

Los geosistemas en la ingeniería de costas, ¿existe un diseño fiable en la actualidad?

Geosystems in coastal engineering, are they an alternative for conventional defenses and systems?

Ana Antón Camacho^{1*}, José Manuel de la Peña Olivas¹, Antonio Lechuga Alvaro¹ y José Luis Almazán Gárate²

Palabras clave

geosistemas;
sacos de geotextil;
tubos de geotextil;
contenedores de geotextil;

Sumario

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 fiabilidad en la actualidad.

Keywords

geosystems;
geotextile bags;
geotextile tubes;
geotextile containers;

Abstract

In recent decades, urban pressure on the coast, increased erosion in many coastal stretches, and rising sea levels due to Climate Change, have led governments to invest more in protecting the coast. Cost reduction, ease of construction and speed of implementation, has allowed to show geosystems as an alternative to hard work traditionally performed along the coasts. However this alternative leads to increased knowledge in their behavior, design and durability, due to lack of suitable materials to withstand large storms, high diversity of non-standard methods or techniques and ease of degradation for vandalism.

1. INTRODUCCIÓN

Los elementos de geotextil rellenos de arena son piezas tridimensionales, fabricados utilizando materiales de geotextil, que se rellenan con 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, como por ejemplo, espigones o diques, como alternativa a materiales del tipo escollera o piedra de cantera, formando parte de su núcleo. Los objetivos de este trabajo, consisten en analizar los geosistemas como alternativa o como un complemento a los sistemas de defensa convencionales y en considerar la necesidad de un método de diseño fiable.

2. ESTADO DEL ARTE

Los métodos de cálculo de los geosistemas para su aplicación en la costa son relativamente recientes. Los hitos más significativos de su investigación han sido:

Liu (1981) presentó un método de diseño para tubos de geotextil rellenos de arena en base a experimentos de laboratorio. Posteriormente Pilarczyk (1995), analizó varios sistemas de defensa de la costa, utilizando elementos de geotextil. Leshchinsky et al. (1996) determinaron un método de diseño para los tubos de geotextil, considerando su geometría, la retención de partículas sólidas y la tensión del geotextil, comparando los resultados obtenidos con los de un modelo numérico.

Oumeraci et al. (2003), llevaron a cabo investigaciones en modelo físico para establecer una fórmula de estabilidad fiable, con sacos de geotextil rellenos de arena, para la protección de dunas sometidas a la acción de los temporales. Weggel et al. (2011) plantearon la utilización de los geosistemas en la deshidratación de lodos. Y Bezuijen y Vastenburg (2012) analizaron algunas limitaciones de los elementos de geotextil.

3. TIPOS DE GEOSISTEMAS

Fundamentalmente existen tres tipos de elementos de geotextil rellenos de arena, denominados: sacos de geotextil, tubos de geotextil y contenedores de geotextil, que se diferencian por su geometría.

Sacos de geotextil

Los sacos de geotextil son los elementos de geotextil con menor volumen, rellenos de arena normalmente

* Corresponding author: ana.l.anton@cedex.es

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

² E.T.S Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

en tierra, situándose posteriormente en la orilla o bajo el agua, dependiendo de su aplicación. Se fabrican de varias formas: bolsa, almohada, colchón, etc., dependiendo de su aplicación, con el objetivo de mejorar su estabilidad y rendimiento. Variando hoy en día, su volumen, entre unos $0,05 \text{ m}^3$ y aproximadamente unos 5 m^3 .

Tubos de geotextil

Los tubos de geotextil son elementos tubulares rellenos de arena mediante bombeo hidráulico, en tierra o sobre el agua, dependiendo de su aplicación. Su diámetro puede variar desde 1 m hasta 10 m y su longitud puede alcanzar los 200 m.

Contenedores de geotextil

Los contenedores de geotextil son elementos de gran volumen que se rellenan en barcazas sobre el agua y posteriormente se sitúan a una determinada profundidad. Su volumen varía entre unos 100 m^3 y aproximadamente 700 m^3 , aunque se han instalado contenedores de unos 1.000 m^3 , siendo necesario para ello un sistema de instalación eficiente y práctico. Hoy en día se utilizan barcazas de abertura por fondo.

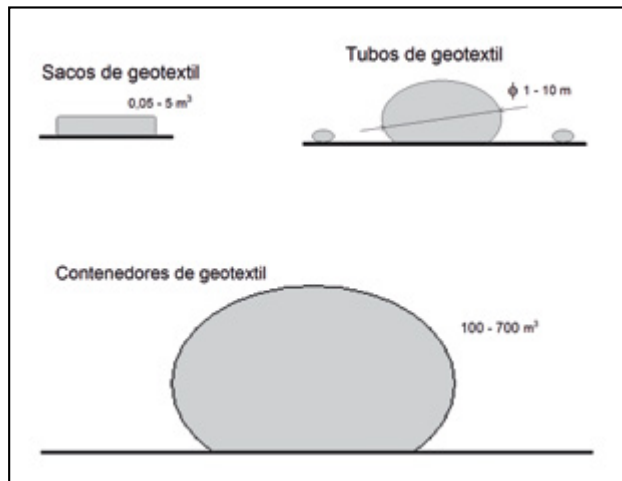


Figura 1. Tipos de geosistemas, sacos de geotextil, tubos de geotextil y contenedores de geotextil.

3. APLICACIONES DE LOS GEOSISTEMAS

Las principales aplicaciones de los geosistemas suelen ser: revestimientos, muros, protección contra el deslizamiento de ladera, protección contra la socavación, protección de dunas, espigones, diques exentos y arrecifes.

Revestimiento

El objetivo habitual de estos revestimientos es reforzar el perfil de la costa para evitar un incremento de erosión. Pueden estar situados respecto a la línea de orilla en playa seca o en aguas someras. El primero de los casos habría que diseñarlo para soportar los embates del oleaje en periodos extremos con una incidencia relativa de la energía del oleaje, mientras que en el segundo de los casos la estructura debe soportar la acción continuada del oleaje en temporales normales.

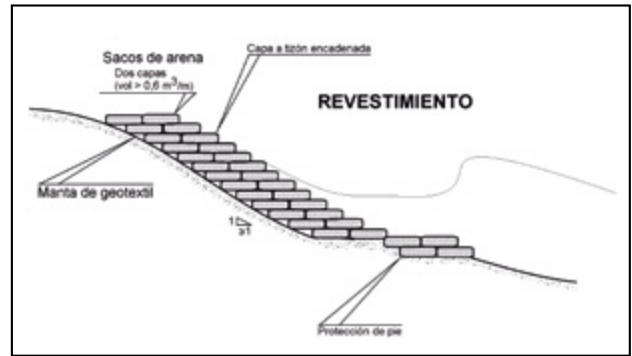


Figura 2. Revestimiento de sacos de protección de la costa.

Muros

Los muros de sacos o bolsas de geotextil rellenos de arena se diferencian, básicamente de los revestimientos en que la estructura es cercana a la vertical, debiendo aguantar el empuje de tierras. Por ello la estructura es más robusta, debiendo contener al menos dos filas de sacos a tizón encaadenados. Debe protegerse la parte superior para que no se produzca colapso por rebase, al igual que debe protegerse el pie de la estructura para evitar la socavación. Los efectos y su comportamiento son similares a los muros de playa convencionales. Suelen usarse para evitar la erosión en zonas donde por continuidad de acción marina se pretenda proteger un bien.

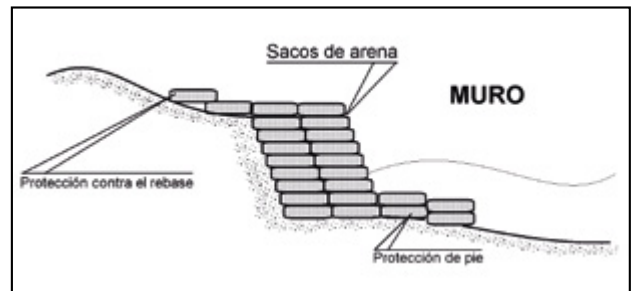


Figura 3. Muros de sacos de geotextil rellenos de arena.

Protección contra el deslizamiento de ladera

Otro de los usos que los especialistas le han dado a las estructuras de sacos rellenos de arena (Lawson 2008, PIANC 2011) es como refuerzo de laderas inestables en un entorno marino. Para evitar el deslizamiento de ladera lo que se realiza es un refuerzo en forma de revestimiento o muro que se corona con un pedraplén.

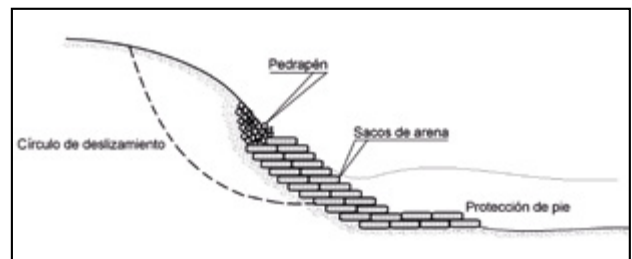


Figura 4. Aplicación contra el deslizamiento de ladera al borde del mar.

Protección contra el socavamiento

La interacción del oleaje y un muro u obra vertical o casi vertical en una playa tiende a formar una socavación

en el pie. Los sacos de geotextil rellenos de arena pueden ser utilizados para evitar esta socavación (Lawson 2008).

La disposición de los sacos debe ser tal que ocupen, al menos, el volumen que se formaría si no se dispusiese de esta obra complementaria.

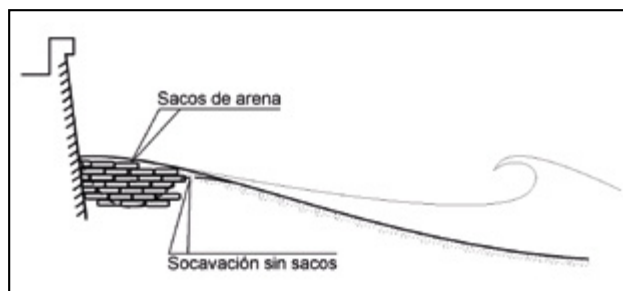


Figura 5. Sacos de geotextil aplicados en la protección contra la socavación.

Protección de dunas

Las bolsas o sacos de geotextil rellenos de arena se han usado, al igual que los tubos, para la protección de los pies de dunas, con el fin de reducir su erosión o retrasar el colapso al que puedan llegar. Consiste en la construcción de un dique a lo largo del pie de duna que mira al mar. Habitualmente la duna acaba por recubrirlo de tal forma que solamente aparece cuando el mar toca ese pie.

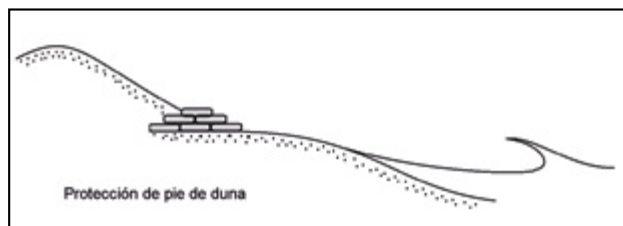


Figura 6. Sacos de geotextil para la protección de pie de duna.

Espigones

La construcción de espigones mediante bolsas o sacos de geotextil rellenos de arena suelen ser eficaces cuando se quiere conocer el comportamiento de este tipo de obras y su eficacia en una zona muy determinada. También pueden usarse tubos de geotextil, pero los sacos dan mayor versatilidad y reutilización a la obra. Los puntos más críticos se encuentran en la zona del morro del espigón, mientras que en el arranque puede que acaben siendo absorbidos por la propia arena de la playa. Por tanto el cálculo estructural debe centrarse en las condiciones estrictas del morro.

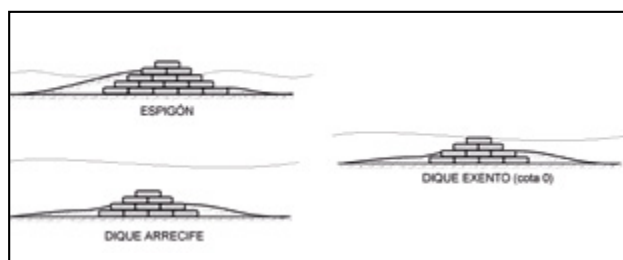


Figura 7. Estructuras de defensa de la costa de sacos de geotextil rellenos de arena.

Diques exentos y diques arrecife

Esta modalidad de obras de defensa de la costa ha sido estudiada en diversos laboratorios. Se pueden diseñar tanto con sacos como con tubos; pero el primero de los casos da mayor versatilidad y se adapta más fácilmente a las condiciones del terreno y formas que quieran darse (Lawson 2008), sin embargo, son estructuras más frágiles frente a la acción del oleaje, habiéndose producido algunos fracasos en su uso.

4. ESTABILIDAD DE LOS SACOS DE GEOTEXTIL

La estabilidad de las estructuras en las que se utilizan sacos de geotextil se ve afectada por varios factores. Para determinar el tipo de saco, la altura de ola que resiste, etc., se han desarrollado una serie de fórmulas aplicables para una estructura específica.

Este apartado tiene por objeto, indicar los principales criterios de estabilidad, de los sacos de geotextil.

Estabilidad según Pilarczyk (1996)

Llegó a la conclusión de que la estabilidad de los sacos de geotextil rellenos de arena, con una geometría tal que su relación ancho / largo sea de 1 a 3, y con un porcentaje de llenado superior al 70%, se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\frac{H_s}{\Delta \cdot D} = c \cdot \cos \alpha \cdot \xi^{-1/2} \quad (\text{Para } \xi \leq 3) \quad [1]$$

Para ($\xi > 3$ se considera $\xi = 3$)

Dónde: H_s = altura de ola significativa [m], $\Delta = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$ = densidad relativa de los sacos [-], D = altura media del saco [m], c = coeficiente de estabilidad para $\xi = 1$, ($c=2.5$), $\cos \alpha$ = proyección horizontal de la pendiente [-], $\xi = \tan \alpha / (H_s / L_o)^{1/2}$ = número de Iribarren [-] y L_o = longitud de onda en aguas profundas [m]. La densidad de los sacos (ρ_s) se puede considerar 2.000 y 2.300 kg/m³ respectivamente para la arena y para el hormigón (siendo Δ respectivamente 1 y 1,3).

La altura de ola significativa alcanza 1,5 m sin sobrepasar nunca de 2 m. Ello hace que esta fórmula solamente sea aplicable a sacos de geotextil ubicados en zonas protegidas, con escasa agitación o donde el oleaje que le llega sea residual.

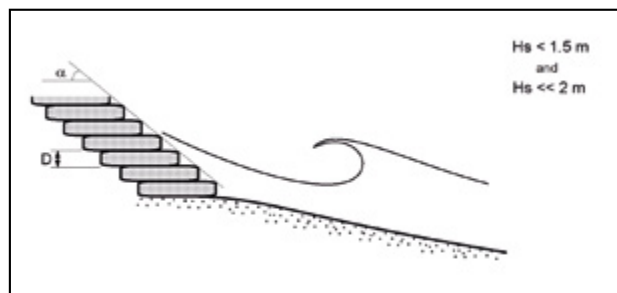


Figura 8. Variables de la fórmula de Pilarczyk (1996).

Estabilidad según Wouters (1998)

Su fórmula de estabilidad se ha obtenido de las referencias que sobre ella se hacen en otros trabajos, siendo el más reciente de Dassanayake and Oumeraci (2012).

Se basa en datos experimentales y determina el número de estabilidad, para los revestimientos.

$$N_s = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_E}{\rho_w} - 1\right) D_{50}} = \frac{C_w}{\sqrt{\xi_0}} \quad [2]$$

Dónde: N_s = número de estabilidad [-], H_s = altura de ola significativa [m], ρ_E = densidad del saco de geotextil [kg/m^3], definido como: $\rho_E = (1-n) \cdot \rho_s + \rho_w \cdot n$, n = porosidad del material de relleno [-], ρ_w = densidad del agua [kg/m^3], D_{50} = espesor de la capa de manto [m], C_w = parámetro empírico derivado de $N_s = 2,5$ [-], $\xi_0 = \tan \alpha / (H_s/L)^{1/2}$ = Número de Iribarren [-], α = ángulo de la pendiente de la estructura (°), $L_0 = g T^2 / (2\pi)$ = longitud de onda en aguas profundas para $T = T_p$ [m].

Estabilidad según Oumeraci et al. (2002)

Su fórmula es similar a la propuesta por Wouters (1998), para determinar el número de estabilidad. Sin embargo se basa en datos obtenidos en laboratorio, canal y gran canal.

- La fórmula obtenida para revestimientos es:

$$N_s = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_E}{\rho_w} - 1\right) D_{50}} = \frac{C_w}{\sqrt{\xi_0}} \quad [3]$$

Dónde: D = diámetro característico del saco de geotextil definido como $D = l \sin \alpha$, l = longitud del saco de geotextil (en la dirección del oleaje) [m], C_w = parámetro empírico derivado de $N_s = 2,75$ [-].

- La fórmula obtenida para sacos situados en la cresta de los revestimientos es:

$$N_s = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_E}{\rho_w} - 1\right) D_{50}} < 0,79 + 0,09 \frac{R_c}{H_s} \quad [4]$$

Dónde: R_c = francobordo [m].

Estabilidad según Recio y Oumeraci (2010)

Su fórmula se obtiene al considerar dos tipos de fallos en una estructura compuesta por sacos de geotextil, vuelco y deslizamiento. Los coeficientes se determinaron realizando ensayos en modelo reducido.

Se basa en un tipo de saco que tiene las siguientes relaciones geométricas. Las fórmulas de cálculo de la estabilidad de una estructura de sacos son las siguientes, sustituyendo los datos de volúmenes y áreas de proyección en función de la longitud del saco (l_c), la anchura ($1/2 l_c$) y la altura ($1/5 l_c$).

Sin tener en cuenta la deformación por deslizamiento:

$$I_{c \text{ (deslizamiento)}} \geq u^2 \frac{(0,5 C_D + 2,5 C_L \mu)}{\left(\mu \Delta g - C_M \frac{\partial u}{\partial t}\right)} \quad [5]$$

Teniendo en cuenta la deformación en el deslizamiento:

$$I_{c \text{ (deslizamiento)}} \geq u^2 \frac{(0,5 K_{SCD} C_D + 2,5 K_{OCL} C_L \mu)}{\left(\mu K_{SR} \Delta g - K_{SCM} C_M \frac{\partial u}{\partial t}\right)} \quad [6]$$

Teniendo en cuenta la deformación por el vuelco:

$$I_{c \text{ (vuelco)}} \geq u^2 \frac{(0,05 K_{OCD} C_D + 1,25 K_{OCL} C_L \mu)}{\left(0'5 \Delta K_{OR} g - 0'1 K_{OCM} C_M \frac{\partial u}{\partial t}\right)} \quad [7]$$

Dónde: ρ_s = densidad del saco [kg/m^3], ρ_w = densidad del agua [kg/m^3]. Y C_D , C_L , C_M , K_{SCD} , K_{OCL} , K_{OCD} , K_{OR} y K_{OCM} = son parámetros empíricos.

Estabilidad según Dassanayake y Oumeraci (2012)

Analizaron tres efectos sobre la estabilidad para los sacos de geotextil, concluyendo:

- Francobordo: aplicable a estructuras de baja cota.
- Proporción de llenado de arena: si el llenado es al 100% la estabilidad es mayor frente al 80% de llenado del saco.
- Tipo de geotextil: la estabilidad de los sacos de geotextil tejido es mayor que la de los sacos de geotextil no tejido.
- Angulo de inclinación de la pieza en la estructura: la estabilidad de los sacos de geotextil cuando se disponen inclinados respecto a la horizontal.

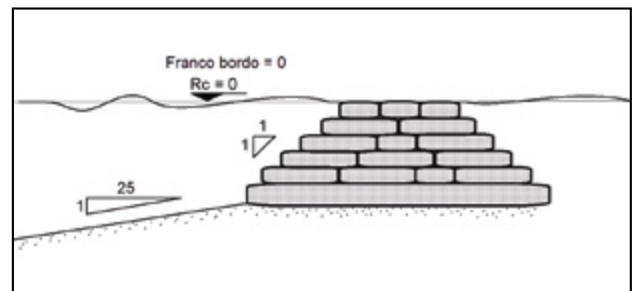


Figura 9. Estructura ensayada por Dassanayake y Oumeraci (2012).

5. ESTABILIDAD DE LOS TUBOS DE GEOTEXTIL

Los métodos de diseño se basan en los resultados obtenidos en diferentes ensayos en modelo físico a escala reducida. Sin embargo, los mecanismos de fallo inducen a la inestabilidad de los tubos sin aprobarse un método de diseño genérico (PIANC 2011). Todas las fórmulas de estabilidad consideradas, corresponden a aquellos tubos de geotextil cuya disposición es perpendicular a la dirección del oleaje.

Estabilidad según Pilarzyk (2000)

Como consecuencia del estudio realizado por Delf Hydraulics (1994) para la empresa Nicolon, basado en un análisis teórico sobre la estabilidad de los tubos de geotextil rellenos de arena y de mortero, en los que la cota del tubo coincide con el nivel del mar en calma. Se concluye que la altura crítica de onda es igual al diámetro teórico del tubo. Y se detecta una reducción del periodo de la ola, el aplanamiento del tubo y la disminución del nivel del agua como efectos positivos sobre la estabilidad.

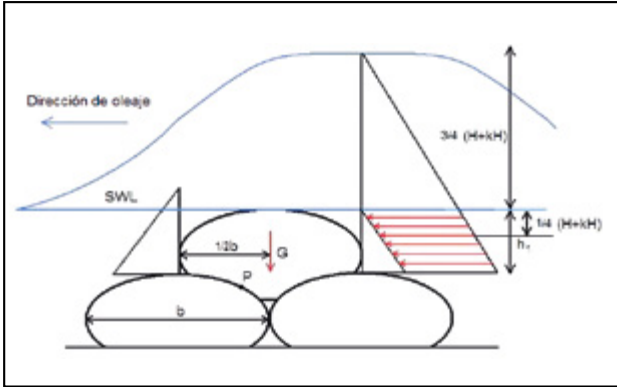


Figura 10. Esquema de fuerzas que actúan sobre el tubo según Pilarczyk (2000).

Considerando el momento de resistencia al vuelco frente al oleaje, en el punto P del tubo de geotextil, determinaron la siguiente expresión:

$$M_0 = \frac{3}{4}(1+k)H \frac{1}{2} h_1^2 \rho_w g \text{ por } m \text{ lineal} \quad [8]$$

Dónde: k = coeficiente de reflexión ($\approx 0,45$), H = altura de ola [m], h_1 = altura del tubo [m], ρ_w = densidad del agua [kg/m^3] y g = aceleración debida a la gravedad [m/s^2].

Y de su análisis con relación a la estabilidad frente al vuelco se concluye:

$$H < \frac{4}{3} = Ab \frac{\Delta_t}{h_1^2(1+k)} \quad [9]$$

Dónde: A = área de la sección del tubo de geotextil [m^2] y $\Delta_t = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w$ = densidad relativa del tubo de geotextil [-].

La expresión (9) se simplifica al considerar la posición del eje de los tubos perpendicular a la dirección del oleaje, con una cota inferior al nivel del agua, obteniendo:

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

Dónde: H_s = altura de ola significativa [m], Δ_t = densidad relativa del tubo de geotextil [-] y b = ancho máximo del tubo [m].

En dicha expresión no se incluye el porcentaje de llenado. Sin embargo, considerando las mediciones de la altura y anchura de los tubos de geotextil utilizados en el modelado físico, para determinar la estabilidad de la fórmula anterior, se determinó que los tubos se llenan hasta aproximadamente el 90%.

Estabilidad según Oh y Shin (2006)

Analizaron la estabilidad de los tubos de geotextil basándose en un análisis bidimensional, en el que consideraron una sección rectangular equivalente. Determinando los siguientes coeficientes de seguridad:

- Coeficiente de seguridad frente al deslizamiento:

$$SF_{\text{deslizamiento}} = \frac{F}{P_h} = \frac{P_v \times \tan \phi'}{P_w \times h_{GT}} \quad [11]$$

Dónde: P_h = fuerza horizontal, F = fuerza vertical, P_v = carga hidrodinámica sobre el tubo de geotextil y peso del tubo de geotextil, P_w = carga hidrodinámica debida al oleaje, h_{GT} = altura del tubo de geotextil y ϕ' = ángulo de rozamiento entre tubo de geotextil y el cimiento de arena.

- Coeficiente de seguridad frente al vuelco:

$$SF_{\text{vuelco}} = \frac{M_R}{M_O} = \frac{P_v \times \frac{B'}{2}}{P_w \times \frac{h_{GT}}{2}} \quad [12]$$

Dónde: B' = ancho de la sección rectangular equivalente.

- Coeficiente de seguridad frente al rodamiento:

$$SF_{\text{rodamiento}} = \frac{Q_u}{Q_a} = \frac{cN_c + \left(\frac{1}{2}\right)\gamma_s B' N_\gamma}{\frac{P_w}{B' - 2e'}} \quad [13]$$

Dónde: c = coeficiente de cohesión del terreno, N_c y N_γ = coeficientes de rodamiento, γ_s = peso del suelo sumergido y e' = excentricidad de la carga hidrodinámica oscilante.

$$e' = \frac{P_w \times h_{GT}}{3F} \quad [14]$$

Del análisis bidimensional se dedujo que en una sección con dos tubos y para una altura de ola significativa de 6m el desplazamiento era menor que para una sección con un tubo y la misma altura de ola significativa. A su vez para una sección con dos filas de tubo y profundidad cero por encima de la cresta resulta más estable frente al oleaje, que para una sección con dos tubos y 0,5m de profundidad por encima de la cresta.

Estabilidad según CUR 217 (CUR 2006)

CUR 217 es una guía en la que se recomienda usar una formula muy parecida a la presentada por Pilarczyk (2000), para calcular la altura de ola límite de resistencia del tubo. Considerando que el tubo sometido a mayor carga es el superior de la estructura, cuando ésta está formada por diferentes capas. Siendo la fórmula que determina la altura de ola límite de resistencia del tubo, la siguiente:

$$\frac{H_s}{\Delta_t D_k} \leq 1 \quad [15]$$

Dónde: H_s = Altura de ola significativa, D_k = Altura del tubo de geotextil (cuando el tubo es perpendicular a la dirección del oleaje) o longitud del tubo de geotextil (cuando el tubo es paralelo a la dirección del oleaje) y Δ_t = Densidad relativa del tubo o de la estructura.

Estabilidad según Van Steeg y Vastenburger (2010)

Mostraron los resultados de los ensayos realizados en el Gran Canal de Deltares utilizando tubos de geotextil con el objeto de determinar su estabilidad. Para lo cual analizaron el comportamiento de los tubos de geotextil rellenos de arena en tres posiciones básicas diferentes, con algunas

variantes de ellas: la primera era situar un tubo de geotextil sobre una plataforma horizontal, tras una pendiente, con la cota del geotextil a la altura del nivel medio del mar, considerando como altura de referencia la cintura de una persona; la segunda era similar pero con dos tubos de geotextil consecutivos en horizontal; y en la tercera situaban un tercer tubo geotextil a caballo entre los dos anteriores, sobresaliendo del nivel medio. En total ensayaron siete estructuras de tubos de geotextil.

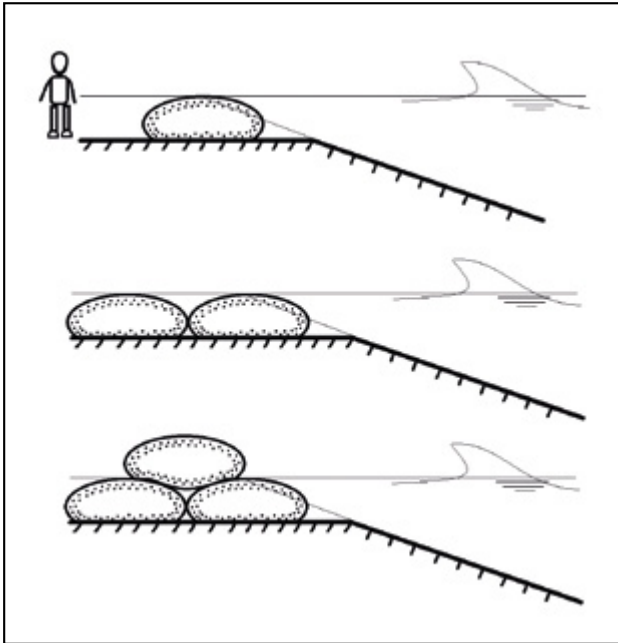


Figura 11. Esquema general de los ensayos (Van Steeg y Vastenburg 2010).

6. ¿LOS ELEMENTOS DE GEOTEXTIL SON UN DISEÑO FIABLE EN LA ACTUALIDAD?

Los geosistemas, como los sacos de geotextil o los tubos de geotextil son elementos que constituyen una buena alternativa en las estructuras de defensa de la costa con relación al tipo de material, su tiempo de ejecución y su coste. Sin embargo existen una serie de inconvenientes con relación al uso de los elementos de geotextil, que se dan lugar al planteamiento de algunas preguntas como: ¿son materiales adecuados para resistir las inclemencias del tiempo y del oleaje?, ¿proceden de métodos de cálculo fiables?, ¿son fácilmente degradables?, y ¿cómo es su impacto visual? Muchas preguntas como estas podrían agruparse en: ¿son eficaces en todos los casos? o ¿existe alguna limitación a su uso? Para responder a estas cuestiones nos hemos basado en dos ejemplos contrapuestos y en las formulaciones del cálculo de estabilidad de apartados anteriores.

Aplicación de los tubos de geotextil en la playa de Young-Jin (Corea)

Oh y Shin (2006) analizaron el comportamiento de los tubos de geotextil sumergidos como solución a un problema de erosión en la playa de Young-Jin, en la costa este de Corea, agravándose el problema cuando las olas alcanzaron una altura de ola significativa de 4 m durante el invierno.

Basándose en los resultados del análisis de estabilidad y del ensayo de modelo hidráulico a escala reducida, en el

que se utilizaron dos líneas de tubos de geotextil. Se determinó que era más estable y eficaz que otros planteamientos de diseño propuestos. Posteriormente y como resultado de la ejecución de la obra, la línea de orilla avanzó entre 2,4 y 7,6 m hacia el mar, acumulándose sedimento junto a los tubos de geotextil.

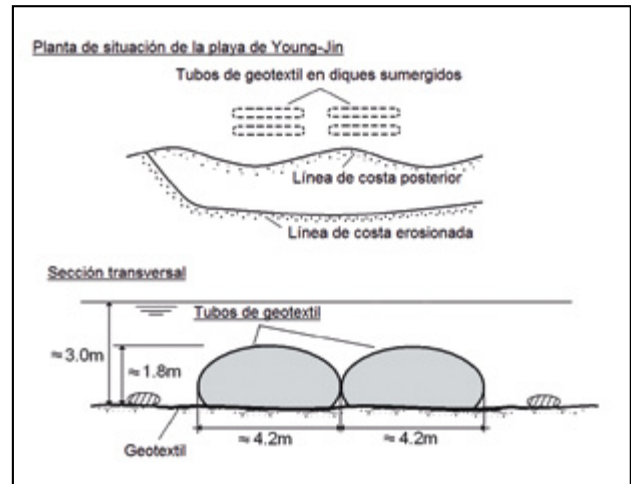


Figura 12. Planta y sección transversal de la playa Young-Jin (Corea).

Aplicación de los tubos de geotextil en la costa de Jumeirah (Dubai)

Por otro lado, en la parte norte de la costa de Jumeirah, en el emirato de Dubai, Weerakoon et al. (2003) utilizaron tubos de geotextil como solución de defensa de la costa. Las principales recomendaciones basadas en la experiencia fueron principalmente que la colocación de los tubos de geotextil en alta mar sólo sería posible con un oleaje muy tranquilo y que las alturas de ola superiores a 40-50 cm hacían difícil mantener las bocas de llenado en posición durante la operación de relleno.

Se observó una reducción significativa de la energía del oleaje al entrar en la zona de bajura con pequeñas olas y bajo niveles muy bajos de marea. Sin embargo, resultó que la anchura de la cresta del tubo era insuficiente en comparación con las longitudes de onda de las olas altas.

La erosión fue un problema significativo para las estructuras con tubos geotextil. Se produjo una fuerte erosión a

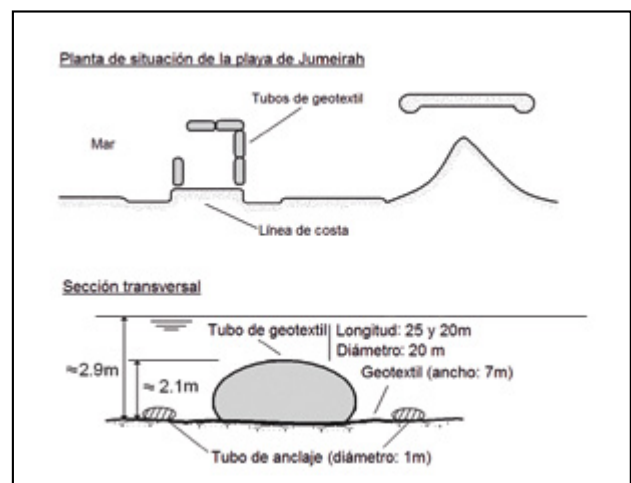


Figura 13. Planta y sección transversal de la costa de Jumeirah (Dubai).

ambos lados de los tubos paralelos a la orilla en alta mar. Debido a la rotura de la ola y a la resaca impulsada por corrientes en el lado exterior. Los tubos de gran tamaño fueron vulnerables a un colapso total debido a la ruptura en cualquier lugar a lo largo de su longitud.

Y en general, los tubos de geotextil no fueron estructuras visualmente atractivas, ya que la remodelación de los tubos después de cambiar la arena y las deformaciones en el fondo del mar tendieron a perder la calidad estética de la estructura de manera significativa y al crecimiento de algas marinas, por lo que los tubos no mejoraron su apariencia.

Crítica a los métodos de estabilidad

Considerando los métodos de estabilidad indicados anteriormente, mediante su análisis se realizan las siguientes indicaciones:

- La fórmula de estabilidad de Pilarczyk (1996) para sacos de geotextil expuestos directamente al oleaje es aplicable para alturas de ola inferiores a 2m. Esta limitación es únicamente posible en zonas costeras protegidas, con escasa agitación o con oleaje residual.
- Pilarczyk (2000) considera la altura crítica de ola igual al diámetro teórico del tubo. Análogamente esta restricción, respecto a la altura de ola, limita su ubicación en zonas costeras.
- Las fórmulas de estabilidad de Oumeraci et al. (2002) proceden de ensayos de laboratorio, por lo que sólo se deben aplicar en las mismas condiciones en las que se realiza el ensayo.
- Y la fórmula estabilidad de Recio - Molina y Oumeraci (2009) sólo se pueden aplicar para un tipo de saco de geotextil.

Por lo tanto, los métodos de estabilidad no son aplicables para todas las alturas de ola ni para todos los sacos de geotextil. Quedando limitada su ubicación en la costa a zonas protegidas.

7. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta las indicaciones anteriores, los elementos de geotextil rellenos de arena, se pueden considerar más como un complemento a los sistemas de protección costera, que como una alternativa.

Los modelos analíticos y / o experimentales para simular el rendimiento de los geosistemas se han desarrollado y calibrado con resultados de los ensayos realizados por diferentes investigadores. Proporcionando sólo resultados indicativos.

La degradación debido a la luz ultravioleta del sol, a la abrasión por la arena, y la rotura por escombros transmitidas por el agua o el vandalismo se cita comúnmente como las principales preocupaciones de los fracasos materiales. Existiendo una diferente opinión sobre si los elementos de geotextil necesitan una protección adicional contra la degradación UV, el vandalismo y el desgaste general. La observación y el seguimiento de los proyectos han proporcionado información respecto a la idoneidad y la esperanza

de vida de los elementos de geotextil para diferentes aplicaciones costeras.

Por otro lado, se ha comprobado que los procedimientos establecidos para la colocación de los elementos de geotextil requieren condiciones de calma, debido a la incertidumbre sobre su comportamiento bajo la acción de un fuerte oleaje.

La durabilidad del material y el comportamiento a largo plazo de los elementos de geotextil siguen siendo los puntos de interés. El seguimiento sistemático de los proyectos realizados y la evaluación de los datos de prototipos y del laboratorio puede proporcionar información útil para fines de verificación, y el perfeccionamiento de los criterios de diseño.

Todavía hoy en día se plantean algunas dudas respecto a la fiabilidad de los métodos de diseño en condiciones de fuerte temporal. Por lo que será necesario su mejora y un incremento de la experiencia práctica en diversas condiciones de carga.

8. AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece la participación de los miembros del Centro de Estudios de Puertos y Costas, perteneciente al CEDEX, sin los cuales no hubiera sido posible realizar este trabajo.

9. 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.
- 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), ISSN 0046-5828.
- CUR (2006). *CUR217: Ontwerpen met geotextile zandelementen*. Stichting CUR, Gouda.
- Dassanayake, D.T. y Oumeraci, H. (2012). *Hydraulic stability of coastal structures made of geotextile sand containers: effect of engineering properties of GSCs*. International Congress on Coastal Engineering (ICCE 2012), Santander.
- Leshchinsky, D. y Leshchinsky, O. (1996). *Geosynthetic confined pressurized slurry (GeoCoPS): Supplemental notes for version 1.0*. Report TR CPAR-GL-96-1, US Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Liu, G. S. (1981). *Design criteria of sand sausages for beach defenses*. XIX IAHR. Congress, New Delhi, India, 95-97.
- Lawson, C. R. (2008). *Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering*. Geosynthetic International, 15(6), 384-427.
- 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.
- Oumeraci, H., Bleck, M., Hinz, M. y Möller, J. (2002). *Theoretische Untersuchungen zur Anwendung geotextiler Sandcontainer im Küstenschutz*. Leichtweiss-Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources, (866), Braunschweig.
- PIANC (2011). *The application of geosynthetics in waterfront areas*. PIANC, 13.
- Pilarczyk, K. W. (1990). *Coastal Protection*. A.A. Balkema Publisher, Rotterdam.

Pilarczyk, K. W. (1996). *Geotextile systems in coastal engineering-an overview*. Proc. 25th Conference on Coastal Engineering, ASCE, 2114-2127.

Pilarczyk, K. W. (2000). *Geosynthetics and geosystems in hydraulic and coastal engineering*. A. A. Balkema, Rotterdam.

Recio-Molina, J. y Yasuhara, K. (2005). *Stability of modified geotextile wrap-around revetments (GWR) for coastal protection*. *Geosynthetics International*, 12(5).

Recio-Molina, J. y Oumeraci, H. (2009). *Processes affecting the hydraulic stability of coastal revetments made of geotextile sand containers*. *Coastal Engineering*, 56, 260-284.

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.

Weerakoon, S., Mocke, G. P., Smit, F. y Al Zahed, K. (2003). *Cost effective coastal protection works using sand field geotextile containers*. CODEPEC VI, Colombo, Sri Lanka.

Wouters, J. (1998). *Open Taludbekledingen; stabiliteit van geosystems (Stability of geosystems)*. Delft Hydraulics, report H1930, Annex 7 (in Dutch).