.	Manto secundario.	199
2.8.3.3.	Núcleo.	200
2.8.3.4.	Berma de pie.	200
2.8.3.5.	Resumen.	201

2.8.4.	Anchura mínima de coronación.	201
2.8.4.1.	Justificación anchos adoptados.	202
2.8.5.	Bermas de refuerzo.	202
2.9.	Propagación del oleaje. Forma en planta de la playa.	203
2.9.1.	El fenómeno de la propagación de las olas.	203
2.9.2.	Hipótesis de partida.	203
2.9.3.	Refracción del oleaje.	204
2.9.4.	Predicción de la forma en planta de la playa.	205
2.9.5.	Difracción causada por los diques.	207
3.	Alimentación artificial.	208
3.1.	Perfil de playa. Anchos mínimos.	208
3.2.	Perfil de playa deseable.	209
3.2.1.	Playa seca.	209
3.2.2.	Playa sumergida y estrán.	210
3.2.3.	Cálculo Run-Up.	210
3.3.	Granulometría de la arena.	211
3.3.1.	D50 de la arena nativa.	211
3.3.2.	Arena de aportación.	211
3.3.3.	Aporte de arenas.	213
3.3.3.1.	Método de aportación.	213
3.3.3.2.	Cálculo de volúmenes.	213
4.	Espigón de control.	216
4.1.	Altura de ola de cálculo.	216
4.2.	Parámetros básicos del espigón.	216
4.3.	Materiales constituyentes y sección transversal.	217
4.4.	Análisis de estabilidad y cálculo del espigón.	217
4.5.	Resumen de Resultados.	219

1. Introducción.

En este anejo se realizarán los cálculos necesarios para que la solución propuesta en el anejo 7 de Estudio de Soluciones adquiera valores cuantitativos y pueda adquirir forma física.

Primero se procederá a realizar el dimensionamiento de los diques exentos. Para ello, se estudiará la altura de ola de cálculo, la disposición de los mismos en planta, los materiales a utilizar y su estudio mecánico.

Posteriormente se continuará con los temas relacionados con la alimentación artificial, las necesidades y condicionantes para hacer una regeneración efectiva. Veremos cómo quedará previsiblemente la playa, tanto en planta como en perfil. Asimismo, definiremos las características granulométricas del material de aporte.

2. Diques exentos sumergidos.

2.1. Parámetros de diseño de los diques.

La principal consideración sobre el diseño de los diques exentos sumergidos reside en la línea que adopte la costa.

2.1.1.Orientación respecto a la orilla.

Existen dos formas principales para orientar los diques exentos, la primera de ella indica que estos deben ser paralelos a la línea de costa. La segunda forma sería colocarlos de forma perpendicular a la dirección del oleaje medio anual.

Los temporales predominantes en la costa de Alicante son aquellos con olas procedentes principalmente del E y del ESE. Y por tanto los diques exentos formarían un ángulo de 46° con la línea de costa.

Por lo tanto tendremos que realizar un análisis de ambas opciones comentadas para determinar cuál es la más efectiva para reducir la energía del oleaje dañino sobre la playa.

2.1.2.Separación de la costa.

La separación de costa viene marcada por la profundidad a la que queramos colocar los diques. Como la costa de nuestro estudio tiene una pendiente media del 5%, a una distancia de 150 metros, tomando como referencia el eje de la carretera contigua a la playa, tenemos una profundidad considerable de aproximadamente -5 metros. Estos valores son de carácter medio ya que es imposible encontrar una homogeneidad absoluta. Aun así como puede verse en los perfiles topobatimétricos (Documento nº2 planos), a esa distancia la profundidad se mantiene relativamente constante. Además se ha pretendido no alejarlos demasiado de la costa, ya que esto se traduciría en un mayor coste de la ejecución.

Ya que la longitud recomendada para el baño de 200 metros y los diques exentos se van a construir a una distancia de unos 150 metros desde la línea de costa, habría que restringir dicha longitud para el baño a unos 140 metros aproximadamente.

2.1.3.Número, longitud y separación entre diques.

La longitud de los diques exentos es una variable de la que depende, en gran medida, el hecho de que éstos generen tómbolos o hemitómbolos. Se puede prevenir la formación de un tómbolo haciendo que la longitud de la obra sea menor que la distancia a la orilla.

Se decide construir los diques exentos con una longitud para cada uno de 100 metros y una separación entre ellos de 150 metros.

Para la protección de la playa de Serragrossa se construirán 2 diques exentos que según los parámetros definidos en el párrafo anterior abarcarán una longitud de 350 metros, ligeramente inferior a la longitud de playa.

2.1.4.Cota de coronación de los diques.

Ya se razono en el anejo de estudio de soluciones la conveniencia de utilizar la solución de diques sumergidos. La cota de coronación puede situarse a distintas profundidades, incluso a nivel medio del mar (NMM). Se debe tener en cuenta que la cota de la base de estas construcciones será aproximadamente de -6 metros. Finalmente se decide situar la cota de coronación de los diques exentos a -0,5 metros. La altura de estas obras será, por lo tanto, de 5,5 metros.

La sección transversal que se va a adoptar y la ubicación de la cota de coronación de los diques a -0,5 metros se debería de analizar con más detalle a fin de obtener un coeficiente de transmisión de altura de ola que permita disminuir la energía del oleaje, y por lo tanto la capacidad de transporte de sedimentos, lo suficiente como para detener la erosión del litoral sin crear barreras locales distorsionadas.

2.2. Materiales y geometría de la sección transversal.

El material a emplear en la construcción de los diques son bloques de escollera, cuyas dimensiones y peso se determinará en el siguiente punto, y relleno todouno de cantera para la formación de los núcleos.

Se van a proyectar todos los diques exentos sumergidos con secciones transversales de geometría trapezoidal, puesto que la pendiente del fondo marino delante de la obra no es muy pronunciada y estas secciones se comportan mejor cuanto menor es la pendiente delante de ellas. Además, está comprobado el perfecto funcionamiento de este tipo de secciones frente a la acción del oleaje.

A continuación se exponen los parámetros para definir completamente la sección transversal de los diques exentos. Algunos de los valores ya han sido fijados en el punto anterior de diseño de los diques, y otro se determinarán posteriormente.

- El ancho en coronación será de 3 metros.
- Los dos extremos del dique (morros) estarán formados por un sector circular de 9 metros de diámetro.
- Los dos taludes, tanto el lado del mar como el de tierra tendrán el valor de 1 en horizontal por 1 en vertical (1/1).
- Se dispondrá un repiè (berma a ambos lados) de 1,8 metros de longitud y 1 metro de altura.
- La cota de coronación se mantendrá constante en todo el dique sumergido, y será de -0,5 metros (respecto al NMM).
- El calado de ubicación será de -6 metros.

Se puede acudir al plano de la sección transversal de los diques para tener una visión general de los resultados.

2.3. Cálculo previo de los diques exentos.

El objetivo de este punto es calcular por condiciones de estabilidad, los pesos de las piezas de escollera que forman los diques exentos. Para ello, se necesita conocer la altura de ola de cálculo. Además, el proceso de cálculo del peso de la escollera también permite estimar espesores de las distintas capas, ancho de coronación de los diques, etc. De esta forma se determinarán numéricamente algunos parámetros de la sección transversal.

2.4. Altura de ola de cálculo (H_{CAL}).

La altura de ola de cálculo, en la mayoría de los casos de defensa de costas está condicionada por la profundidad. Dependiendo de ella, las olas que afecten a las obras de protección de la playa de Serragrossa, serán las correspondientes al régimen de oleaje en su forma original o en rotura. Para saber qué caso nos aborda en este proyecto, se va a hallar la altura de ola significativa en aguas profundas (H_{S0}) y la altura de ola en condiciones de rotura (H_b).

El objetivo de este apartado es la determinación de la altura de ola de cálculo para el dimensionamiento de los diques exentos sumergidos. Se hace esta advertencia ya que en otro punto del anejo se obtendrá una altura de ola en rotura a utilizar en los estudios del perfil de la playa, entre los diques y la orilla. Esta última altura de ola no coincidirá con el valor de H_b obtenido en este apartado ya que las condiciones de cálculo son distintas.

2.4.1. Altura de ola significativa en aguas profundas (H_{S0}).

De toda la información disponible para el área VII, área donde se enmarca la zona de actuación de este proyecto en la ROM 0.3 – 91, en este punto se va a utilizar la que ofrecen los cuadros D (Regímenes Extremales Escalares) y E (Registros Instrumentales: Correlaciones, Altura de ola / Periodo en Temporales).

A través del cuadro D se podrá determinar el oleaje de proyecto para condiciones extremas, obteniéndose la altura de ola correspondiente al periodo de retorno asociado a la probabilidad de presentación o riesgo admisible durante la vida útil de la obra. La ecuación a manejar es la siguiente:

$$H_{S0} = \frac{K_{\alpha}}{K_R} * H_{S,R}$$

Siendo:

- H_{S0} la altura de ola significativa en aguas profundas asociada a un periodo de retorno, para una dirección determinada.
- $H_{S,R}$ la altura de ola significativa asociada a un periodo de retorno obtenida del régimen extremal escalar instrumental.
- K_{α} el coeficiente de reparto direccional para la dirección considerada.
- K_R el coeficiente de refracción en un punto de medida para la dirección considerada y el periodo establecido asociado a dicha altura.

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN TRANSPORTE, TERRITORIO Y URBANISMO.
PROYECTO DE ADECUACIÓN DE LA PLAYA DE SERRAGROSSA (ALICANTE)**

- Shoaling en un punto de medida (la costa de Alicante pertenece al Área VII, Boya de Alicante) para la dirección considerada, y el periodo establecido asociado a dicha altura de ola.

Coefficiente de reparto direccional K_d ALICANTE (ROM 0.3-91)					
ENE	E	ESE	SE	SSE	S
1.00	0.90	0.80	0.70	0.60	0.60

Tabla 1 Coeficiente de reparto direccional

Coefficiente de refracción K_R – SHOALING. ALICANTE (ROM 0.3-91)						
Dirección	Periodo Significante $T_{(s)}$					
	7	9	11	13	15	17
ENE	1.00	0.98	0.94	0.92	0.92	-
E	1.00	0.98	0.93	0.88	0.90	-
ESE	1.00	0.98	0.94	0.91	0.90	-
SE	1.00	0.98	0.93	0.84	0.79	-
SSE	1.00	0.97	0.90	0.85	0.81	-
S	1.00	0.97	0.90	0.80	0.80	-

Tabla 2 Coeficiente de refracción

A continuación se presentan, en forma de tabla, los resultados obtenidos al aplicar la formulación anterior, obteniendo así las alturas de ola de proyecto según el periodo de retorno y la dirección del oleaje.

RESULTADOS								
H_{50} (m)	T (años)	2	5	10	20	50	100	200
	$H_{S,R}$	3.1	3.6	4.0	4.3	4.9	5.2	5.7
	$T_{p,min}$	8.80	9.49	10.00	10.37	11.07	11.40	11.94
	$T_{p,max}$	11.09	11.95	12.6	13.06	13.95	14.37	15.04
	T_p	9	11	11	11	13	13	13
	ENE	3.16	3.83	4.26	4.57	5.33	5.65	6.20
	E	2.85	3.48	3.87	4.16	5.01	5.32	5.83
	ESE	2.53	3.06	3.40	3.66	4.31	4.57	5.01
	SE	2.21	2.71	3.01	3.24	4.08	4.33	4.75
	SSE	1.92	2.40	2.67	2.87	3.46	3.67	4.02
	S	1.92	2.40	2.67	2.87	3.68	3.90	4.28

Tabla 3 Alturas de ola de proyecto

Se van a seguir, ahora, las instrucciones de la ROM 0.2-90 “Acciones de Proyecto de Obras Marítimas y portuarias”, en la que se establecen las vidas útiles mínimas para obras e instalaciones de carácter definitivo, como son las que se proyectan para la protección de la playa de Serragrossa. El nivel de seguridad requerido en este tipo de obras es el NIVEL 1 (donde se incluyen las obras de defensa y regeneración de costas). Además, la infraestructura se considera de carácter general. Con todo esto, se obtiene una vida útil mínima para estas construcciones de $L=25$ años. Como vemos en el siguiente cuadro sacado de la ROM 0.2-90.

En la información de la ROM 0.2-90 referida a los “riesgos máximos admisibles para la determinación, a partir de los datos estadísticos, de los valores característicos de cargas variables para fase de servicio y condiciones extremas” hay que considerar para las obras de

Serragrossa una posibilidad de pérdidas de vidas humanas reducida y repercusión económica de inutilización de obra media. Con estas premisas, se obtiene un valor del riesgo admisible de iniciación de averías de $E = 0,3$. Nota: El riesgo se define como la probabilidad de fallo durante la vida útil de la obra.

**VIDAS ÚTILES MÍNIMAS PARA OBRAS O INSTALACIONES
DE CARÁCTER DEFINITIVO (en años)**

TIPO DE OBRA O INSTALACIÓN	NIVEL DE SEGURIDAD REQUERIDO		
	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
INFRAESTRUCTURA DE CARÁCTER GENERAL	25	50	100
DE CARÁCTER INDUSTRIAL ESPECÍFICO	15	25	50

Figura 2 Vidas útiles para obras

**RIESGOS MÁXIMOS ADMISIBLES PARA LA DETERMINACIÓN,
A PARTIR DE DATOS ESTADÍSTICOS, DE VALORES CARAC-
TERÍSTICOS DE CARGAS VARIABLES PARA FASE DE SERVI-
CIO Y CONDICIONES EXTREMAS**

a) RIESGO DE INICIACIÓN DE AVERÍAS

		POSIBILIDAD DE PÉRDIDAS HUMANAS	
		REDUCIDA	ESPERABLE
REPERCUSIÓN ECONÓMICA EN CASO DE INUTILIZACIÓN DE LA OBRA. Índice : $\frac{\text{Coste de pérdidas}}{\text{Inversión}}$	BAJA	0,50	0,30
	MEDIA	0,30	0,20
	ALTA	0,25	0,15

b) RIESGO DE DESTRUCCIÓN TOTAL

		POSIBILIDAD DE PÉRDIDAS HUMANAS	
		REDUCIDA	ESPERABLE
REPERCUSIÓN ECONÓMICA EN CASO DE INUTILIZACIÓN DE LA OBRA. Índice r : $\frac{\text{Coste de pérdidas}}{\text{Inversión}}$	BAJA	0,20	0,15
	MEDIA	0,15	0,10
	ALTA	0,10	0,05

Figura 1 Riesgos admisibles

A partir de los parámetros obtenidos, se puede calcular el periodo de retorno (T) a considerar para la obras de regeneración de la playa de Serragrossa.

$$E = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^{L_f}$$

Por tanto:

$$T \sim 71 \text{ años}$$

Adoptando este periodo de retorno (T = 71 años), se puede obtener de la tabla D de la ROM 0.3-91 un valor de $H_{S,B} = 5 \text{ m}$.

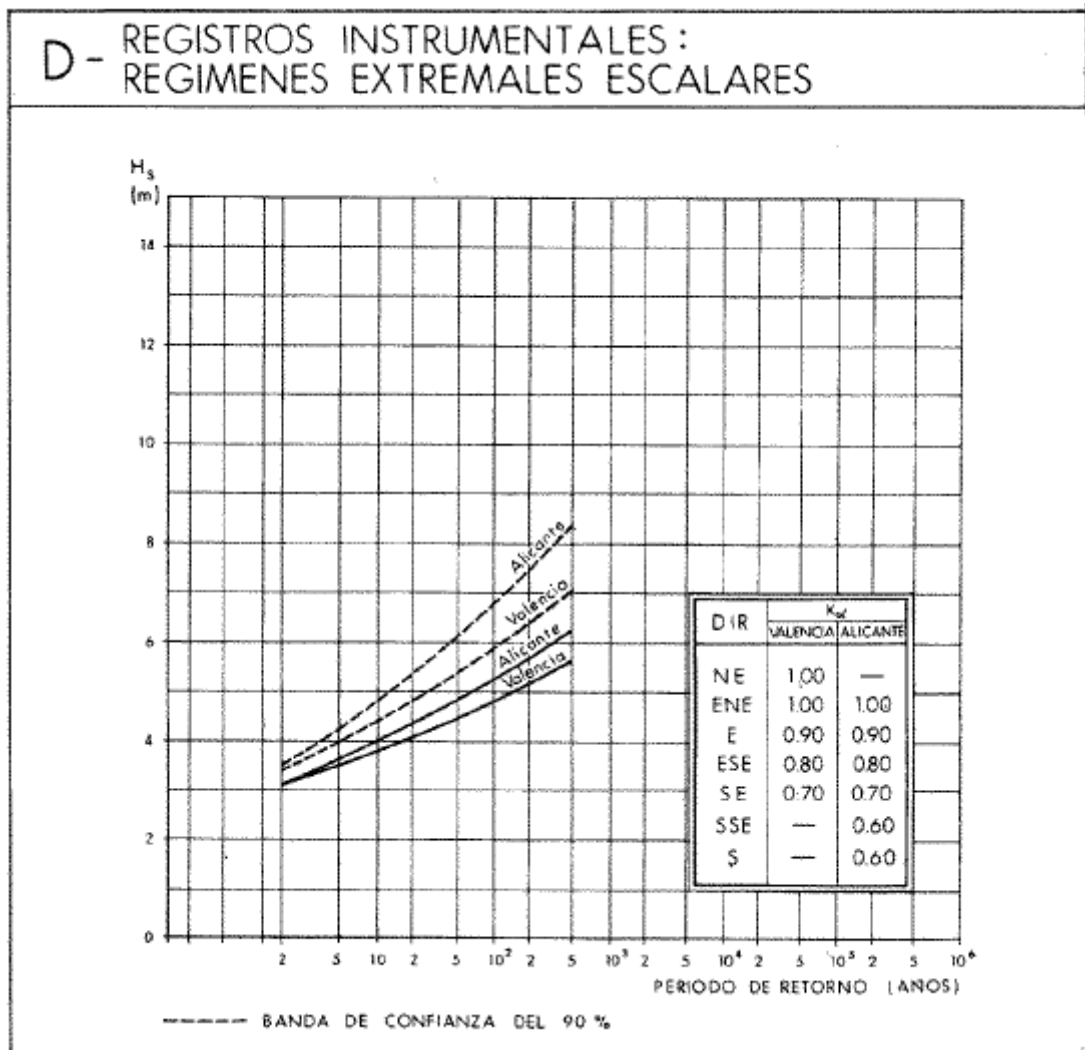


Figura 3 Regimenes extremales escalares

Con $H_{S,R}$ y con la fórmula:

$$H_{S0} = \frac{K_\alpha}{K_R} * H_{S,R}$$

Obtendremos la altura de ola significativa en profundidades indefinidas:

Dirección	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
H_{50} (m)	5,4	5,0	4,4	4,3	3,6	3,7

Figura 4 Altura ola significativa

Por consiguiente, se toma como altura de ola significativa en aguas profundas el valor $H_{50} = 5,4$ metros. Como se ha podido ver en la tabla, las olas más altas tienen dirección ENE y E.

Una vez definido H_{50} se procede a obtener la longitud y el periodo de esta ola de cálculo. Para ello, se utiliza la recomendación de la ROM 0.3-91, que para la zona correspondiente a Alicante establece:

$$T_p = (5 \sim 6.3) * \sqrt{H_{50}}$$

Tenemos dos valores de periodo T:

$$T = 11.6 \text{ s}$$

$$T = 14.6 \text{ s}$$

Así que tomaremos un valor medio entre ambos:

$$T = 13.1 \text{ s}$$

Por otro lado, el valor de longitud de onda se puede obtener a partir del periodo tal y como sigue:

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = 268 \text{ m}$$

2.4.2. Altura de ola en condiciones de rotura (HB).

La altura determinante para las obras costeras es frecuentemente la mayor ola rompiente que pueda llegar a la obra. En aguas poco profundas, la altura de la ola está limitada por su peralte, es decir, la relación entre la altura y la longitud de onda. En el caso de las obras de protección de la playa de Serragrossa, habrá que considerar la máxima altura de ola que pueda abordar la obra sin romper antes. En el punto en que la rotura se desencadena, la teoría de la onda solitaria prevé que:

$$\frac{H_b}{d_b} = 0.78$$

Donde:

- H_b es la altura de ola en condiciones de rotura (breaking)
- d_b es la altura de cálculo al pie de las estructuras, obtenida como suma de la profundidad real de éstas (d_s) y la sobreelevación considerada (s).

Este valor generalmente concuerda con lo que se observa en la naturaleza, sin embargo, pueden aparecer importantes diferencias con los resultados de esta fórmula general según la pendiente del fondo, la profundidad frente a la obra, la altura y el periodo de las olas incidente. Además, en la naturaleza se tienen oleajes irregulares, y no olas esquemáticas como las ondas solitarias, sobre todo cuando se trata de mar de viento.

Existen gráficas en las que se representan las curvas para obtener la relación H_b/d_b en función de la pendiente de la playa y del periodo del oleaje. La playa de Serragrossa tiene una pendiente aproximada de la superficie del fondo por delante de las estructuras entorno del 3,5% al 5,5%. Con este dato, y considerando un periodo de oleaje en torno a los 11 – 14 segundos, se acude a la siguiente gráfica:

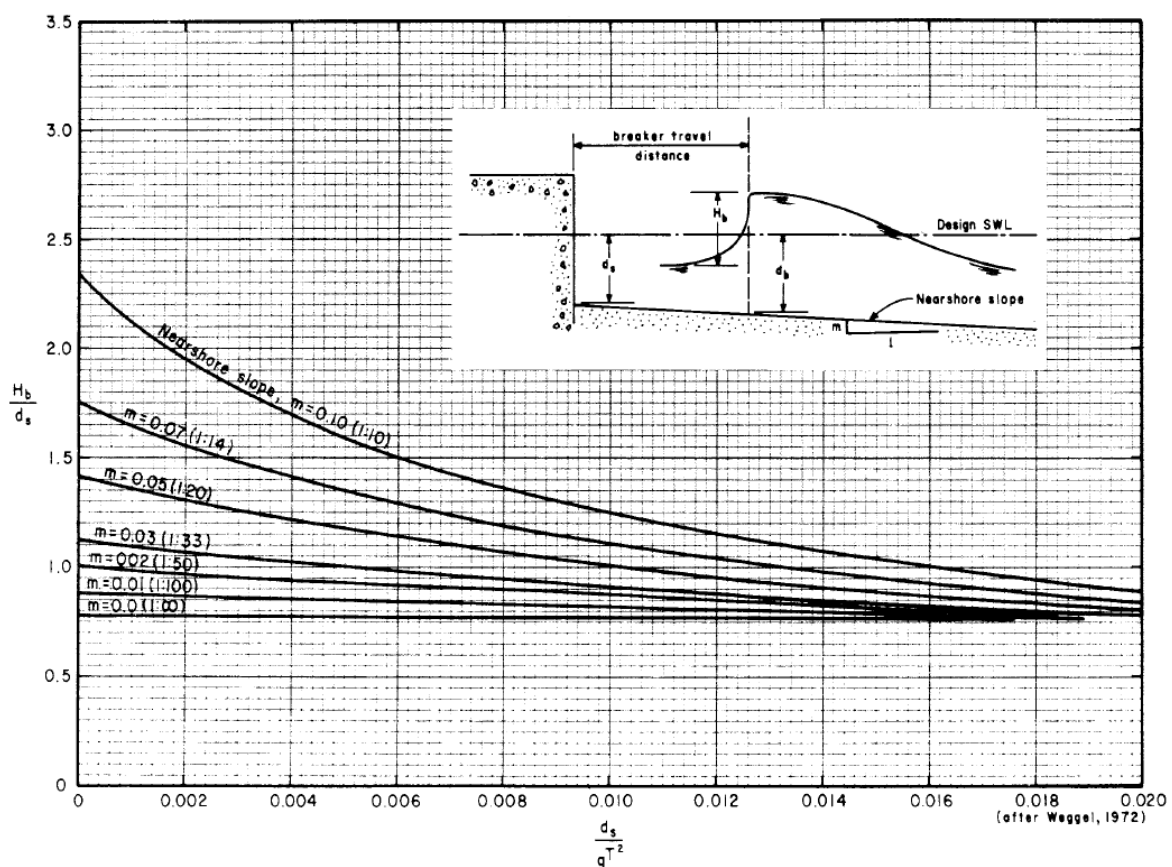


Figura 5 Gráfica de Weggel

Según la profundidad relativa a la relación Z_s/gT^2 y la pendiente del fondo (m); las curvas anteriores (Weggel) indican la rompiente máxima que puede llegar a una obra con una cierta profundidad de agua delante de ésta, Z_s (Z_s es $d_b = 6$ que se está tratando en este proyecto). Hay que notar que, en general, Z_s (profundidad frente a la obra) es menor que Z_b (profundidad de inicio de rotura) a causa de la pendiente de fondo frente a la obra. Entrando en la gráfica con los valores señalados se obtiene:

$$\frac{H_b}{d_s} = 1.25 \text{ metros}$$

La altura máxima de rompiente así determinada no toma en consideración las condiciones del entorno del lugar. Es posible que éstas impidan que se produzca tal altura.

Además, los resultados de las curvas a las que se ha hecho referencia han sido obtenidos, en su mayor parte, a través de ensayos de laboratorio sobre playas sin obstáculos. La influencia de las obras en la modificación del flujo en sus proximidades no ha sido tomada en consideración, y continua siendo objeto de investigación.

La altura de ola en rotura para el diseño de las obras de regeneración en la playa de Serragrossa se calcula a partir de las curvas de Weggel. Aplicando a estos valores la relación obtenida, se llega a:

$$H_b = 0.95 * d_s$$

$$H_b = 0.95 * 6 = 5.7 \text{ metros}$$

El valor de H_b siguiendo la teoría de onda solitaria cumple:

$$\frac{H_b}{d_b} = 0.78 \sim 0.8$$

Por lo que para nuestro dique exento situado a una profundidad de 6 metros, más una sobreelevación debida a la variación del nivel del mar de $\pm 1,0$ metros, nos quedaría un valor de altura de ola de rotura:

$$H_b = 0.8 * (6 + 1.0) = 5.6 \text{ metros}$$

Decidimos quedarnos con este valor que es más restrictivo que el anterior.

2.4.3. Discusión de "HCAL".

Al haber obtenido una altura de ola en rotura (H_b) de 5,6 metros, se tiene que todas las olas mayores a ese valor romperán antes de alcanzar las obras de protección.

Por otro lado, la altura de ola significativa $H_{1/3}$ del régimen de oleaje en Alicante, según los cálculos hechos en este mismo anejo a partir de la tabla VII de la ROM 0.3-91 es de $H_{50} = H_{1/3} = 5,4$ metros. Se sabe que durante la presentación de un temporal existen alturas de ola individuales que, en algunos casos, pueden llegar a ser del orden de $2 \cdot H_{1/3}$.

Surge así el problema de elegir el valor de la altura de ola de diseño que sirva para el análisis de la estructura. Para el caso de obras con vidas previsibles cortas como es el caso de este proyecto, el SPM (1.984) recomienda tomar $H_{1/10}$, siendo $H_{1/10} = 1,27 \cdot H_{1/3}$. Entonces, $H_{1/10} = 6,86$ metros (correspondiente a un periodo $T = 71$ años).

Como $H_b < H_{1/10}$ se tiene que la obras de protección de la playa de Serragrossa se encuentran en situación "Breaking", es decir, en condiciones de rotura de ola a pie del dique exento. Por lo tanto, la altura de ola de cálculo será:

$$H_{\text{cálculo}} = H_b = 5.6 \text{ metros}$$

2.5. Distribución en planta.

El principal aspecto sobre el diseño de diques exentos sumergidos gira alrededor de la forma que vaya a adoptar la línea de costa. En general estas actuaciones inducen la formación de tómbolos. Estos causan los mismos efectos erosivos aguas abajo que los espigones, y además, la existencia de varios tómbolos crea celdas de agua y arena poco renovables. En la playa de Serragrossa lo que se quiere generar son hemitómbolos que permiten un flujo y renovación del agua pero limiten la pérdida de arenas.

El objetivo de este proyecto es conseguir regenerar la playa de Serragrossa, posteriormente protegerla para evitar la regresión posible y además con el tiempo conseguir una playa seca de una anchura mínima de 55 metros, cumpliendo los estándares recomendados para playas urbanizadas. Partiendo de esta premisa y teniendo en cuenta la formación de hemitómbolos en las zonas abrigadas como consecuencia de la presencia de los diques exentos sumergidos, se tiene que los parámetros a determinar son:

- Orientación respecto de la orilla.
- Separación de la costa y calado de ubicación de los diques.
- Número, longitud y separación entre los diques exentos.

2.5.1.Orientación.

Como se ha visto en anejos anteriores, los cuales hacen referencia al estudio de régimen de oleaje, los temporales que se producen frente a las costas de Alicante suelen ser consecuencia de las perturbaciones atmosféricas ligadas al paso de los sistemas de bajas presiones del oeste. Se registran en mayor abundancia en otoño e invierno. Los más enérgicos se aprecian mayormente en otoño. Predominan los temporales con olas procedentes del ENE y E. Les sigue con una proporción menor los del ESE. Y por último y por ello menos habituales, están los temporales de SE, SSE y S.

Las recomendaciones sobre la orientación de los diques exentos indican que éstos se tienen que construir perpendiculares a la resultante del oleaje. No obstante, si se toma una dirección intermedia entre ENE y E como resultante del oleaje, una orientación de las obras en perpendicular formaría un ángulo de unos 24° con la línea de costa es decir, considerablemente inclinados respecto a una hipotética línea paralela a la costa.

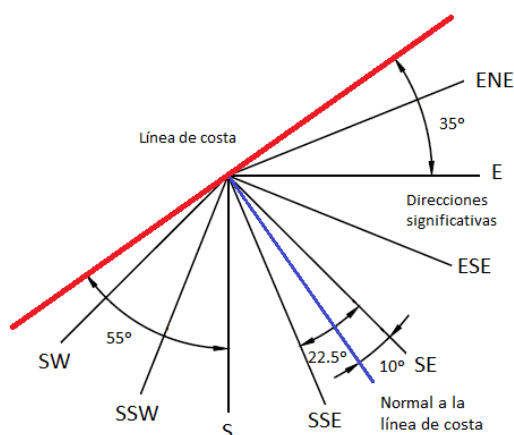


Figura 6 Direcciones significativas del oleaje

Además, no es del todo correcto que la incidencia de las olas sobre la alineación de diques lleve una oblicuidad de unos 24° , porqué al llegar a la zona de profundidades reducidas, la refracción modifica la dirección del oleaje. En el apartado de este mismo anejo en el que se analiza la propagación del oleaje se calcula el ángulo β entre las líneas de cresta de las olas y la alineación de los diques, obteniéndose que dicho ángulo es igual a 12° . Por lo tanto, la oblicuidad es aún menor.

Tenemos que considerar que el oleaje proveniente de la dirección ENE se ve prácticamente anulado por el cabo de la Huerta, así como también el oleaje de dirección E aunque en menor medida. Por tanto la resultante del oleaje a utilizar para determinar la orientación de los diques exentos será la dirección media entre E y ESE, formando la perpendicular con la línea de costa un ángulo de unos 46° , estando estos menos inclinados que con el ángulo considerado anteriormente.

La playa de Serragrossa es una playa abierta y en esta situación es muy indicada la orientación de los diques exentos en paralelo a la línea de costa. Además, se ha podido constatar que el verdadero ángulo de ataque de las olas sobre los diques no es el que se produce en aguas profundas (considerando el diseño para temporales del ENE-E), sino que es aún menor debido a la refracción del oleaje. Por ello, se decide construir los diques exentos sumergidos en una posición prácticamente paralela a la línea de costa.

2.5.2. Distancia a la costa y calado.

La distancia de los diques exentos sumergidos de la línea de costa, considerando la anchura de la playa seca de 50 metros, se fija en 150 metros. La decisión de tomar esta separación que es un valor medio se ha apoyado en las siguientes consideraciones:

1. Se ha querido alejar estas construcciones lo suficiente de la costa, para que la sobreelevación (ponding) que provocan al paso del oleaje sea mínima, de manera que el correspondiente balance hidráulico que originan las corrientes de retorno (rip currents) sea despreciable.
2. Por consideraciones de seguridad del usuario de la costa. Por un lado bañistas, disponiendo los diques a una distancia relativamente inaccesible debido a la profundidad existente en la zona. Por otro lado, permitiendo un calado suficiente para el tránsito con cierta normalidad de embarcaciones ligeras, cuya presencia en meses estivales es muy frecuente.

Además se ha de tener en cuenta el disponer de una profundidad constante para la ubicación de los diques. Se decide situar estos diques a un calado de -6 metros. Como puede observarse en los perfiles topobatimétricos, en la franja comprendida de los 150 metros de separación de la línea de costa se obtiene una profundidad relativamente constante de -6 metros de forma aproximadamente paralela a la línea de costa.

Hay que mencionar que la separación de 150 metros se ha estimado tomando de referencia una línea imaginaria que determina una playa seca de ancho igual a 50 metros. En los planos correspondientes (documento nº XX de este proyecto) se puede ver la distancia

desde el punto medio de los diques hasta la orilla estimada (espiral logarítmica evolucionada, no la real).

La alineación de los diques va a seguir de manera aproximada la batimétrica de -6 metros, aunque se admite que en ocasiones debido a irregularidades de fondo pueda llegar a los -6,5 metros.

2.5.3. Número, longitud y separación.

La longitud de los diques exentos es una variable fundamental pues de ella depende, en gran medida, que se generen tómbolos o hemitómbolos. Se puede prevenir la formación de un tómbolo haciendo que la longitud de la obra sea menor que la distancia a la orilla como recomienda el SPM.

En el apartado, de este mismo anejo en el que se estima la forma en planta de la playa ya regenerada, se consigue encajar la curva de espiral logarítmica a partir de los datos que se disponen, separación de la orilla igual a 150 metros, y ángulo de incidencia del oleaje sobre los diques, que se obtiene más adelante. Para lograr encajar la forma en planta de la playa dentro de los parámetros que se persiguen y así conseguir una anchura mínima de la playa seca, se ha recurrido a varias disposiciones de los diques. Finalmente, se ha concluido que la mejor opción es la de construir estos diques exentos con una longitud para cada uno de ellos de 100 metros y una separación entre ellos de 150 metros.

Toda la información y cálculos de la obtención de este resultado, así como la representación de la curva de espiral logarítmica utilizada para encajar la forma en planta de la playa se expone en este mismo anejo, en el apartado “Estudio de la propagación del oleaje. Forma en planta de la playa”.

La playa de Serragrossa a proteger mediante las obras descritas en este proyecto tiene una longitud aproximada de 600 metros. Todos los diques exentos sumergidos que se van a construir tienen la misma longitud, 100 metros y la misma separación, 150 metros. Entonces, para cubrir toda la longitud de la playa, será necesario construir un total de 2 diques.

La separación de 150 metros entre los diques exentos sumergidos deja la suficiente anchura para obviar los posibles accidentes de embarcaciones recreativas, además de permitir una mejor remoción de las aguas entre las obras y la costa. Por otro lado, la longitud de estas construcciones es menor que la separación entre éstos y la línea de costa. De esta manera, tal y como refleja el SPM, se evita la formación de tómbolos. Además, esta longitud es indicada para producir corrientes de retorno, que desaguan por estos “canales” sin alterar de forma apreciable el complicado proceso de hidrodinámica creado.

Al tratarse de una playa de aproximadamente 600 metros de longitud y presentar una deriva de transporte litoral en sentido Norte – Sur, aunque sin relevante importancia, se decide adoptar una disposición en planta en cuanto a su número que se podría llamar “total” ya que con las 2 unidades previstas la defensa completa de la zona tratada está asegurada. Si se quisiese “aligerar” esta solución reduciendo el número de unidades, existirían zonas de

playa no defendidas y, por lo tanto, ni la estabilidad de la playa ni la eficacia de las obras de protección estarían aseguradas.

2.6. Transmisión del oleaje.

Los diques exentos sumergidos suponen un obstáculo a la propagación del oleaje. Al disminuir bruscamente el calado, las olas rompen y se reflejan parcialmente, de manera que sólo pasa esta barrera artificial una parte de la energía del oleaje.

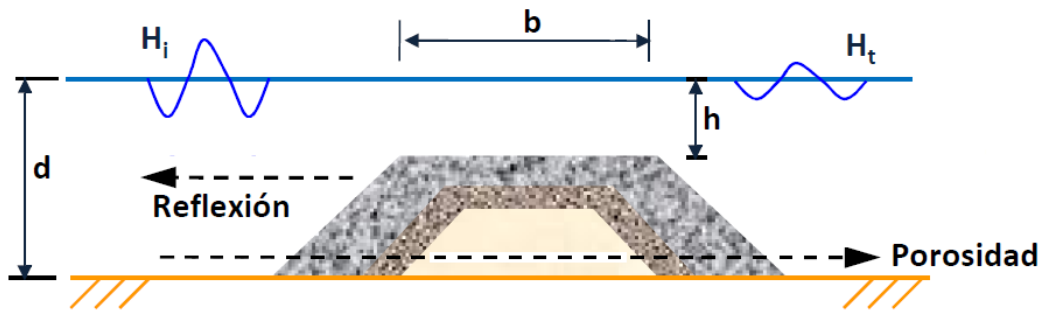


Figura 7 Transmisión del oleaje

Tal y como se puede ver en la figura, se consideran tres tipos de alturas de olas: la altura de ola incidente (H_i), la altura de ola que se transmite (H_t) y la altura de ola que se refleja (H_r). Como se ha dicho, el objetivo de un dique exento sumergido es el de reducir la energía del oleaje que llega al área protegida.

Una de las características más importantes es evaluar la magnitud del coeficiente de transmisión de altura de ola (K_t), que es función de las características geométricas del dique y de las alturas de ola incidentes.

$$K_t = \frac{\text{Altura de ola transmitida}}{\text{Altura de ola incidente}} = \frac{H_t}{H_i}$$

Hay dos tipos básicos de transmisión del oleaje:

1. Por rebase.
2. A través de la estructura.

Por consiguiente, se puede considerar dos coeficientes distintos: uno de transmisión por rebase (K_{t0}) y otro de transmisión por permeabilidad (K_{tt}), de manera que:

$$K_t = \sqrt{(K_{t0})^2 + (K_{tt})^2} = \frac{H_t}{H_i}$$

2.6.1.Cota de coronación.

La cota de coronación puede situarse a distintas profundidades, incluso a nivel medio del mar (NMM). Se debe tener en cuenta que la cota de la base de estas construcciones será aproximadamente de -6 metros.

Se toma la decisión, finalmente, de situar la cota de coronación de los diques exentos a -0,5 metros. La altura de estas obras será, por lo tanto, de 5,5 metros. Las razones que han ayudado a esta decisión son fundamentalmente dos:

1. Esta disposición permite obtener un coeficiente de transmisión aceptable. En el siguiente apartado se aborda este coeficiente.
2. Por consideraciones de impacto paisajístico, estético, funcional, etc. La implantación de estas estructuras artificiales por debajo del NMM reporta muchos beneficios, ya que no interrumpe para nada la línea del horizonte, no genera zonas de remanso donde se estanque la suciedad y permite la navegación de embarcaciones ligeras.

2.6.2.Coeficiente de transmisión de altura de ola.

En la introducción del punto 2.6. se han visto los dos tipos de coeficientes que componen el coeficiente de transmisión K_t , donde K_{t0} se puede determinar a partir del modelo analítico de Hadsen – White, mientras que K_{tt} se obtiene a partir del modelo de Seeling. En este proyecto no se emplearán estos modelos sino los resultados de distintos ensayos que proporcionan directamente valores del coeficiente K_t .

2.6.2.1.Ensayos de Seeling (Cerc, 1980)

Se representan los coeficientes de transmisión de ola frente a $(H_i)/gT^2$ (características del oleaje) apreciándose una banda de transmisión que se puede suponer próxima a $K_t = 0,60$.

Los resultados son concordantes con los de Saville, a pesar de que en el ensayo de Seeling se han probado unos diques un tanto diferentes a los que se están proyectando para la playa de Serragrossa. Por un lado, Seeling sólo considera diques impermeables. Por otro, la curva que obtiene del ensayo es válida para unos valores de B/h_c y d_s/h_c distintos a los que aquí se están diseñando.

La sección transversal que se va a adoptar y la ubicación de la cota de coronación de los diques a -0,5 metros se ha tratado en este proyecto, a fin de obtener un coeficiente de transmisión K que permita disminuir la energía del oleaje. Por lo tanto la capacidad de transporte de sedimentos estará entre 1/10 y 1/15, aliviando así la erosión sin crear barreras locales distorsionadas.

2.6.2.2.Altura de ola transmitida.

Después de valorar y contrastar los diferentes resultados, se decide que una buena estimación para el coeficiente de transmisión es $K_t = 0,53$. Se cumple, entonces, una de las limitaciones que establece el SPM para los diques sumergidos, que establece que este coeficiente debe tener un valor superior a 0,4.

Por tanto, con la fórmula siguiente obtendremos la altura de ola incidente tras el paso por el dique exento.

$$K_t = \frac{\text{Altura de ola transmitida}}{\text{Altura de ola incidente}} = \frac{H_t}{H_i}$$

$$H_t = K_t * H_i = 0.53 * 5.6 = 2.97 \text{ metros}$$

Hemos de constatar que la altura de ola incidente de 5,6 metros estaría en situación de “breaking”, por lo que rompería antes de que llegase a producirse la difracción pero se ha querido dejar constancia de la influencia en la altura de ola transmitida tras el paso por un dique exento.

2.7. Material y geometría de la sección transversal.

El material a emplear en la construcción de los diques son bloques de escollera y relleno todouno de cantera para la formación de los núcleos.

Se van a dimensionar todos los diques exentos sumergidos con secciones transversales de geometría trapezoidal, puesto que la pendiente del fondo marino delante de la obra es muy poco pronunciada (estas secciones se comportan mejor cuanto menor es la pendiente delante de ellas). Además, se está comprobando el perfecto funcionamiento de este tipo de secciones frente a la acción del oleaje.

A continuación se exponen los parámetros para definir completamente la sección transversal de los diques exentos. Algunos de los valores ya han sido fijados en apartados anteriores, y otros se determinarán posteriormente.

- El ancho en coronación será de 3 metros, para tras finalizar esta quedar con una anchura en base de 17,6 metros.
- Los dos extremos del dique (morros) estarán formados por un sector circular de 3 metros de diámetro.
- Los dos taludes, tanto el lado del mar como el de tierra tendrán el valor de 1 en horizontal por 1 en vertical (1/1).
- Se dispondrá un repié (berma a ambos lados) de 1,8 metros de longitud y 1 metros de altura.
- La cota de coronación se mantendrá constante en todo el dique sumergido, y será de -0,5 metro (respecto al NMM).
- El calado de ubicación será de -6 metros.

Para tener una visión global de estos resultados, se puede acudir al plano perteneciente al documento nº XX del proyecto, en el que se representa la sección transversal tipo de estos diques.

Existen varios métodos de analizar la estabilidad y cálculo de los diques. En el siguiente apartado se va a abordar este estudio utilizando la formulación recomendada por el SPM.

2.8. Análisis de estabilidad. Cálculo pesos de las escolleras.

Los diques exentos se suelen diseñar con diferentes capas, con piezas de tamaño decreciente desde el manto exterior o manto principal hasta el núcleo. Los mantos secundarios deben cumplir la misión de apoyo y filtro con las piezas de los mantos adyacentes. Estos diques se denominan multicapa. En algunos casos, bien debido al pequeño volumen del dique, a la disponibilidad de material o a la escasa importancia de la transmisión a través del dique u otros factores, es económico construir diques de una sola capa, pasando a denominarse como diques monocapa.

En ocasiones, debido a la carencia de escolleras adecuadas en las canteras o al costo del hormigón para las piezas artificiales del manto, se ha diseñado diques de escolleras con un peso de las piezas del manto exterior que no garantiza la estabilidad individual de las mismas.

Por ello, en este tipo de diques se admite en el diseño una determinada deformación del perfil del manto exterior, como resultado a la acción del oleaje. Para permitir esta deformación sin que se vean afectados mantos inferiores, se requiere la aportación de un mayor volumen de material formando una berma.

2.8.1. Evolución de la formulación.

Iribarren presentó en 1.938 una fórmula para el cálculo del peso de las piezas del manto principal. En ella el peso dependía del cubo de la altura de ola, de la pendiente del talud, de la densidad relativa de las piezas y de dos coeficientes, correspondientes al rozamiento y tipo de las escolleras. En 1.950, Iribarren y Nogales generalizan la fórmula anterior introduciendo el efecto de la profundidad y del período mediante una modificación en la altura de ola.

Hudson y Jackson presentan, en 1.959, una fórmula que ha tenido una amplia difusión en el mundo, con una estructura similar a la de Iribarren.

En 1.976, el PIANC elaboró un informe en el cual se presentan las fórmulas más importantes usadas hasta entonces en el cálculo de este tipo de diques, mostrándose la gran disparidad existente entre los diferentes resultados obtenidos. Las averías ocurridas en los diques de Bilbao (1.976), Sines (1.978) y San Ciprián (1.979) pusieron en entredicho la validez de los métodos de diseño empleados hasta entonces en el cálculo de los diques de piezas sueltas y en los métodos de cálculo del oleaje.

Losada y Jiménez – Curto (1.979) utilizan el concepto de curvas de interacción para el análisis directo de la estabilidad y reconocen la aleatoriedad intrínseca de la respuesta de los diques de escollera. Estos mismos autores utilizan por primera vez, en 1.981, la hipótesis de equivalencia en el estudio de la probabilidad de fallo de las obras marítimas solicitadas por un estado de mar y analizan la influencia de la duración de éste en la probabilidad de fallo. En 1.982, Losada y Jiménez – Curto presentan una hipótesis de trabajo para el cálculo de la estabilidad de diques de escollera con incidencia oblicua.

Por lo que respecta a los morros de los diques exentos, la experiencia muestra que son menos estables que las secciones del tronco. En dicha experiencia se fundamentan las recomendaciones de Iribarren (1.964) y Brunn (1.973) de aumentar el peso de las piezas del morro con respecto a las del manto del talud exterior.

Entre las aportaciones más destacables en el campo de los diques exentos sumergidos, se puede citar los ensayos de Ahrens (1.987) y Van der Meer (1.988) sobre diques emergidos. En diques sumergidos se cuenta con la experimentación de Givier y Sorensen (1.986).

2.8.2. Estabilidad.

El avance del conocimiento de las características del flujo sobre el talud de los diques de escollera y de las fuerzas geomecánicas que desarrollan las piezas en el manto ha permitido el desarrollo de principios racionales para el diseño de las piezas de manto principal.

2.8.2.1. Concepto.

Bruun (1.979), tras analizar las posibles causas de fallo de un dique rompeolas exento expuesto a la acción del oleaje, realizó una síntesis de ellas, agrupándolas en once causas principales, que comprenden la estabilidad hidrodinámica de las piezas, la estabilidad mecánica de las mismas, la estabilidad geotécnica de todo el conjunto granular y errores constructivos. En lo sucesivo, se analizará la estabilidad de los diques rompeolas atendiendo a las causas de avería debidas a falta de estabilidad hidrodinámica, es decir:

- Extracción de las piezas del manto principal a causa del oleaje.
- Movimientos continuos de los elementos del manto principal sin grandes desplazamientos instantáneos, pero capaces de deteriorar en el tiempo la conformación del manto. Se podría considerar como una rotura por fatiga.

El movimiento de una pieza integrada en el manto de un dique puede ser de dos tipos: cabeceos sobre sus apoyos en el manto y desplazamiento de su posición en el manto a otra nueva.

Al ser atacado el dique por oleaje regular de pequeña altura, éste permanece inalterado, salvo la extracción de algunas piezas no integradas en el conjunto granular. Si la altura de ola que aborda el dique aumenta suficientemente, comienza la extracción de piezas, si bien dichas extracciones acaban cesando a partir de un número de olas determinado. Durante estos estados, que podríamos calificar de “estabilidad parcial”, el dique alcanza una situación de estabilidad tras un número determinado de olas.

Finalmente, cuando las acciones debidas al flujo superan un determinado valor, el manto principal no alcanza una situación de estabilidad antes de que las piezas del manto secundario (o filtro) se vean afectadas. Cuando el filtro comienza a verse afectado, la progresión del daño aumenta, alcanzándose rápidamente niveles de deformación incompatibles con la función de la estructura. Cuando el espesor del manto principal es muy

elevado, caso de los diques berma, o el dique está constituido con una sola gradación de escolleras (diques arrecifes), la deformación admisible es muy superior, por lo que la limitación a la deformación vendrá impuesta, o por el inicio de la erosión del manto secundario (caso de los diques berma), o por los efectos que la deformación produce en la funcionalidad del dique.

2.8.2.2. Criterios de avería.

Para relacionar el estado de avería de un dique con los valores de los parámetros de daño, es necesario definir algunos criterios globales de avería asociados a variaciones geométricas apreciables en el manto, proporcionando así información cualitativa del estado del dique.

Los criterios de avería, tanto cuantitativos como cualitativos, se han ido modificando a lo largo del tiempo. Es por ello que, según tengamos en cuenta unos criterios u otros, pueden modificarse las valoraciones en cuanto a qué entendemos nosotros por la avería de nuestra construcción.

Recientemente se han definido 4 niveles de daño diferentes reconocibles mediante la inspección visual de los diques: Iniciación de Avería (IA), Avería de Iribarren (AI), Inicio de Destrucción (ID) y Destrucción (D).

De todos modos, en los cálculos de este proyecto se va a seguir el criterio del SPM (1.984) que proporciona una tabla para relacionar la altura de ola de iniciación de averías o daño cero con la altura de ola de cálculo que realmente ataca el dique. En esta tabla se define “daño” como el porcentaje de escollera que se mueve en una banda activa. En este criterio, la destrucción del dique se da para un daño del 50%.

2.8.3. Pesos de las piezas y espesores de las capas.

En este punto se describe el cálculo de los elementos que forman parte de los diques en talud considerando sólo el mecanismo de erosión del manto por la acción del oleaje.

El manto principal es el elemento más resistente del dique frente al oleaje. En general, el PIANC recomienda tomar una fórmula empírica para el prediseño y después ajustar el resultado en un canal de ensayos. En los ensayos a escala, la clave reside en reproducir adecuadamente la estructura del dique y el clima marítimo de diseño. En el pasado, muchos diseños han fallado por la dificultad de establecer el clima marítimo, ya que en su determinación existen unas fuentes de incertidumbre asociadas a las propias hipótesis de trabajo, como son la hipótesis de estacionalidad climática, los errores en los datos de calibración, variabilidad muestral, etc. e hipótesis sobre funciones de distribución y variabilidad de los parámetros estimados.

Evidentemente, en este proyecto no hay posibilidad de ajustar el prediseño en una prueba a escala en el canal de ensayos. No obstante, el coeficiente K_d que se emplee en esta formulación se obtendrá de una tabla de valores deducidos mediante estudios en modelo reducido.

Por lo tanto, para el cálculo de los pesos unitarios de los elementos del manto se va a aplicar la fórmula de Iribarren (1.938), modificada por Hudson (1.952), que es la propuesta por el SPM (1.984).

$$W = \frac{\gamma_r * H^3}{(S_r - 1)^3 * K_d * \cot \alpha}$$

Donde:

- W, el peso de la escollera del manto.
- γ_r , el peso específico de la escollera, de valor 2,7 T/m³.
- H, la altura de ola a considerar.
- S_r , el peso específico relativo del material respecto del agua, es decir: $S_r = \frac{\gamma_r}{\gamma_w}$
- α , el ángulo que forma el paramento del dique con la horizontal. En este caso el valor de $\cot \alpha$ es igual a 2 para los dos taludes, lados orientados al mar y tierra.
- K_d , el coeficiente de estabilidad. Su valor se va a obtener, también, a continuación.

La altura de ola (H) a introducir en esta ecuación está en función del nivel de daño (D) que se acepte para la estructura. El SPM (1.984) define este nivel como el porcentaje de escollera que se mueve dentro de una banda activa, y para cada valor de D, proporciona una relación entre la altura de ola (H) a introducir en la ecuación de Hudson, y la altura de ola de cálculo (H_{calc}). La tabla del SPM también recoge la posibilidad de diferentes tipos de unidades que forman el dique (rocas, dolos, tetrápodos, etc.). Usaremos la siguiente tabla:

Pieza		Daño (D) en Porcentaje						
		0-5	5-10	10-15	15-20	20-30	30-40	40-50
Escollera lisa	$H/H_{D=0}$	1,00	1,08	1,14	1,20	1,29	1,41	1,54
Escollera rugosa	$H/H_{D=0}$	1,00	1,08	1,19	1,27	1,37	1,47	1,56
Tetrápodos Cuadrípodos	$H/H_{D=0}$	1,00	1,09	1,17	1,24	1,32	1,41	1,50
Tribar	$H/H_{D=0}$	1,00	1,11	1,25	1,36	1,50	1,59	1,64
Dolos	$H/H_{D=0}$	1,00	1,10	1,14	1,17	1,20	1,24	1,27

Tabla 4 Nivel de daño

Si se quisiese dimensionar el peso de los bloques de escollera para cumplir la situación de IA (Inicio de Averías), se tomaría $H = H_{calc}$. Se decide permitir un nivel de daño D = 20-30% que sería el correspondiente a H_{calc} siendo, de esta manera, la altura de ola a introducir en la ecuación según la tabla del SPM (1.984):

$$H = \frac{5.6}{1.37} = 4.09 \text{ metros}$$

Por otro lado, K_d es un coeficiente de estabilidad que varía principalmente con la forma de las piezas, la rugosidad en la superficie, la angulosidad de las aristas y el grado de entrelazado obtenido en la colocación. También depende del número de capas que se vayan a utilizar, de cómo se coloquen las piezas, de las condiciones de oleaje: rotura o no rotura y de si estamos en la sección del morro o no. Su definición se da en la tabla 7-8 del SPM (1.984).

En nuestros diques definiremos dos capas, ya que se desaconseja el uso de una capa para diques con olas en rotura, por lo tanto, $n=2$. Además, consideramos que la escollera que se va a utilizar será angulosa, así como su colocación la consideraremos aleatoria. Realmente, al haber dos capas, se tendrá un cierto esmero, pero esto nos deja del lado de la seguridad.

Con todas las premisas expuestas, nos dirigimos a la tabla XX y vemos que los valores de los coeficientes K_d en situación “breaking”. Finalmente, se decide que $K_d=4,2$ que es un valor intermedio entre 2 para colocación aleatoria de los bloques y 5,8 para colocación especial. Como se puede ver, se estima que se está más cerca de la segunda forma de instalación que de la primera y así se refleja en la elección del coeficiente.

Para el K_d obtenido, y con las recomendaciones que se acaban de especificar son aceptables los taludes del manto con valores de $\cot\alpha = 2$.

En lo que respecta a los morros de los diques, el coeficiente K_d se toma, también para $n=2$ y rocas angulosas colocadas aleatoriamente. Así, se decide interpolar entre los dos métodos de colocación igual que hemos hecho para el cuerpo del dique, y finalmente obtener un valor $K_d=3,4$.

Table 7-8. Suggested K_D Values for use in determining armor unit weight .

No-Damage Criteria and Minor Overtopping							
Armor Units	3 n	Placement	Structure Trunk		Structure Head		
			K _D ²		K _D		Slope
			Breaking Wave	Nonbreaking Wave	Breaking Wave	Nonbreaking Wave	
Quarrrystone							
Smooth rounded	2	Random	1.2	2.4	1.1	1.9	1.5 to 3.0
Smooth rounded	>3	Random	1.6	3.2	1.4	2.3	
Rough angular	1	Random	4	2.9	4	2.3	
Rough angular	2	Random	2.0	4.0	1.9 1.6 1.3	3.2 2.8 2.3	1.5 2.0 3.0
Rough angular	>3	Random	2.2	4.5	2.1	4.2	5
Rough angular	2	Special	5.8	7.0	5.3	6.4	5
Parallelepiped ⁷	2	Special	7.0 - 20.0	8.5 - 24.0	--	--	
Tetrapod and Quadripod	2	Random	7.0	8.0	5.0 4.5 3.5	6.0 5.5 4.0	1.5 2.0 3.0
Tribar	2	Random	9.0	10.0	8.3 7.8 6.0	9.0 8.5 6.5	1.5 2.0 3.0
Dolos	2	Random	15.8 ⁸	31.8 ⁸	8.0 7.0	16.0 14.0	2.0 ⁹ 3.0
Modified cube	2	Random	6.5	7.5	-----	5.0	5
Hexapod	2	Random	8.0	9.5	5.0	7.0	5
Toskane	2	Random	11.0	22.0	--	--	5
Tribar	1	Uniform	12.0	15.0	7.5	9.5	5
Quarrrystone (K _{RR})							
Graded angular	-	Random	2.2	2.5	--	--	

Tabla 5 Coeficiente de estabilidad K_d

2.8.3.1.Manto principal.

Se tienen ya todos los elementos para calcular el peso de los elementos que forman el manto de los diques. El cálculo será diferente para el cuerpo y para los morros de los diques:

Cuerpo:

$$W = \frac{2,7 * 4.10^3}{(2.634 - 1)^3 * 4.2 * 2} = 5.08 T$$

Morro:

$$W = \frac{2,7 * 4.10^3}{(2.634 - 1)^3 * 3.4 * 2} = 6.27 T$$

Se decide tomar el valor del peso de la escollera del morro para toda la estructura, quedando así del lado de la seguridad.

Para calcular el espesor del manto principal de escollera, se tiene que obtener el tamaño del cubo equivalente de los elementos de escollera:

$$r = n * K_{\Delta} * \left(\frac{W}{\gamma_r}\right)^{\frac{1}{3}}$$

Siendo:

- n, el número de capas.
- K_{Δ} , el coeficiente de capa, cuyo valor es de 1 para roca angulosa y colocación aleatoria.
- W, el peso de la escollera del manto.
- γ_r , el peso específico de la escollera.

Siendo γ_r el peso específico de las piezas: $2,7 \text{ T/m}^3$ y considerando que tenemos dos capas, los espesores del cuerpo y morro serán:

$$e(\text{cuerpo}) = 2,65 \text{ metros} \quad e(\text{morro}) = 2,65 \text{ metros}$$

A partir de aquí, según la sección tipo multicapa recomendada para diques de escollera en aguas poco profundas, y en condiciones de rotura de fondo (breaking wave condition) del SPM (1.984), se obtienen los pesos de las distintas partes que componen los diques exentos. Para ello, disponemos de la sección tipo la cual se compone por manto principal, una capa de filtro o manto secundario y un núcleo.

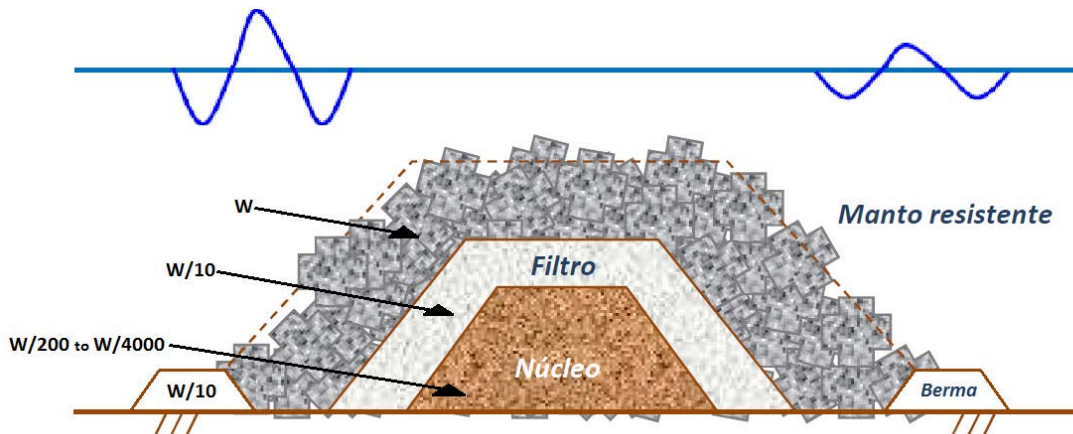


Figura 8 Sección tipo dique exento

2.8.3.2. Manto secundario.

El manto secundario de los diques actuará como filtro, para evitar la dispersión del núcleo por la acción del oleaje. Se va a utilizar un peso para las piezas que forman esta capa igual a $W/10$. El espesor se calcula de la misma manera que en el caso del manto principal sólo que en este caso el número de capas es $n=1$. Entonces:

$$\text{Cuerpo: } W = 627 \text{ Kg}$$

$$\text{Morro: } W = 627 \text{ Kg}$$

Cuerpo:

$$l(\text{cuerpo}) = \sqrt[3]{Volumen} = \sqrt[3]{\frac{W}{\gamma_r}} = \sqrt[3]{\frac{0,627}{2,7}} = 0,61 \text{ metros}$$

$$e(\text{cuerpo}) = 1 * 0,61 = 0,61 \text{ metros}$$

Morro:

$$l(\text{morro}) = \sqrt[3]{Volumen} = \sqrt[3]{\frac{W}{\gamma_r}} = \sqrt[3]{\frac{0,627}{2,7}} = 0,61 \text{ metros}$$

$$e(\text{morro}) = 1 * 0,61 = 0,61 \text{ metros}$$

2.8.3.3. Núcleo.

Por último, se va a definir un núcleo interior cuya misión será impedir, al menos en parte dada su baja porosidad, la transmisión de la energía de las olas. El núcleo estará formado por relleno todouno de cantera, es decir, con unos elementos que tienen un peso dentro de un amplio rango. Éste se delimitará, para este caso, por los valores $W/200$ y $W/4000$. Entonces:

Núcleo interior:

$$W \in (1,6 - 31)Kg.$$

2.8.3.4. Berma de pie.

Para el dimensionamiento de las escolleras del pie se utiliza la formulación de Gerding (1995), válida para diques formados por piezas sueltas de escollera de densidades en torno a $2,65 \text{ T/m}^3$ y taludes de $\cot\alpha = 1,5$ sometidos a oleaje irregular.

$$0,4 < \frac{h_t}{h} < 0,9 \qquad 3 < \frac{h_t}{D_{n50}} < 25$$

Siendo:

- h_t , el calado medido desde la cota de la berma.
- h , el calado a pie de dique.
- D_{n50} , el tamaño medio de la escollera de la berma.

Para asegurar la estabilidad del dique frente los procesos de socavación y deslizamiento de las piezas del pie de la berma es suficiente colocar una o dos capas de escollera de diámetro equivalente con un ancho suficiente. Las recomendaciones del SPM sugieren adoptar un ancho mínimo de la berma de cuatro diámetros equivalentes.

En este caso, para proteger el pie del dique se proponen berma de 1 m de altura y 1,8 m de ancho.

2.8.3.5. Resumen.

Como resumen, se expresan en la siguiente tabla los resultados a los que se ha llegado en relación con los pesos de las piezas de escollera que forman las distintas capas de los diques exentos, así como sus espesores:

Capa		Peso de escollera	Espesor (m)
Manto principal	Cuerpo	6,27 T	2,65
	Morro	6,27 T	2,65
Manto secundario	Cuerpo	627 Kg	0,61
	Morro	627 Kg	0,61
Núcleo	-	1,6 – 31 Kg	-

Tabla 6 Pesos piezas distintas capas

Cada una de las capas permite un intervalo de variación alrededor del valor del peso de escollera obtenido. Este, valor, de acuerdo con el SPM (1.984) es:

Capa		Variación	Peso Mín.	Peso Max.
Manto principal	Cuerpo	75 % - 125 %	4,70 T	7,84 T
	Morro	75 % - 125 %	4,70 T	7,84 T
Manto secundario	Cuerpo	70 % - 130 %	439 Kg	815 Kg
	Morro	70 % - 130 %	439 Kg	815 Kg
Núcleo		30 % - 170 %	0,5 Kg	53 Kg

Tabla 7 Intervalo de variación de los pesos

2.8.4. Anchura mínima de coronación.

Cuando se ha diseñado la sección transversal de los diques exentos sumergidos, se ha dado una anchura en coronación (B) de 3 m. También se advertía que en los morros, la anchura sería mayor. Ahora se quiere comprobar que este valor está por encima del mínimo obtenido por el cálculo. Se van a seguir las recomendaciones del SPM (1.984) que establecen que:

$$B \geq n * K_{\Delta} * \left(\frac{W}{\gamma_r} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Siendo:

- n, el número de capas del manto principal. Se ha tomado n=2.
- K_Δ, el coeficiente de capa. Se toma según la tabla 7-13 del SPM, K_Δ = 1.
- W, el peso de la escollera del manto.
- γ_r, el peso específico de la escollera. Se considera un valor de 2,7 T/m³.

Obteniendo:

$$B(\text{cuerpo dique}) \geq 2 * 1 * \sqrt[3]{\frac{6.27}{2.7}} = 2.65 \quad B(\text{morro dique}) \geq 2 * 1 * \sqrt[3]{\frac{6.27}{2.7}} = 2.65$$

2.8.4.1. Justificación anchos adoptados.

El SPM aconseja que el ancho deba ser lo suficientemente ancho para acomodar cualquier operación de construcción o mantenimiento que se haya de realizar desde la estructura.

El hecho de tomar una anchura en coronación del dique superior a la mínima puede parecer un gran error, sobre todo en lo que se refiere a la economía. Sin embargo, se puede justificar esta elección mediante el sistema de construcción de estas estructuras.

Como se puede ver en el anejo correspondiente, el proceso de ejecución de las obras previsto es el terrestre. Será necesaria la utilización de maquinaria pesada (de movimiento de tierras y de elevación) que se tendrá que desplazar (mar adentro) sobre caminos de acceso y sobre los propios diques. Estos diques exentos no se construirán, desde el principio, sumergidos porque las mismas estructuras tienen que servir para acceder a la ejecución del contiguo. Entonces, estos tendrán, en fase de construcción una altura de coronación por encima del nivel medio del mar.

Por lo tanto, se deben de ejecutar los diques con una anchura tal que, en fase de construcción, puedan permitir la circulación de camiones, grúas, palas, y otras máquinas pesadas necesarias para las obras. Después, en el último momento de la ejecución, los diques serán “rebajados” quedando su coronación por debajo del nivel del mar. En este rebaje se gana anchura debido al carácter trapezoidal de la sección.

Entonces, la anchura en coronación de diseño, que se toma $B = 6$ metros, se considera suficiente para permitir la circulación de maquinaria en la coronación provisional en fase de construcción. De igual modo, se acaba adoptando para los dos morros de cada dique una anchura en coronación igual a 6 metros de diámetro en fase de construcción.

2.8.5. Bermas de refuerzo.

El oleaje actuante puede llegar a provocar erosiones en el fondo y en la propia cimentación de las estructuras, por lo que ésta deberá protegerse a fin de evitar fallos en el pie o asientos excesivos. Esta protección está más justificada en casos, como en la playa de Serragrossa, en lo que el material del fondo no es rocoso. El fondo marino en los lugares de asentamiento de los diques está compuesto por arena y se necesita colocar una base que funcione como filtro. Así se evitará que los granos se desplacen a través de los huecos, provocando erosiones y movimientos de los bloques de escollera que forman el cuerpo.

Se proyectan unos refuerzos a modo de bermas a ambos lados de los diques para evitar los problemas que puedan aparecer, sobre todo los producidos por la socavación. Estos elementos tendrán una anchura de 1,8 metros, y envolverán todo el dique, incluyendo los morros. Su altura será de 1 metro, medidos a partir de la base artificial. Estará compuesto por las mismas piezas de escollera que la capa de filtro o manto secundario.

Lógicamente, estas bermas son elementos que, en cierta forma, son difíciles de construir bajo el agua. No obstante, su presencia es recomendable para evitar problemas cuya solución resultaría más costosa.

2.9. Propagación del oleaje. Forma en planta de la playa.

2.9.1.El fenómeno de la propagación de las olas.

La forma de equilibrio en planta de la playa de Serragrossa dependerá, en gran medida, del oleaje incidente en ella. Las olas generadas en aguas profundas se van propagando, y al llegar a la costa puede modificar sus características. En efecto, pueden sufrir los procesos de refracción y fricción con el fondo y al encontrarse con los diques exentos, se puede dar la difracción y/o reflexión. En este trabajo no tiene mucho interés el estudio de la reflexión, pero sí el de otros fenómenos que intervienen en la propagación del oleaje.

La difracción es la deformación que sufre el frente de olas al rodear cualquier obstáculo, mientras que la refracción es la modificación del oleaje ligada a la modificación de la profundidad, y también a la disposición de las isobatas. Por refracción, las crestas de las olas se hacen paulatinamente paralelas a la costa. El flujo de energía concentrado por unidad de superficie, al llegar a la costa se ve obligado a concentrarse o expandirse. La importancia de la refracción del oleaje en este proyecto estriba en el hecho de que las obras de regeneración de la playa que se están diseñando se construirán en profundidades reducidas, donde las olas sufren cambios considerables debido a su efecto.

Interesa la propagación del oleaje hasta la alineación de los diques exentos. A partir de este límite, la forma de las playas en planta, así como su perfil, se analizarán mediante otras herramientas, dejando de lado, en cierta medida, el fenómeno de la propagación del oleaje.

Ya se ha dicho que en este proyecto no tiene gran interés el estudio de la reflexión. En cuanto a la refracción, por lo que se está diciendo, solamente se va a analizar la refracción hasta los diques, y no la existente al rebasar los mismos. Además, se hará un breve comentario sobre los efectos provocados por la difracción que estos obstáculos provocan a las olas.

Por lo tanto, el primero de los objetivos de este apartado es el cálculo del ángulo (β) que forma la perpendicular del oleaje incidente con la alineación de los diques exentos sumergidos. Después, con el valor de β ya obtenido, se trabajará con métodos predictivos y se intentará encajar una curva geométrica que represente la planta de la playa de Serragrossa en situación de equilibrio y una vez producida la evolución.

En otro apartado de este anejo, se va a estimar la forma del perfil de la playa después de las obras de protección. Así, con los datos de la forma en planta y del perfil de la playa protegida y comparándolos con los del estado actual, se podrá calcular el volumen de áridos necesarios de la alimentación artificial y las zonas donde éstos han de ser vertidos.

Finalmente, se repasarán algunos conceptos de la difracción del oleaje de incidencia oblicua sobre los diques.

2.9.2.Hipótesis de partida.

Para llegar a calcular el ángulo β , se debe de partir de unas hipótesis que, aunque son razonables y algunas están basadas en otros estudios incluidos en este proyecto, no dejan de ser algo restrictivas. Los supuestos de partida son los siguientes:

- Las líneas batimétricas frente a la playa de Serragrossa se consideran paralelas a la línea de costa.
- En este punto se va a analizar la difracción que sufren las olas desde la zona de aguas profundas hasta la alineación de los diques exentos, es decir, hasta la batimétrica -5 metros.
- Los diques exentos sumergidos se dispondrán paralelos a la costa, a una profundidad de -5 metros.
- El oleaje en aguas profundas a utilizar en los cálculos es el obtenido en el apartado 2.1 de este anejo. Se aceptan, por lo tanto, los mismos valores de vida útil (25 años) y riesgo (0,3) para las obras de regeneración que allí se describían.
- En la playa de Serragrossa predominan los temporales con olas procedentes del ENE y del E. Después se presentan los de ESE. Y por último, los menos habituales, son los correspondientes a las direcciones SE, SSE y S. Los cálculos se harán partiendo de un oleaje con una dirección intermedia entre E y ESE, como ya se explicó previamente.

2.9.3.Refracción del oleaje.

El estudio de la refracción permite obtener el cambio en la dirección de propagación de cada uno de los puntos del frente de olas y, por lo tanto, la convergencia o divergencia de la energía de la onda al acercarse a la costa.

En la actualidad, el fenómeno de la refracción puede analizarse mediante métodos gráficos (planos de oleaje, ortogonales, etc.) y numéricos. En este proyecto se va a usar un procedimiento basado en una serie de determinaciones prácticas (SPM), las cuales han sido llevadas al siguiente ábaco.

Este ábaco es sólo válido para el caso de líneas batimétricas paralelas a la costa y hay que entrar con los datos de:

- El ángulo entre la orilla y la perpendicular a la dirección predominante del oleaje en aguas profundas es aproximadamente 44° , teniendo en cuenta las consideraciones especificadas previamente en este mismo anejo.
- Los datos del oleaje en aguas profundas (HS0 y T) para el nivel de riesgo y vida útil de las obras y la dirección del oleaje entre E y ESE, son: HS0 = 5,4 metros y T = 13 segundos.
- Profundidad aproximada a la que se construirán los diques exentos: 5 metros.

- El valor del cociente $d/(gT^2)$ será: 0,0020

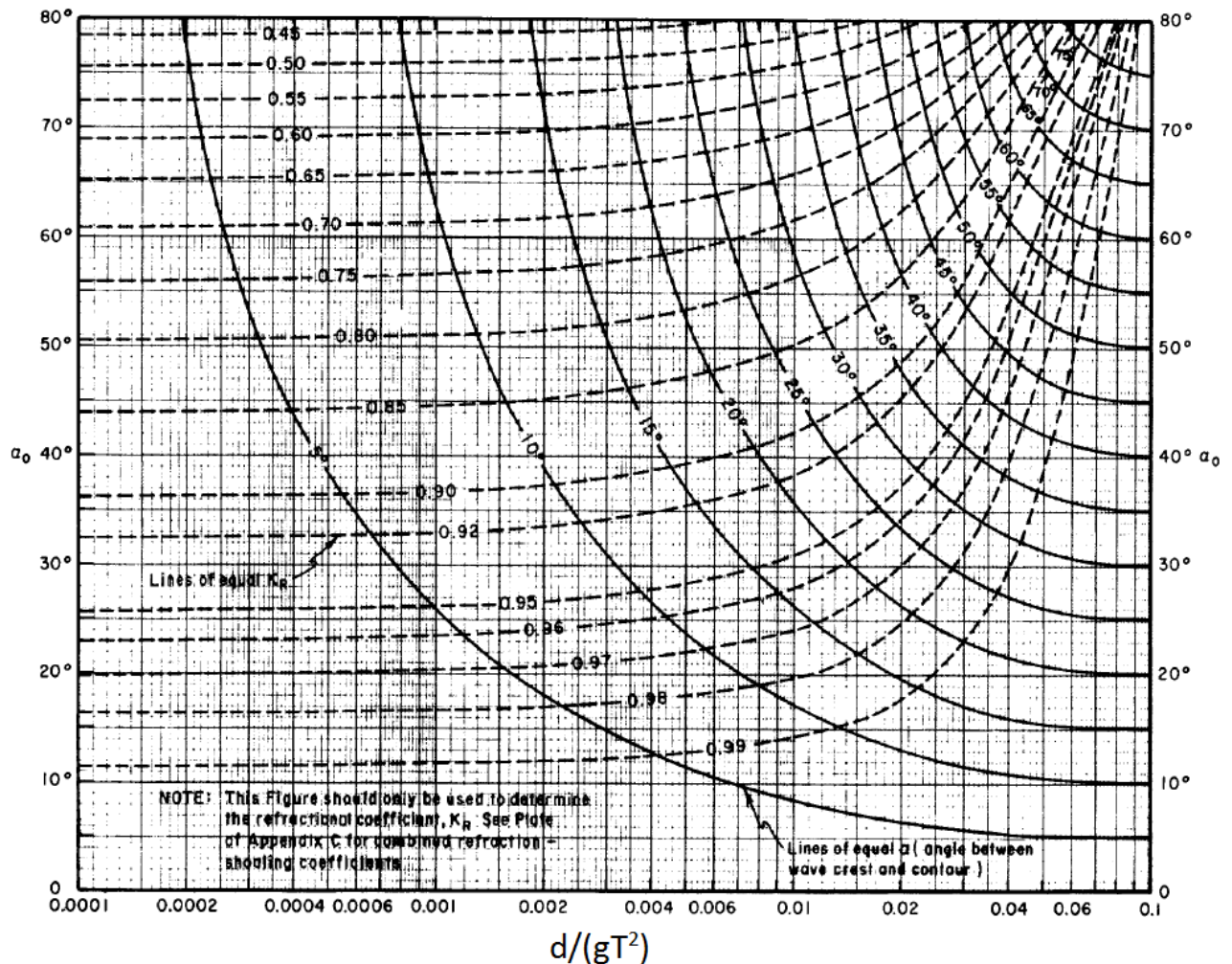


Figura 9 Abaco refracción del oleaje

Se obtiene que el ángulo entre la perpendicular a la dirección predominante del oleaje y la alineación de los diques exteriores será de $\beta = 12^\circ$.

2.9.4. Predicción de la forma en planta de la playa.

Se va a hacer una predicción de la forma en planta de la playa buscando la forma final de equilibrio a la que se llegará con la retirada de los espigones existentes y la construcción de los nuevos diques exentos sumergidos.

Como se puede ver en la siguiente figura, si la incidencia de las olas fuese normal a la alineación de los diques, se formaría un hemitómbolo justo en la zona central tras las construcciones, a esta zona se le conoce con el nombre de zona de sombra.

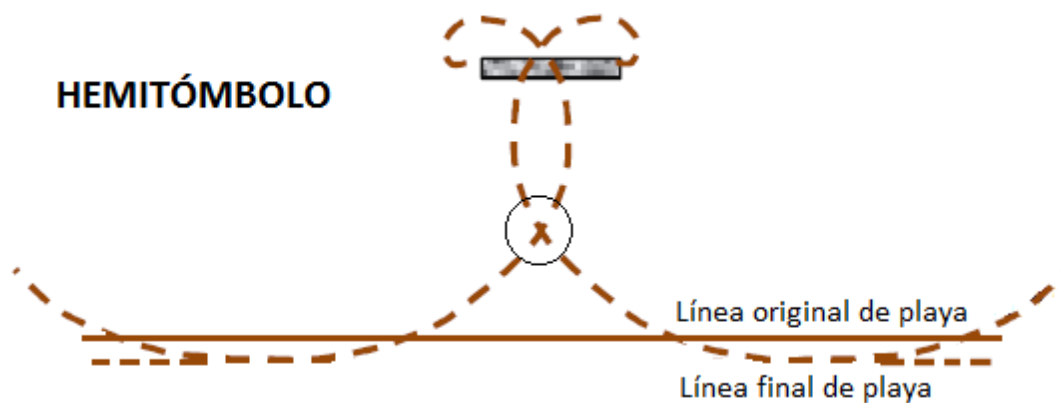


Figura 10 Formación del hemitómbolo

En las zonas protegidas, tras los diques exentos, se manifestarán los efectos de la difracción del oleaje (en el siguiente punto se ve con mayor detalle). Adicionalmente, aparece la componente del transporte longitudinal debido al gradiente, a lo largo de la playa, de la altura de ola, que generará corrientes dirigidas desde la zona expuesta a la protegida. Este esquema siempre ha dado a la planta de la playa una forma curva, que se ha intentado caracterizar mediante expresiones analíticas universales.

En este caso concreto de la playa de Serragrossa, la forma en planta que va a adoptar una vez que haya actuado el oleaje, se ha estimado mediante el uso del “compás de playa” o espiral logarítmica de ángulo constante de C. Garau. La fórmula mediante la que se obtiene esta curva es:

$$R(\theta) = R \cdot e^{\theta \cdot \cot \alpha}$$

La curva tiene tres grados de libertad: dos coordenadas de polo y el ángulo α . Se supone que los polos corresponden con los extremos de los diques, elementos de difracción y que el ángulo α depende de la playa pero suele utilizarse 30° . No obstante, la curva tiene una gran flexibilidad. Los datos de partida para conseguir un ajuste de la línea de orilla que se desea a una espiral logarítmica son:

- Ángulo de incidencia del oleaje sobre los diques exentos, es decir, ángulo entre las alineaciones de las crestas de las olas y los diques: $\beta = 12^\circ$.
- Distancia media entre la alineación de los diques y la línea que marca la orilla para el ancho mínimo de playa seca determinado: 250 metros.

En las formas de equilibrio estudiadas por R. Silvester se observa que el ángulo que forman las crestas de las olas con la alineación de los diques (β) es igual al que existe en la zona tangencial de la playa y la misma alineación. Teniendo en cuenta esta premisa, se toman como polos los extremos de los diques, y se consiguen encajar espirales logarítmicas de 30° . De esta manera se logra el ancho mínimo de playa seca que se ha especificado. Este encaje se

ha conseguido con diques exentos de 100 metros de longitud y separados entre sí 150 metros.

2.9.5. Difracción causada por los diques.

Para un ángulo de incidencia ya calculado de $\beta = 12^\circ$, el efecto de la difracción causado por los diques se puede representar mediante unas curvas con diferentes estimaciones para el coeficiente de difracción, $K' = H_d/H_i$ (cociente entre la altura de ola difractada y la de la ola incidente). La gráfica siguiente corresponde a diques exentos emergidos y, por lo tanto, los valores del coeficiente, para las distintas curvas, pueden no ser válidos para el caso de los diques sumergidos. No obstante, sí sirve para formar una idea del efecto creado por la difracción en la zona comprendida entre los diques y orilla.

El diagrama se ha escogido en función del ancho de paso entre los diques (B) y la longitud de la ola al atravesar esa zona (L) que en nuestro caso tienen una magnitud similar. Fue propuesto por Johnson en 1.952, y es válido para un ángulo entre la dirección del oleaje y la alineación de los diques de 90° , que es muy próximo al que se ha obtenido para la playa de Serragrossa, siendo éste de $90^\circ - 12^\circ = 78^\circ$.

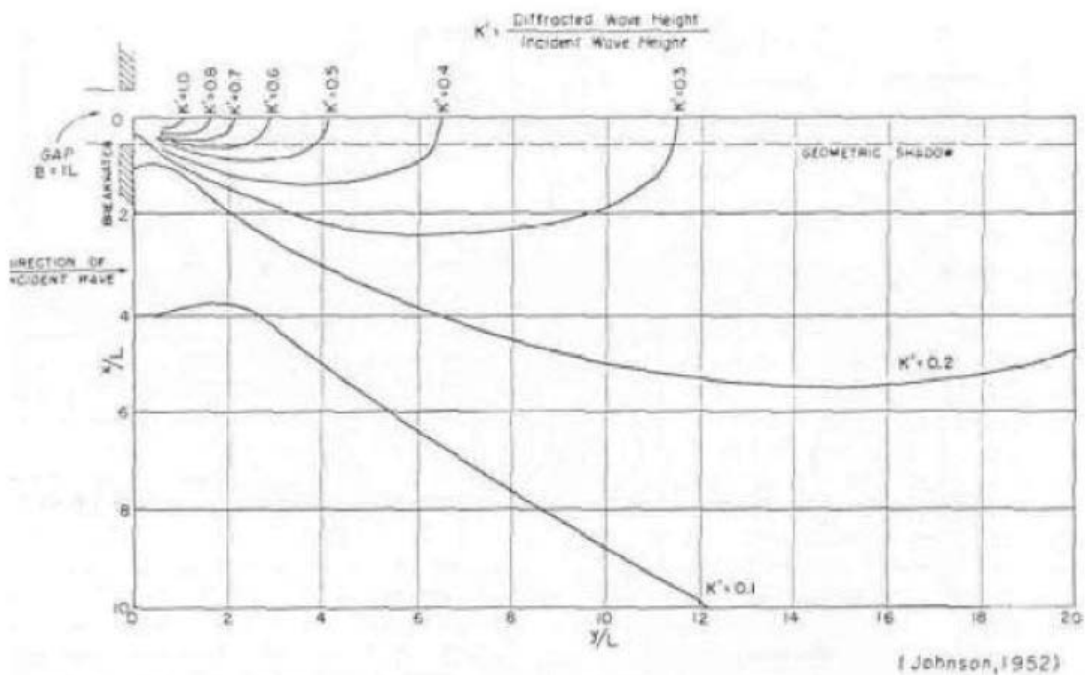


Figura 11 Diagrama de difracción

3. Alimentación artificial.

3.1. Perfil de playa. Anchos mínimos.

Tal y como se menciona en otros anejos de este proyecto, el perfil de la playa se divide en cuatro zonas:

1. Playa sumergida.
2. Estrán.
3. Playa seca.
4. Escarpe.

Estas zonas quedan reflejadas en la siguiente figura y deben presentar aproximadamente los siguientes parámetros:

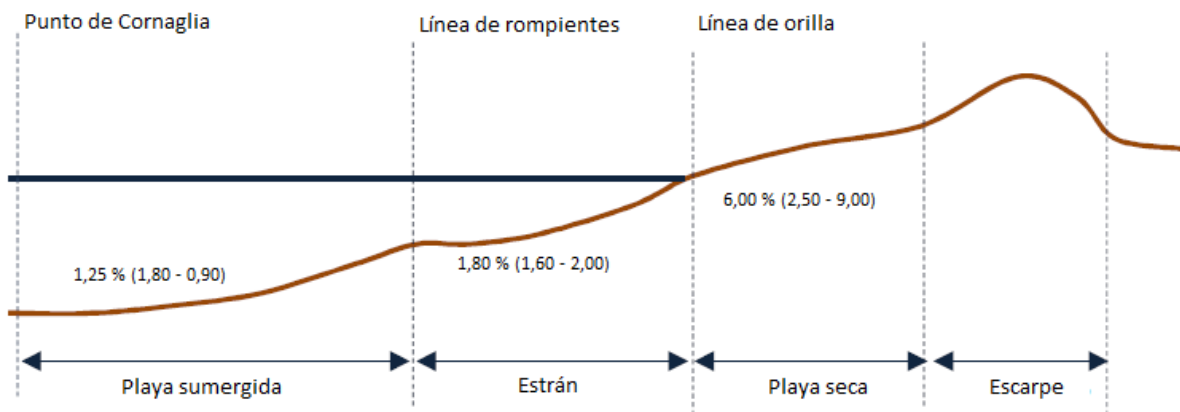


Figura 12 Perfil de playa. Anchos mínimos

A su vez dividimos la playa seca en los tramos que se mencionan a continuación.

Según las recomendaciones obtenidas a partir del estudio de la Dirección General de Puertos y Costas (realizado en 1.985) sobre la ordenación de playas, en las playas se pueden distinguir tres zonas sensiblemente paralelas a la línea de costa, y que son:

- a) Zona activa o de inmersión. “Es la franja de arena más próxima a la orilla, la colindante con la línea de costa, que debe permanecer libre para favorecer la cómoda inmersión y tránsito de las personas que acuden a bañarse”. Se recomienda un ancho mínimo para esta zona de 10 metros y una pendiente del 8%. El valor definitivo se obtendrá atendiendo a la pendiente de la playa en esta franja, y al valor del Run-Up.
- b) Zona de reposo o inactiva. “Es la franja inmediata y paralela a la anterior en la que es posible el uso de sombrillas, hamacas, toldos y otros elementos portátiles, particulares o de uso público, con destino a hacer cómoda la permanencia en la playa, facilitando el descanso a sus usuarios”. En las playas del Mediterráneo se recomienda una anchura para esta zona no superior a los 30 metros ya que, las condiciones climáticas de este

litoral en los veranos provocan un excesivo calentamiento de las arenas, y se hacen desagradables desplazamientos superiores para acceder al baño.

- c) Margen de resguardo. “Es la zona de oscilación natural de la playa, en caso de que la playa empezara a retroceder a causa de la acción de un temporal.
- d) Zona de servicios. “Está constituida por el conjunto de terrenos inmediatos a la zona de reposo o inactiva por el lado de tierra. Esta zona debe servir como elemento de separación entre la zona de reposo de la playa y las zonas urbanas colindantes”.

Uno de los parámetros a tener en cuenta en los cálculos de la forma en planta que adoptará la playa seca, es el ancho mínimo que se desea para la misma. Esta magnitud se obtendrá como suma de las zonas activas y de reposo. La zona de servicios no entra en lo que se viene a denominar “área de playa seca”.

3.2. Perfil de playa deseable.

El objetivo es cuantificar las necesidades de arena a aportar para la alimentación artificial, por lo tanto vamos a establecer el perfil deseado de la misma.

3.2.1. Playa seca.

- a) Zona activa: La pendiente será del 7% y tendrá un ancho de 10 metros.
- b) Zona de reposo o inactiva: Se adoptará una pendiente del 2% y un ancho deseable de 23 metros.
- c) Margen de resguardo: 8 metros de anchura.
- d) Zona de servicios: 9 metros.

Con estas longitudes se obtendría un ancho deseable de la playa seca de 50 metros y una pendiente aproximada del 2%. En la siguiente figura se muestra un croquis de dicho perfil:

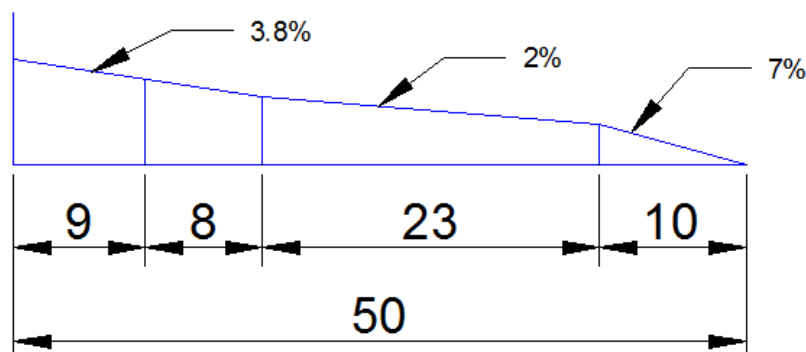


Figura 13 Ancho deseable de playa seca

3.2.2. Playa sumergida y estrán.

Siguiendo los parámetros establecidos en la figura XX (perfil de playa teórico) se pueden fijar unos porcentajes de la playa sumergida y del estrán de 1,25% y 1,8% respectivamente. Se han tomado estos valores por ser valores intermedios dentro de los parámetros mencionados.

3.2.3. Cálculo Run-Up.

El Run-Up es la cota de la playa seca hasta la que asciende una ola de altura en condiciones de rotura. Para su cálculo se va a usar la formulación de Longuet Higgins y Stewart, que establece:

$$S = 0,19 \cdot \left(1 - 2,82 \cdot \sqrt{\frac{H_b^-}{g \cdot T^2}} \right) \cdot H_b^-$$

Siendo:

- s, el valor del Run-Up.
- H_b^- , la altura de ola en condiciones de rotura.
- T, el periodo de la ola de altura H_b^- .

Un aspecto importante a tener en cuenta es que la altura de ola H_b^- de la fórmula anterior no tiene por qué corresponder con la altura de ola para el cálculo de los diques exentos, obtenida en la primera parte de este anejo por condiciones de rotura de fondo. En efecto, en los cálculos del perfil de la playa hay que utilizar la altura de ola al romper en la línea de costa.

Existen diferentes criterios de rotura del oleaje. En este proyecto se van a usar los que consideran las características batimétricas, es decir, la pendiente de la playa y el peralte de la onda en la zona offshore (H_{s0}/L_0).

Para estos cálculos se toma la altura de ola significativa en aguas profundas obtenida en el inicio del anejo. Entonces, se sigue considerando una vida útil de las obras de regeneración de 25 años, y un riesgo igual a 0,3. De esta manera, se obtiene $H_{s0} = 5,4$ metros y $L_0 = 268$ metros.

Por otro lado, a efectos de estos cálculos, se va a tomar como pendiente media en zona de rompientes, es decir, en la zona de aguas someras de la playa de Serragrossa, $m = 2,5$ %.

Criterio de Sunamura y Horikawa:

$$H_b^- = m^{0,2} \cdot H_{s0} \cdot \left(\frac{H_{s0}}{L_0} \right)^{-\frac{1}{4}} = 6.9 \text{ metros}$$

Por otro lado, el periodo de estas olas (T) al llegar a la costa de Serragrossa es de unos 13 segundos. Aplicando estos valores a la ecuación de Longuet Higgins y Stewart se obtiene un Run-Up de $s = 1$ metro.

Hay que decir que el valor del Run-Up obtenido es el válido en las zonas de la orilla “desprotegidas” por los diques exentos sumergidos donde las olas llegan con toda su energía tras pasar entre dique y dique. En las zonas de los hemitómbolos, situados a la sombra de los diques, el Run-Up es menor porque la altura de ola H_b^- es menor de 6,9 metros. En efecto, se ha visto en otro punto de este mismo anejo que el coeficiente de transmisión de altura de ola (K_t) al atravesar los diques sumergidos es igual a 0,55. No obstante, a efectos de cálculo, se va a tomar la situación más desfavorable y se va a considerar un Run-Up igual a 1 metro para toda la longitud de la playa de Serragrossa.

Considerando una sobreelevación media del nivel del mar de 0,4 metros, la cual se considera aceptable para las playas del mediterráneo, se obtiene un Run-Up total de 1,4 metros.

3.3. Granulometría de la arena.

3.3.1.D50 de la arena nativa.

A causa de la acción clasificadora del oleaje, sería necesario analizar un gran número de muestras de arena, tanto originales como de préstamos para llegar a establecer la curva granulométrica de las arenas que forman la playa de Serragrossa. En este apartado se va a analizar, con los datos de que se dispone proporcionados por el Ministerio de Medio Ambiente, el tamaño medio de la arena nativa de la playa seca, y a partir de este dato, se decidirán las mejores características granulométricas del material a utilizar.

Hay que decir que en ingeniería de costas, y cuando se trata de playas de arenas, no se suele trabajar con curvas granulométricas, sino con un tamaño medio de las partículas al que se denomina D_{50} . Para decidir el D_{50} a considerar en este proyecto, es necesario saber el tamaño original de las arenas de nuestras playas ya que el tamaño que utilizaremos debe ser mayor o igual a las nativas.

Con los datos de campo que se dispone sobre la playa de Serragrossa según el “Estudio Ecocartográfico del Litoral de las Provincias de Alicante y Valencia”, encontramos un $D_{50} = 0,25$ mm respectivamente para cada playa.

3.3.2.Arena de aportación.

A partir de este dato, se van a decidir las características granulométricas del material de aportación a utilizar. Normalmente, las arenas de préstamo no son iguales a las originales y, por lo tanto, el comportamiento del nuevo perfil activo de la playa diferirá del anterior. En efecto, tras una serie de ensayos de laboratorio, Vellinga obtuvo en 1.982 una relación de sedimento en la forma del perfil de la playa.

Esta relación viene dada por:

$$\frac{l_n}{l_p} = \left(\frac{W_n}{W_p} \right)^{-0,56}$$

Donde:

- l: indica la distancia horizontal entre dos cotas dadas.
- w: es la velocidad de caída del sedimento.
- n: indica las características de la playa nativa.
- p: indica características de la playa alimentada.

Como se verá más adelante, en la determinación del perfil de la playa de Serragrossa, tras la alimentación artificial, no se va a utilizar exactamente la fórmula de Vellinga. Sin embargo, sí se está tratando en este punto para caracterizar la granulometría de la arena de aportación ya que, observando esta relación, se puede deducir que la utilización de un material más grueso que la arena nativa hace que la pendiente de la playa generada sea mayor que la original. Esto es así porque se necesita una menor longitud horizontal para lograr una diferencia de cota dada.

Por el contrario, si se usa un material más fino, la pendiente de equilibrio disminuiría, se necesitaría una mayor distancia horizontal para conseguir una misma diferencia de cota. Entonces, una de las conclusiones de la relación de Vellinga es que el uso de arenas más gruesas que las originales origina volúmenes necesarios de aportación menores. Esto es muy importante, pues redundaría en un coste económico menor.

Se establece, por tanto, que el tamaño de las arenas de préstamo sea igual o superior a las nativas. Si el tamaño es superior, el comportamiento del nuevo perfil activo de la playa diferirá del original. Esta diferencia consistiría básicamente en un aumento de la pendiente de la playa. Esto por un lado puede producir una mayor incomodidad en los usuarios y por otro lado, como se ha dicho, una reducción del volumen de arena de aportación a utilizar, pero cabe decir para ambos casos que no se trata de una variación brusca de la pendiente y es por eso que tanto los efectos positivos como negativos que pudiéramos encontrar no son excesivamente relevantes.

Hay que considerar, además, que la movilidad de los granos de arena está también en función del tamaño medio de los mismos. Así, si se realiza la alimentación con un D_{50} mayor que el de la playa natural, los sedimentos serán empujados hacia la costa, mientras que si el D_{50} de aportación es menor, los sedimentos se desplazarán hacia el mar. Esto hace pensar en la posible utilización de varios tamaños. No obstante, se decide usar solamente un tamaño de grano, es decir, un material más o menos uniforme, con un D_{50} definido pero con una curva granulométrica que permita la existencia de pequeños porcentajes de granos finos y otro más gruesos. Hay que tener en cuenta que el trasiego de las arenas de préstamo, por la acción del oleaje, supone un lavado de sus finos, por lo que el tamaño medio puede aumentar con el tiempo.

Por todos estos motivos y recordando que la playa de Serragrossa tiene un $D_{50} = 0,26$ mm. Se decide utilizar para este proyecto de protección de la playa, un diámetro medio de los sedimentos de aportación a la playa de $D_{50} = 0,30$ mm.

3.3.3. Aporte de arenas.

3.3.3.1. Método de aportación.

En la ejecución de las obras de protección de este proyecto, se va a emplear el emplazamiento directo de la arena, así como el apilado en áreas para su distribución por la dinámica litoral y el emplazamiento “offshore” para aquella necesaria en la playa sumergida.

En un primer momento, para crear el ancho mínimo de playa especificado, se emplazarán directamente los volúmenes necesarios en cada zona de la playa. Este primer proceso es muy sencillo, y consiste en verter desde los camiones que llegan cargados de arena a la playa seca, y repartirla con maquinaria de movimiento de tierras hasta conseguir la anchura determinada.

Una vez concluida esta fase, la arena necesaria para completar el perfil de equilibrio definido para la playa sumergida se podrá aportar mediante el vertido en puntos separados de la costa o mediante apilado en los primeros metros de la playa sumergida. El emplazamiento “offshore” se puede ejecutar con medios terrestres, aprovechando, antes de su retirada, los caminos de acceso provisionales para la construcción de los diques exentos. El otro método, el apilado de volúmenes de arena para su distribución por la dinámica litoral, se puede realizar en áreas determinadas de la playa sumergida, pero muy próximas a la costa, para evitar así el uso de medios marinos de ejecución.

Resumiendo, la forma de aportar la arena es un tanto variada, pero sencilla en todos los casos, no siendo necesario otro tipo de maquinaria más que la corriente de movimiento de tierras.

Por otro lado, la arena de aporte va a proceder de plantas de extracción y tratamiento de áridos. Por lo tanto, la fuente es terrestre, y para su utilización en la playa de Serragrossa, necesitarán un proceso de machaqueo, clasificación, etc. Se desestiman entonces las fuentes fluviales y marinas.

Una consideración a tener en cuenta respecto al origen de la arena de aportación, es que el material utilizado tiene que diferir mínimamente del nativo. Se ha dado el caso de regenerar alguna playa con material, procedente de canteras muy diferente del de la playa, y el resultado ha sido muy negativo, hasta el punto que se ha tenido que reponer con otro tipo de material similar al nativo.

3.3.3.2. Cálculo de volúmenes.

Puesto que no se dispone de los parámetros reales se va a adoptar un factor de relleno de 1,5 ya que es un valor habitual para arenas de relleno de $D_{50} = 0,30$ mm. Este valor corresponde a una situación estable además de razonable.

Ahora ya nos encontramos en condiciones de realizar el cálculo del volumen de arenas necesario para llevar a cabo la regeneración de la playa de Serragrossa. En este proyecto se ha cubicado la arena necesaria de aportación utilizando un total de 16 perfiles transversales. A continuación se expone esquemáticamente los pasos seguidos:

- a) Se trazan 16 perfiles transversales, separados entre sí la longitud necesaria, hasta cubrir aproximadamente los 650 metros de playa de este proyecto.
- b) En cada uno de ellos, se dibuja el perfil existente con la ayuda de la información batimétrica de que se dispone.
- c) Se estima la planta de la playa tras la construcción de los diques exentos sumergidos, mediante el empleo de la espiral logarítmica. La intersección de esta planta de la playa con cada uno de los perfiles transversales indica, en cada uno de los 16, el punto donde se situará la línea de costa tras la regeneración.
- d) Se calcula el perfil de la playa, tanto seca como sumergida, y se dibuja en cada uno de los perfiles transversales, teniendo cuidado con hacer coincidir la línea de costa del perfil con la estimada en el paso anterior.
- e) El perfil de equilibrio de la playa ya regenerada intersectará con el perfil actual de la playa en cada uno de los 16 transversales. El área encerrada entre los dos perfiles será la superficie de relleno en ese perfil transversal.
- f) Se aplica la fórmula de cubicación de Puig Adam para obtener el volumen de aportación a partir de las superficies de relleno.

Los 16 perfiles transversales sobre los que se ha basado la estimación del volumen de arena a aportar se representan en unos planos que forman parte del documento nº2 de este proyecto. Por lo tanto, para poder disponer de la información gráfica de los transversales, se remite a este documento.

Tal y como se decía en el paso f), la cubicación de los volúmenes de arena se realizará con el método trapezoidal de Puig Adam. Donde el volumen de arena necesario para las obras de regeneración de la playa de Serragrossa se calculará con la siguiente fórmula:

$$V = \frac{S_1 + S_2}{2} \cdot D_{1-2} + \frac{S_2 + S_3}{2} \cdot D_{2-3} + \dots + \frac{S_{n-1} + S_n}{2} \cdot D_{(n-1)-n}$$

Donde S_i es el área de relleno del perfil transversal i , y D_{i-j} es la distancia entre los perfiles i y j .

En la siguiente tabla se especifican, perfil a perfil, las áreas de relleno. En la columna situada a la derecha se determina el volumen entre dos perfiles transversales consecutivos. Finalmente se obtiene el volumen total de arena a aportar entre los 16 perfiles (véase Documento nº2 Planos).

Así pues, el volumen total de relleno contabilizado es de 88.861,25 m³. A este volumen obtenido del cálculo, debemos aplicarle el factor de relleno al que aludíamos con

anterioridad, y que como comentábamos, se usaba para determinar el exceso necesario de material de préstamo, esto es, para determinar la cantidad de arenas de préstamo necesarias para obtener 1 m³ de relleno de playa. Ya se fijó, en este mismo anejo, el valor de este coeficiente, siendo de 1,5. Por consiguiente, el volumen total que se debe adquirir para la regeneración de la playa de Serragrossa es de 133.291,88 m³.

Tramo	Longitud	Área i	Área i+1	Volumen m ³
0-1	0	0	81,40	0
1-2	33,28	81,40	69,90	2517,63
2-3	25,19	69,90	62,13	1662,92
3-4	38,83	62,13	152,45	4166,07
4-5	36,94	152,45	143,89	5473,40
5-6	52,17	143,89	111,58	6663,80
6-7	46,34	111,58	75,70	4339,16
7-8	46,78	75,70	197,26	6384,53
8-9	43,85	197,26	150,85	7632,31
9-10	44,57	150,85	168,67	7120,50
10-11	36,45	168,67	197,51	6673,63
11-12	50,63	197,51	181,80	9602,23
12-13	46,95	181,80	252,30	10190,50
13-14	56,49	252,30	132,31	10863,31
14-15	44,07	132,31	36,43	3718,19
15-16	62,72	36,43	22,66	1853,06
Total				88.861,25
Factor volumen		x1,5		133.291,88

Figura 14 Volumén de aportación

4. Espigón de control.

En este apartado, se va a calcular el espigón de control a sotamar de la playa. La misión principal del espigón es evitar que se produzcan pérdidas a sotamar de las arenas de aportación, además de conseguir una playa más encajada y, por ello, que sean más durables las obras de regeneración.

El método para el cálculo del espigón es similar al empleado en los diques. Por ello, no se explicarán los pasos seguidos con tanto detalle como se hizo con los diques exentos.

4.1. Altura de ola de cálculo.

Como ya se vio en el caso de los diques, la altura de ola de cálculo vendrá marcada por la condición de rotura por fondo. Por tanto, la fórmula a utilizar será:

$$\frac{H_b}{d_b} = 0.78$$

Para hallar la altura de ola, se debe conocer la profundidad a la cual se llevará el espigón. Como veremos más adelante, esta se sitúa a la cota -3 m. Si además consideramos posibles sobreelevaciones del nivel del mar por mareas, tenemos que $d_b = 4$ m. Por tanto:

$$H_b = 4 * 0.78 = 3.12 \text{ metros}$$

4.2. Parámetros básicos del espigón.

La caracterización del espigón viene determinada por el tipo de barrera que queremos crear en la costa. Al ser un espigón de control, no se busca crear una gran barrera al transporte longitudinal, sino una barrera parcial. Estos parámetros básicos serán:

- Orientación sobre la costa.
- Longitud del espigón.
- Cota de coronación.

Para establecer la longitud del espigón se han tenido en cuenta los criterios que aparecen en el SPM (1.984), donde se recomienda que para playas arenosas la profundidad en la que se ubica la obra debe estar comprendida entre los 1,2 – 3 metros, logrando con ello retener el 75% del transporte litoral, lo que hace que la obra sea factible de ejecutar desde el punto de vista económico.

Asimismo, hay que recordar que el ancho de la playa a regenerar será de 45 metros, por lo que el espigón ha de ser mayor a dicha longitud. Teniendo en cuenta las batimétricas y lo dicho anteriormente, llegamos a la conclusión de que lo ideal es llevar el espigón hasta las cota -3 metros. Entonces el espigón será de 100 metros.

Para considerar la orientación del espigón, tenemos en cuenta que para no alterar en demasiado la costa a sotamar, lo ideal es que el espigón sea perpendicular a la línea de costa.

Por último la cota de coronación del espigón alcanzará 1,5 metros de altura.

4.3. Materiales constituyentes y sección transversal.

Los materiales constituyentes de los diques serán bloques de escollera y todouno de cantera para el núcleo. Las dimensiones de los bloques se estudiarán posteriormente en este anejo. La sección transversal de los diques será la misma y de geometría trapezoidal, como en el caso de los diques exentos.

Seguidamente, se exponen los parámetros necesarios para definir geométricamente la sección transversal:

- El ancho de coronación de 8 m (mayor que el de los existentes).
- Los dos taludes (a barlomar y sotamar) tendrán valor de 1,5:1 (horizontal/vertical).
- La cota de coronación será constante de 1,5 metros.
- El calado o profundidad de colocación del morro será de -3 metros.

En el **plano XX** se muestra una definición gráfica de la sección transversal del espigón.

A continuación, se abordará el análisis de la estabilidad y cálculo del espigón. Para ello, se hará uso de la formulación recomendada en el SPM Volumen II (1.984).

4.4. Análisis de estabilidad y cálculo del espigón.

Este análisis se hace de la misma manera que se hizo para los diques exentos. Aunque hay que hacer notar que la misión de los espigones no es la misma que al de los diques, pero la acción que determina su constitución sí es la misma: el oleaje.

A diferencia de los diques, en este caso no habrá capas intermedias y solo estará compuesto del manto principal y núcleo. Pese a ello, las funciones de ambos elementos seguirán siendo las mismas. Se prescinde de la capa intermedia puesto que el espigón no está expuesto al oleaje tanto como los diques y no hay riesgo de posible pérdida de núcleo.

Para calcular el peso de las piezas que componen el manto, recurriremos de nuevo a la expresión de Hudson:

$$W = \frac{\gamma_r * H^3}{(S_r - 1)^3 * K_d * \cot \alpha}$$

Con respecto a los parámetros utilizados en el cálculo de las piezas del dique, aquí solo variarán el valor de $\cot \alpha = 1,5$ y de $H = 3,12$ m, por lo que el valor de K_d en el caso del morro será 1,9. En el espigón también colocaremos dos capas.

Además, como ya se hizo con los diques, la altura de ola la reduciremos para un nivel de daño estipulado. Este nivel de daño lo fijamos en $D=20-30\%$ como en los diques. Por tanto, la altura de ola que nos queda será:

$$H = \frac{3,12}{1,37} = 2,28 \sim 2,3 \text{ metros}$$

Teniendo en cuenta estas consideraciones, las piezas del manto principal tendrán un peso de:

- Cuerpo:

$$W = \frac{2,7 * 2,30^3}{(2,634 - 1)^3 * 1,5 * 2} = 2,51 \text{ T}$$

- Morro:

$$W = \frac{2,7 * 2,30^3}{(2,634 - 1)^3 * 1,5 * 1,9} = 2,64 \text{ T}$$

Para conocer el espesor del manto principal, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$r = n * K_{\Delta} * \left(\frac{W}{\gamma_r}\right)^{\frac{1}{3}}$$

Siendo:

- n, el número de capas del manto principal. Se ha tomado n=2.
- K Δ , el coeficiente de capa. Se toma según la tabla 7-13 del SPM, K Δ = 1.
- W, el peso de la escollera del manto.
- γ_r , el peso específico de la escollera. Se considera un valor de 2,7 T/m³.

Con todo ello, tenemos que los espesores del manto principal son:

$$e (\text{cuerpo}) = 2 \text{ metros} \quad e (\text{morro}) = 2 \text{ metros}$$

Para calcular el peso del material del núcleo se hace uso de la siguiente expresión:

$$W_n = \left(\frac{W}{125}, \frac{W}{7,5}\right)$$

Donde W es el peso de las piezas del manto principal. Con ello, tenemos que los elementos del núcleo tendrán un peso de:

$$W = (21 - 352)Kg$$

4.5. Resumen de Resultados.

A continuación, se muestra una tabla que resume los resultados obtenidos para determinar la constitución de la sección transversal del espigón de control a sotamar de la playa.

Capa		Peso escollera	Espesor (m)
Manto principal	Cuerpo	2,64 T	2
	Morro	2,64 T	2
Núcleo	-	21 – 352 Kg	-

Tabla 8 Resumen resultados espigón de control

