

Diseño funcional y ambiental de diques exentos de baja cota de coronación

L. BRICIO GARBERÍ (*), V. NEGRO VALDECANTOS (**), J.J. DÍEZ GONZÁLEZ (***) y J.S. LÓPEZ GUTIÉRREZ (****)

RESUMEN La investigación que se presenta en este artículo aborda el diseño de los diques exentos, por constituir éstos un tipo de obras de defensa costera con los que poder luchar de una forma estable y sostenible contra muchos de los problemas de erosión que existen en las playas.

Se plantea como objetivo principal la formulación de un método de diseño funcional y ambiental (no estructural) que permita definir las características fundamentales de un dique exento en función del efecto que se quiera inducir en la costa, satisfaciendo las demandas sociales y preservando o mejorando la calidad del medio ambiente litoral. Además, se busca la aplicabilidad general del método mediante la consideración de relaciones entre variables de distinta naturaleza (climáticas, geomorfológicas y geométricas) que influyen en los cambios experimentados en la costa tras la construcción del dique exento.

El estudio de las relaciones entre las distintas variables se realiza sobre los datos de una base de diecinueve diques exentos reales, existentes en el litoral mediterráneo español, y sigue una metodología basada en el planteamiento de monomios adimensionales y en la búsqueda de relaciones de dependencia entre ellos.

Finalmente, la discusión de los resultados obtenidos conduce a la propuesta de un método de diseño que utiliza algunas de las relaciones gráficas encontradas entre las variables estudiadas y con el que se consigue el objetivo principal anteriormente expuesto.

FUNCTIONAL AND ENVIRONMENTAL DESIGN OF DETACHED, LOW CREST LEVEL BREAKWATERS

ABSTRACT *The research work as presented in this article covers the design of detached breakwaters since they constitute a type of coastal defence work with which to combat many of the erosion problems found on beaches in a stable, sustainable fashion.*

The main aim of this work is to formulate a functional and environmental (non structural) method of design enabling the fundamental characteristics of a detached breakwater to be defined as a function of the effect it is wished to induce on the coast whilst meeting social demands and preserving or improving the quality of the littoral environment. The general applicability of the method is also sought by means of considering relations between variables of different natures (climatic, geomorphologic and geometric) influencing the changes experienced on the coast after the detached breakwater has been built.

The study of the relations between the different variables is carried out on the data from a base of nineteen actual, existing detached breakwaters on the Spanish Mediterranean coastline and follows a methodology based on the implementation of non-dimensional monomials and on a search for relations of dependency between them.

Finally, a discussion on the results obtained lead to a proposal for a design method that uses some of the graphic relations found between the variables studied with which the aforesaid main objective is achieved.

Palabras clave: Dique exento, Diseño funcional, Tómbolo, Saliente, Hemitómbolo.

Keywords: Detached breakwater, Functional design, Tombolo, Salient, Hemitombolo.

1. INTRODUCCIÓN

La costa constituye una estrecha franja, fuertemente presionada y sometida a grandes desequilibrios como consecuencia

de múltiples y variadas causas, tanto naturales (oleaje, mareas, subida del nivel medio del mar...) como derivadas de la acción directa del hombre (construcción de obras marítimas que interrumpen el transporte de sedimentos, urbanismo ma-

(*) Doctora Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Técnico Superior del Ministerio de Fomento. Ministerio de Fomento. Pº de la Castellana 67, 28071 Madrid.

(**) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Profesor Titular de Universidad (Puertos)E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. c/ Profesor Aranguren, s/n, 28040 Madrid.

(***) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Catedrático (Oceanografía). E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. c/ Profesor Aranguren, s/n, 28040 Madrid.

(****) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Profesor Asociado de Universidad (Puertos). E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. c/ Profesor Aranguren, s/n, 28040 Madrid.



FIGURA 1. Playa de Blanes (Término Municipal de Blanes, Gerona) –izquierda– y Playa del Posiguet (Término Municipal de Alicante, Alicante) –derecha–.

sivo en áreas costeras, etc.). Es por ello que existen en la actualidad un gran número de playas con problemas erosivos, y que la búsqueda de soluciones para protegerlas y garantizar su estabilidad es, hoy por hoy, una necesidad prioritaria, tanto desde un punto de vista social como ambiental. De entre las posibles actuaciones en la costa susceptibles de hacer lograr este fin se encuentra la construcción de diques exentos.

Los diques exentos son obras marítimas exteriores, aisladas y sensiblemente paralelas a la línea de costa, que se construyen a una cierta distancia de la orilla. Protegen de la acción del oleaje un determinado tramo del litoral, creando una zona de abrigo al reducir la cantidad de energía que penetra en él, y siendo potencialmente capaces de crear zonas de acreción en el tramo de costa que protegen. Se trata de estructuras artificiales inspiradas en el funcionamiento de formaciones naturales tales como arrecifes, barras o islotes próximos a la orilla (Figura 1).

Estas obras constituyen una tipología estructural utilizada para la protección de playas desde mediados del siglo XX, fundamentalmente desde la década de los años setenta. Los resultados obtenidos con ellos desde entonces han sido diversos, desde notables éxitos hasta reconocidos fracasos.

Su estudio ha sido abordado en múltiples ocasiones y la propuesta de un método de diseño para este tipo de obras ha sido, y es, un objetivo general perseguido por muchos investigadores. Sin embargo, pese a lo prolijo de los estudios realizados en este campo, existe una notable dispersión de esquemas analíticos de dimensionamiento, lo cual pone de manifiesto la dificultad real al abordar el diseño de un dique exento por la carencia de unas pautas claras, fiables y sencillas. Como consecuencia, la adopción de este tipo de obra como solución para la protección o estabilización de una playa suele resultar menos atractiva que la de otras posibles actuaciones.

Esta realidad contrasta con la teórica conveniencia de utilizar diques exentos frente a otro tipo de obras, ya que éstos resultan ventajosos desde la perspectiva de una menor afectación a la dinámica litoral, porque, a priori, no interrumpen el transporte longitudinal de sedimentos. Es por ello que, desde el Laboratorio de Puertos de la Escuela de Caminos de Madrid, se ha llevado a cabo una investigación sistemática, orientada al desarrollo de un método para el diseño funcional y ambiental de diques exentos, que permita definir sus características fundamentales en función del efecto que se quiera inducir en la costa, satisfaciendo las demandas sociales y preservando o mejorando la calidad del medio ambiente litoral.

2. OBJETIVOS

Se trata de plantear el problema desde el punto de vista científico, técnico y de proyecto, partiendo de la base de que se conocen las características climáticas, geomorfológicas y de la dinámica litoral del lugar donde se estudia ubicar el dique exento, y de que se sabe cuál es el resultado que se quiere inducir en la costa tras su construcción, por lo que se tiene que poder fijar “a priori” el estado final de equilibrio. Por tanto, el objetivo perseguido, es el de plantear un modelo analítico predictivo para el diseño funcional de diques exentos, de aplicabilidad general, que permita:

1. Tener en cuenta las características climáticas y geomorfológicas del lugar donde se va a proyectar la obra.
2. Determinar la correcta ubicación del dique en la franja litoral considerando la interacción entre la obra y el transporte longitudinal de sedimentos y teniendo en cuenta los conceptos de profundidad litoral y de cierre.
3. Relacionar las características geométricas y estructurales del dique con los efectos producidos en la costa (la potencial posibilidad de generar lenguas de arena sumergidas o de dar lugar a formaciones tipo tómbolo o hemitómbolo).
4. Satisfacer las demandas sociales y preservar o mejorar la calidad del medio ambiente litoral al favorecer con sus efectos en la costa el uso y disfrute de las playas y permitir, simultáneamente, el desarrollo de biocenosis típicas de sistemas arrecifales, potenciando así la biodiversidad del medio.

3. METODOLOGÍA

Se inició la investigación llevando a cabo una profunda revisión del estado del arte en materia de diques exentos y se encontró que existen muchos modelos de diseño que relacionan el tipo de respuesta inducida en la costa con los dos parámetros geométricos básicos de este tipo de obras, que son: la longitud del dique exento y la distancia de éste a la línea inicial de orilla.

Sin embargo, prácticamente ninguno de ellos relaciona la respuesta de la costa tras la construcción del dique con variables de otra naturaleza, como las que caracterizan el clima marítimo local o la geomorfología del lugar. Esto implica que dichos modelos no pueden aplicarse generalizadamente, por-

que como los efectos producidos en la costa por un dique exento son notablemente sensibles al oleaje incidente y, por tanto, a los estados del mar y a la batimetría local, los métodos de diseño que no consideran como variables del problema las condiciones de contorno sólo pueden aplicarse en aquellos casos en los que dichas condiciones de contorno climáticas y geomorfológicas se asemejen a las de los casos de origen que fueron considerados para la formulación del modelo.

Tras este análisis se concluyó que para dotar al método de diseño de ese carácter general, era necesario estudiar las posibles relaciones entre variables de distinta naturaleza que tuviesen influencia en los cambios hidrodinámicos y morfológicos de la costa tras la construcción de un dique exento. Para ello se estableció una metodología de trabajo basada en tres cuestiones clave:

1. En primer lugar, la selección de diques exentos a considerar como fuentes de origen de los datos de estudio.

Se partió de la consideración del conjunto total de diques existentes en el litoral español y se establecieron unos criterios de selección que permitiesen acotar la muestra y tener en cuenta sólo aquellos de características homogéneas para los que los parámetros que tienen influencia en la respuesta de la costa pero que no iban a ser considerados como variables del problema fueran prácticamente iguales. (Posteriormente, las hipótesis adoptadas como criterios de selección habrían de ser entendidas como prescripciones a tener en cuenta al aplicar el método de diseño obtenido como resultado de la investigación).

Los criterios de selección fueron los siguientes: considerar diques exentos aislados en playas de arena abiertas, de baja cota de coronación (francobordo entre -0,50 y 2 m) y estructura permeable con sección granular homogénea, ubicados en zonas donde la carrera de marea fuera menor o igual a 1 m. Al aplicar estos filtros el conjunto definitivo de diques exentos considerados como fuentes de datos quedó reducido a un conjunto de 19 obras, que son las que se recogen en la Figura 2 y en la Tabla 1.

2. En segundo lugar, la elección de variables a estudiar (teniendo en cuenta sólo aquellas que son determinantes con el fin de simplificar el problema), y la definición de monomios adimensionales entre los que buscar relaciones de dependencia.

El conjunto de variables consideradas en la investigación que necesitaron ser medidas o calculadas para cada uno de los 19 diques exentos anteriores, son las que se recogen en la Tabla 2, y sus valores son los de la Tabla 3. Asimismo, el conjunto de monomios adimensionales empleados para estudiar las relaciones entre las distintas variables son los que figuran en la Tabla 4.

3. El tercer y último paso de la metodología de trabajo consistió en la búsqueda de relaciones entre el factor geométrico del dique (B/X) y el resto de monomios adimensionales, y el ajuste de funciones entre los monomios para los que se encontrase algún tipo de relación utilizando el método de los mínimos cuadrados.

4. RESULTADOS

De entre los casos estudiados sólo se obtuvieron resultados claros y positivos para las relaciones entre:

- B/X y NI (tanto NI_0 como NI_d): Esta relación permite vincular las características geométricas básicas del dique exento con las características climáticas y morfológicas del emplazamiento (Figura 4).

La nube de puntos presenta una tendencia creciente y se concentra dentro de una franja limitada por dos bandas límites de forma exponencial, cuyas funciones de ajuste presentan un coeficiente de regresión superior a 0,99.

- B/X y X/X_{sa} : Se relacionan las características geométricas del dique exento con las de la dinámica litoral, permitiendo determinar la posición relativa de la obra dentro de la zona *surf* (Figura 6).



FIGURA 2. Mapa de situación de los diques exentos considerados en la investigación.

| CÓDIGO | Provincia | Término Municipal | Playa | Respuesta de la costa |
|--------|-----------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| T1 | Tarragona | Tarragona (Altafulla) | Tamarit | Saliente |
| T2 | Tarragona | Cambrils | Cap de Sant Pere | Saliente |
| C1 | Castellón | Benicásim | Terrers | Saliente |
| C2 | Castellón | Burriana | El Serradal | Tómbolo |
| C3 | Castellón | Chilches | Chilches | Tómbolo |
| C4 | Castellón | Chilches | Chilches | Tómbolo |
| A1 | Alicante | Denia | Les Basetes | Limitada/Nula |
| A2 | Alicante | Altea | La Roda | Saliente |
| A3 | Alicante | Alicante | Postiguet | Tómbolo |
| MU1 | Murcia | Águilas | Poniente | Saliente |
| AL1 | Almería | Almería | Las Conchas | Saliente |
| AL2 | Almería | Roquetas de Mar | Aguadulce | Saliente |
| AL3 | Almería | Adra | San Nicolás | Tómbolo |
| G1 | Granada | Almuñécar | Puerta del Mar | Saliente |
| MA1 | Málaga | Rincón de la Victoria | Cala del Moral | Saliente |
| MA2 | Málaga | Málaga | Malagueta | Saliente |
| MA3 | Málaga | Estepona | La Rada | Limitada/Nula |
| CA1 | Cádiz | La Línea | Levante | Saliente |
| ME1 | Melilla | Melilla | Cárabos | Limitada/Nula |

TABLA 1. Conjunto de diques exentos del litoral mediterráneo empleados en la investigación.

La función ajustada gráficamente a la nube de puntos es una función polinómica de cuarto grado, que presenta un factor de ajuste elevado (coeficiente de regresión de 0,9). Conviene apuntar que su forma es semejante a la de distribución del transporte longitudinal de sedimentos, que alcanza un máximo a una distancia de 2/3 de la distancia entre la línea de orilla y la línea de rotura del frente de ondas.

- **B/X y Y/X:** Permite establecer el tipo de respuesta que se quiere inducir en la costa a resguardo del dique exento y relacionarla con las características fundamentales de la obra (Figura 5).

En este caso no se encontró una función de ajuste por el método de los mínimos cuadrados, pero sí se observó la existencia de áreas gráficas diferenciadas según los valores adoptados por el factor geométrico B/X , para los casos de formación de respuesta limitada o nula, saliente poco desarrollado y saliente bien desarrollado.

El análisis de dichos resultados condujo a la propuesta de un método de diseño con el que se consigue el objetivo principal de la investigación, y que hace uso de las relaciones encontradas entre los monomios anteriores.

5. MÉTODO DE DISEÑO PROPUESTO

Se trata de un método que se desarrolla en cinco pasos, y que se puede aplicar una vez conocidos los datos de partida del problema y fijada la respuesta de la costa que se desea obtener. Concretamente exige:

1. Asumir que es aplicable al diseño de un dique exento aislado, rectilíneo y sensiblemente paralelo a la costa, de

baja cota de coronación (francobordo entre $-0,50$ y 2 m) y de estructura permeable con sección granular homogénea.

2. Seleccionar para la ubicación del dique exento un tramo de costa abierto, no afectado por la presencia de ninguna otra obra o elemento que altere en las características del oleaje incidente, y donde la carrera de marea no sea superior a 1 m.
3. Conocer, como datos de partida relativos al lugar de emplazamiento de la obra, previamente estudiados y calculados, los relacionados con el clima marítimo local, la playa, el material sedimentario y la dinámica litoral, definidos en la Tabla 2.
4. Fijar la respuesta de la costa que se desea obtener (tómbolo, hemitómbolo o respuesta limitada).
5. Considerar una aportación artificial de sedimentos, estable conforme a las características de la dinámica litoral local, con el fin de garantizar y acelerar la consecución del estado final de equilibrio que se quiere inducir en la costa, así como de minimizar los posibles efectos negativos de la erosión en las playas limítrofes con el tramo en el que se va a actuar.

Una vez verificadas todas las premisas y condiciones anteriores, los pasos a seguir serían los siguientes:

5.1. PASO 1

Comprobar, a modo de recomendación previa, si se está en un caso en el que el peralte del oleaje en profundidades indefinidas no supera el valor de $0,034$. En caso de superarse ese valor no se recomienda el uso de las gráficas propuestas en la metodología porque se estaría fuera del rango de valo-

| Parámetros relacionados con el clima marítimo local | | | |
|---|---|-----|-------------------------------|
| H_{12} | Altura de ola significativa en aguas profundas excedida 12h al año en régimen medio. | | |
| T_s | Periodo significativo del oleaje correlado con la altura de ola H_{12} . | | |
| L_0 | Longitud de onda del oleaje en aguas profundas calculada con el periodo significativo. | | |
| L_d | Longitud de onda del oleaje a pie de dique calculada con el periodo significativo. | | |
| Parámetros relacionados con el dique exento | | | |
| X | Distancia del dique exento a la línea inicial de orilla. | | |
| B | Longitud del dique exento. | A | Anchura de coronación. |
| CC | Cota de coronación. | d | Profundidad del dique exento. |
| Parámetros relacionados con la playa y el material sedimentario | | | |
| m_t | Pendiente media teórica de la playa sumergida. ($m_t = d/X$) | | |
| S | Relación entre el peso específico del sedimento y el del fluido. | | |
| Y | Longitud del saliente formado a resguardo del dique exento. | | |
| Respuesta | Tipo de respuesta inducida en la costa (tómbolo, saliente, respuesta limitada/nula). | | |
| Parámetros relacionados con la dinámica litoral | | | |
| d_{sa} | Profundidad litoral calculada a partir de la fórmula de Hallermeier (1983). $d_{sa} = \frac{2,9 \cdot H_{12}}{\sqrt{(S-1)}} - \frac{110 \cdot H_{12}^2}{(S-1) \cdot g \cdot T_s^2}$ | | |
| X_{sa} | Ancho de la franja litoral o zona surf. ($X_{sa} = d_{sa} / m_t$) | | |
| NI_0 | Número de Iribarren en aguas profundas, que relaciona la pendiente media de la playa con el peralte del oleaje en profundidades indefinidas. $NI_0 = \frac{m_t}{\sqrt{\frac{H_{12}}{L_0}}}$ | | |
| NI_d | Número de Iribarren a pie de dique, que relaciona la pendiente media de la playa con el peralte del oleaje a la profundidad en la que se encuentra el dique exento. $NI_d = \frac{m_t}{\sqrt{\frac{H_{12}}{L_d}}}$ | | |

TABLA 2. Variables con influencia en la respuesta de la costa tras un dique exento.

res obtenidos con los datos de origen para los que se garantiza la aplicabilidad del método (Figura 3).

5.2. PASO 2

A partir de la gráfica de la Figura 4 y del dato del Número de Iribarren en aguas profundas, obtener un primer intervalo de valores posibles del factor geométrico (B/X) del dique exento que se quiere diseñar, para los cuales es esperable una respuesta significativa de la costa.

5.3. PASO 3

En función de la magnitud de la respuesta que se quiere inducir en la costa, afinar el rango de valores posibles para el factor geométrico a partir de los resultados obtenidos en la gráfica de la Figura 5, que relaciona el factor geométrico del dique exento (B/X) con el factor de posición del saliente que se va a generar (Y/X), siendo Y la magnitud del saliente emergido formado a resguardo del dique exento y medido desde la línea inicial de orilla. Esto es:

Tómbolo $B/X > 1,67$ (en todo caso $B/X > 0,85$)

Hemitómbolo

Saliente bien desarrollado ($Y/X > 0,5$) $B/X \in [1'14, 1'67]$

Saliente poco desarrollado ($Y/X < 0,5$) $B/X \in [0'56, 1'14]$

5.4. PASO 4

A partir de la gráfica de la Figura 6 y teniendo en cuenta el intervalo estimado de posibles valores para el factor geométrico B/X obtenido en los pasos anteriores, se fijaría la posición relativa del dique exento con respecto a la línea de rompientes (X/X_{sa}). De esta forma se estaría tomando la decisión de situar el dique en la zona litoral o activa del perfil de playa (si la profundidad a pie de dique es menor que la profundidad litoral: $X < X/X_{sa}$ y $d < d_{sa}$), en la zona de transición o asomeramiento (si la obra exenta se encuentra entre la profundidad activa y la de cierre: $d_{sa} < d < d_c$), o en profundidades mayores (profundidades *offshore* si se supera el punto neutro o la profundidad de cierre: $d > d_c$).

| CÓDIGO | Parámetros relacionados con el dique exento | | | | | Parámetros relacionados con la playa | | Parámetros relacionados con el clima marítimo local | | | | Parámetros relacionados con la dinámica litoral | | | |
|--------|---|-------|--------|-------|-------|--------------------------------------|-------|---|-----------|-----------|-----------|---|--------------|--------|--------|
| | X (m) | B (m) | CC (m) | A (m) | d (m) | m_h | Y (m) | H_{12} (m) | T_s (s) | L_0 (m) | L_d (m) | d_{sa} (m) | X_{sa} (m) | NI_0 | NI_d |
| T1 | 180 | 100 | 0,50 | 5 | 4,0 | 0,022 | 82 | 2,30 | 7 | 83,43 | 43,13 | 4,66 | 210 | 0,134 | 0,096 |
| T2 | 195 | 120 | 2,00 | 12 | 4,5 | 0,023 | 34 | 2,30 | 7 | 83,43 | 47,34 | 4,66 | 202 | 0,139 | 0,105 |
| C1 | 149 | 205 | 0,70 | 10 | 3,0 | 0,020 | 132 | 2,83 | 7 | 85,65 | 34,66 | 5,55 | 276 | 0,111 | 0,070 |
| C2 | 50 | 82 | 0,50 | 9 | 3,0 | 0,060 | 50 | 2,83 | 7 | 85,65 | 34,66 | 5,55 | 93 | 0,330 | 0,210 |
| C3 | 138 | 138 | 0,50 | 8 | 2,0 | 0,014 | 138 | 2,83 | 7 | 85,65 | 23,86 | 5,55 | 389 | 0,079 | 0,041 |
| C4 | 177 | 150 | 0,50 | 7 | 2,0 | 0,011 | 177 | 2,83 | 7 | 85,65 | 23,86 | 5,55 | 492 | 0,062 | 0,033 |
| A1 | 290 | 183 | -0,50 | 12 | 2,5 | 0,009 | 24 | 3,07 | 8 | 92,05 | 31,59 | 6,01 | 697 | 0,047 | 0,028 |
| A2 | 180 | 190 | 0,20 | 12 | 5,0 | 0,028 | 59 | 3,07 | 8 | 92,05 | 56,52 | 6,01 | 216 | 0,152 | 0,119 |
| A3 | 78 | 155 | 1,00 | 7 | 3,0 | 0,038 | 78 | 3,07 | 8 | 92,05 | 37,25 | 6,01 | 156 | 0,211 | 0,134 |
| MU1 | 120 | 200 | 1,00 | 12 | 4,0 | 0,033 | 105 | 3,86 | 7 | 81,75 | 42,27 | 6,95 | 209 | 0,153 | 0,110 |
| AL1 | 120 | 190 | 0,50 | 8 | 4,5 | 0,038 | 92 | 3,14 | 8 | 94,91 | 53,86 | 6,16 | 164 | 0,206 | 0,155 |
| AL2 | 88 | 100 | 0,50 | 6 | 3,0 | 0,033 | 63 | 3,14 | 8 | 94,91 | 38,41 | 6,16 | 185 | 0,183 | 0,117 |
| AL3 | 72 | 102 | 0,50 | 6 | 3,5 | 0,049 | 72 | 3,14 | 8 | 94,91 | 43,92 | 6,16 | 127 | 0,267 | 0,182 |
| G1 | 130 | 150 | 0,00 | 8 | 6,5 | 0,050 | 108 | 2,85 | 8 | 105,65 | 77,19 | 5,79 | 116 | 0,304 | 0,260 |
| MA1 | 200 | 175 | 0,50 | 10 | 5,0 | 0,025 | 80 | 2,85 | 8 | 105,65 | 64,87 | 5,79 | 232 | 0,152 | 0,119 |
| MA2 | 180 | 205 | 0,25 | 6 | 5,0 | 0,028 | 30 | 2,85 | 8 | 105,65 | 64,87 | 5,79 | 209 | 0,169 | 0,133 |
| MA3 | 170 | 160 | 0,00 | 12 | 3,5 | 0,021 | 14 | 3,85 | 9 | 137,48 | 63,61 | 7,78 | 378 | 0,123 | 0,084 |
| CA1 | 145 | 165 | 1,80 | 15 | 3,7 | 0,024 | 30 | 3,85 | 9 | 137,48 | 66,66 | 7,78 | 322 | 0,144 | 0,100 |
| ME1 | 186 | 200 | -0,50 | 10 | 3,5 | 0,019 | 13 | 3,14 | 8 | 94,91 | 43,92 | 6,16 | 327 | 0,103 | 0,070 |

TABLA 3. Valores de las variables consideradas en la investigación para cada uno 19 diques exentos.

| Monomios adimensionales relacionados con las características del dique | |
|--|--|
| B/X | Factor geométrico del dique o ratio entre la longitud del dique exento (B) y su distancia inicial a la línea de orilla (X). |
| Monomios adimensionales relacionados con las características del entorno | |
| H_{12}/L_0 | Peralte del oleaje en aguas profundas, donde H_{12} es la altura de ola significativa excedida doce horas al año en régimen medio y L_0 es la longitud de onda del oleaje en aguas profundas calculada con el periodo significativo del oleaje (T_s). |
| H_{12}/L_d | Peralte del oleaje a la profundidad a la que se encuentra el dique, donde H_{12} es la altura de ola significativa excedida doce horas al año en régimen medio y L_d es la longitud de onda del oleaje a pie de dique calculada con el periodo significativo del oleaje (T_s). |
| NI_0 | Número de Iribarren en profundidades indefinidas, que relaciona la pendiente media teórica de la playa (m_h) con la raíz cuadrada del peralte del oleaje en aguas profundas (H_{12}/L_0). |
| NI_d | Número de Iribarren a pie de dique, que relaciona la pendiente media teórica de la playa (m_h) con la raíz cuadrada del peralte del oleaje a la profundidad en la que se encuentra el dique exento (H_{12}/L_d). |
| X/X_{sa} | Factor de posición del dique o ratio entre la distancia inicial a la línea de orilla del dique exento (X) y el ancho de la franja litoral o zona surf (X_{sa}), en la que tiene lugar la mayor parte del transporte longitudinal de los sedimentos. |
| d/d_{sa} | Factor de profundidad del dique o ratio entre la profundidad a la que se encuentra ubicado el dique exento (d) y la profundidad límite litoral (d_{sa}). |
| Y/B | Factor geométrico del saliente o ratio entre la longitud del saliente formado a resguardo del dique exento (Y) y la longitud de la estructura (B). |
| Y/X | Factor de posición del saliente o ratio entre la longitud del saliente formado a resguardo del exento (Y) y la distancia del dique a la línea inicial de orilla (X). |

TABLA 4. Monomios adimensionales considerados en la investigación.

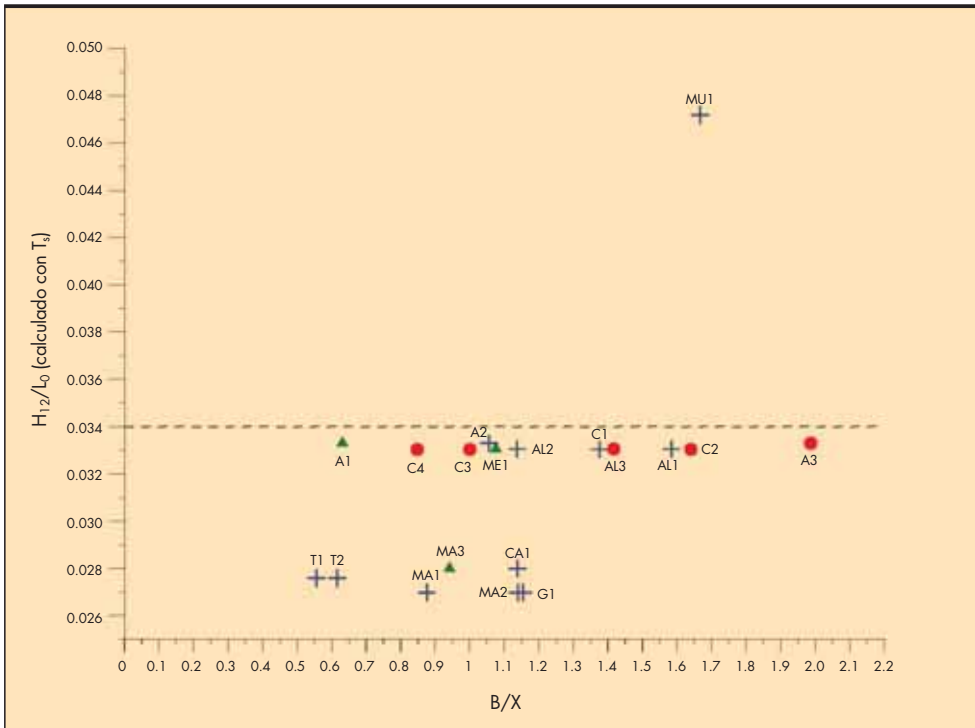


FIGURA 3. Relación entre el peralte del oleaje en aguas profundas y el factor geométrico del dique exento.

Asimismo, fijado el valor de XX_{sa} , se estaría en disposición de determinar el valor del factor geométrico del dique exento (B/X) y el de la distancia de la estructura a la línea inicial de orilla (X). Con este último se calcularía el valor de la longitud del dique exento (B).

5.5. PASO 5

Con la gráfica de la Figura 7, y a partir del dato del Número de Iribarren a pie de dique (NI_d), se comprobaría si el valor obtenido del factor geométrico del exento se encuentra dentro del rango de valores obtenidos con los datos de origen.

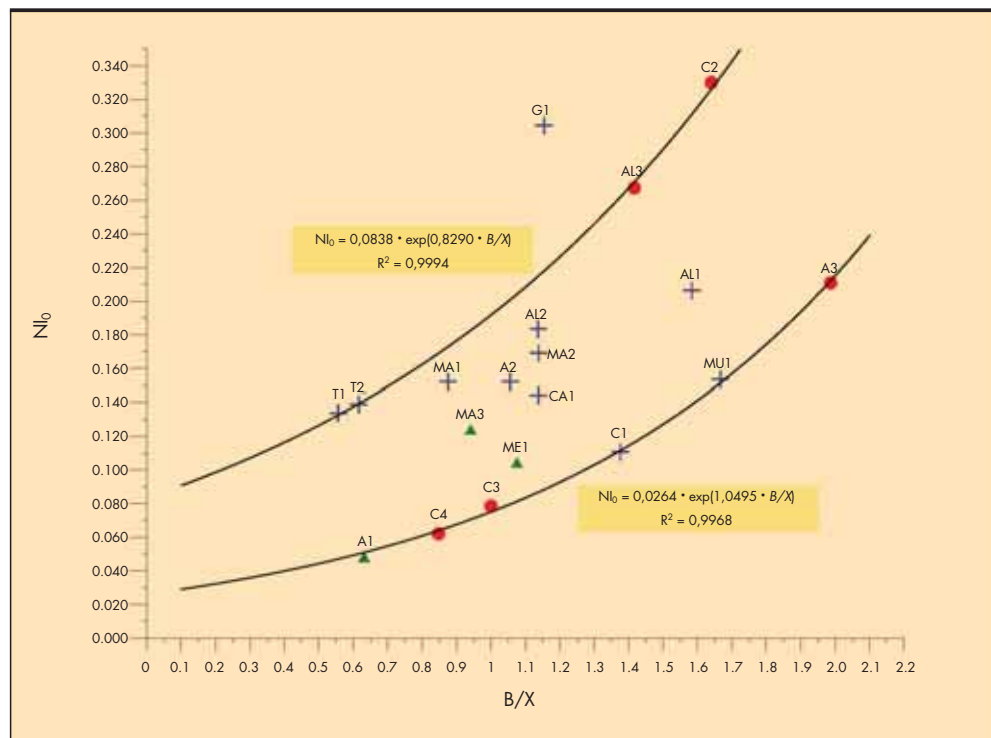


FIGURA 4. Relación entre el Número de Iribarren en profundidades indefinidas y el factor geométrico del dique exento.

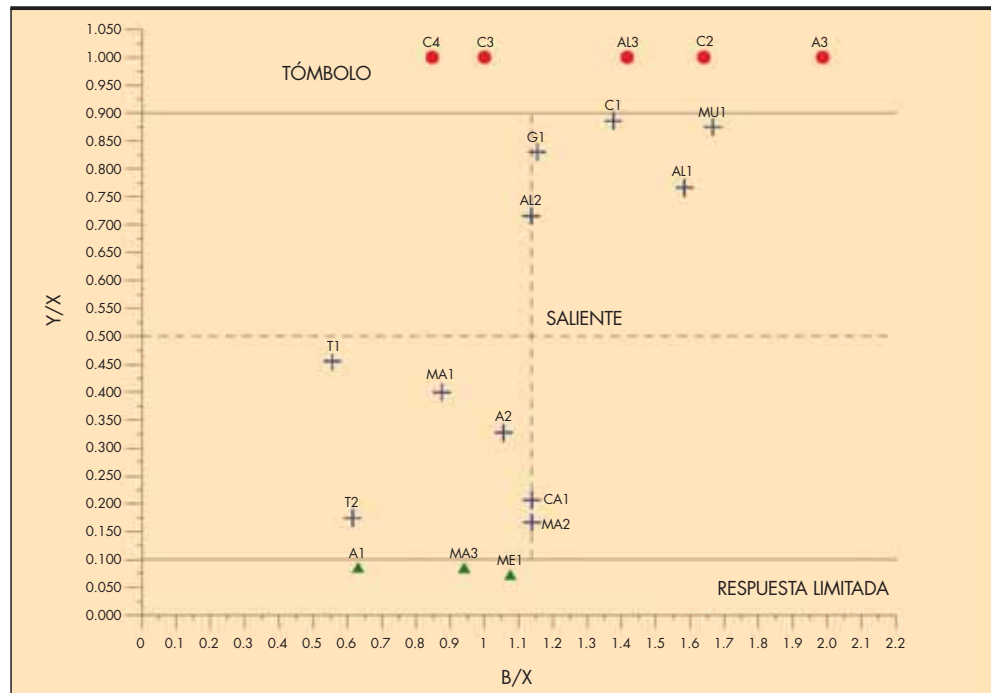


FIGURA 5. Relación entre el factor de posición del saliente formado en la costa y el factor geométrico del dique exento.

6. CONCLUSIONES

La investigación llevada a cabo concluye con la propuesta de un método de diseño de diques exentos que responde a los objetivos planteados inicialmente, si bien es fundamental llamar la atención sobre su aplicabilidad limitada, al menos temporalmente, para el caso de diques exentos aislados que cumplan con las hipótesis inicialmente planteadas en la investigación, las cuales constituyen las prescripciones del

método de diseño propuesto. Dado que el método se basa en unas gráficas de diseño ajustadas a datos reales de diques existentes en un determinado lugar (litoral mediterráneo español), éste sólo será válido desde un punto de vista cuantitativo para casos en los que las condiciones de contorno puedan asemejarse a las de los casos de origen.

Es por ello, que se requiere continuar con la investigación, ampliando en trabajos posteriores la muestra de datos con ensayos en modelo físico y en modelo numérico, y con

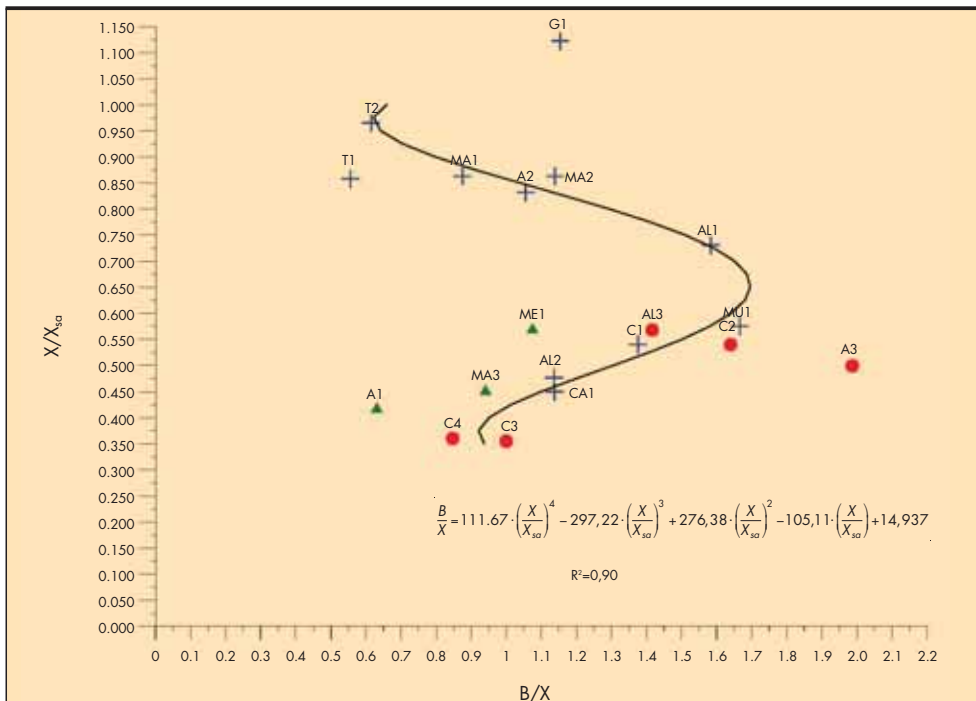


FIGURA 6. Relación entre el factor de posición y el factor geométrico del dique exento.

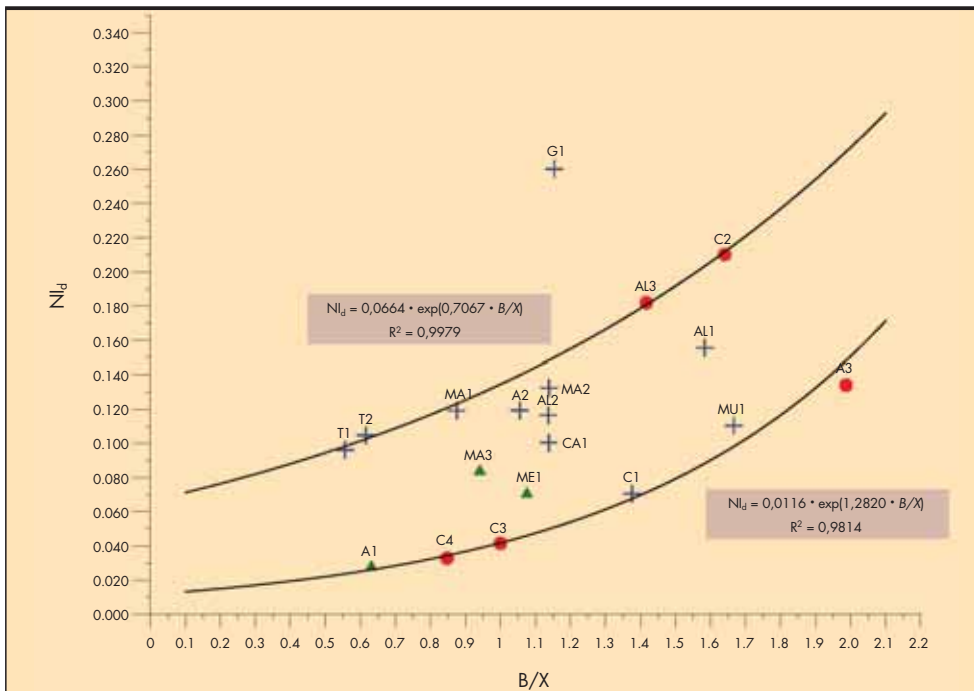


FIGURA 7. Relación entre el Número de Iribarren a pie de dique y el factor geométrico del exento.

datos de diques de otros lugares, con el fin de mejorar el ajuste de las funciones obtenidas, de encontrar relaciones con otras variables y de generalizar en mayor medida la aplicabilidad del método.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado dentro del programa de formación de investigadores de la Universidad Politécnica de Madrid.

Los autores desean agradecer la contribución y el apoyo prestados por la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, y por el Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC), por permitir el acceso a sus archivos y la consulta de documentación, así como la lectura de los trabajos de investigación en materia de diques exentos, fundamentales para la desarrollo de la investigación presentada.

8. BIBLIOGRAFÍA

Bricio, L., Negro, V. y Diez, J.J. 2008. Geometric detached breakwater indicators on the Spanish Northeast Coastline. *Journal of Coastal Research*, Vol. 24, No. 5, (pp. 1289-1303). ISSN: 0749-0208.

Chasten, M.A., Rosati, J.D., McCormick, J.W. y Randall, R.E. 1993. *Engineering Design Guidance for Detached Breakwaters as Shoreline Stabilization Structures*. Technical Report

CERC-93-19. Vicksburg (Mississippi): U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center.

Diez, J.J. 1982. Shore protection of Almanzora Coast. *Proceedings of the IV Congress International Association of Engineering Geology*, Nueva Deli 1982, Vol. VII, (pp.231-245).

Hallermeier, R.J. 1983. Sand transport limits in coastal structure design. *Proceedings of the 2nd Coastal Structures Conference, March 1983, Arlington (Virginia)*, (pp. 703-716). American Society of Civil Engineers (ASCE).

Herbich, J.B. (ed.) 2000. *Handbook of Coastal Engineering*. Nueva York: McGraw-Hill, Chapter 5.

Hsu, J.R.C. y Silvester, R. 1990. Accretion behind single offshore breakwater. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 116, No. 3, mayo/junio 1990, (pp. 362-380).

Silvester, R. y Hsu, J.R.C. 1997. Coastal Stabilization. *World Scientific; Advanced Series on Ocean Engineering*, Vol. 14, Capítulo 4.2.

Peña, J.M. de la y Sánchez, F.J. 2008. *Directrices para el diseño de diques exentos en las costas españolas*. Monografía, octubre 2008, ISBN: 978-84-7790-474-8, 153 p. Madrid (España): Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).