

Zonas de la costa apropiadas para el uso de los diques compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena

Coastal zones suitable to use breakwaters of geotextile tubes filled with sand

Ana Antón Camacho^{1*}, Antonio Lechuga Álvaro¹, José M. De la Peña Olivas¹, José L. Almazán Gárate²

Palabras clave

tubos de geotextil;
perfil de la costa;
tipo de costa;
dique sumergido;

Resumen

En las últimas décadas la presión urbanística en la costa, el aumento de la erosión en muchos tramos y la subida de nivel de mar, debido al Cambio Climático, ha llevado a los gobiernos a invertir más en la protección de la costa. A su vez, la reducción de costes, su facilidad de construcción y velocidad de implementación, ha hecho que los elementos de geotextil rellenos de arena, conocidos con el nombre de geosistemas, se muestren como una alternativa a los sistemas de defensa tradicionales o como complemento a ellos, a lo largo de las costas. Sin embargo, aunque hoy en día se tiene un mayor conocimiento de su comportamiento, diseño y durabilidad, debido a la falta de materiales adecuados para soportar las inclemencias del tiempo, su alta diversidad de métodos o técnicas no normalizadas y su facilidad de degradación por el vandalismo, hace que se cuestione su utilidad en la actualidad.

Keywords

geotextile tube;
coastal profile;
type of coast;
breakwater;

Abstract

In recent decades, urban pressure on the coast, increased erosion in many places and rising sea levels due to climate change, has led governments to invest more in protecting the coast. In turn, cost reduction, ease of construction and speed of implementation, the elements made of sand filled geotextile, known under the name Geosistemas, are displayed as an alternative to traditional defense systems or in addition to them, along the coast. However, although today it has a better understanding of their behavior, design and durability, due to the lack of suitable materials to withstand inclement weather, high diversity of methods or techniques are not standardized and ease of degradation by the vandalism, makes its usefulness is in question today.

1. INTRODUCCIÓN

Los elementos de geotextil rellenos de arena son piezas tridimensionales, fabricadas con materiales de geotextil, rellenos de arena. Constituyen un subgrupo dentro de un amplio sistema de soluciones de tipo geosintético, para el control de la erosión, conocidos con el nombre de geosistemas. Fundamentalmente existen tres tipos de elementos de geotextil rellenos de arena: sacos, tubos y contenedores. Estos elementos se utilizan en estructuras de la Ingeniería de Costas, por ejemplo en espigones o diques, como alternativa a materiales del tipo escollera o bloques de hormigón pudiendo formar parte de su núcleo. Los objetivos de este trabajo, consisten en analizar los lugares adecuados para su uso en los diques sumergidos compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena como alternativa o como un complemento a los sistemas de defensa convencionales.

A continuación se enumeran los principales trabajos desarrollados más recientemente, para el conocimiento y la mejora del comportamiento de los tubos de geotextil rellenos de arena en la costa; Liu (1981) determinó la expresión que define la forma de los tubos de geotextil.

Posteriormente Leshchinsky et al. (1996) realizaron un análisis de cálculo de la forma geométrica del tubo y de los esfuerzos de tracción en el geotextil, mediante un programa numérico y validaron los resultados, con las expresiones matemáticas obtenidas anteriormente. Pilarczyk (2000) presentó un resumen de los elementos de geotextil en la costa y en la ingeniería hidráulica. Oh y Shin (2006) analizaron varios casos con tubos de geotextil en modelo físico a escala reducida y real para reducir la erosión de la costa, en la playa de Young-Jin, situada al este de Korea. Lawson (2008) describió los principales tres tipos de elementos de geotextil. Chu et al (2011) presentaron diferentes aplicaciones de los tubos de geotextil. Finalmente, Bezuijen y Pilarczyk (2012) describieron diferentes aplicaciones con tubos de geotextil en la ingeniería.

2. TUBOS DE GEOTEXTIL RELLENOS DE ARENA

Los primeros tubos de geotextil rellenos de arena comenzaron a ser utilizados en la década de 1960, en estructuras hidráulicas y costeras. Estos tubos, denominados Longard tubes, eran de pequeño diámetro (inferior a 2m) y se utilizaban especialmente en ambientes hidráulicos como capa impermeable de geotextil tejido, para impedir la pérdida de arena durante su relleno, mediante bombeo hidráulico.

* Autor de contacto: ana.i.anton@cedex.es

¹ Centro de Estudios de Puertos y Costas, CEDEX, Madrid, España.

² Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

Durante la década de 1980 se desarrolló el diseño de tubos de geotextil de gran diámetro, con geotextil tejido y sin capa interior impermeable. Su principal ventaja fue la gran cantidad de volumen que podía diseñarse satisfaciendo los requisitos de estabilidad hidráulicos y de la costa. También, durante ésta década, se desarrollaron los diseños de tubos de geotextil tejido, de pequeño diámetro, inferior a 1,5m. Hoy en día, se utilizan tubos de geotextil, con diámetro que varía de 1 a 6m, en aplicaciones por todo el mundo que han sido ejecutadas con éxito en la ingeniería de costas como protección frente a la erosión en la realización de espigones (Nicolon 1995).

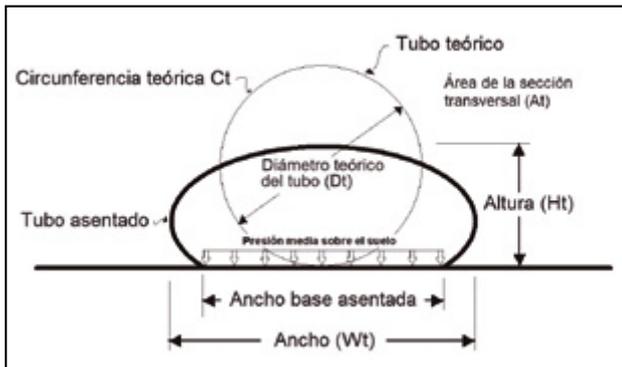


Figura 1. Parámetros fundamentales del tubo de geotextil.

2.1. Variables del tubo de geotextil

Los tubos de geotextil normalmente se describen en función de su diámetro teórico D_t (en Europa, Oriente Medio y Asia) o perímetro teórico C_t (en Norte y Sur de América). Si bien, estas dos variables representan los parámetros fundamentales de los tubos de geotextil, no son fundamentales cuando se trata de los parámetros de ingeniería para aplicaciones hidráulicas y costeras, donde el tubo geotextil, en su estado lleno, es de primordial importancia. Los principales parámetros del tubo de geotextil en ingeniería se muestran en la figura 1.

2.2. Disposición del tubo de geotextil

Los tubos de geotextil se sitúan y se rellenan hidráulicamente en la obra, hasta conseguir la forma geométrica requerida. En la figura 2, se muestra la sección típica de relleno, de un tubo de geotextil, con arena. El relleno con arena, se realiza mediante bombeo hidráulico, a través de los accesos de llenado, fabricados específicamente y separados

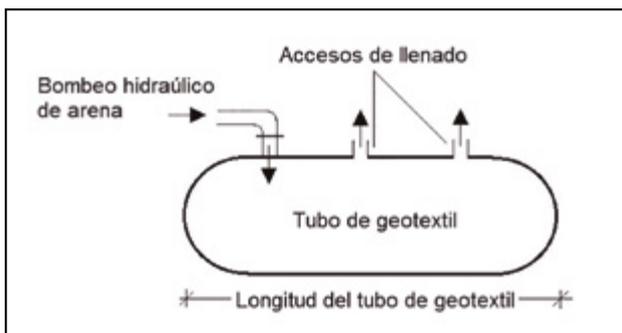


Figura 2. Principales características de la sección longitudinal del tubo de geotextil.

una misma distancia, en toda su parte superior. Durante el llenado, el agua pasa a través de las paredes del tubo de geotextil. En las aplicaciones costeras, normalmente el tipo de material de relleno utilizado, es la arena, o un porcentaje significativo de ella. Una vez lleno el tubo geotextil, se comporta como una unidad de masa-gravedad.

2.3. Aplicaciones de los tubos de geotextil

Las aplicaciones costeras de los tubos de geotextil suelen ser en estructuras tipo revestimiento, cuando se utiliza el material de relleno, para proporcionar estabilidad. Los tubos de geotextil se utilizan tanto para revestimientos enterrados, como para revestimientos superficiales. En los revestimientos enterrados, el tubo geotextil está recubierto por el suelo local. En los revestimientos superficiales, el tubo geotextil queda expuesto durante toda su vida útil.

Los tubos geotextil, también se utilizan para realizar diques rompeolas, y reducir la erosión provocada por el oleaje en los procesos costeros. En este caso, el tubo geotextil lleno se encuentra a una cierta distancia de la costa y sumergido poca profundidad, con el fin de disipar la fuerza de las olas antes de que alcancen la costa. A su vez, el tubo de geotextil, se coloca sobre una manta de geotextil, para eliminar la socavación.

Así mismo los tubos geotextil, se utilizan para realizar diques de protección, y con ello evitar o reducir los daños provocados por las inundaciones o los temporales. En este caso, se suele recubrir el tubo de geotextil, con material del suelo local.

Los tubos de geotextil se utilizan también como núcleo de diques de contención, sumergidos a una profundidad relativamente pequeña. En este caso, la estructura compuesta por tubos de geotextil, se rellenan con arena situada en las proximidades de la ubicación de la obra, mediante bombeo hidráulico.

Finalmente, los tubos de geotextil se pueden utilizar como espigones para eviatar el transporte de sedimentos a lo largo del litoral. En la mayoría de estas aplicaciones, los tubos de geotextil suelen estar expuestos, sin embargo, en otras ocasiones los tubos de geotextil se recubren con otro geotextil más resistente para evitar su deterioro debido a la radiación ultra-violeta y al vandalismo. Cada uno de estos tipos de espigones, se pueden aplicar, dependiendo de la vida útil requerida de la estructura.

3. UBICACIÓN DE UNA ESTRUCTURA CON RESPECTO A LA COSTA

La elección del tipo de estructura de geotextil, así como su cálculo o diseño, vendrá condicionado por las solicitudes a la que estará sometida dicha estructura, siendo una de ellas la debida a la acción del oleaje y por ello, en primer lugar, será necesario conocer el clima marítimo de la zona en la que se pretende ubicar la estructura.

El oleaje que incide en una estructura puede considerarse desde dos aspectos complementarios. El primero de ellos hace referencia a la ubicación que tiene la estructura respecto al perfil de la playa, y por tanto, al desarrollo de su energía a lo largo de éste. Y el segundo aspecto a considerar es el tipo de costa en la que se ubicará la estructura, y por tanto a la intensidad del oleaje que incide en ella.

Por lo tanto, es necesario estudiar la ubicación de la estructura respecto a:

- La zona del perfil de una playa
- Tipo de costa

3.1. Ubicación de una estructura con respecto al perfil longitudinal de la playa

Según Weggel (1988), las acciones debidas al oleaje que inciden sobre una estructura a lo largo del perfil de una playa, van variando de intensidad. Este autor distingue desde este punto de vista, seis zonas en el perfil de una playa, como se aprecia en la siguiente figura, expresadas cada una de ellas mediante una ecuación.

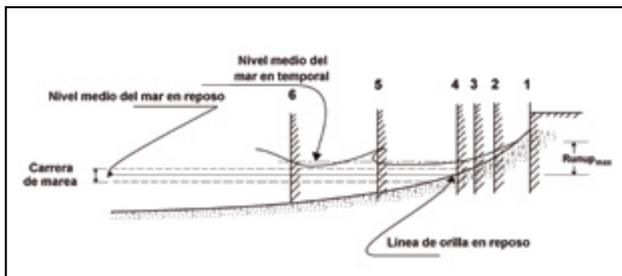


Figura 3. Clasificación de las zonas del perfil de una playa según Weggel (1998).

Las variables que constituyen cada una de estas ecuaciones en cada zona, son:

- Para el nivel de marea:
 Z_a = semi carrera de marea
 Z_s = elevación del mar en temporal
- Para el alcance de la ola en la costa:
 R = run-up
- Distancias de referencia:
 D = profundidad del agua al pie de la obra
 X_W = distancia entre la línea de orilla en media marea y la base de la obra
 s = pendiente de la playa
- Para el oleaje:
 H_0 = altura de ola en alta mar
 T = periodo del oleaje
 H_1 = altura de ola local

A continuación se indican las principales características para cada zona del perfil.

Zona 1: Estructura situada fuera del máximo alcance del máximo temporal. Expresada mediante la ecuación:

$$\frac{X_W}{g T^2} > \frac{H_0}{g T^2 s} \left(\frac{Z_a}{H_0} + \frac{Z_s}{H_0} + \frac{R}{H_0} \right) \quad [1]$$

La zona del perfil de playa situada fuera del máximo alcance del máximo temporal, corresponde a la playa seca, definida como la zona del perfil de una playa comprendida entre el límite de tierra de la playa y el inicio del frente de playa.

El oleaje que puede alcanzar esta zona 1 es un oleaje nulo, con alturas de ola prácticamente inapreciables, $H_1 \approx 0$, sucediendo únicamente en eventos extraordinarios.

Por lo tanto, las acciones relativas al oleaje que pueden esperarse en una estructura de geotextil situada en esta zona, son prácticamente inapreciables y además con periodos de retorno muy elevados. No siendo la altura de ola la acción más relevante a tener en cuenta.

Zona 2: Estructura situada por encima de la máxima elevación del mar y por debajo del run-up máximo. Expresada mediante la siguiente ecuación.

$$\frac{H_0}{g T^2 s} \left(\frac{Z_a}{H_0} + \frac{Z_s}{H_0} \right) < \frac{X_W}{g T^2} < \frac{H_0}{g T^2 s} \left(\frac{Z_a}{H_0} + \frac{Z_s}{H_0} + \frac{R}{H_0} \right) \quad [2]$$

La zona del perfil de playa situada por encima de la máxima elevación del mar y por debajo del run-up máximo, corresponde a la zona intermareal (foreshore) definida como la zona de la playa comprendida entre la parte exterior de la berma y el límite de descenso del oleaje en bajamar (CEM 1995).

El oleaje en esta zona del perfil no incide directamente, solamente se alcanzan láminas de agua de baja intensidad procedente de un oleaje residual muy evolucionado, $H_2 \approx H_{\text{residual}} \approx 0$. Pudiéndose considerar la altura de ola prácticamente inapreciable, solamente incidiendo en ella una corriente de agua de baja intensidad.

Por lo que, las acciones debidas al oleaje que puede soportar una estructura de geotextil, situada en esta zona son nulas, debiendo considerar solamente la corriente de agua debida al desarrollo final del run-up. Por lo que no sería necesario valorar la consideración de la aplicación de la fórmula de resistencia debido al oleaje en los sacos de geotextil, salvo para eventos muy extraordinarios.

Zona 3: Estructura situada por encima de las mareas normales y por debajo de las elevaciones excepcionales. Expresada mediante la siguiente ecuación.

$$\frac{H_0}{g T^2 s} \left(\frac{Z_a}{H_0} \right) < \frac{X_W}{g T^2} < \frac{H_0}{g T^2 s} \left(\frac{Z_a}{H_0} + \frac{Z_s}{H_0} \right) \quad [3]$$

Análogamente la zona del perfil de playa situada por encima de las mareas normales y por debajo de las elevaciones excepcionales, corresponde a la zona intermareal, definida anteriormente.

Solamente puede incidir el oleaje en esta zona 3 cuando se producen mareas o elevaciones excepcionales; por lo tanto con periodos de retorno largos. Y aun así, el oleaje no puede considerarse más que residual, incidiendo con un flujo de agua empujado por el run-up de muy corta altura, $H_3 \approx H_{\text{residual}} \approx 0$.

Por tanto no puede considerarse una altura de ola en sentido formal, sino más bien una corriente de subida y bajada de agua de mediana intensidad.

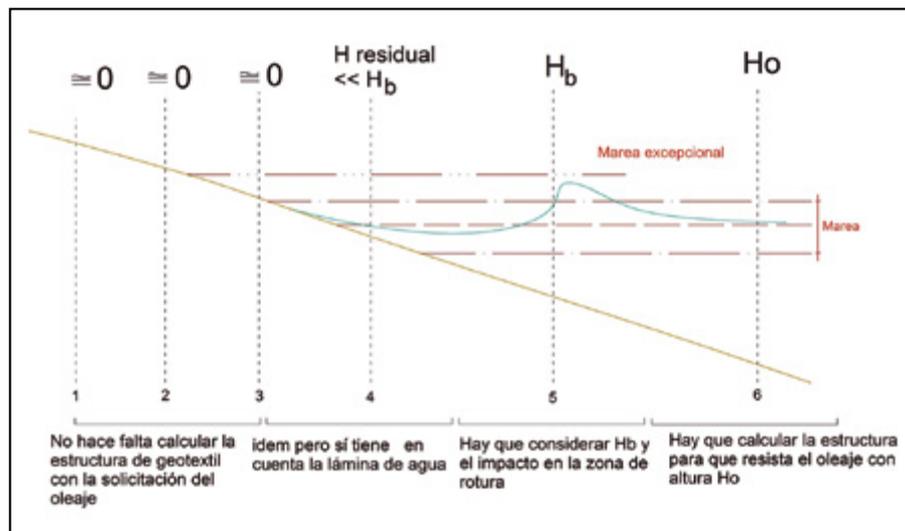


Figura 4. Clasificación de las zonas del perfil de una playa en la costa.

Zona 4: Estructura situada dentro del rango de marea y con su base sumergida durante parte del ciclo de marea. Expresada mediante las siguientes ecuaciones.

$$\frac{X_w}{g T^2} < \frac{H_0}{g T^2} \frac{1}{s} \left(\frac{Z_s}{H_0} \right) \quad \text{y} \quad \frac{d}{H_0} < \frac{Z_a}{H_0} \quad [4] \text{ y } [5]$$

La zona del perfil de playa situada dentro del rango de marea corresponde al denominado frente de playa (beach-face) (CEM 1995).

El oleaje que puede presentarse en una estructura de geotextil situada en esta zona, corresponde a un oleaje residual, con alturas de ola de intensidad media, con período de retorno intermedio y longitud de sus crestas moderada, $H_4 \approx H_{residual} \ll H_b$.

Por lo tanto, las acciones debidas al oleaje que pueden presentarse en una estructura de geotextil situada en esta zona, son de intensidad media.

Zona 5: Estructura situada dentro del mar en marea baja y con su base siempre sumergida. Expresada mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{d}{H_0} > \frac{Z_a}{H_0} \quad [6]$$

La zona del perfil de playa situada dentro del mar en marea baja y con su base siempre sumergida, corresponde a la zona de rotura (breakerzone).

Una estructura de geotextil situada en esta zona, estará sometida a un oleaje en rotura, con alturas de ola de cierta intensidad, con rotura constante en la franja, $H_5 \approx H_b$. Por lo que para su cálculo debe considerarse la ola en rotura y el impacto que sobre la estructura se produce.

Por lo tanto, las acciones debidas al oleaje a las que se encuentra sometida una estructura de geotextil, situada en esta zona son de cierta intensidad.

Zona 6: Estructura cimentada a tal profundidad que el oleaje normalmente nunca rompe. Expresada mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{H_0}{H_i} \frac{d}{H_0} - \frac{Z_a}{H_0} > 1,28 \quad [7]$$

Finalmente, la zona del perfil de playa en la que el oleaje nunca rompe corresponde a la zona de ascenso-descenso (swashzone) (CEM 1995). El oleaje al que se encuentra sometida una estructura de geotextil en esta zona del perfil de playa, se caracteriza por ser un oleaje desarrollado, $H_6 = H_o$ con alturas de ola de gran intensidad y período de retorno elevado.

En la siguiente tabla se incluye la clasificación de las solicitaciones a las que se encuentra sometida una estructura de geotextil, en función de la zona del perfil de playa en la que se ubica.

Tabla 1. Solicitaciones de una estructura según la zona del perfil de la playa

Zona	Oleaje	Solicitaciones
1	Nulo	$H_1 \approx 0$
2	Nulo	$H_2 \approx \ll H_{residual} \approx 0$
3	Lámina de agua	$H_3 \approx < H_{residual} \approx 0$
4	Residual	$H_4 \approx H_{residual} \ll H_b$
5	En rotura	$H_5 \approx H_b$
6	Desarrollado	$H_6 \approx H_o$

3.2. Ubicación de la estructura respecto al tipo de costa

La estructura morfológica de la costa y la ubicación de una estructura respecto a ella son esenciales para conocer las solicitaciones debidas al oleaje que debe soportar una estructura costera realizada con sacos de geotextil.

A su vez, las solicitaciones a las que se encuentra sometida una estructura compuesta con sacos de geotextil rellenos de arena, serán diferentes en función del tipo de costa en la que se encuentre situada.

Para determinar la altura de ola de cálculo de una estructura de geotextil se tendría que recurrir a propagar el oleaje desde profundidades indefinidas hasta el punto de ubicación de dicha estructura, como se realiza para cualquier obra costera convencional.

Si la obra se encuentra en profundidades indefinidas, la altura de ola de cálculo sería $(H_{1/3})_{\max}$ y la denominaremos H_0 . Si la obra se halla en profundidades intermedias, habría que recurrir a propagar desde profundidades indefinidas hasta el punto donde se ubicará la futura obra y determinar la altura de ola que se alcanza, H_i , debido al fenómeno de refracción. Si además el punto de costa en cuestión se encuentra protegido del oleaje directo habría que propagar para determinar la altura de ola de cálculo afectada por los fenómenos de refracción y difracción.

Dependiendo del grado de protección, el valor de la altura de ola procedente desde profundidades indefinidas, H_0 , se vería modificado. Así podríamos clasificar las costas en: abiertas, poco protegidas, medianamente protegidas, protegidas y muy protegidas.

A estos tipos de costas habría que añadir aquellas costas como las rías, los estuarios o bahías muy cerradas en las que el oleaje exterior penetra en un tramo corto, siendo más importante el oleaje local. Clasificándose este tipo de costa como costa cerrada.

La definición que podría hacerse de cada una de ellas sería:

- a) *Costa abierta*: se considera una costa abierta, a aquella en la que el oleaje incide directamente, sin presentar ningún obstáculo que interfiera.

Este tipo de costa se presenta geográficamente en acantilados, playas abiertas, cabos y arrecifes en los que no existan obstáculos que modifiquen el oleaje, por lo que el único fenómeno de modificación del oleaje es la refracción.

- b) *Costa poco protegida*: se considera una costa poco protegida, a aquella en la que el oleaje procedente de aguas profundas, aun incidiendo directamente se reduce parcial o localmente. Esto sucede, cuando existe algún obstáculo en el mar, que crea a su resguardo una zona de amortiguamiento del oleaje, y por tanto un área de menor energía. Por lo que aun imperando el fenómeno de refracción del oleaje; se puede apreciar también la existencia de difracción u otro elemento de reducción de la energía de oleaje.

Este tipo de costa se presenta en costas abiertas a resguardo, en las cercanías de algún obstáculo, o con bajos próximos.

- c) *Costa medianamente protegida*: se considera una costa medianamente protegida, a aquella en la que el oleaje se refleja al encontrarse obstáculos en su propagación. Siendo la protección de este parcial. Al fenómeno de refracción importante se une el de difracción que aumenta en importancia e intensidad.

Este tipo de costas se presenta al abrigo parcial de islas, cabos, etc.

- d) *Costa protegida*: se considera una costa protegida, a aquella en la que la intensidad del oleaje se reduce significativamente por la presencia de un obstáculo, alcanzándole solamente el oleaje difractado.

Este tipo de costa se presenta geográficamente en bahías, con islas o penínsulas en su frente, etc.

- e) *Costa muy protegida*: se considera que una costa está muy protegida, cuando solamente le llega un oleaje muy difractado por lo que las alturas son poco apreciables.

Este tipo de costa se presenta en islas al trasdós, dentro de bahías o entrantes en lugares muy protegidos, etc.

- f) *Costa cerrada*: se considera que se da este tipo de costa cuando el oleaje que penetra desde el mar exterior es muy reducido imperando el oleaje local que pueda formarse por el viento.

Este tipo de costa se asocia a concavidades costeras de poco calado y con costas adyacentes muy activas sedimentariamente y se presenta en albuferas, golas, marismas y marjales.

Cuando el objetivo del trabajo es obtener una mera aproximación o "tanteo" con el objeto de analizar si es idónea la estructura de geotextil en una ubicación, podría recurrirse a un método aproximado que nos diese un valor, con una aproximación global y que sustituyese a lo requerido para un futuro proyecto o anteproyecto de obra, que es lo indicado en los párrafos anteriores.

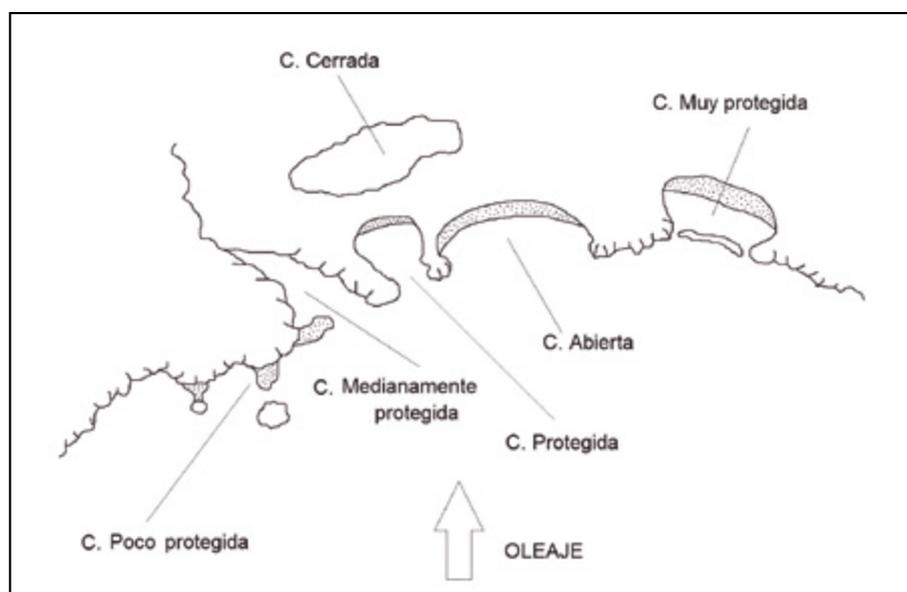


Figura 5. Clasificación de los tipos de costa.

El método consiste en asignar un coeficiente reductor de la altura de ola $H_o = (H_{1/3})_{\max}$ para costa abierta a los otros tipos de costa, pudiéndose tomar el que se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 2. Coeficientes reductores de oleaje según el tipo de costa

Tipo de costa	Solicitaciones: Cr·Ho
Abierta	$H'_o = H_o$
Poco protegida	$H'_o = 0,8 \cdot H_o$
Medianamente protegida	$H'_o = 0,6 \cdot H_o$
Protegida	$H'_o = 0,4 \cdot H_o$
Muy protegida	$H'_o = 0,2 \cdot H_o$
Cerrada	$H'_o = 0,1 \cdot H_o$

4. LIMITACIONES DE LAS FÓRMULAS DE ESTABILIDAD PARA TUBOS DE GEOTEXTIL

Uno de los puntos clave para el diseño de estructuras compuestas por tubos de geotextil rellenos de arena, es conocer el rango de validez de la altura de ola significativa. Una vez determinado este, se analizan los lugares de la costa y del perfil de la playa donde se pueden ubicar y como consecuencia, en los que es aconsejable su uso.

Aunque algunos autores en sus trabajos indican claramente el rango de validez de la altura de ola, otros autores no lo hacen, lo que puede dar lugar a un mal uso.

Por lo que, a continuación se determinará el rango de validez de la variable altura de ola significativa, H_s , que aparece en las fórmulas de estabilidad definidas por los diferentes autores. Las variables consideradas en dichas fórmulas de estabilidad, son:

- H_s = Altura de ola significativa [m]
- Densidad relativa de los sacos: $\Delta = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$ [-]
- Longitud máxima del saco: I_c [m]
- D = Ancho de la capa de los sacos = $I_c \cdot \text{sen} \alpha$ [m]
- α = Pendiente de la estructura [°]
- ξ = Número de Iribarren = $\frac{\tan \alpha}{(H_s/L_o)^{1/2}}$ [-]

- f = Coeficiente de rozamiento
- χ = Factor de reducción de energía que se pierde debido al rebase, considerando SWL en la cresta de la estructura.

4.1. Limitaciones de la fórmula de Pilarczyk (2000)

En base a los ensayos en modelo físico a escala reducida, realizados por Delft Hydraulics y otros investigadores, a continuación se exponen los siguientes criterios de estabilidad para espigones o diques, realizados con tubos de geotextil y con el nivel de agua, coincidente con la cresta de la estructura:

- Tubos colocados en la parte superior de la estructura (coincidiendo con el nivel medio del agua) y colocados paralelos a eje del dique, como se aprecia en la siguiente figura:

$$\frac{H_s}{\Delta_t b} = 1 \tag{8}$$

Dónde b es el ancho del tubo (medido horizontalmente); una hipótesis asumible es $b = (1.1 \text{ to } 1.2) \cdot D$, (D = diámetro teórico del tubo). Si la cresta de la estructura se compone de dos tubos de geotextil, el ancho equivalente es igual a $2 \cdot b$.

- Tubos colocados perpendiculares al eje del dique:

$$\frac{H_s}{\Delta_t l} = 1 \tag{9}$$

Dónde l es la longitud del tubo de geotextil.

Según Pilarczyk (2000) la altura de ola de una estructura compuesta por elementos de geotextil sometidas a la acción del oleaje, para la cual la estructura es estable, es $H_s = 1.5m$ (max 2m) debido a la posible inestabilidad interna de la arena o migración de la arena, por lo que se recomienda utilizar en el cálculo de la estabilidad $l < 2 \cdot d$, siendo d = el ancho medio del tubo de geotextil.

$$H_s \leq 1.5m$$

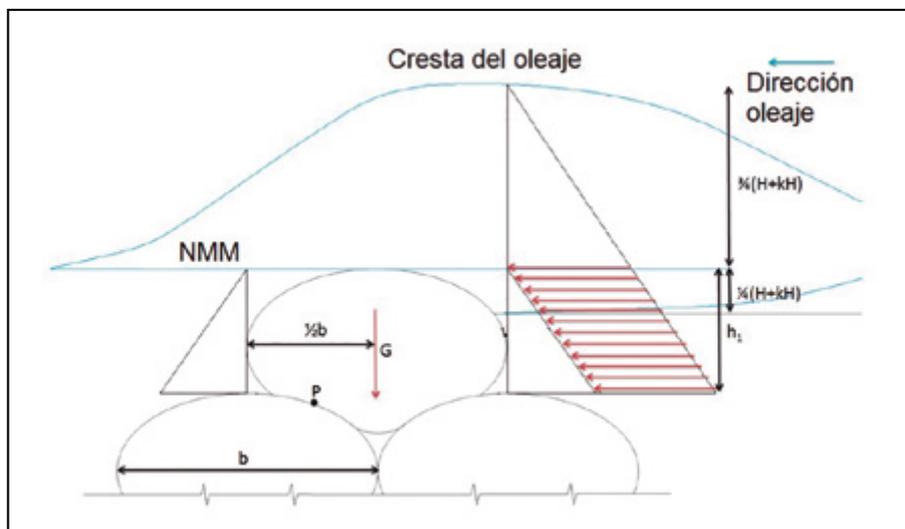


Figura 6. Esquema de fuerzas que actúan sobre el tubo de geotextil (Pilarczyk 2000).

4.2. Limitaciones de la fórmula de CUR 217 (2006)

CUR 217 (CUR 2006) recomienda utilizar una fórmula muy similar a la utilizada por Pilarczyk (2000) para el cálculo de estabilidad. La altura de ola significativa considerada en la siguiente expresión es aquella a la cual el tubo de geotextil comienza a moverse.

CUR (2006), CUR (2006), afirma que el tubo que recibe la carga más pesada, es el tubo situado en la cresta de la estructura. Indica la fórmula de cálculo de la estabilidad de un tubo de geotextil en la cresta de un dique.

$$\frac{H_s}{\Delta_t D_k} < 1 \quad [10]$$

Dónde:

D_k = altura del tubo de geotextil (si el tubo se sitúa perpendicular a la dirección del oleaje) o
= longitud del tubo de geotextil (si el tubo se sitúa paralelo a la dirección del oleaje)

La máxima altura de ola significativa a la que puede estar sometido un dique compuesto por tubos de geotextil que garantiza su estabilidad, se determina calculando los valores máximos de las variables de la expresión anterior [10].

Δ = Densidad relativa máxima del tubo de geotextil [-]
Según Kriel (2012) se considera igual a 1 ($\Delta t \approx 1$).

D = Diámetro efectivo mínimo del tubo de geotextil [m]

Considerando el caso más desfavorable, el tubo situado perpendicular a la dirección del oleaje, el diámetro mínimo efectivo del tubo coincide con la altura del tubo de geotextil. Y suponiendo que el volumen mínimo del tubo de geotextil es igual a $7m^3$:

$$D = \sqrt[3]{V} = \sqrt[3]{7} = 1.9m$$

Por lo que, la máxima altura de ola significativa es:

$$H_s \leq 1.9m$$

4.3. Limitaciones de la fórmula de Van Steeg and Vastenburg (2010)

Para ensayar la estabilidad de los tubos de geotextil sometidos a la acción del oleaje, se realizaron varios medelos físicos, en el canal de Deltares, con una escala aproximada de 1:2 to 1:4. Todos los fallos se produjeron por deslizamiento. La migración de la arena en tubos rellenos al menos al 70% es mínima en tubos con altos porcentajes de llenado (Van Steeg y Vastenburg 2010).

La nueva expresión de estabilidad para un tubo de geotextil, considerando que el nivel medio del agua coincide con la cresta de la estructura:

$$\frac{\chi \cdot H_s}{\Delta_t \sqrt{BD} (f \cos \alpha + \sin \alpha)} \leq 0.65 \quad [11]$$

Teniendo en cuenta los valores límite de la siguiente expresión, obtenida de los ensayos realizados por Van Steeg and Vastenburg (2010) en el canal de Deltares y considerando el máximo valor del diámetro del tubo de geotextil, según Lawson (2008), igual a 2m:

$$0.6 < \frac{H_s}{D} < 4 \quad [12]$$

Los valores límite de la altura de ola significativa obtenidos de la expresión anterior [12] son:

$$1.2m < \frac{H_s}{D} < 8m$$

A modo de resumen, la siguiente tabla muestra las ecuaciones, sus autores y los límites de la altura de ola significativa de cada uno, a partir de las ecuaciones sobre la

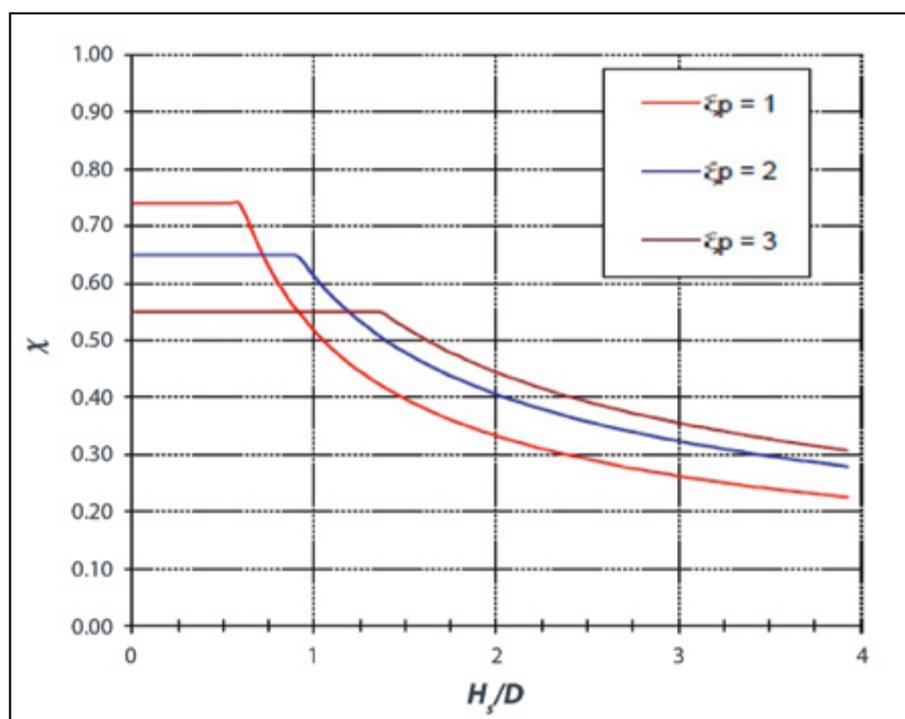


Figura 7. Factor de reducción χ (Van Steeg & Vastenburg 2010).

estabilidad de las estructuras con tubos de geotextil rellenas de arena.

Tabla 3. Fórmulas y limitaciones de altura de ola para diques con tubos de geotextil

Autor	Fórmulas	Límites H_s
Pilarczyk (2000)	$\frac{H_s}{\Delta_t b} < 1$	$H_s \leq 1.5m$
CUR 217 (2006)	$\frac{H_s}{\Delta_t D} < 1$	$H_s \leq 1.9m$
Van Steeg y Vastenburg (2010)	$\frac{\chi \cdot H_s}{\Delta_t \sqrt{BD}(f \cos \alpha + \sin \alpha)} \leq 0,65$	$1.2m < H_s < 8m$

5. ZONAS COSTERAS APROPIADAS PARA LA UBICACIÓN DE DIQUES COMPUESTOS POR TUBOS DE GEOTEXTIL COMO DEFENSA DE LA COSTA

No todos los lugares de la costa resultan adecuados para el uso de determinadas estructuras compuestas por tubos de geotextil rellenas de arena. Por ello, siguiendo la zonificación de la costa realizada anteriormente tanto a lo largo del perfil longitudinal de una playa, como en los diferentes tipos de costa, en este apartado se determinan aquellas zonas de la costa donde se pueden ubicar las estructuras tipo diques, compuestas de tubos de geotextil rellenos de arena y en consecuencia, las zonas donde es posible su uso.

Finalmente se incluye una tabla en las que se indican a modo de resumen las zonas aptas en la costa para la ubicación de estas estructuras, considerando la zonificación anterior.

Debido a que, la intensidad del oleaje que se presenta en las zonas 1, 2 y 3 del perfil longitudinal de una playa, en condiciones normales, es prácticamente nulo. No se realiza distinción entre ellas, considerándose como si fuera sólo una zona.

En la determinación de los lugares de la costa adecuados, para la ubicación de estructuras tipo dique, compuestas por tubos de geotextil rellenos de arena, se consideran las fórmulas para este tipo de estructuras, indicadas en la tabla 4, al igual que sus limitaciones de altura de ola significativo.

Para estar del lado de la seguridad, se van a considerar los valores superiores de la horquilla o rango de validez de las alturas de ola significativo, en las fórmulas indicadas. Por ser las mayores alturas de ola, las más desfavorables con respecto a la estabilidad de los revestimientos compuestos por sacos de geotextil.

A continuación se realiza el análisis de los lugares en los que son aplicables la fórmula de estabilidad en el diseño de un dique formado por tubos de geotextil rellenos de arena.

- Zonas 1, 2 y 3 del perfil longitudinal de una playa

Tipo de costa abierta

Si un dique compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena, se sitúa en las zonas 1, 2 o 3 del perfil longitudinal de una playa, correspondiente a la playa seca y a la zona inter mareal (foreshore) y a su vez esta playa pertenece a

un tipo de costa abierta. Esta estructura se podrá diseñar con las fórmulas definidas con anterioridad, debido a que el oleaje al que se encuentra sometido es de muy baja intensidad, no superando el límite establecido de 1,5m, 2m y 8m. Y como consecuencia podrá situarse en las zonas 1, 2 y 3 del perfil longitudinal de una playa perteneciente a un tipo de una costa abierta.

Restantes tipos de costa

Por ser los restantes tipos de costa, denominados como: costa poco protegida, costa medianamente protegida, costa protegida, costa muy protegida y costa cerrada, más abrigadas que una costa tipo abierta. Los oleajes a los que se encontrará sometido un dique compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena situado en estos tipos de costa, serán de menor intensidad que los oleajes a los que se encuentra sometida esta estructura situada en un tipo de costa abierta. Y en consecuencia, los valores de la altura de ola significativo serán inferiores, satisfaciendo aún más las limitaciones de las formulaciones anteriores. Por lo que esta estructura, situada en estos tipos de costa y en las zonas 1, 2 o 3 del perfil longitudinal de una playa, se podrá diseñar con la fórmula indicada. Y en consecuencia se podrá situar en las zonas 1, 2 y 3 del perfil longitudinal de una playa perteneciente a los restantes tipos de una costa.

- Zona 4 del perfil longitudinal de una playa

Tipo de costa abierta

Si un dique compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena, se sitúa en la zona 4 del perfil de una playa y pertenece a un tipo de costa abierta, el oleaje al que se encontraría sometida dicha estructura sería de intensidad moderada, siendo la altura de ola de tipo residual, por lo que no superará nunca el valor de 1,5m, 2m y 8m. Y por tanto esta estructura situada en dicha zona y para un tipo de costa abierta podría diseñarse con las fórmulas indicadas anteriormente, pudiéndose situar en la zona 4 del perfil de una costa abierta, como consecuencia.

Restantes tipos de costa

Por estar sometida una estructura situada en los restantes tipos de costa, a la acción de un oleaje de menor intensidad que los oleajes a los que se encontraría sometida una estructura situada en un tipo de costa abierta, por ser costas más abrigadas. Un dique compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena podría diseñarse con la fórmula indicada, ya que los valores de la altura de ola no superarían la limitación requerida. Y en consecuencia podría situarse en la zona 4 del perfil longitudinal de un tipo de costa poco protegida, medianamente protegida, protegida, muy protegida y cerrada.

- Zona 5 del perfil longitudinal de una playa

Tipo de costa abierta

En la zona 5 del perfil longitudinal de una playa, correspondiente a la zona de rotura, y perteneciente a un tipo de

costa abierta, las alturas de ola a las que se encuentra sometida esta estructura, presentan una importante descarga de energía y en consecuencia las alturas de ola pueden alcanzar valores superiores a las limitaciones 1,5m, 2m ó 8m, que requieren las fórmulas de estabilidad; lo que implica que estas fórmulas no se pueden utilizar para el diseño de este tipo de estructuras. Y como consecuencia, no es aconsejable su uso en esta zona.

Tipo de costa poco protegida y medianamente protegida

Si un dique compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena, se sitúa en la zona 5 del perfil de una playa correspondiente a la zona de rotura perteneciente a un tipo de costa poco protegida y medianamente protegida, el oleaje al que se encuentra sometida dicha estructura será:

$$H_c \text{ geotextil} = H_0 \cdot C_{\text{reductor perfil}} \cdot C_{\text{reductor costa}}$$

- a) Por ubicarse la estructura de geotextil en la zona 5 del perfil de la costa, correspondiente a la zona de rotura, se debe considerar una altura de ola coincidente con la altura de ola en rotura (H_b).

$$H_0 \cdot C_{\text{reductor perfil}} = H_b$$

- b) Por situarse en una costa poco protegida y medianamente protegida, el oleaje se reduce aproximadamente el 20% y el 40%, debiendo considerarse una altura de ola igual al 0,8 y 0,6 de su valor.

$$C_{\text{reductor costa}} = 0,8 \text{ y } 0,6$$

- c) Con lo que la altura de ola de cálculo, de una estructura de geotextil rellena de arena, situada en la zona 5 del perfil de la playa que pertenece a un tipo de costa poco protegida y medianamente protegida, será:

$$H_c \text{ geotextil} = H_b \cdot 0,8 \text{ y } H_c \text{ geotextil} = H_b \cdot 0,6$$

- d) Luego la altura de ola en rotura a la que debe estar sometido un dique situado en la zona 5 del perfil de una playa que pertenece a una costa poco protegida y medianamente protegida, será:

Si el tipo de costa es poco protegida:

$$H_b \leq \frac{1,5m \text{ (Pilarczyk 2000)} \text{ ó } 2m \text{ (CUR 217 2006)} \text{ ó } 8m \text{ (Van Steeg y Vastenburg 2010)}}{0,8}$$

Si el tipo de costa es medianamente protegida:

$$H_b \leq \frac{1,5m \text{ (Pilarczyk 2000)} \text{ ó } 2m \text{ (CUR 217 2006)} \text{ ó } 8m \text{ (Van Steeg y Vastenburg 2010)}}{0,6}$$

O lo que es lo mismo:

Para costa poco protegida:

$$H_b \leq 1,8m \text{ (Pilarczyk 2000)} \text{ ó } 2,5m \text{ (CUR 217 2006)} \text{ ó } 10m \text{ (Van Steeg y Vastenburg 2010)}$$

Para costa medianamente protegida:

$$H_b \leq 2,5m \text{ (Pilarczyk 2000)} \text{ ó } 3,3m \text{ (CUR 217 2006)} \text{ ó } 13,3m \text{ (Van Steeg y Vastenburg 2010)}$$

Por lo que, para poder diseñar un dique compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena, situado en la zona 5 del perfil longitudinal de una playa y perteneciente a un tipo de costa poco protegida con las fórmulas anteriormente indicadas de Pilarczyk (2000), CUR 217 (2006) y Van Steeg y Vastenburg (2010), habría que garantizar que la altura de ola en rotura fuese menor de 1,8m; 2,5m y 10m, respectivamente, según lo indicado. Algo que no se puede garantizar, por lo que no es aconsejable su uso en esta zona de la costa.

Y para poder diseñar un dique compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena, situado en la zona 5 del perfil longitudinal de una playa y perteneciente a un tipo de costa medianamente protegida, con las fórmulas anteriormente indicadas de Pilarczyk (2000), CUR 217 (2006) y Van Steeg y Vastenburg (2010), habría que garantizar que la altura de ola en rotura fuese menor de 2,5m; 3,3m y 13,3m, respectivamente, según lo indicado. En caso contrario no se aconseja su uso en esta zona.

Tipo de costa protegida, muy protegida y cerrada

Si un dique compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena, se sitúa en la zona 5 del perfil de una playa perteneciente a un tipo de costa protegida, muy protegida o cerrada, el oleaje al que se encuentra sometida la estructura será de rotura y por tanto dentro del rango de validez de la altura de ola donde pueden aplicarse las fórmulas de estabilidad de Pilarczyk (2000), CUR 217 (2006) y Van Steeg y Vastenburg (2010), para el cálculo de su diseño.

Otra forma de comprobarlo puede ser siguiendo el mismo razonamiento planteado anteriormente. Es decir; si un dique compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena, se sitúa en la zona 5 del perfil de una playa correspondiente a la zona de rotura perteneciente a un tipo de costa protegida, muy protegida y cerrada, el oleaje al que se encuentra sometida dicha estructura será:

$$H_c \text{ geotextil} = H_0 \cdot C_{\text{reductor perfil}} \cdot C_{\text{reductor costa}}$$

- a) Por ubicarse la estructura de geotextil en la zona 5 del perfil de la costa, correspondiente a la zona de rotura, se debe considerar una altura de ola coincidente con la altura de ola en rotura (H_b).

$$H_0 \cdot C_{\text{reductor perfil}} = H_b$$

- b) Por situarse en una costa protegida, muy protegida y cerrada, el oleaje se reduce el 60%, el 80% y el 90%, debiendo considerarse una altura de ola igual al 0,4; 0,2 y 0,1 de su valor.

$$C_{\text{reductor costa}} = 0,4; 0,2 \text{ y } 0,1$$

- c) Con lo que la altura de ola de cálculo, de una estructura de geotextil rellena de arena, situada en la zona 5 del perfil de la playa que pertenece a un tipo de costa protegida, muy protegida y cerrada, será:

$$H_c \text{ geotextil} = H_b \cdot 0,4; H_c \text{ geotextil} = H_b \cdot 0,2 \text{ y}$$

$$H_c \text{ geotextil} = H_b \cdot 0,1$$

- d) Luego la altura de ola en rotura que debe soportar un dique situado en la zona 5 del perfil de una playa que pertenece a una costa protegida, muy protegida y cerrada, será:
Si el tipo de costa es protegida:

$$H_b \leq \frac{1,5m \text{ (Pilarczyk 2000)} \text{ ó } 2m \text{ (CUR 217 2006)} \text{ ó } 8m \text{ (Van Steeg y Vastenburg 2010)}}{0,4}$$

Si el tipo de costa es muy protegida:

$$H_b \leq \frac{1,5m \text{ (Pilarczyk 2000)} \text{ ó } 2m \text{ (CUR 217 2006)} \text{ ó } 8m \text{ (Van Steeg y Vastenburg 2010)}}{0,2}$$

Si el tipo de costa es cerrada:

$$H_b \leq \frac{1,5m \text{ (Pilarczyk 2000)} \text{ ó } 2m \text{ (CUR 217 2006)} \text{ ó } 8m \text{ (Van Steeg y Vastenburg 2010)}}{0,1}$$

O lo que es lo mismo:

Para costa protegida:

$$H_b \leq 3,75m \text{ (Pilarczyk 2000)} \text{ ó } 5m \text{ (CUR 217 2006)} \text{ ó } 20m \text{ (Van Steeg y Vastenburg 2010)}$$

Para costa muy protegida:

$$H_b \leq 7,5m \text{ (Pilarczyk 2000)} \text{ ó } 10m \text{ (CUR 217 2006)} \text{ ó } 40m \text{ (Van Steeg y Vastenburg 2010)}$$

Para costa cerrada:

$$H_b \leq 15m \text{ (Pilarczyk 2000)} \text{ ó } 20m \text{ (CUR 217 2006)} \text{ ó } 80m \text{ (Van Steeg y Vastenburg 2010)}$$

Luego para ubicar un dique compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena, situado en la zona 5 del perfil longitudinal de una playa o zona de rotura y perteneciente a un tipo de costa protegida, habría que garantizar que la altura de ola en rotura fuese menor de 3,75m; 5m y 20m, según las fórmulas de Pilarczyk (2000), CUR 217 (2006) y Van Steeg y Vastenburg (2010), como se ha indicado anteriormente. En caso contrario no se aconseja su uso en esta zona.

Para poder diseñar un dique compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena, situado en la zona 5 del perfil longitudinal de una playa o zona de rotura y perteneciente a un tipo de costa muy protegida, habría que garantizar que la altura de ola en rotura fuese menor de 7,5m; 10m y 40m según las fórmulas de Pilarczyk (2000), CUR 217 (2006) y Van Steeg y Vastenburg (2010). Algo que suele suceder, debido a que en la zona de rotura de una playa que pertenece a un tipo de costa muy protegida, no se suelen superar éstas alturas de ola. En caso contrario no se aconseja su uso en esta zona.

Y para poder diseñar un dique compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena, situado en la zona 5 del perfil longitudinal de una playa y perteneciente a un tipo de costa cerrada, habría que garantizar que la altura de ola en rotura fuese menor de 15m; 20m y 80m, según las fórmulas de Pilarczyk (2000), CUR 217 (2006) y Van Steeg y Vastenburg (2010). Algo que suele suceder, debido a que en la zona de rotura de una playa, que pertenece a un tipo de costa cerrada no se suelen presentar alturas de ola de 15m.

– Zona 6 del perfil longitudinal de una playa

Tipo de costa abierta

En la zona 6 del perfil longitudinal de una playa que pertenece a un tipo de costa abierta, el oleaje está totalmente

desarrollado y las alturas de ola a las que se encuentra sometida una estructura tipo diquecompuesto por tubos de geotextil rellenos de arena son las evolucionadas desde alta mar, H_0 , hasta profundidades intermedias, H_0' , y por tanto no puede garantizarse que su valor sea inferior a 1m, valor de altura de ola significativo exigido en la fórmula de diseño de Pilarczyk (2000). No pudiéndose diseñar obras de este tipo en esta zona del perfil y para este tipo de costa, con esta fórmula. Y en consecuencia, no siendo aconsejable su uso.

Sin embargo, para una estructura tipo diquecompuesto por tubos de geotextil rellenos de arena, las alturas de ola a las que se encuentra sometido, son las evolucionadas desde alta mar, H_0 , hasta profundidades intermedias, H_0' , habría que analizar mediante el clima marítimo de la zona si se puede garantizar que las alturas de ola en el dique sean inferiores a 5m ó 6,9m, como requieren las fórmulas de diseño de CUR 217(2006) y Van Steeg y Vastenburg (2010). No siendo aconsejable su uso en caso contrario.

Tipo de costa poco protegida y medianamente protegida

Un dique compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena situado en la zona 6 del perfil de una playa, perteneciente a un tipo de costa poco protegida y medianamente protegida, el oleaje al que se encontraría sometido sería:

$$H_c \text{ geotextil} = H_0 \cdot C_{reductor \text{ perfil}} \cdot C_{reductor \text{ costa}}$$

- a) Por ubicarse la estructura de geotextil en la zona 6 del perfil de la costa, correspondiente a la zona de rotura, se debe considerar una altura de ola correspondiente a un oleaje de características similares a las de un oleaje de alta mar (H_0).

$$H_0 \cdot C_{reductor \text{ perfil}} = H_b$$

- b) Por situarse en una costa poco protegida o medianamente protegida, el oleaje se reduce el 20% y el 40%, debiendo considerarse una altura de ola igual al 0,8 y 0,6 de su valor.

$$C_{reductor \text{ costa}} = 0,8 \text{ y } 0,6$$

- c) Con lo que la altura de ola de cálculo, de una estructura de geotextil rellena de arena, situada en la zona 6 del perfil de la playa que pertenece a un tipo de costa poco protegida y medianamente protegida, sería:

$$H_c \text{ geotextil} = H_b \cdot 0,8 \text{ y } H_c \text{ geotextil} = H_b \cdot 0,6$$

- d) Luego la altura de ola que debe soportar un dique situado en la zona 6 del perfil de una playa que pertenece a una costa poco protegida y medianamente protegida, vendrá dada por:

Si el tipo de costa es poco protegida:

$$H_b \leq \frac{1,5m \text{ (Pilarczyk 2000)} \text{ ó } 2m \text{ (CUR 217 2006)} \text{ ó } 8m \text{ (Van Steeg y Vastenburg 2010)}}{0,8}$$

Si el tipo de costa es medianamente protegida:

$$H_b \leq \frac{1,5m \text{ (Pilarczyk 2000)} \text{ ó } 2m \text{ (CUR 217 2006)} \text{ ó } 8m \text{ (Van Steeg y Vastenburg 2010)}}{0,6}$$

O lo que es lo mismo:

Para costa poco protegida:

$$H_b \leq 1,8m \text{ (Pilarczyk 2000)} \text{ ó } 2,5m \text{ (CUR 217 2006)} \text{ ó } 10m \text{ (Van Steeg y Vastenburg 2010)}$$

Para costa medianamente protegida:

$$H_b \leq 2,5m \text{ (Pilarczyk 2000)} \text{ ó } 3,3m \text{ (CUR 217 2006)} \text{ ó } 13,3m \text{ (Van Steeg y Vastenburg 2010)}$$

Luego si un dique compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena se sitúa en la zona 6 del perfil de una playa que pertenece a un tipo de costa poco protegida habría que analizar más en detalle si la altura de ola a la que se encontraría sometido dicho dique sería superior a 1,8m. En caso de que, según el clima marítimo de la zona, se observasen alturas de ola superiores, el diseño con la formulación anterior no sería correcto. No siendo aconsejable su uso en la zona 6 del perfil de una playa perteneciente a una costa poco protegida.

Y si un dique compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena se sitúa en la zona 6 del perfil de una playa que pertenece a un tipo de costa poco medianamente protegida habría que analizar más en detalle si la altura de ola a la que se encontraría sometido dicho dique sería superior a los 2,5m. En caso de que, según el clima marítimo de la zona, se observasen alturas de ola superiores, el diseño con la formulación anterior no sería correcto. No siendo aconsejable su uso en la zona 6 del perfil de una playa perteneciente a una costa poco protegida.

Tipo de costa protegida, muy protegida y cerrada

Si un dique compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena, se sitúa en la zona 6 del perfil de una playa perteneciente a un tipo de costa protegida, muy protegida o cerrada, el oleaje que incide sobre la estructura tendrá alturas de ola en condiciones normales inferiores a 3,75m; 7,5m y 15m, considerando las fórmulas de Pilarczyk (2000), CUR 219 (2006) y Van Steeg y Vastenburg (2010). Por lo que se podrá situar en este tipo de costa y en esa zona.

En la siguiente tabla se indican las diferentes zonas del perfil longitudinal de una playa y los distintos tipos de costa. Mostrando los lugares adecuados y no adecuados para la aplicación de formulaciones relativas a la estabilidad de un dique formado por tubos de geotextil rellenos de arena. Y en consecuencia los lugares adecuados y no adecuados para el uso de diques compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena.

Una vez determinadas las zonas costeras apropiadas para la ubicación de diques con tubos de geotextil rellenos de arena y de haber analizado las zonas en las ecuaciones para el diseño de estructuras de arena llena de geotextil son aplicables, las zonas aptas para el emplazamiento de esas estructuras son finalmente validados por el desempeño de varios ejemplos de estructuras existentes en diferentes países.

Los diques con tubos de geotextil tomados en consideración se encuentran en las siguientes playas:

- DT1.- Playa de TelukKalong, en Kemaman, Terengganu (Malasia)
- DT2.- Playa de PantaiBatuBuruck, Terengganu (Malasia)
- DT3.- Playas de Las Coloradas, Telchac y Progreso, en Yucatan (Méjico)
- DT4.- Playa de Candolim, in Goa (India)
- DT5.- Playa de Young-Yin (Corea del Sur)

6. CONCLUSIONES

Los tubos de geotextil rellenos de arena son piezas tridimensionales, fabricadas utilizando materiales de geotextil, que posteriormente se rellenan con arena. Estas piezas se utilizan para formar estructuras en la Ingeniería de Costas, como por ejemplo, espigones o diques, tanto como alternativa a materiales tradicionales como complemento a ellos, su diámetro, varía entre 1 y 6 m.

Las estructuras realizadas con piezas o elementos de geotextil surgen como una necesidad de realizar obras de emergencia, para reducir la erosión de la costa, debido a la acción de los temporales. Su principal característica es su rapidez de ejecución, su poco coste, debida a la utilización de materiales situados en la zona y su poco mantenimiento. Sin embargo, en

Tabla 4. Posibles lugares adecuados para el uso de formulaciones relativas a la estabilidad de los diques compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena

ZONAPERFIL	TIPO DE COSTA					
	Abierta Ho	Poco protegida (0,8 Ho)	Medianamente protegida (0,6 Ho)	Protegida (0,4 Ho)	Muy protegida (0,2 Ho)	Cerrada (0,1 Ho)
Zona 1, 2 y3 ($H_o \approx 0$)						
Zona 4 (H_o)						
Zona 5 (H_b)						
Zona 6 (H_o)	DT4	DT2	DT1, DT3, DT5			

■ Lugares adecuados.

■ Lugares no adecuados.

■ Lugares dudosos.

muchas ocasiones, estas estructuras inicialmente realizadas como temporales se han convertido en permanentes, debido a su buen funcionamiento.

Las zonas más apropiadas para el diseño y en consecuencia para el uso de diques compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena suelen ser la zona 6 del perfil longitudinal de una playa, correspondiente a la zona de oleaje desarrollado y sobretodo perteneciente a un tipo de costa medianamente protegida, como se aprecia en la tabla 4.

7. AGRADECIMIENTOS

La coautora Ana I. Antón agradece la participación de los miembros del Centro de Estudios de Puertos y Costas, CEDEX, sin los cuales no hubiera sido posible realizar este trabajo.

8. REFERENCIAS

Bezuijen, A. y Pilarczyk, K. W. (2012). "Geosynthetics in hydraulic and coastal engineering: filters, revetments and sand filled structures". *Proc. EuroGeo 5, Valencia*, 65-80.

CUR (2006). "Ontwerpen met geotextiele zandelementen". *Publication no. 217, Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, Gouda, The Netherlands*, 117 pp.

Chu, J., Guo, W. y Yan, S. W. (2011). "Geosynthetic tubes and geosynthetic mats: analyses and applications". *Geotechnical Engineering, Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 42(1), ISSN0046-5828.

Lawson, C. R., (2008). "Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering" *Geosynthetics International*, 15, No. 6, 384-427.

Leshchinsky, D., Leshchinsky, O., Ling, H.I. y Gilbert, P.A. (1996). "Geosynthetic tubes for confining pressurized slurry: some design aspects". *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 122(8), 682-690.

Liu, G.S. (1981). "Design criteria of sand sausages for beach defences". *The 19th Congress of the International Association for Hydraulic Research*. New Delhi, India. No 6, 123-131.

Oh, Y. I. y Shin, E. C. (2006). "Using submerged geotextile tube structures in the protection of the E. Korean shore". *Coastal Engineering*, 53, 879-895.

Pilarczyk, K. W. (2000). "Geosynthetics and geosystems in hydraulic and coastal engineering, Balkema", pp 217-413.

Steeg, P. Van., Vastenburg, E., Bezuijen, A., Zengerink, E. y de Gijt, J. (2011). "Large-scale physical model tests on sand-filled geotextile tubes and containers under wave attack". *Proceedings of 6th International Conference on Coastal Structures, Yokohama*.

Weggel, J. (1988). "Seawalls: the need for research, dimensional considerations and suggested classification". *Journal of Coastal Research*, 4, pp. 29-39.