UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

**LUGARES ADECUADOS PARA LA UTILIZACIÓN DE
NUEVOS MATERIALES Y FORMAS CON GEOTEXTILES
EN LA GESTIÓN INTEGRAL DE LA ZONA LITORAL COMO
PROTECCIÓN AMBIENTAL**

TESIS DOCTORAL

Ana Isabel Antón Camacho
Ingeniero de Caminos Canales y Puertos

Año 2016

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

**LUGARES ADECUADOS PARA LA UTILIZACIÓN DE
NUEVOS MATERIALES Y FORMAS CON GEOTEXTILES
EN LA GESTIÓN INTEGRAL DE LA ZONA LITORAL COMO
PROTECCIÓN AMBIENTAL**

TESIS DOCTORAL

Autor: Ana Isabel Antón Camacho
Ingeniero de Caminos Canales y Puertos

Director: José Luís Almazán Gárate
Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos

Año 2016

TESIS DOCTORAL

LUGARES ADECUADOS PARA LA UTILIZACIÓN DE NUEVOS MATERIALES Y FORMAS CON GEOTEXTILES EN LA GESTIÓN INTEGRAL DE LA ZONA LITORAL COMO PROTECCIÓN AMBIENTAL

Autor: Ana Isabel Antón Camacho
Ingeniero de Caminos Canales y Puertos

Director: José Luís Almazán Gárate
Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos

Tribunal nombrado por el Mgfco, y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica,
de Madrid, el día   de   de 2016.

Presidente:

Secretario:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Acuerda otorgarle la calificación de:

Madrid,   de   de 2.016

INDICE GENERAL	I-IX
AGRADECIMIENTOS	X
RESUMEN Y ABSTRACT	XI-XII
LISTADO DE TABLAS	XIII-XIV
LISTADO DE FIGURAS.....	XV-XXIV

CAPÍTULOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1.1
1.1. CONSIDERACIONES DE PARTIDA	1.3
1.1.1 Importancia de la erosión costera	1.3
1.1.2 Gestión Integral de la Costa	1.4
1.1.3 Importancia de las obras de geotextil en la Ingeniería de Costas	1.9
1.1.4 Necesidad del diseño de las obras de geotextil	1.10
1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN Y PROPUESTA METODOLÓGICA	1.11
1.2.1 Objetivos de la investigación	1.11
1.2.3 Propuesta metodológica	1.12
1.3. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	1.14
CAPÍTULO 2: ANÁLISIS CRÍTICO DEL ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	2.1
2.1. INTRODUCCIÓN.....	2.3
2.2. PRECEDENTES HISTÓRICOS	2.3
2.3. DESARROLLO DESDE EL SIGLO XX	2.4
2.4. CRONOLOGÍA DE LOS AVANCES DEL CONOCIMIENTO SOBRE LOS GEOTEXTILES EN LA INGENIERÍA DE COSTAS	2.6
2.5. EVOLUCIÓN DEL CONOCIMIENTO RECIENTE.....	2.13
2.5.1 Liu (1981).....	2.13
2.5.2 Silvester (1986).....	2.14
2.5.3 Leschchinsky y Leschchinsky (1996).....	2.15
2.5.4 Pilarczyk (1996).....	2.19

2.5.5 Plaut y Klusman (1999)	2.22
2.5.6 Bezuijen et al. (2000).....	2.23
2.5.7 Oumeraci et al. (2003)	2.23
2.5.8 Pilarczyk (2003).....	2.25
2.5.9 Zhu et al. (2004)	2.27
2.5.10 Recio-Molina y Yasuhara (2005)	2.27
2.5.11 Jones et al. (2006).....	2.29
2.5.12 Oh y Shin (2006).....	2.29
2.5.13 Jackson et al. (2006)	2.32
2.5.14 Yasuhara y Recio-Molina (2007)	2.34
2.5.15 Heilman et al. (2008)	2.34
2.5.16 Lawson (2008).....	2.35
2.5.17 Mori et al. (2008).....	2.43
2.5.18 Jackson et al. (2008)	2.45
2.5.19 Smith (2008).....	2.45
2.5.20 Pilarczyk (2008).....	2.47
2.5.21 Wert et al. (2008).....	2.47
2.5.22 Recio, J. (2008) y Recio y Oumeraci (2008, 2009).....	2.50
2.5.23 Akter et al. (2009).....	2.56
2.5.24 Harris y Sample (2009)	2.57
2.5.25 Blacka et al. (2009).....	2.59
2.5.26 Aminti et al. (2010).....	2.60
2.5.27 Yan y Chu (2010).....	2.63
2.5.28 Jackson (2010).....	2.65
2.5.29 Akter et al. (2010).....	2.66
2.5.30 Hornsey et al. (2011).....	2.66
2.5.31 Wilke y Hangen (2011)	2.69
2.5.32 Steeg et al. (2011)	2.71
2.5.33 Weggel et al. (2011).....	2.74
2.5.34 Cantré y Saathopff (2011)	2.74
2.5.35 Neveset al. (2011)	2.74
2.5.36 Khalilzad y Gabr (2011).....	2.75

2.5.37 Chuet al. (2011)	2.75
2.5.38 Leey Douglas (2012).....	2.77
2.5.39 Yasuhara et al. (2012)	2.79
2.5.40 Dassanayake y Oumeraci (2012)	2.79
2.5.41 Hornsey (2012)	2.83
2.5.42 Bezuijen y Pilarczyk (2012)	2.83
2.6. ANÁLISIS DE LAS PUBLICACIONES MÁS DESTACADAS	2.84
2.6.1 CERC (1984)	2.84
2.6.2 USACE (1984 y 2004)	2.85
2.6.3 USACE (1995).....	2.88
2.6.4 Lyne (2003)	2.89
2.6.5 CUR (2004, 2006).....	2.89
2.6.6 USACE (2006).....	2.92
2.6.7 Van Steeg y Vastenburg (2010).....	2.93
2.6.8 PIANC (2011).....	2.96
2.6.9 Rousset et al. (2012)	2.98
2.6.10 Greenwood et al. (2012).....	2.100
2.6.11 Kriel (2012)	2.101
2.6.12 Bezuijen y Vastenburg (2012).....	2.102
2.7. CATÁLOGOS Y MARCAS ESPECIALIZADAS SOBRE OBRAS DE GEOTEXTIL .	2.103
2.8. CLASIFICACIÓN DE PUBLICACIONES, AUTORES, POR TIPO DE OBRAS	2.105
 CAPÍTULO 3: ESTUDIO DE TIPOLOGÍAS Y COMPORTAMIENTO	 3.1
 3.1. ASPECTOS GENERALES.....	 3.3
3.2. MATERIAL DE RELLENO	3.6
3.2.1 Elección del material de relleno	3.6
3.2.2 Pérdidas de arena en las piezas de geotextil. exigencias técnicas.....	3.7
3.2.3 Pérdidas de arena en la pieza en las operaciones de llenado	3.10
3.2.4 Exigencias al mortero como material de relleno	3.11
3.3. GEOTEXTILES: TIPOLOGÍA Y PROPIEDADES. ELECCIÓN	3.13
3.3.1 Tipología de los geotextiles	3.13

3.3.2 Propiedades de los geotextiles.....	3.16
3.3.3 Elección de los geotextiles	3.24
3.4. TIPOS DE PIEZAS DE GEOTEXTIL. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES	3.25
3.4.1 Bolsas de geotextil.....	3.26
3.4.2 Tubos de geotextil.....	3.27
3.4.3 Contenedores de geotextil	3.28
3.4.4 Cortinas de geotextil	3.28
3.5. DISPOSICIÓN DE LAS PIEZAS DE GEOTEXTIL EN LA ESTRUCTURA.....	3.29
3.5.1 Disposición de las bolsas o sacos de geotextil.....	3.29
3.5.2 Disposición de los tubos de geotextil	3.31
3.6. TIPOLOGÍA Y EJEMPLOS DE LAS ESTRUCTURAS BÁSICAS DE GEOTEXTIL... 3.33	
3.6.1 Estructuras auxiliares o complementarias.....	3.33
3.6.2 Estructuras independientes de geotextil.....	3.35
3.7. APLICACIONES MÁS FRECUENTES DE LAS ESTRUCTURAS DE GEOTEXTIL .. 3.39	
3.7.1 Revestimientos.....	3.39
3.7.2 Muros	3.41
3.7.3 Protección contra el deslizamiento de ladera.....	3.42
3.7.4 Protección contra la socavación	3.42
3.7.5 Protección de dunas	3.43
3.7.6 Espigones.....	3.44
3.7.7 Diques exentos y arrecife	3.44
3.8. UBICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE GEOTEXTIL RESPECTO A LA COSTA. SOLICITACIONES A CONSIDERAR	3.45
3.8.1 Ubicación de la estructura de geotextil respecto al perfil de la costa	3.45
3.8.2 Ubicación de la obra respecto al tipo de costa	3.51
3.8.3 Altura de ola de cálculo a considerar en el diseño	3.56

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA PROPUESTA EN EL CRITERIO DE DECISIÓN DE LOS LUGARES ADECUADOS PARA SU USO.....4.1

4.1. INTRODUCCIÓN.....	4.3
4.2. ESTRUCTURAS COMPUESTAS DE SACOS O BOLSAS DE GEOTEXTIL.....	4.4
4.2.1 Tipos y características de los sacos de geotextil.....	4.4

4.2.2 Dimensiones de los sacos de geotextil.....	4.4
4.2.3 Mecanismos de fallo de los sacos de geotextil.....	4.6
4.2.3.1 Estado límite externo	4.7
4.2.3.2 Estado límite interno.....	4.13
4.2.3.2.1. Inestabilidad local.....	4.13
4.2.3.2.2. Rotura del saco de geotextil.....	4.15
4.2.3.2.3. Deformación de la bolsa	4.20
4.2.4 Formulaciones para el cálculo de estabilidad de los sacos de geotextil.....	4.20
4.2.4.1 Fórmula de Pilarczyk (1996).....	4.23
4.2.4.2 Fórmula de Wouters (1998)	4.24
4.2.4.3 Fórmula de Oumeraci et al (2002).....	4.25
4.2.4.4 Fórmula de Recio (2007) y Recio y Oumeraci (2010)	4.26
4.2.4.5 Fórmula de Mori (2008) y Mori et al (2008)	4.28
4.2.4.6 Fórmula de Dassanayake y Oumeraci (2013)	4.29
4.2.4.7 Método de cálculo de Coghlan et al. (2009).....	4.35
4.2.5 Validez y limitaciones de las formulaciones para sacos de geotextil	4.36
4.3.5.1 Limitaciones de la fórmula de Pilarczyk (1996).....	4.37
4.3.5.2 Limitaciones de la fórmula de Wouters (1998).....	4.37
4.3.5.3 Limitaciones de la fórmula de Oumeraci et al. (2002, 2003)	4.41
4.3.5.4 Limitaciones de la fórmula de Mori(2008) y Mori et al. (2008)	4.45
4.3.5.5 Limitaciones de la fórmula de Dassanayake y Oumeraci(2013)	4.48
4.3.5.6 Limitaciones del método de cálculo de Coghlan et al. (2009)	4.50
4.2.6 Resumen de las limitaciones en formulaciones con sacos de geotextil	4.52
4.2.7 Estructuras realizadas con sacos de geotextil rellenos de arena	4.54
4.2.7.1 Revestimientos con sacos de geotextil rellenos de arena	4.56
R.S.1 Revestimiento - Playa de Jumeirah (Dubai)	4.56
R.S.2 Revestimiento - Playa de Stockton (Australia)	4.57
R.S.3 Revestimiento - Playa de Maroochydore (Australia)	4.60
R.S.4 Revestimiento - Playa de Kelso (Sudáfrica)	4.62
R.S.5 Revestimiento - Playa de Amanzimtoti (Sudáfrica).....	4.64
R.S.6 Revestimiento - North Beach en la Bahía de Jeffreys (Sudáfrica)	4.66
R.S.7 Revestimiento -Playa de Kelly (Sudáfrica).....	4.68

4.2.7.2 Espigones con sacos de geotextil rellenos de arena	4.70
E.S.1 Espigones en la Playa de Maroochydore (Australia).....	4.70
E.S.2 Espigón en Clifton Spings (Australia)	4.72
E.S.3 Espigones en Langebaan (Sudáfrica).....	4.74
4.3. ESTRUCTURAS COMPUESTAS DE TUBOS DE GEOTEXTIL	4.76
4.3.1 Formas y dimensiones de los tubos de geotextil	4.76
4.3.2 Consideraciones de los tubos de geotextil	4.81
4.3.2.1 El porcentaje de llenado y la deformación.....	4.81
4.3.2.2 La tensión del geotextil.....	4.85
4.3.2.3 La socavación en el pie	4.94
4.3.2.4 La permeabilidad	4.95
4.3.3 Mecanismos de fallo de los tubos de geotextil.....	4.95
4.3.3.1 Mecanismos de fallo externos	4.96
4.3.3.2 Mecanismos de fallo internos.....	4.98
4.3.4 Formulas para el cálculo de estabilidad de los tubos de geotextil.....	4.99
4.3.4.1 Fórmula de Pilarczyk (2000).....	4.99
4.3.4.2 Fórmula de CUR 217 (2006).....	4.101
4.3.4.3 Fórmula de Van Steeg y Vastenburg (2010).....	4.101
4.3.5 Validez y limitaciones de las formulaciones para tubos de geotextil	4.105
4.3.5.1 Limitaciones de la fórmula de Pilarczyk (2000)	4.105
4.3.5.2 Limitaciones de la fórmula de CUR 217 (2006)	4.105
4.2.7.3 Limitaciones de la fórmula de Van Steeg y Vastenburg (2010).....	4.106
4.3.6 Resumen de las limitaciones en formulaciones con tubos de geotextil	4.107
4.3.7 Estructuras realizadas con tubos de geotextil rellenos de arena	4.108
4.2.7.1 Obras auxiliares con tubos de geotextil.....	4.109
O.A.1 Núcleo de diques en las islas artificiales Amwaj de Bahréin (Dubai)	4.109
O.A.2 Núcleo de diques en la provincia de Esmeraldas (Ecuador).....	4.111
O.A.3 Refuerzo de dunas en Beach Haven (Nueva Jersey)	4.113
4.2.7.2 Espigones con tubos de geotextil	4.115
E.T.1 Espigón en la playa de Kirra, Queensland (Australia)	4.115
E.T.2 Espigones con forma de T en Upham Beach (Florida).....	4.117
4.2.7.3 Diques con tubos de geotextil	4.119

D.T.1 Diques arrecife en la playa de Narrow Neck (Australia)	4.119
D.T.2 Diques exentos en la playa de Young-Jin (Corea).....	4.121
D.T.3 Diques rompeolas y espigón en el Dorado Royale (Méjico).....	4.123
D.T.4 Diques sumergidos en las playas de la costa de Cancún (Méjico)	4.125
D.T.5 Dique de contención en Enkhuizen (Holanda)	4.127
CAPÍTULO 5: RESULTADOS, DISCUSIÓN Y VALIDACIÓN.....	5.1
5.1. INTRODUCCIÓN.....	5.3
5.2. LUGARES ADECUADOS PARA EL USO DE ESTRUCTURAS COSTERAS DE SACOS O BOLSAS DE GEOTEXTIL	5.4
5.2.1 Zonas costeras aptas para la aplicación de las formulaciones de diseño de revestimientos compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena	5.4
5.2.1.1. Formulaciones para revestimientos con sacos de geotextil	5.5
5.2.1.2. Validación de las formulaciones para revestimientos con ejemplos reales.....	5.17
5.2.2 Zonas costeras aptas para la aplicación de las formulaciones de diseño de diques o espigones compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena	5.26
5.2.2.1. Formulaciones para diques o espigones compuestos con sacos de geotextil	5.26
5.2.2.2. Validación de las formulaciones para diques o espigones con ejemplos reales....	5.33
5.3. LUGARES ADECUADOS PARA EL USO DE ESTRUCTURAS COSTERAS DE TUBOS DE GEOTEXTIL.....	5.39
5.3.1 Zonas costeras aptas para la aplicación de las formulaciones de diseño de revestimientos compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena	5.39
5.3.1.1. Formulaciones para revestimientos con tubos de geotextil	5.40
5.3.1.2. Validación de las formulaciones para revestimientos con ejemplos reales.....	5.50
5.3.2 Zonas costeras aptas para la aplicación de las formulaciones de diseño de diques compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena	5.61
5.3.2.1. Formulaciones para diques con tubos de geotextil.....	5.62
5.3.2.2. Validación de las formulaciones para diques con ejemplos reales	5.72
5.4. ELEMENTOS DE MEJORA PARA EL USO DE ESTRUCTURAS COSTERAS DE ELEMENTOS DE GEOTEXTIL	5.82
5.4.1. Elementos de mejora de estructuras compuestas por sacos de geotextil.....	5.82
5.4.1.1. Celdas con grava en la parte superior e inferior de la estructura.....	5.82
5.4.1.2. Sistema de anclaje de los sacos de geotextil mediante redes	5.83

5.4.1.3. Sistema de anclaje mediante correas alrededor de cada saco de geotextil y fijados a toda la estructura	5.84
5.4.2 Elementos de mejora de estructuras compuestas por tubos de geotextil.....	5.84
5.4.2.1. Sistema de anclaje de los tubos de geotextil mediante correas alrededor de toda la sección transversal de la estructura.....	5.85
5.4.2.2. Sistema de anclaje de los tubos mediante correas y tubos de PVC	5.86
5.4.2.3. Tubos de geotextil con sección transversal de multi-celdas.....	5.88
5.4.3 Elementos de mejora frente a la subida del nivel del mar debido al Cambio Climático ..	5.89
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	6.3
6.1. INTRODUCCIÓN.....	6.3
6.2. CONCLUSIONES.....	6.3
6.2.1 Conclusiones extraídas del estado del conocimiento	6.3
6.2.2 Conclusiones extraídas de los lugares adecuados para el uso de estructuras compuestas por elementos de geotextil rellenos de arena	6.5
6.2.3 Conclusiones extraídas de los elementos de mejora para el uso de las estructuras compuestas por elementos de geotextil rellenos de arena	6.7
6.3. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	6.8
6.3.1 Limitaciones de la investigación para el uso de los sacos de geotextil rellenos de arena ..	6.9
6.3.2 Limitaciones de la investigación para el uso de los tubos de geotextil rellenos de arena ..	6.9
6.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	6.10
6.4.1. Futuras líneas de investigación para el uso de los elementos de geotextil rellenos de arena	6.10
CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA	7.3
7.1. INTRODUCCIÓN.....	7.3
7.2. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	7.3
7.2.1. Libros e informes técnicos	7.3
7.2.2. Ponencias.....	7.6
7.2.3. Artículos	7.12
7.3. PÁGINAS WEB CONSULTADAS.....	7.18

APÉNDICES

APÉNDICE A: COMUNICACIÓN CON ESPECIALISTAS

APÉNDICE B: ARTÍCULOS Y CONGRESOS

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a Prof. Dr. José Luis Almazán Gárate, director de esta tesis, por ofrecerme la oportunidad de investigar, y por vigilar el buen fin de esta tesis doctoral. Al igual que a Prof. Dra. Maria del Carmen Palomino Monzón, por su predisposición y accesibilidad en todos los momentos.

También quiero dar las gracias a la Dirección General del CEDEX, especialmente al Laboratorio de Puertos y Costas, por sus iniciativas para fomentar la formación de postgrado y la realización de tesis doctorales.

Del mismo modo quiero expresar mi agradecimiento a Dr. Antonio Lechuga Álvaro, por facilitarme la posibilidad de compaginar mi trabajo con la realización de esta Tesis Doctoral y por su colaboración incondicional. Y por supuesto, a Dr. José Manuel de la Peña Olivas, por la motivación, la rigurosidad y por sus acertados consejos recibidos durante toda la investigación realizada en esta Tesis Doctoral. A ambos les doy las gracias por facilitarme la asistencia a congresos y la información para la publicación de los trabajos relacionados con esta investigación en diferentes revistas.

Así mismo agradezco a mi familia y esposo el apoyo moral recibido, la paciencia y la colaboración recibida durante la realización de esta investigación.

Y finalmente quiero manifestar mi reconocimiento al personal y compañeros del laboratorio, por su buena voluntad y apoyo prestado. Para no dejarme a nadie y que ninguno se sienta ofendido, les doy las gracias a todos.

RESUMEN

La erosión costera es un fenómeno que ha cobrado importancia durante los últimos años, debido a sus repercusiones tanto en el turismo, como en el incremento de riesgo para las infraestructuras y para la población allí ubicada. Se define como el retroceso progresivo de la línea de costa cuyas causas pueden ser de origen natural o antropogénicas. La costa merece la máxima protección, y su gestión debe asegurar su integridad física y su libre acceso, al igual que un uso público por parte de todos.

En este horizonte, la reducción de costes, la facilidad de construcción y velocidad de realización, las obras de geotextil se han mostrado como una alternativa muy seria a las obras duras u obras clásicas, tradicionalmente realizadas a lo largo de las costas. Pero esta alternativa de uso conlleva un mayor conocimiento en el comportamiento de éstas, su diseño y durabilidad.

Las obras de geotextil, como su nombre indica, se realizan con elementos tridimensionales de geotextil (cosidos o no cosidos) rellenos de arena. Estos elementos se pueden considerar innovadores, económicos, ecológicos y alternativos frente a los tradicionales. Se distinguen tres tipos denominados: sacos, tubos y contenedores.

El principal objetivo de esta tesis se centra en la determinación de las zonas de la costa apropiados para la utilización de estructuras compuestas de elementos de geotextil rellenos de arena, como obras de defensa de costas, con el fin de facilitar su uso en la ingeniería de costas.

Para ello se ha clasificado tanto las distintas zonas del perfil longitudinal de una playa, como los tipos de costa en función de la variable altura de ola significativa. Se han determinado las limitaciones de esta variable en las distintas fórmulas de estabilidad de estas estructuras. Y finalmente, en función de la máxima limitación de altura de ola significativa y de sus posibles valores en las zonas y tipos de costa, se han determinado las zonas más apropiadas para el uso de las estructuras compuestas por elementos de geotextil.

Finalmente se han redactado las conclusiones de la investigación y se han propuesto nuevas líneas de investigación relacionadas con esta Tesis Doctoral.

ABSTRACT

Coastal erosion is a phenomenon that has become more important in recent years because of its impact on both on tourism, and increased risk to infrastructure and the population located there. It is defined as the gradual decline in the coastline whose causes may be natural or anthropogenic origin. The coast deserves maximum protection, and management should ensure their physical integrity and their free access, as well as public use by all.

In this line, cost reduction, ease of construction and completion rate, geotextile works have been shown as a very serious to hard works or classics alternative, traditionally performed along the coasts. But this alternative use entails greater insight into the behaviour of these, design and durability.

Works of geotextile, as its name suggests, are made with three-dimensional elements of geotextile (sewn or stitched) filled with sand. These items can be considered innovative, economic, and ecological alternative compared to traditional. Bags, tubes and containers, three known types are distinguished.

The main objective of this thesis focuses on determining the appropriate areas of the coast for the use of composite structures of elements filled geotextile sand as coastal defence works, in order to facilitate their use, in coastal engineering.

For it, has been classified by both the different areas of the longitudinal profile of a beach as the shoreline types depending on the variable significant wave height. We have determined the limitations of this variable in the different formulas stability of these structures. And finally, depending on the maximum limitation of significant wave height and its possible values in the areas and types of coastline, have determined the most appropriate for use in structures composed of elements of geotextile areas.

Finally, the conclusions of the research have been addressed and the proposal of new lines of work related to the topic has been made.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 2: ANÁLISIS CRÍTICO DEL ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Tabla 2.1. Comparación de estructuras GWR	2.28
Tabla 2.2. Principales variables de la sección de un tubo de geotextil.....	2.90

CAPÍTULO 3: ESTUDIO DE TIPOLOGÍAS Y COMPORTAMIENTO

Tabla 3.1. Criterios de retención recomendados para geotextiles geométricamente cerrados	3.10
Tabla 3.2. Propiedades de las materias primas de los geotextiles	3.17
Tabla 3.3. Resistencia a tracción y deformación	3.19
Tabla 3.4. Resistencia de los geotextiles frente a diferentes entornos	3.22
Tabla 3.5. Resistencia a la tracción admisible como porcentaje de la resistencia a la tracción original debido a la fluencia a 20°C	3.23
Tabla 3.6. Aplicaciones de los geotextiles en función de sus propiedades.....	3.24
Tabla 3.7. Aplicaciones de los tipos de piezas o elementos de geotextil	3.25
Tabla 3.8. Clasificación de revestimientos de sacos.....	3.40
Tabla 3.9. Solicitaciones de una estructura de geotextil según la zona del perfil de la costa.....	3.50
Tabla 3.10. Coeficientes reductores de oleaje según el tipo de costa.....	3.56

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA PROPUESTA EN EL CRITERIO DE DECISIÓN DE LOS LUGARES ADECUADOS PARA SU USO

Tabla 4.1. Validez de los parámetros de la fórmula de Oumeraci y Dassanayake (2013).....	4.49
Tabla 4.2. Parámetros empíricos de la fórmula de Oumeraci y Dassanayake (2013).....	4.49
Tabla 4.3. Limitaciones de altura de ola para sacos ELCOROCK 0,75m ³).....	4.51
Tabla 4.4. Limitaciones de altura de ola para sacos ELCOROCK 2,5m ³).....	4.51
Tabla 4.5. Limitaciones de las formulaciones para estructuras con sacos de geotextil	4.52
Tabla 4.6. Formulaciones y limitaciones de las estructuras con sacos de geotextil.....	4.52
Tabla 4.7. Dimensiones del tubo para diferentes porcentajes de llenado (CUR 217, 2006).....	4.78
Tabla 4.8. Formulaciones y limitaciones para diseño de estructuras compuestas por tubos de geotextil.....	4.52

CAPÍTULO 5: RESULTADOS, DISCUSIÓN Y VALIDACIÓN

Tabla 5.1 Posibles lugares para el uso de formulaciones relativas a la estabilidad de los revestimientos compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena.	5.16
Tabla 5.2 Validación de los lugares para el uso de formulaciones relativas a la estabilidad de los revestimientos compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena con ejemplos reales.....	5.25
Tabla 5.3 Posibles lugares de ubicación de los diques o espigones compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena.....	5.33
Tabla 5.4 Validación de los lugares para el uso de formulaciones relativas a la estabilidad de los espigones compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena con ejemplos reales	5.38
Tabla 5.5 Posibles lugares para el uso de formulaciones relativas a la estabilidad de los revestimientos compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena.	5.50
Tabla 5.6 Validación de los lugares para el uso de formulaciones relativas a la estabilidad de los revestimientos compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena con ejemplos reales.....	5.61
Tabla 5.7 Posibles lugares de ubicación de los diques compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena.....	5.72
Tabla 5.6 Validación de los lugares para el uso de formulaciones relativas a la estabilidad de los diques compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena con ejemplos reales	5.81

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Figura 1.1. Efectos de la erosión en la costa noroeste de Cádiz (Informe del cumplimiento de los requerimientos de la UE, 2002)	1.3
Figura 1.2. Playa de Sueca (Valencia) en estado de bonanza y temporal (Directrices sobre actuaciones en playas, 2008)	1.4
Figura 1.3. La playa como zona de esparcimiento y uso lúdico (Directrices sobre actuaciones en playas, 2008)	1.5
Figura 1.4. La playa de Benidorm en 1960 y en la actualidad (Directrices sobre actuaciones en playas, 2008)	1.6
Figura 1.5. Revestimiento en la playa de Kelso, situada en Sudáfrica (Directrices sobre actuaciones en playas, 2008)	1.11

CAPÍTULO 2: ANÁLISIS CRÍTICO DEL ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Figura 2.1. Parámetros adimensionales de diseño de tubos considerados (Liu, 1981)	1.14
Figura 2.2. Planta y sección transversal para colocación de espigones (Silvester, 1986).....	2.15
Figura 2.3. Geometría y esfuerzos del tubo de geotextil (Leshchinsky y Leshchinsky, 1986)..	2.16
Figura 2.4. Geometría y esquema de dos tubos apilados (Plaut y Klusman, 1999)	2.22
Figura 2.5. Ejemplo de sistema planteado. Aquarreef (Pilarczyk, 2003)	2.26
Figura 2.6. Ejemplo de sistema planteado. ReefBalls (Pilarczyk, 2003).....	2.26
Figura 2.7. Esquema del análisis de estabilidad hidráulica eb dos dimensiones (Oh y Shin, 2006)	2.30
Figura 2.8. Gráfica de la estabilidad para contenedores rellenos de arena (Jackson et al., 2006)..	2.32
Figura 2.9. Fallos esperables en el revestimiento de sacos (Jackson et al., 2006).....	2.33
Figura 2.10. Fuerzas que actúan sobre los sacos de geoetxtil (Jackson et al., 2006).....	2.33
Figura 2.11. Variables utilizadas en el diseño de un tubo (Lawson, 2008)	2.37
Figura 2.12. Movimientos de un tubo en sección (Lawson, 2008).....	2.38
Figura 2.13. Tensiones en el geotextil del tubo (Lawson, 2008)	2.39
Figura 2.14. Procedimientos de instalación de los contenedores de geotextil (Lawson, 2008).....	2.40
Figura 2.15. Definición de las áreas de llenado de un contenedor de geotextil (Lawson, 2008) ...	2.41
Figura 2.16. Formas básicas de apilamiento de los tubos de geotextil (Lawson, 2008)	2.42
Figura 2.17. Sección longitudinal y transversal de la construcción de un espigón (Mori et al., 2008)...	2.44

Figura 2.18. Estructura ensayada en el modelo de flujo (Recio et al., 2009)	2.50
Figura 2.19. Movimiento de los sacos de geotextil rellenos de arena debido a la acción directa del oleaje (Recio y Oumeraci, 2009)	2.52
Figura 2.20. Esquema de fuerzas de movimiento debidas al oleaje (Recio et al., 2009)	2.54
Figura 2.21. Efecto del movimiento de la arena en el interior del saco frente al deslizamiento (Recio et al., 2009)	2.54
Figura 2.22. Estabilidad hidráulica de un saco de arena frente al deslizamiento y al vuelco (Recio et al., 2009)	2.55
Figura 2.23. Comparación entre contenedores multicelda y de célula simple (Harris y Sample, 2009).....	2.58
Figura 2.24. Profundidad (franco bordo) de un dique exento sumergido (Blacka et al., 2009).....	2.60
Figura 2.25. Sección de barrera litoral formada por un tubo de geotextil sumergido (Aminti et al., 2010).....	2.62
Figura 2.26. Esfuerzos a los que se encuentran sumergidos los colchones de geotextil (Yan y Chu, 2010).....	2.64
Figura 2.27. Esquema de la sección del dique de Tianjin formado por colchones de geotextil (Yan y Chu, 2010).....	2.65
Figura 2.28. Sección tipo ensayada de dos filas de sacos de geotextil (Hornsey et al., 2011).....	2.68
Figura 2.29. Dimensiones de los sacos de geotextil rellenos de arena	2.72
Figura 2.30. Sección transversal de los colchones de geotextil rellenos de arena (Chu y Yan, 2011).....	2.76
Figura 2.31. Secciones típicas del tubo durante y después de su llenado (Lee y Douglas, 2012)).....	2.77
Figura 2.32. Sección transversal de diseño con tubo de geotextil (Lee y Douglas, 2012).....	2.78
Figura 2.33. Ejemplos de geotubos para proteger las zonas costeras (Yasuhara et al., 2012).....	2.79
Figura 2.34. Variables de las dimensiones del saco	2.81
Figura 2.35. Diferentes tipos de protecciones de bajo coste asimilables a blandas	2.88
Figura 2.36. Sección transversal de construcción de bermas con material grueso (Lyne, 2003) ...	2.89
Figura 2.37. Variables usadas para determinar la forma de la sección de un tubo de geotextil dependiendo del porcentaje de llenado	2.91
Figura 2.38. Diagrama de fuerzas sobre el tubo de geotextil (CUR, 2004).....	2.91
Figura 2.39. Esquema general de los ensayos en el gran canal de Deltares (Van Steeg y Vastenburg, 2010).....	2.93
Figura 2.40. Esquema de las variables utilizadas (Van Steeg y Vastenburg, 2010)	2.95
Figura 2.41. Esquema de los diferentes ensayos que presenta Kriel (2012).....	2.101

CAPÍTULO 3: ESTUDIO DE TIPOLOGÍAS Y COMPORTAMIENTO

Figura 3.1. Pasos para la realización de obras costeras con geotextiles	3.4
Figura 3.2. Concepto de abertura de los hilos en un geotextil	3.8
Figura 3.3. Geotextiles no tejidos y tejidos (PIANC, 2011)	3.13
Figura 3.4. Clasificación de materiales geo sintéticos (PIANC, 2011)	3.14
Figura 3.5. Geo celdas, geo redes y geo esteras (PIANC, 2011).....	3.15
Figura 3.6. Dimensiones de las bolsas de geotextil	3.26
Figura 3.7. Secciones del tubo de geotexti durante y después de su llenado	3.27
Figura 3.8. Llenado, traslado y disposición de los contenedores de geotextil.....	3.28
Figura 3.9. Disposiciones de los sacos de arena en el perfil	3.30
Figura 3.10. Posición del saco en la estructura	3.30
Figura 3.11. Posición de las capas de sacos	3.31
Figura 3.12a. Disposición de los tubos de geotextil en una pendiente tendida.....	3.31
Figura 3.12b. Disposición de los tubos de geotextil en una pendiente pronunciadas	3.32
Figura 3.13. Ejemplos de piezas de geotextil como estructuras auxiliares.....	3.34
Figura 3.14. Ejemplo de un dique auxiliar temporal construido con sacos de geotextil en la playa de Longebaan (EnviroRock, 2004).....	3.35
Figura 3.15. Ejemplo de espigones con tubos de geotextil en la playa de la Isla Bald Head, en Carolina del Norte (TenCate, 2004).....	3.36
Figura 3.16. Sección del dique arrecife en la playa de Young-Jin en Korea (Oh y Shin, 2006)	3.37
Figura 3.17. Ejemplo de revestimiento con tubos de geotextil en la playa de Vero, Florida (Amogot et al., 2007)	3.38
Figura 3.18. Revestimiento de sacos para protección d ela costa	3.41
Figura 3.19. Muros de sacos de geotextil rellenos de arena.....	3.41
Figura 3.20. Uso de los sacos de geotextil rellenos de arena como protección contra el deslizamiento de ladera en el borde del mar	3.42
Figura 3.21. Sacos de geotextil rellenos de arena como protección contra la socavación de las estructuras	3.43
Figura 3.22. Sacos de geotextil rellenos de arena para la protección de pie de duna	3.43
Figura 3.23. Estructuras de defensa de la costa con sacos de geotextil rellenos de arena.....	3.44
Figura 3.24. Clasificación de las estructuras según Weggel, 1998 (CEDEX, 2010).....	3.45
Figura 3.25. Clasificación de las zonas del perfil de una playa... ..	3.50

Figura 3.26. Tipos de costa según su protección frente al oleaje...	3.52
Figura 3.27. Escala de Beaufort, 1948 (Diccionario Náutico)...	3.55

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA PROPUESTA EN EL CRITERIO DE DECISIÓN DE LOS LUGARES ADECUADOS PARA SU USO

Figura 4.1. Dimensiones de los sacos de geotextil	4.4
Figura 4.2. Relación entre las diemnsiones de una bolsa (Recio y Oumeraci, 2008)	4.6
Figura 4.3. Estabilidad externa a la estructura (Lawson, 2008)	4.8
Figura 4.4. Protección contra la socavación del pie de la estructura.....	4.8
Figura 4.5. Tipos de fallos en las estructuras de sacos de arena	4.9
Figura 4.6. Efecto del rebase sobre la estructura de sacos de arena	4.10
Figura 4.7. Fuerzas actuantes sobre un saco de la estructura (Recio y Oumeraci, 2009).....	4.10
Figura 4.8. Áreas de los sacos considerados para el cálculo de fuerzas sobre él (Recio y Oumeraci, 2009).....	4.11
Figura 4.9. Estabilidad de un saco frente al vuelco (Recio y Oumeraci, 2009)l.....	4.12
Figura 4.10. Inestabilidades internas de los sacos (Lawson, 2008).....	4.13
Figura 4.11. Movimientos de la arena dentro del saco y efectos que produce.....	4.14
Figura 3.12. Tipos de rotura más comunes en sacos de geotextil rellenos de arena	4.15
Figura 3.13. Tipos de costura en el cierre de los sacos de geotextil (PIANC, 2011).....	4.17
Figura 4.14. Degradación del geotextil por vandalismo (Hornsey et al., 2011)	4.17
Figura 4.15a. Abrasión de un saco de geotextil en la zona de rotura (Hornsey et al., 2011)... ..	4.18
Figura 4.15b. Daños por abrasión tras 8 años (Oumeraci y Dassanayake, 2013)... ..	4.19
Figura 4.16. Ensayo de resistencia a la radiación ultra-violeta (Hornsey et al., 2011)... ..	4.20
Figura 4.17. Fuerzas sobre la escollera en un revestimiento (Hudson, 1956).....	4.22
Figura 4.18. Variables de la fórmula de Pilarzyk (1996)... ..	4.24
Figura 4.19. Fuerzas que actúan en un saco de geotextil de un revestimiento (Wouters, 1998)... ..	4.25
Figura 4.20. Posiciones críticas de los sacos de un revestimiento (Oumeraci et al., 2002).....	4.26
Figura 4.21. Coeficientes de deslizamiento y vuelco (Recio, 2007).....	4.28
Figura 4.22. Curva de estabilidad para estructuras sumergidas con sacos de geotextil no tejido y rellenos al 80% (Oumeraci y Dassanayake, 2013).....	4.30
Figura 4.23. Curva de estabilidad para estructuras sumergidas con sacos de geotextil no tejido y rellenos al 100% (Oumeraci y Dassanayake, 2013).....	4.30

Figura 4.24. Curva de estabilidad para estructuras sumergidas con sacos de geotextil tejido y rellenos al 100% (Oumeraci y Dassanayake, 2013).....	4.31
Figura 4.25. Estructura ensayada por Dassanayake y Oumeraci (2013).....	4.31
Figura 4.26. Efecto del franco bordo sobre el número de estabilidad de la estructura de sacos rellenos de arena al 80% (Oumeraci y Dassanayake, 2013).....	4.32
Figura 4.27. Efecto del grado de llenado del saco relleno de arena al 80% o 100%, en el número de estabilidad de la estructura (Oumeraci y Dassanayake, 2013).....	4.33
Figura 4.28. Efecto del tipo de geotextil del saco relleno de arena, lleno al 80%, en el número de estabilidad de la estructura, en continuo no tejido y en trazos tejido (Oumeraci y Dassanayake, 2013).....	4.34
Figura 4.29. Efecto del ángulo de inclinación del saco de geotextil relleno de arena, horizontal y a 15°, llenado al 80%, en el número de estabilidad de la estructura (Oumeraci y Dassanayake, 2013).....	4.34
Figura 4.30. Grafica de estabilidad para sacos de geotextil de 2,5m ³ (Coghlan et al., 2009).....	4.35
Figura 4.31. Grafica de estabilidad para sacos de geotextil de 0,75m ³ (Coghlan et al., 2009).....	4.36
Figura 4.32. Grafica de estabilidad obtenida de diferentes ensayos realizados (Pilarczyk 2000).....	4.38
Figura 4.32. Grafica de estabilidad obtenida de diferentes ensayos realizados (Pilarczyk 2000).....	4.38
Figura 4.33. Representación de la altura de ola en función del francobordo.....	4.44
Figura 4.34. Estructura sumergida compuesta por sacos de geotextil.....	4.48
Figura 4.35. Localización de las obras con sacos de geotextil (Google Earth).....	4.55
Figura 4.36. Situación de la playa de Jumeirah (Google Earth).....	4.56
Figura 4.37. Sección del revestimiento (Weerakoon et al., 2003).....	4.56
Figura 4.38. Revestimiento – Playa de Jumeirah (Shaathoff et al., 2007 y Weerakoon et al., 2003).....	4.57
Figura 4.39. Revestimiento de geotextil en la playa de Jumeirah en 2003 (Mocke et al. 2006).....	4.57
Figura 4.40. Situación de la playa de Stockton (Google Earth).....	4.58
Figura 4.41. Sección tipo del revestimiento – Playa de Stockton (Hornsey et al., 2011).....	4.58
Figura 4.42. Situación de la obra en la playa de Stockton (Google Earth).....	4.59
Figura 4.43. Revestimiento - Playa de Stockton en 2009 (Wistaw et al., 2011).....	4.59
Figura 4.44. Situación de la playa de Maroochydhore (Google Earth).....	4.60
Figura 4.45. Sección tipo del revestimiento (Hornsey et al., 2011).....	4.58

Figura 4.46. Localización de la obra en el perfil de la playa y en el tipo de costa (Hornsey et al., 2011).....	4.61
Figura 4.47. Revestimiento - Playa de Maroochydore (Elcorock).....	4.61
Figura 4.48. Localización del revestimiento - Playa de Kelso (Google Earth).....	4.62
Figura 4.49. Sección del revestimiento – Playa de Kelso (Weerakoon et al., 2003).....	4.62
Figura 4.50. Localización en el perfil y en el tipo de costa (Google Earth).....	4.63
Figura 4.51. Revestimiento – Playa de Kelso en 2008 (Kaytech).....	4.63
Figura 4.52. Localización del revestimiento - Playa de Amanzimtoti (Google Earth).....	4.64
Figura 4.53. Elección del revestimiento – Playa de Amanzimtoti (KAYTECH.CO).....	4.64
Figura 4.54. Localización en el perfil de la playa (Google Earth).....	4.65
Figura 4.55. Revestimiento – Playa de Amanzimtoti en 2008 (Kaytech).....	4.65
Figura 4.56. Localización del revestimiento de la Bahía de Jeffrey (Google Earth).....	4.66
Figura 4.57. Vista del revestimiento – Bahía de Jeffrey (Kaytech).....	4.66
Figura 4.58. Localización de la obra en el tipo de costa (Google Earth).....	4.67
Figura 4.59. Comportamiento revestimiento – Bahía de Jeffrey en 2011 (Kaytech).....	4.67
Figura 4.60. Localización del revestimiento - Playa de Kelly (Google Earth).....	4.68
Figura 4.61. Elección del revestimiento – Playa de Kelly (Kaytech).....	4.68
Figura 4.62. Localización obra en perfil de playa y en tipo de costa (Google Earth).....	4.69
Figura 4.63. Comportamiento del revestimiento de la playa de Kelly (KAYTECH.CO).....	4.69
Figura 4.64. Localización de los espigones - Playa de Maroochydore (Google Earth).....	4.70
Figura 4.65. Sección de los espigones – Playa de Maroochydore (Hornsey et al., 2011).....	4.70
Figura 4.66. Localización en el perfil de la playa (Google Earth).....	4.71
Figura 4.67. Comportamiento espigones de la playa de Maroochydore en 2007 (Google Earth).....	4.71
Figura 4.68. Localización del espigón del puerto de Clifton Springs (Google Earth).....	4.72
Figura 4.69. Sección del espigón del puerto de Clifton Springs (Geofabrics).....	4.72
Figura 4.70. Espigón del puerto de Clifton Springs (Geofabrics).....	4.73
Figura 4.71. Localización del espigón de Langeeban (Google Earth).....	4.74
Figura 4.72. Vista del espigón de la ciudad de Langeeban (McClarty et al., 2006).....	4.74
Figura 4.73. Espigón norte de Langeeban en 2004 (McClarty et al., 2006).....	4.75
Figura 4.74. Sección de un tubo de geotextil relleno al 80% y al 100% (CUR 2006).....	4.77
Figura 4.75. Sección longitudinal de los tubos de geotextil (Lawson 2008).....	4.82
Figura 4.76. Parámetros teóricos (a) y parámetros ingenieriles (b) de los tubos (Lawson 2008)...	4.83

Figura 4.77. Deformación de los tubos de geotextil sometidos al peso de los tubos superiores (Cantré 2002)	4.84
Figura 4.78. Método de Timoshenko para calcular la tensión del geotextil (CUR 2006).....	4.86
Figura 4.79. Diagrama de fuerzas del tubo de geotextil (CUR 2004).....	4.87
Figura 4.80. Tensión de tracción, carga hidráulica y porcentaje de llenado correspondiente a diferentes formas de un tubo de 12m de diámetro (CUR 2004).....	4.88
Figura 4.81. Tensiones en el tubo de geotextil (D. Leshchinsky y O. Leshchinsky, 1996).....	4.89
Figura 4.82. Tensiones en el tubo de geotextil (Lawson, 2008).....	4.90
Figura 4.83. Tensión máxima circunferencial según Palmerton, 2002 (Lawson, 2008).....	4.91
Figura 4.84. Distribución de la tensión circunferencial (a) y su aproximación en función de $[T_{máx}]c$ (Lawson, 2008).....	4.92
Figura 4.85. Máxima tensión axial de un tubo de geotextil según Palmerton, 2002 (Lawson, 2008).....	4.93
Figura 4.86. Desplazamiento de la erosión bajo el tubo de geotextil (Wegel, 2005).....	4.94
Figura 4.87. Mecanismos de fallo a) externos y b) internos de los tubos de geotextil (Lawson, 2008).....	4.96
Figura 4.88. Esquema de fuerzas que actúan sobre el tubo (Pilarczyk, 2000).....	4.99
Figura 4.89. Factor de reducción X (Van Steeg y Vastenburg, 2010).....	4.102
Figura 4.90. Esquema general de los ensayos realizados (Van Steeg y Vastenburg, 2010).....	4.102
Figura 4.91. Esquema de fuerzas considerando un rectángulo equivalente (Oh y Shin, 2006)...	4.104
Figura 4.92. Localización de las obras con tubos de geotextil (Google Earth).....	4.108
Figura 4.93. Localización de las islas artificiales de Amwaj (Google Earth).....	4.109
Figura 4.94. Sección tipo de las islas artificiales de Amwaj (Forler et al., 2002).....	4.109
Figura 4.95. Sección transversal de los diques rompeolas (Forler et al., 2002).....	4.110
Figura 4.96. Vista aérea de las islas artificiales de Amwaj (TenCate).....	4.110
Figura 4.97. Localización de Esmeraldas en Ecuador (Google Earth).....	4.111
Figura 4.98. Sección tipo del dique de Stella Maris en Ecuador (Geotec).....	4.111
Figura 4.99. Localización del dique Stella Maris en el perfil de la playa (Geotec).....	4.112
Figura 4.100. Vista del dique Stella Maris en Ecuador (TenCate).....	4.112
Figura 4.101. Localización de Beach Haven en Nueva Yersey (Google Earth).....	4.113
Figura 4.102. Sección tipo del refuerzo de dunas en Beach Haven (TenCate).....	4.113
Figura 4.103. Localización en el perfil de la playa (TenCate).....	4.114
Figura 4.104. Vista de Beach Haven antes y después de la obra (TenCate).....	4.114

Figura 4.105. Localización de la playa de Kirra (Google Earth).....	4.115
Figura 4.106. Sección transversal del espigón de la playa de Kirra (Restall et al., 2002).....	4.115
Figura 4.107. Espigón en la playa de Kirra (Restall et al., 2002).....	4.116
Figura 4.108. Localización de la playa de Upham en Florida (Google Earth).....	4.117
Figura 4.109. Sección tipo de los espigones en T (Elko y Mann, 2007).....	4.117
Figura 4.110. Vista en planta de los espigones en T, de Florida (Google Earth).....	4.118
Figura 4.111. Vista de la playa de Upham en 2013 (Google Earth).....	4.118
Figura 4.112. Localización de la playa de Kyrra (Google Earth).....	4.119
Figura 4.113. Vista aérea del arrecife artificial de Narrow Neck (Jackson y Hornsey, 2003)....	4.119
Figura 4.114. Playa de Narrow Neck antes (1996) y después de su regeneración (2003) (Jackson et al., 2005).....	4.120
Figura 4.115. Localización de la playa de Joung-Jin (Google Earth).....	4.121
Figura 4.116. Sección tipo de la estructura en la playa de Joung-Jin (Oh y Shin, 2006).....	4.122
Figura 4.117. Localización de El Dorado Royale, Méjico (Google Earth).....	4.123
Figura 4.118. Vista de la obra en El Dorado Royale, Méjico (Geotubes).....	4.123
Figura 4.119. Vista de los diques exentos en El Dorado Royale, Méjico (TenCate)....	4.124
Figura 4.120. Diques rompeolas en El Dorado Royale, en 2011 (Google Earth)....	4.124
Figura 4.121. Localización de los diques en la costa de Cancún, Méjico (Google Earth).....	4.125
Figura 4.122. Sección de la obra en la costa de Cancún, Méjico (Geotubes).....	4.125
Figura 4.123. Localización de los diques en las playas de Cancún, Méjico (Geotubes).....	4.126
Figura 4.124. Vista de la playa antes y después (Geotubes).....	4.126
Figura 4.125. Localización de Enkhuizen, Holanda (Google Earth).....	4.127
Figura 4.126. Sección del dique de Enkuizen, Holanda (TenCate).....	4.127
Figura 4.127. Disposición de la escollera sobre el tubo de geotextil (TenCate).....	4.128
Figura 4.128. Vista del dique de Enkuizen, Holanda (TenCate).....	4.128

CAPÍTULO 5: RESULTADOS, DISCUSIÓN Y VALIDACIÓN

Figura 5.1. Revestimiento – Playa de Jumeirah (Dubai) en la actualidad (Google Earth).....	5.18
Figura 5.2. Revestimiento – Playa de Stocton (Australia) en 1999 y 2008 (Eurofabrics).....	5.19
Figura 5.3. Revestimiento – Playa de Maroochydore (Australia) en 1999 y 2002 (Eurofabrics)....	5.19
Figura 5.4. Revestimiento – Playa de Kelso (Kwa-Zulu-Natal) en la actualidad (Kaytech).....	5.21

Figura 5.5. Revestimiento – Playa de Amanzimtoti (Kwa-Zulu-Natal) en la actualidad (Google Earth).....	5.22
Figura 5.6. Revestimiento – Playa de North Beach (Bahía de Jeffrey) en la actualidad (Google Earth).....	5.23
Figura 5.7. Revestimiento – Playa de Kelly (Port Alfred) en la actualidad (Google Earth).....	5.24
Figura 5.8. Espigón – Playa de Maroochydore (Australia) en la actualidad (Google Earth).....	5.35
Figura 5.9. Espigón – Puerto Clifton Springs (Victoria) en la actualidad (Google Earth).....	5.36
Figura 5.10. Espigones – Playa de Longeeban (Bahía de Saldanha) en la actualidad (Google Earth).....	5.37
Figura 5.11. Localización de la playa de Wrihstsvillage (Google Earth).....	5.51
Figura 5.12. Revestimiento tubos de geotextil – Shell Island (Welsh, 2004).....	5.52
Figura 5.13. Situación del revestimiento desde 2002 (Welsh, 2004).....	5.52
Figura 5.14. Localización de la playa de Sea Isle City (Google Earth).....	5.53
Figura 5.15. Revestimiento - Sea Isle City en 1998 (Ocean-Coastal).....	5.53
Figura 5.16. Situación del revestimiento en 1999 (USACE 1999).....	5.54
Figura 5.17. Localización de la playa de Siasconset (Google Earth).....	5.55
Figura 5.18. Revestimiento - Siasconset (Ocean-Coastal).....	5.55
Figura 5.19. Situación del revestimiento de Siasconset (Ocean-Coastal).....	5.56
Figura 5.20. Localización de la playa de Shankarpul (Google Earth).....	5.57
Figura 5.21. Revestimiento de la playa de Shankarpul (Kudale et al. 2013).....	5.57
Figura 5.22. Comportamiento Revestimiento - playa de Shankarpul (Google Earth).....	5.58
Figura 5.23. Localización de la playa de Hamala, en Mumbai (Google Earth).....	5.59
Figura 5.24. Revestimiento - playa de Hamala (Kudale et al. 2013).....	5.59
Figura 5.25. Revestimiento - playa de Hamala en 2008 (Google Earth).....	5.60
Figura 5.26. Localización de la playa Teluk Kalong, Kemaman (Google Earth).....	5.73
Figura 5.27. Playa Teluk Kalong, en 2009 (Lee y Douglas, 2011).....	5.74
Figura 5.28. Localización playa de Pantai Batu Buruck, Terengganu (Google Earth).....	5.75
Figura 5.29. Playa de Pantai Batu Buruck en 2009 (Lee y Douglas, 2011).....	5.76
Figura 5.30. Localización playa de Progreso (Google Earth)....	5.76
Figura 5.31. Seguimiento playa de Progreso (González et al., 2012).....	5.77
Figura 5.32. Localización playa de Candolim (Google Earth)....	5.78
Figura 5.33. Comportamiento playa de Candolim (Kudale et al., 2013)....	5.79

Figura 5.34. Localización playa de Young-Jin (Google Earth).....	5.79
Figura 5.35. Comportamiento playa de Young-Jin (Oh y Shin, 2006)....	5.80
Figura 5.36. Sacos de geotextil con grava en la parte superior de la estructura (Geofabrics).....	5.84
Figura 5.37. Sistema de anclaje de los sacos de geotextil mediante redes(Geofabrics).....	5.84
Figura 5.38. Sistema de correas alrededor de cada saco de geotextil en Port Pierce, Florida (Harris y Sample, 2009).....	5.85
Figura 5.39. Sistema de anclaje mediante correas alrededor de toda la sección de la estructura en Port Pierce, Florida (Harris y Sample, 2009).....	5.87
Figura 5.40. Sistema de anclaje mediante correas y tubos de PVC durante su ejecución en Port Pierce, Florida (Harris y Sample, 2009).....	5.87
Figura 5.41. Sistema de anclaje en Vero Beach, Florida, durante su ejecución y tras la acción de los temporales (Harris y Sample, 2009).....	5.88
Figura 5.42. Comportamiento de la estructura, antes y después de la acción de los huracanes, en 2004 (Harris y Sample, 2009).....	5.88
Figura 5.43. Comparación de la sección entre los tubos de geotextil multi-celda y los tubos de geotextil de una celda (Harris y Sample, 2009).....	5.88
Figura 5.44. Restauración de dunas mediante tubos multi-celda en el cabo de San Blas, Florida (Harris y Sample, 2009).....	5.90
Figura 5.45. Comportamiento de la duna restaurada con tubos multi-celdas, antes y después del paso del huracán en 2004 (Harris y Sample, 2009).....	5.90
Figura 5.46. Temporales máximos registrados en la boya de Bilbao (REDCOS) ENTRE 1976 Y 2010 (Peña y Antón, 2011).....	5.91
Figura 5.47. Dique Saemangeum, en Corea (TenCate).....	5.92
Figura 5.48. Diques de protección frente a tsunamis en Japón (Tsimopolou, 2012).....	5.93

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

1.1.	CONSIDERACIONES DE PARTIDA	1.3
1.1.1.	Importancia de la erosión costera	1.3
1.1.2.	Gestión Integral de la Costa.....	1.7
1.1.3.	Importancia de las obras de geotextil en la Ingeniería de Costas.....	1.10
1.1.4.	Necesidad del diseño de las obras de geotextil.....	1.13
1.2.	OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN Y PROPUESTA METODOLÓGICA	1.14
1.2.1.	Objetivo de la investigación	1.14
1.2.2.	Propuesta metodológica	1.14
1.3.	ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO.....	1.15

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. CONSIDERACIONES DE PARTIDA

La primera consideración a realizar en esta Tesis Doctoral, se basa en la importancia de la erosión costera. La segunda consideración es la gestión integral de la zona litoral y su aplicación en las costas españolas. Otra de las consideraciones a realizar se centra en la importancia de las estructuras compuestas por elementos de geotextil rellenas de arena en la actualidad. Y finalmente, la última de las consideraciones es la necesidad de diseño de las obras de geotextil.

1.1.1. Importancia de la erosión costera

El alto grado de intervención de la costa con infraestructuras y edificaciones en zonas no siempre geológicamente estables cerca de la costa, genera riesgos de erosión y deslizamiento de los terrenos.

*Figura 1.1: Efectos de la erosión en la costa de KuaZulu-Natal en Sudáfrica
(Fuente: Departament of Agriculture and Environmental Affairs, KuaZulu-Natal)*

Considerando las indicaciones de las Directrices sobre actuaciones en playas (2008) del Ministerio de Medio Ambiente se deduce que, la playa como franja que delimita la tierra del mar tiene tres funciones básicas en el territorio, que son:

- a) Defensa de la costa
- b) Hábitat para la flora y fauna silvestres
- c) Zona de esparcimiento y uso público social

a) Defensa de la costa

Como defensa de la costa, se espera de la playa que ante los embates del mar, se modele de tal forma que absorba la energía del oleaje sin llegar a alcanzar nunca los bienes existentes en su trasdós. Por lo que la playa ha de poseer una anchura, o franja seca, suficiente para que en cualquier momento de su evolución natural tenga anchura mínima que resguarde los bienes o valores ambientales a defender tras ella.

*Figura 1.2: Ancho de la playa de Mareny-Blau, situada en Sueca, Valencia
(Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente)*

b) Hábitat para la flora y fauna silvestres

Las playas y los sedimentos que la forman configuran un hábitat para determinadas especies y comunidades, tanto terrestres como marinas. Y por lo general la franja más próxima a la línea de orilla no suele ser una zona muy productiva ni de gran diversidad, aunque existen excepciones que deben tenerse en cuenta, generalmente zonas intermareales en playas tranquilas.

Pero donde es frecuente encontrar comunidades de gran valor ecológico dentro del sistema litoral es en las partes más alejadas de la orilla, tanto en tierra (sistemas dunares) como el mar (fondos vegetados con fanerógamas marinas como *Posidonia* oceánica, *Cymodocea* nodosa o *Zostera noltii*), a veces extendiéndose a lo largo de decenas de kilómetros de litoral. Sin embargo, en otros casos la misma playa forma parte de espacios protegidos.

c) Zona de esparcimiento y uso público social

Cuando la playa tiene que cumplir una función como zona de uso público de esparcimiento, debe estudiarse cuales son los usos a los que va a ir destinada y la previsión que se tenga de los mismos para el período de retorno asignado. Por lo general, su anchura suele oscilar entre 30 y 60 metros, aunque no suele ser un rango fijo.

Además la demanda de usos sociales puede exigir un tipo de sedimento u otro, y dentro de éste de unas características determinadas, así por ejemplo; para el confort del usuario es preferible una arena natural marina a una artificial procedente de machaqueo de piedra de cantera.

Hoy en día se encuentra en riesgo la función de defensa de las costas en muchos lugares del litoral, debido a tres causas fundamentales: por un lado, la erosión costera implica una regulación de los cauces y trampas en la costa, como los puertos, etc... Por otro lado la subida del nivel del mar provoca una invasión

marina que incrementa los costes de defensa, Y finalmente, por otro lado, la invasión urbana.

Como estrategias para la defensa de la costa en la actualidad se contempla como herramienta de la ingeniería de costas, casi exclusivamente las obras clásicas o duras constituidas por estructuras hechas a base principalmente de escollera y hormigón, que por lo general suelen ser caras, rígidas o no inmediatas y las obras blandas, que suelen ser de gran variedad, tanto en forma como en materiales.

*Figura 1.3: Playa de Benidorm en 1960 y en la actualidad
(Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente)*

Algunos tipos de obras blandas se componen de vertido o movimiento de arena, como la alimentación artificial de playas o la reordenación de material, otras se forman con piezas o elementos de geotextil. Éstas hoy en día tienen un gran desarrollo pero plantean algunas dificultades, entre las que destaca su falta de criterios claros de cálculo y su falta de conocimientos para un empleo preciso.

1.1.2. **Gestión Integral de la Costa**

La costa es un espacio de gran valor ambiental, que juega un papel importante socio-económico como lugar de ocio por excelencia. Por ello merece la máxima protección, y su gestión debe asegurar su integridad física y su libre acceso, al igual que un uso público por parte de todos.

De acuerdo con diversas recomendaciones internacionales, el litoral debe ser objeto de una gestión integral, realizada desde políticas estatales de alto nivel. Esta gestión debe integrar las distintas políticas sectoriales y su ámbito debe tener en cuenta la realidad física del litoral, sin detenerse en la división administrativa o política del territorio.

Los retos que plantea la erosión general de la costa en el mundo, exigen una nueva estrategia territorial en el litoral, que debe fundamentarse en dos aspectos.

Primero, se trata de establecer mecanismos urbanísticos, financieros y fiscales para favorecer que las inversiones en la costa se canalicen hacia la reubicación de edificaciones en terrenos situados más al interior.

Y segundo, las actuaciones para combatir la regresión de la costa, o mantener la integridad de las playas y de otros espacios litorales, se deben realizar mediante técnicas de bajo impacto y costes de mantenimiento moderados.

Referencias internacionales

En la Gestión Integral de la Costa, ésta aparece como un ente que precisa de una gestión conjunta, de un principio rector global. Esta conclusión no ha sido original ya que se ha aplicado en las grandes zonas metropolitanas o en los espacios protegidos.

La conclusión de la Comisión Especial del Parlamento Australiano sobre gestión de la Gestión de la Zona Costera, de 1992, indicó:

“...el primer objetivo de la gestión del litoral es proporcionar una serie de directrices a los responsables de la toma de decisiones, en el sentido de que la demanda de numerosas actividades encuentre acomodo sin perturbarse unas a otras, al tiempo que se respetan el equilibrio del sistema natural y el uso y disfrute de los miembros de la comunidad.”

El antecedente más significativo es el caso de Estados Unidos. Este país promulgó en 1972 la “Coastal Zone Management Act”, que se mantiene vigente hasta hoy, aunque con algunas modificaciones y adaptaciones.

Otro concepto que ha emergido es el denominado desarrollo sostenible, que emerge con carácter general.

La Declaración de Río, adoptada en el seno de la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo en 1992, dio carta de naturaleza al concepto de desarrollo sostenible. La importancia de este concepto se demostró en el hecho de que la propia Unión Europea lo interiorizó al máximo nivel constitutivo, en el tratado de Ámsterdam de 1997.

En materia de costa la Unión Europea concluyó en 1999 una serie de Programas Demostración (Proyectos Piloto en la denominación española) que derivó hacia una propuesta de la Comisión al Consejo y al Parlamento Europeo, sobre la Gestión Integrada de Zonas Costeras.

En septiembre de 2001, la Comisión Europea elevó al Consejo y al Parlamento Europeo las conclusiones obtenidas de los Proyectos de Demostración desarrollados entre 1997 y 1999, en materia de Gestión Integrada de la Zona Costera.

Posteriormente, La Comisión propuso a ambos órganos, Parlamento y Consejo, la adopción de una propuesta de recomendaciones a los estados miembros sobre esta materia, el 30 de mayo de 2002.

Estrategia para el caso de España

Para satisfacer las necesidades actuales y de las generaciones futuras es necesario proteger el medio ambiente y sus recursos. Y promover su equitativo en la sociedad, mejorando los niveles de prosperidad y eficiencia económica en el largo plazo. Estos principios representan los pilares del desarrollo sostenible que, en una sociedad democrática, se pueden alcanzar a través del establecimiento de un marco estable. Y efectivo para la gestión integrada. El desarrollo sostenible en las zonas costeras está estrictamente ligado a su correcta gestión por parte de los organismos responsables con la colaboración y participación de los actores implicados.

En la Estrategia Española de la GIZC se definen dos objetivos estratégicos, el primero relacionado con el desarrollo sostenible de las zonas costeras y el segundo relacionado con su gestión integrada. Se reconoce que el desarrollo sostenible es el fin que se puede alcanzar a través de su gestión integrada, pero se consideran los dos como objetivos estratégicos del mismo nivel, para que el desarrollo sostenible se pueda alcanzar con la participación de los actores competente y del público en general.

Los objetivos específicos marcan los ejes prioritarios de actuación, de acuerdo con los dos objetivos estratégicos definidos. En ellos se recogen los ámbitos de actuación en los cuales se embarcarán las futuras actuaciones en la costa, estableciendo por un lado objetivos relacionados con la protección del medio y el uso sostenible de sus recursos, y por otro los objetivos relacionados con su gestión integrada, incluyendo los procesos de participación, como formación y uso efectivo de los conocimientos para una correcta toma de decisiones.

Finalmente, las iniciativas medidas e instrumentos concretos representan el compromiso de España para cumplir con los objetivos definidos, y marcan el camino y la labor necesaria en los próximos años. Las iniciativas, medidas e instrumentos incluyen la aplicación de un instrumento para la planificación sostenible y participada, El Plan Director para la Sostenibilidad de la Costa, cuya efectividad será reforzada por la firma de los convenios de colaboración con las Comunidades Autónomas, el seguimiento del estado del medio a través de la implantación permanente de un Observatorio de la Sostenibilidad del Litoral Español y la creación del Consejo Nacional de la Costa, para desarrollar la representatividad sectorial y social que establece la Recomendación. Además se describen iniciativas en los ámbitos del I+D+I y de la formación que ha contribuido, está contribuyendo o contribuirá al desarrollo del conocimiento y su transferencia a los usuarios finales y a los actores interesados.

*Figura 1.4: Nuevo modelo de ocupación del suelo litoral
(Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente)*

1.1.3. Importancia de las obras de geotextil en la Ingeniería de Costas

Los diversos autores que han ido analizando y tratando el estudio de las obras de geotextil, destacan en las introducciones de sus trabajos la importancia que éstas cobran en la actualidad. Todas ellas, dentro de las denominadas obras blandas, se podrían agrupar en tres puntos:

- 1- Obra alternativa a las clásicas, también llamadas duras, realizadas primordialmente como estructuras de hormigón o de escollera. Pero, que también, sirven de complemento en la construcción de éstas. Usándose en alguna de sus fases constructivas, como pueden ser para núcleos de diques, como prototipo para conocer la eficacia de la obra que se pretende realizar, o como obra auxiliar.
- 2- Obra que se realiza en un corto espacio de tiempo, inmediatez y rapidez, que la hace ideal como obra de emergencia. Nótese que éste es el uso que se ha dado en la historia a obras con sacos terreros, consideradas como blandas, y a las que se recurre hoy en día en determinadas acontecimientos como inundaciones.
- 3- Los costes de las obras blandas por lo general son muchísimo más bajos que las obras de defensa de costa tradicionales, también conocidas como obras dura. A ello se une la simplicidad de su construcción. En ocasiones se confunden éstas con obras de bajo coste; si bien, las primeras tienen una componente ambiental diferente a las de bajo coste, que únicamente se le exige que cumpla con el nombre que se le ha puesto.

Contra estas tres ventajas, evidentes, se podría argumentar una serie de inconvenientes, muy fuertes, que han sido determinantes para que hasta épocas recientes no se usaran salvo en casos muy esporádicos. Entre ellos los más importantes son:

- 1 – Materiales inadecuados para resistir las inclemencias del tiempo y los embates del mar.

2 – Alta diversidad de métodos y técnicas no normalizadas, y por tanto inexistencia de métodos de cálculo adecuados y fiables.

3 – Fácilmente degradables por la acción humana; con especial relevancia al vandalismo.

4 – Percepción subjetiva de falta de resistencia y poco vistosa con un impacto visual importante.

En este horizonte, la reducción de costes, la facilidad de construcción y velocidad de realización, las obras de geotextil se han mostrado como una alternativa muy seria a las obras duras u obras clásicas, tradicionalmente realizadas a lo largo de las costas. Pero esta alternativa de uso conlleva un mayor conocimiento en el comportamiento de éstas, su diseño y durabilidad.

*Figura 1.5: Revestimiento con sacos de geotextil en la India
(Fuente: www.elcorock.com)*

De todas las obras blandas existentes en la actualidad, solamente la alimentación de playas se encuentra perfectamente calculada para su diseño y

comportamiento en el tiempo. Esta circunstancia ha hecho que un buen número de expertos e instituciones de investigación y de países desarrollados hayan optado por su estudio, con el fin último de encontrar herramientas de cálculo, diseño y comportamiento fiables para este tipo de obras. Es curioso, como se puede apreciar en el siguiente capítulo dedicado al estado del conocimiento, cómo se multiplica, casi de manera exponencial, los artículos y referencias de trabajos sobre el concepto citado en el transcurrir de los años.

El conocimiento de todas las técnicas y métodos de diseño y cálculo de las obras de geotextil, por tanto, resultan esenciales en la actual Ingeniería de Costas.

1.1.4. Necesidad del diseño de las obras de geotextil

Las obras de geotextil, como su nombre indica, se realizan con elementos tridimensionales de geotextil (cosidos o no cosidos) rellenos de arena. Según se ha indicado en el apartado anterior, estos elementos se pueden considerar innovadores, económicos, ecológicos y alternativos frente a los tradicionales. Se distinguen cuatro tipos denominados: sacos, tubos, colchones y contenedores. En esta Tesis Doctoral se van a considerar tanto los sacos como los tubos de geotextil rellenos de arena.

Las zonas geográficas en las que se tiene experiencia, de este tipo obras son en prácticamente los cinco continentes. Sin embargo, se tiene la impresión de que es posible una mayor aplicación con un mayor conocimiento del rendimiento de los elementos de geotextil rellenos de arena. El primer paso se llevó a cabo en los Países Bajos, haciendo el conocimiento de los geosistemas más accesible a un público más amplio. Además, Pilarczyk (2000) proporcionó una extensa descripción de los conocimientos disponibles. En base a los trabajos de diferentes autores, se propone una metodología de diseño de las obras de geotextil, como medida de protección frente a la erosión costera.

1.2. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN Y PROPUESTA METODOLÓGICA

1.2.1. Objetivo de la investigación

El principal objetivo de esta tesis se centra en la determinación de los lugares adecuados para el diseño de estructuras compuestas por elementos de geotextil rellenos de arena y como consecuencia, en la determinación de los lugares adecuados para la utilización de estas estructuras, como obras de defensa, con el fin de facilitar su uso en la ingeniería de costas.

Tras realizar una revisión general del estado del arte en el campo de la investigación del comportamiento y evolución de las obras de geotextil, se detectan algunas carencias, que han motivado el objeto de esta investigación.

Uno de los principales motivos que han llevado a la propuesta de estas zonas se centra, principalmente en las limitaciones de la altura de ola significativa de las fórmulas de estabilidad correspondientes a las estructuras compuestas por sacos o tubos de geotextil rellenos de arena.

1.2.2. Propuesta metodológica

La propuesta metodológica empleada para el desarrollo de la presente investigación se basa, en primer lugar, en la determinación de las consideraciones generales de las estructuras costeras compuestas por elementos de geotextil. Entre las que destacan el material de relleno, la tipología y las propiedades de los geotextiles, los principales tipos de elementos de geotextil rellenos de arena, su disposición en la estructura, las aplicaciones más frecuentes en estructuras de tipo: muros, revestimientos, espigones, diques, etc...

Como consideración fundamental para la determinación de los lugares adecuados para el diseño y uso de las estructuras compuestas por elementos de geotextil rellenos de arena en la costa, se realizan dos clasificaciones. La primera relativa a las distintas zonas del perfil de una playa en las que se pueden ubicar estas estructuras. Y la segunda relativa a los distintos tipos de costa.

Para determinar los lugares adecuados para el uso de estructuras compuestas por sacos y tubos de geotextil rellenos de arena, se consideran las fórmulas de diseño relativas a la estabilidad y sus limitaciones de altura de ola. Y se analiza, en función de la zona del perfil de playa y del tipo de costa, en el que se ubiquen, si la altura de ola a la que se encuentra sometida la estructura supera o no las limitaciones exigidas para su diseño en la formulación existente. Lo cual, a su vez, determina los lugares adecuados para el uso de estructuras.

1.3. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

Con el fin de abordar los trabajos desarrollados en la presente Investigación de la forma más clara y ordenada posible, el presente documento se ha estructurado de la siguiente manera:

Capítulo 1: En este capítulo se expone el objetivo y alcance de esta Tesis Doctoral, la organización del documento y algunas nociones fundamentales relativas a la Gestión Integral del Litoral y la necesidad de diseño de las obras de geotextil, que se consideran necesarias para la comprensión de los contenidos desarrollados en sucesivos capítulos.

Capítulo 2: En este capítulo se realiza una revisión del estado del conocimiento sobre los elementos de geotextil rellenos de arena que componen las estructuras para la defensa de la costa frente a la erosión. Dicha revisión incluye la descripción y aplicaciones de cada tipología expuesta, las investigaciones realizadas en estudios y ensayos, la descripción de los mismos y sus resultados obtenidos.

Capítulo 3: En este capítulo se hace referencia a las principales consideraciones de las estructuras costeras de geotextil. Para lo cual se indican los tipos de materiales de relleno para los elementos de geotextil rellenos de arena existentes hasta la actualidad, la tipología y las propiedades de elección de los geotextiles. Y la clasificación de las zonas tanto del perfil de una playa como de los tipos de costa, en los que se pueden ubicar las estructuras compuestas por elementos de geotextil rellenos de arena.

Capítulo 4: En este capítulo se desarrolla la metodología de la investigación realizando un análisis crítico de las formulaciones existentes relativas al diseño y la estabilidad de los elementos de geotextil, tipo sacos y tubos, rellenos de arena; los aspectos constructivos y los criterios de idoneidad de uso para cada tipo de obra de geotextil: revestimientos, espigones y diques.

Capítulo 5: En este capítulo se determinan los resultados y se discute la validación de las zonas de la costa donde se puede diseñar una obra de defensa, compuesta por elementos de geotextil rellenos de arena. Añadiendo la consideración de los elementos de mejora de estas estructuras, frente a su resistencia respecto a la acción del olaje.

Capítulo 6: En este capítulo se sintetizan las conclusiones extraídas de cuanto se expone en los capítulos anteriores, se indican las limitaciones propias de la investigación desarrollada y se proponen las posibles futuras líneas de investigación.

Capítulo 7: En este capítulo se citan las referencias bibliográficas utilizadas en la presente Tesis Doctoral.

Apéndices: Con el objeto de completar lo expuesto hasta aquí, se anexan los siguientes capítulos:

- **Apéndice A.** Se recoge la comunicación generada con especialistas durante la realización de toda la investigación.
- **Apéndice B.** Contiene las diferentes publicaciones generadas a partir de esta Tesis Doctoral y los congresos en los que se ha expuesto esta investigación.

Capítulo 2

ANÁLISIS CRÍTICO DEL ESTADO DEL CONOCIMIENTO

ÍNDICE

2.1.	Introducción.....	2.3
2.2.	Precedentes históricos	2.3
2.3.	Desarrollo desde el siglo XX.....	2.4
2.4.	Cronología de los avances del conocimiento sobre los geotextiles en la Ingeniería de Costas	2.6
2.5.	EVOLUCIÓN DEL CONOCIMIENTO RECIENTE	2.13
2.5.1	Liu (1981).....	2.13
2.5.2	Silvester (1986)	2.14
2.5.3	Leshchinsky y Leshchinsky (1996)	2.15
2.5.4	Pilarczyk (1996).....	2.19
2.5.5	Plaut y Klusman (1999)	2.21
2.5.6	Bezuijen et al. (2000).....	2.22
2.5.7	Oumeraci et al. (2003).....	2.23
2.5.8	Pilarczyk (2003).....	2.25
2.5.9	Zhu et al. (2004)	2.26
2.5.10	Recio-Molina y Yasuhara (2005)	2.26
2.5.11	Jones et al. (2006)	2.28
2.5.12	Oh y Shin (2006).....	2.29
2.5.13	Jackson et al. (2006).....	2.31
2.5.14	Yasuhara y Recio-Molina (2007)	2.33
2.5.15	Heilman et al. (2008)	2.33
2.5.16	Lawson (2008)	2.34
2.5.17	Mori et al. (2008).....	2.41
2.5.18	Jackson et al. (2008).....	2.43
2.5.19	Smith (2008).....	2.43
2.5.20	Pilarczyk (2008).....	2.45
2.5.21	Wert et al. (2008).....	2.45
2.5.22	Recio, J. (2008) y Recio y Oumeraci (2008, 2009)	2.47
2.5.23	Akter et al. (2009).....	2.54
2.5.24	Harris y Sample (2009).....	2.54
2.5.25	Blacka et al. (2009).....	2.56
2.5.26	Aminti et al. (2010).....	2.57
2.5.27	Yan y Chu (2010)	2.60
2.5.28	Jackson (2010).....	2.62
2.5.29	Akter et al. (2010).....	2.63
2.5.30	Hornsey et al. (2011)	2.63
2.5.31	Wilke y Hangen (2011)	2.65
2.5.32	Steeg et al (2011)	2.68
2.5.33	Weggel et al. (2011).....	2.71
2.5.34	Cantré y Saathopff (2011)	2.71
2.5.35	Neves et al. (2011).....	2.71
2.5.36	Khalilzad y Gabr (2011)	2.72

2.5.37	Chu et al. (2011).....	2.72
2.5.38	Lee y Douglas (2012)	2.74
2.5.39	Yasuhara et al. (2012).....	2.75
2.5.40	Dassanayake y Oumeraci (2012)	2.76
2.5.41	Hornsey (2012).....	2.79
2.5.42	Bezuijen y Pilarczyk (2012)	2.80
2.6.	ANÁLISIS DE LAS PUBLICACIONES MÁS DESTACADAS.....	2.81
2.6.1	CERC (1984)	2.81
2.6.2	USACE (1984 y 2004).....	2.82
2.6.3	USACE (1995).....	2.85
2.6.4	Lyne (2003).....	2.86
2.6.5	CUR (2004, 2006).....	2.86
2.6.6	USACE (2006).....	2.88
2.6.7	Van Steeg y Vastenburg (2010)	2.89
2.6.8	PIANC (2011).....	2.92
2.6.9	Rousset et al. (2012).....	2.93
2.6.10	Greenwood et al. (2012).....	2.95
2.6.11	Kriel (2012)	2.96
2.6.12	Bezuijen y Vastenburg (2012).....	2.98
2.7.	CATÁLOGOS Y MARCAS ESPECIALIZADAS SOBRE OBRAS DE GEOTEXTIL	2.99
2.8.	CLASIFICACIÓN DE PUBLICACIONES, AUTORES, POR TIPO DE OBRAS	2.101

Capítulo 2

ANÁLISIS CRÍTICO DEL ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1. INTRODUCCIÓN

La erosión costera es un proceso natural que siempre ha existido y que ha dado forma a la costa a lo largo de la historia, pero ahora está claro que su dimensión está lejos de ser natural (Eurosion 2005). En vista de que esta problemática afecta a muchos países que tienen zona costera, se han venido realizando actuaciones rígidas utilizando materiales como hormigón, acero, rocas, etc. Con el fin de proteger sus edificaciones y evitar la pérdida de playa. Este tipo de actuaciones al interrumpir el transporte natural de sedimentos han provocado una erosión más intensa en las zonas adyacentes más los impactos ambientales que conllevan una vez construidos. Por este motivo se plantea la necesidad de la alternativa de este tipo de actuaciones.

2.2. PRECEDENTES HISTÓRICOS

La defensa contra la acción del agua utilizando sacos de arena, “sacos terreros” o de sedimento se aleja en la noche de los tiempos. Es probable que el mundo egipcio usase los muros de sacos de arena para la defensa de las tierras inundables en las estaciones de subida del nivel del Nilo. También es probable que lo hiciesen los mesopotámicos para las riberas de los ríos Tigris y Éufrates.

Pero de lo que sí se tiene certeza es del uso de sacos rellenos de sedimento en la ingeniería costera y portuaria de la ingeniería romana. Lo sabemos gracias a los escritos de Vitruvio (Peña 2001). Debido a que lo usaban para la impermeabilización de recintos en el mar, en la construcción de diques. Para lo cual construían un doble recinto de madera en el que añadían sacos de enea llenos de arcilla. En este caso los sacos servían para poder reutilizar la materia impermeabilizante; la arcilla.

A su vez los chinos fueron pioneros en la construcción de diques para controlar las inundaciones del río Yang Tse. Plinio el Viejo indicó que en Europa los frisios (hoy Holanda) acumulaban tierra por encima del nivel inundable ya en tiempos románicos. Posteriormente en el siglo XI, flamencos y holandeses adoptaron los diques para controlar las inundaciones del río Elba (Isla y Lastra 2006).

Los habitantes de Holanda aumentan artificialmente las elevaciones naturales con fines exclusivamente defensivos. En un principio el sistema era bien simple: el mar penetraba en las áreas bajas dos veces al día con la marea; al retirarse dejaba una capa de barro y fango. Este largo proceso elevaba la zona por encima del nivel medio del mar, y estas tierras fangosas se rodeaban de diques para protegerlas contra la marea alta. Los diques que se construían de cerro en cerro consistían simplemente en tierra amontonada que posteriormente se revestiría de cañizo y posteriormente de sacos.

En una primera etapa sólo se pudieron desecar áreas por encima de la marea media, pero conforme se fueron creando instrumentos para elevar el agua (molino de mano, molino de viento, molino de viento con cúpula giratoria) se pudieron construir los pólderes, propiamente dichos, es decir, territorios rodeados de diques, por debajo del nivel medio del mar y que necesitan una constante evacuación artificial del agua (González Ortiz 1990).

2.3. DESARROLLO DESDE EL SIGLO XX

Hasta principios del siglo XX las actuaciones del hombre en costas abiertas se limitaron, en el mundo entero, a la construcción de abrigos para puertos y la defensa de márgenes, construcción de espigones de encauzamiento y de apoyo, con la natural formación, en su caso, de las correspondientes playas de apoyo. La tecnología era puramente artesanal, reduciéndose a un conjunto de recomendaciones, algunas heredadas incluso de los romanos, y de experiencias personales transmitidas de maestros a discípulos (Suárez Bores 1999).

En los años setenta aparece el concepto de los geocontenedores de arena (Geotextile Sand Containers) como una alternativa de estructuras de defensa

costera. Este concepto nace en los Países Bajos donde se utilizaron bolsas de arena para la construcción de un dique en Pluimpot. De igual manera, durante la misma época en Alemania se evaluaba el comportamiento de un dique construido a partir de bolsas de arena en las costas del mar del norte (Zitscher 1971).

Los geocontenedores luego fueron utilizados como herramientas de protección para atender emergencias, como soluciones temporales debido a los inconvenientes que presentaron como obras permanentes. Esta etapa sirvió para identificar los problemas y encaminar nuevas investigaciones orientadas a solucionar y mejorar el rendimiento como obras de larga durabilidad. Entre los problemas que presentaban los geotextiles uno de ellos era la afección que causaba la exposición a la radiación solar, con lo cual fueron implementados aditivos y estabilizantes para su protección; se identificaron las causas de los problemas de la estabilidad de la estructura costera producidas por la deformación que causaba el oleaje, como muestran los trabajos de Recio y Oumeraci (2009), entre otros.

En los últimos años, desde que se están aplicando los geocontenedores de arena como barreras para la protección costera, se han desarrollado importantes investigaciones que han permitido mejorar los métodos de diseño. Entre ellas las investigaciones realizadas en la universidad de Braunschweig (Alemania) orientadas al desarrollo de cálculos matemáticos para el diseño de protecciones dunares; las investigaciones realizadas en la universidad de Ibaraki (Japón) donde en un modelo físico se hacen modificaciones a la técnica de envoltorios de arena; entre otras.

En países como Australia, Alemania, Portugal y Holanda, entre otros; se han realizado actuaciones costeras aplicando obras de defensa blandas a partir de geotextiles (Saathoff 2003). Entre las razones por las cuales se orienta a la utilización de este tipo de obras es por la forma más sencilla de construcción, integración al paisaje y menores costes de construcción.

2.4. CRONOLOGÍA DE LOS AVANCES DEL CONOCIMIENTO SOBRE LOS GEOTEXTILES EN LA INGENIERÍA DE COSTAS

Resulta interesante conocer como se ha ido desarrollando en el tiempo la tecnología de los geotextiles aplicado a la Ingeniería de Costas. A continuación se indican por orden cronológico los trabajos más representativos de las obras de geotextil, que han contribuido a la evolución del conocimiento. Y que posteriormente, en el siguiente apartado, se describen con mayor profundidad.

1971. Zitscher realiza los primeros trabajos con sacos de geotextil rellenos de arena, para la reparación de un dique en Holanda (Oumeraci et al. 2003).

1977. Liu presenta su tesis doctoral sobre los tubos de geotextil rellenos de cemento para la defensa del litoral (Silvester 1986).

1977. Liu y Silvester presentan su trabajo sobre el diseño y cálculo de tubos de geotextil rellenos de arena (Silvester 1986).

1977 – 1979. El equipo de Porraz, mediante el análisis de estructuras costeras de bajo coste, fueron los pioneros en el desarrollo de membranas flexibles, rellenas de mortero de cemento, que actúan como encofrado para su fraguado in-situ (Silvester 1986).

1981. Liu presentó una ecuación para describir la forma de equilibrio de los tubos de geotextil rellenos de arena (Zhu et al. 2004).

1982. El equipo de Bogosian estudia la reducción de la erosión costera mediante la construcción de diques compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena o mortero (Leshchinsky y Leshchinsky 1996).

1986. Perrier utiliza almohadones de geotextil rellenos de tierra como medida de protección costera (Leshchinsky y Leshchinsky 1996).

1986. Silvester estudia el diseño, la estabilidad de los tubos de geotextil y su disposición tal que maximice la superficie de contacto. Realiza ensayos para conseguir una mezcla de mortero más económica y lo aplica a la construcción de un dique rompeolas (Silvester 1986).

- 1991.** Ockels realiza innovaciones en la ingeniería costera mediante el empleo de geotextiles (Leshchinsky y Leshchinsky 1996).
- 1993.** Sprage analiza aspectos constructivos de los tubos de geotextil rellenos con material dragado (Leshchinsky y Leshchinsky 1996).
- 1994.** Pilarczyk trabaja con tubos de geotextil como sistema novedoso de construcción para la protección de la erosión costera (Leshchinsky y Leshchinsky 1996).
- 1994.** Kazimierowicz presentó una aproximación numérica para resolver las ecuaciones relativas a la geometría del tubo de geotextil (Leshchinsky y Leshchinsky 1996).
- 1994.** Koerner trabajó en la obtención de los coeficientes de seguridad de la tensión del tubo de geotextil cuando se somete a situaciones de carga (Leshchinsky y Leshchinsky 1996).
- 1995 - 1996.** Pilarczyk y Zeidler analizan los tipos y aplicaciones de los geotextiles en la ingeniería costera (Pilarczyk 1996).
- 1996.** Leshchinsky y su mujer presentan un programa de cálculo para el diseño de los tubos de geotextil rellenos de lechada, comparando los resultados con estudios de autores anteriores como Liu, Kazimierowicz y Carroll (Leshchinsky y Leshchinsky 1996).
- 1996.** Pilarczyk realiza una visión general de la aplicación de los geotextiles en la ingeniería costera y hace referencia a los criterios de diseño (Pilarczyk 1996).
- 1998.** Wouters realiza una primera aproximación en la formulación relativa al cálculo de la estabilidad de los sacos de geotextil rellenos de arena sometidos a la acción del oleaje (Oumeraci et al. 2003).
- 1999.** Plaut y Klusman realizan un análisis bidimensional de los tubos de geotextil apilados sobre una cimentación deformable para obtener mediante

formulación la geometría final del tubo de geotextil relleno de mortero y sometido a una presión hidrostática (Plaut y Klusman 1999).

2000. El equipo de Bezuijen presenta métodos de cálculo de los tubos de geotextil de grandes dimensiones rellenos de arena en situaciones críticas, como en la apertura por fondo de la barcaza y en el impacto sobre el lecho (Bezuijen et al. 2000).

2003. El equipo de Oumeraci realiza investigaciones con modelos hidráulicos en la universidad de Braunschweig, en Alemania, para determinar una fórmula de estabilidad de los sacos de geotextil rellenos de arena sometidos a la acción del oleaje (Oumeraci et al. 2003).

2003. Pilarczyk analiza los principales sistemas alternativos de protección costera, para lo que se centra en diferentes tipos de geotextiles: sacos, tubos, colchones o cortinas. Este último también conocido como sistema BEROSIN. Considerando sus principales características. (Pilarczyk 2003).

2004. El equipo de Zhu estudia el inicio del movimiento de los sacos de geotextil rellenos de arena para la protección de canales, mediante ensayos de laboratorio (Zhu et al. 2004).

2005. Recio-Molina y Yasuhara plantean una alternativa de protección costera denominada “Geotextile Wrap-around Revetments (GWR)” que consiste en láminas de geotextil rellenas de arena. Y estudian su estabilidad mediante la realización de ensayos de laboratorio (Recio-Molina y Yasuhara 2005).

2006. El equipo de Jones propone una guía de especificaciones técnicas sobre los tubos de geotextil como solución alternativa a la defensa de las costas (Jones et al. 2006).

2006. Oh y Shin investigan sobre la estabilidad de los tubos de geotextil sumergidos en estructuras de protección frente a la erosión, en la playa de Young-Jin de Korea, realizando ensayos de modelo hidráulico (Oh y Shin 2006).

- 2006.** El equipo de Jackson presenta un análisis sobre las estructuras realizadas mediante el empleo de geotextiles, sus mecanismos de fallo y su estabilidad frente a la acción del oleaje (Jackson et al. 2006).
- 2007.** Recio-Molina y Yasuhara aplican la alternativa de protección costera denominada “Geotextile Wrap-around Revetments (GWR)”, formada por láminas de geotextil rellenas de arena, en la playa de la isla de Sylt, en Alemania. Planteando su aplicación en caso de desastres naturales (Recio-Molina y Yasuhara 2007).
- 2008.** El equipo de Heilman estudia el comportamiento de los tubos de geotextil para la protección de dunas, en las playas de la ciudad de Galveston, al norte de la costa de Texas (Heilman et al. 2008).
- 2008.** Lawson realiza un amplio estudio de los principales tipos de elementos de geotextil, como sacos, tubos y contenedores, en sus aplicaciones hidráulicas y medioambientales, como estructuras de protección de la costa (Lawson 2008).
- 2008.** El equipo de Mori realiza investigaciones en base a la construcción de un dique mediante el empleo de sacos de Geotextil rellenos de arena (Mori et al. 2008).
- 2008.** Pilarczyk presenta un breve repaso a los sistemas alternativos de protección de la costa frente a la erosión. Prestando especial atención a los elementos prefabricados, como Aquareef o ReefBalls, y a los elementos de geotextil, como sacos, tubos, contenedores, cortinas, etc. Rellenos de rellenos de arena o cemento (Pilarczyk 2008).
- 2008.** El equipo de Jackson presenta ejemplos de estructuras alternativas de protección de la costa, realizadas con elementos de geotextil rellenos de arena (Jackson et al. 2008).

- 2008.** Smith realiza un repaso a los principales tipos de geotextil, sacos, tubos y contenedores y describe la aplicación de los tubos de geotextil en la deshidratación (Smith 2008).
- 2008.** El equipo de Werth presenta los resultados de los ensayos realizados sobre la permeabilidad de las estructuras realizadas con sacos de geotextil rellenos de arena, destacando su influencia en la estabilidad, cuando están sometidos a la acción del oleaje (Werth et al. 2008).
- 2009.** Recio y Oumeraci estudian mediante la realización de ensayos en laboratorio, la estabilidad hidráulica de los sacos de geotextil, cuando incide sobre ellos el oleaje. Como solución alternativa frente a la erosión costera (Recio y Oumeraci 2009).
- 2009.** El equipo de Akter analiza los mecanismos de fallo, de las estructuras realizadas con sacos de geotextil rellenos de arena, para validar un modelo numérico existente (Akter et al. 2009).
- 2009.** Harris y Sample comparan los tubos de geotextil rellenos de arena, a los que llama de una celda, con los tubos de geotextil llamados multi-celda, para su empleo como estructuras alternativas de protección frente a la erosión costera (Harris y Sample, 2009).
- 2009.** El equipo de Blacka realiza modelos físicos de oleaje monocromático con elementos de geotextil de 4 metros de ancho, dispuestos en una, dos y tres filas. Analizando su efecto amortiguador al incidir sobre ellas el oleaje (Blacka et al. 2009).
- 2010.** El equipo de Aminti presenta el resultado de la monitorización de un dique arrecife construido con tubos de geotextil en la playa de San Vincenzo, en Italia (Aminti et al. 2010).
- 2010.** Yan y Chu presentan el estudio realizado para el diseño y posterior construcción de un dique, a base de colchones de geotextil rellenos de una

mezcla de arcilla, cubiertos con una manta de geotextil, en el puerto de Tianjin en China (Yan y Chu, 2010).

2010. Jackson analiza el diseño y la construcción de un dique arrecife con sacos de geotextil rellenos de arena y su comportamiento cuando se somete a la acción del oleaje (Jackson, 2010).

2010. El equipo de Akter describe los modelos hidráulicos realizados para el estudio de revestimientos con sacos de geotextil, en las riberas de los ríos (Akter et al. 2010).

2011. El equipo de Hornsey en su trabajo abarca los temas clave que aseguran la integridad a largo plazo de los geotextiles como protección de la costa. Estos temas son, en primer lugar, la estabilidad de los geocontenedores, en segundo lugar, un análisis detallado de los últimos ensayos de oleaje a gran escala, que evalúan la capacidad de llenado, el tamaño, la pendiente de la estructura y la protección frente a la erosión, en tercer lugar, la durabilidad de los geocontenedores, y finalmente los métodos y especificaciones para limitar los factores que afectan a la vida útil del geotextil como el vandalismo, la radiación ultravioleta o la resistencia a la abrasión (Hornsey et al. 2011).

2011. Wilke y Hangen realizan un pequeño repaso a los aspectos fundamentales de diseño de los tubos de geotextil y sus posibles aplicaciones como los proyectos ejecutados en el mar Báltico, en Latvia y en San Vincenzo, Italia (Wilke y Hangen 2011).

2011. El equipo de Steeg en su trabajo de investigación deduce una fórmula adimensional, basada en ensayos con modelos físicos a gran escala, relativa a la estabilidad para tubos de geotextil sometidos a la acción del oleaje y describe cualitativamente los geocontenedores bajo la acción de las olas (Steeg et al. 2011).

2011. El equipo de Weggel propone utilizar geotextiles para la deshidratación de lodos (Weggel et al. 2011).

- 2011.** Cantré y Saathoff estudian el comportamiento de los tubos de geotextil reforzado considerando la tensión (Cantré y Saathoff 2011).
- 2011.** El equipo de Neves realiza unos estudios experimentales para investigar la eficiencia de los tubos de geotextil rellenos de arena como sistemas de protección costera (Neves et al. 2011).
- 2011.** Khalilzad y Gabr estudian la estabilidad de los tubos de geotextil y el efecto que ejerce en ellos el oleaje cuando hay sobre elevaciones debido a los temporales (Khalilzad y Gabr. 2011).
- 2011.** El equipo de Chu analiza las posibles soluciones teóricas de los tubos y cochones de geotextil (Chu et al. 2011).
- 2012.** Lee y Douglas estudian el comportamiento de los tubos de geotextil en diques arrecife, para la protección del litoral en Malasia (Lee y Douglas 2012).
- 2012.** El equipo de Yasuhara justifica el uso de geotextiles en la protección frente a desastres naturales debidos al cambio climático (Yasuhara et al. 2012).
- 2012.** Dassanayake y Oumeraci analizan las propiedades de los sacos de geotextil rellenos de arena y la estabilidad de sus estructuras (Dassanayake y Oumeraci 2012).
- 2012.** Hornsey repasa las aplicaciones de los geotextiles en cuatro obras costeras y portuarias de Australia (Hornsey 2012).
- 2012.** Bezuijen y Pilarczyk destacan las dos aplicaciones de los geotextiles en la ingeniería de costas: por un lado como filtro y revestimiento de laderas, y por otro, como estructuras rellenas de arena (Bezuijen y Pilarczyk 2012).

2.5. EVOLUCIÓN DEL CONOCIMIENTO RECIENTE

Como continuación del apartado anterior se presenta una descripción de los principales trabajos de las obras de geotextil en la ingeniería de costas destacables, tanto por su innovación como por su profundidad. Con ello se indica cómo ha evolucionado el conocimiento sobre el diseño de las obras de geotextil, como medida de protección del litoral.

2.5.1 Liu (1981)

Presenta un método de diseño de tubos rellenos de arena saturada o mezcla de arena y cemento, basado en experimentos de laboratorio, obteniendo varias gráficas con un determinado número de parámetros adimensionales. Los pasos realizados fueron:

1. Estudio de la deformación del tubo desde la sección circular inicial.

a. Parámetros:

$$\frac{4A}{\pi D^2} \quad ; \text{ siendo: } A=\text{Sección; } D=\text{Diámetro inicial del tubo}$$

$$\frac{2\bar{y}}{D} \quad ; \text{ siendo: } \bar{y} = \text{Distancia del centro de gravedad al suelo}$$

$$\frac{L}{D} \quad ; \text{ siendo: } L= \text{Ancho del tubo}$$

$$\frac{b_1}{D} \quad ; \text{ siendo: } b_1= \text{Profundidad}$$

b. Parámetro de tensión del tubo:

$$\frac{2T}{\gamma b_1^2} \quad ; \text{ siendo: } \gamma= \text{Peso específico; } T= \text{Tensión del tubo}$$

2. Calibración de estos parámetros en una gráfica, mediante experimentación.

3. Diseño del tubo para resistir deslizamiento y vuelco, sometido a la acción del oleaje.

Figura 2.1: Parámetros adimensionales de diseño de tubos considerados (Liu 1981)

2.5.2 Silvester (1986)

Justifica su objetivo indicando que: “*el viejo concepto de construir estructuras costeras con escollera o piezas de hormigón basadas en el peso para resistir el oleaje han caído recientemente en descrédito*”. Además indica que su coste se incrementa prodigiosamente.

Añade que Porraz et al. (1977, 1978 y 1979) fueron pioneros en el desarrollo de membranas flexibles actuando como encofrado para morteros de cemento que se colocan in-situ.

Presenta unas gráficas de diseño, similares a las de Liu (1981), para estos tubos rellenos de “mortero de cemento”, con variables adimensionales parecidas.

Finalmente muestra un método de colocación, para espigones, utilizando tubos de dimensiones no muy grandes (como sacos alargados) formando ángulos de 45° y dejando hueco entre ellos.

Figura 2.2: Planta y sección transversal para la ejecución de espigones (Silvester 1986)

2.5.3 Leshchinsky y Leshchinsky (1996)

En sus dos trabajos, basándose el segundo en el primero, se presenta una metodología para el diseño de los tubos de geotextil, teniendo en cuenta tres consideraciones:

1. Tensión que debe soportar el geotextil.
2. Retención de partículas sólidas en el geotextil.
3. Altura final (forma) de la sección del tubo de geotextil.

Presentan un estudio teórico partiendo de cuatro hipótesis:

- I. Es un problema bidimensional, es decir: todas las secciones son iguales en geometría y materiales.
- II. El espesor del geotextil es delgado y flexible, con un peso por unidad de longitud despreciable.
- III. El tubo de geotextil está relleno de una lechada, por lo que en el interior del tubo hay presión hidrostática.
- IV. No hay tensiones superficiales entre el geotextil y la lechada.

Figura 2.3: Geometría y esfuerzos del tubo de geotextil (Leshchinsky y Leshchinsky 1996)

La ecuación que gobierna la forma que adquiere la sección del tubo, $y(x)$, es:

$$T \frac{d^2 y}{dx^2} - (p_0 + \gamma x) \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} = 0 \quad (2.1)$$

Se trata de una ecuación diferencial no lineal que no tiene solución de forma cerrada. Conocido γ el peso unitario de la mezcla, la ecuación tiene tres incógnitas: T , p_0 y h ; por lo que se han de plantear dos condiciones de contorno:

- Condición 1: El geotextil en O debe ser horizontal con una transición suave a ambos lados del eje de simetría del tubo, o lo que es lo mismo debe tener tangente horizontal en (0,0):

$$\left(\frac{1}{\frac{dy}{dx}} \right)_{0,0} = 0 \quad (2.2)$$

- Condición 2: El equilibrio de fuerzas verticales, en la base de longitud b , es una de estas expresiones:

$$W = b(p_0 + \gamma h) \quad \text{ó} \quad b = \frac{W}{p_0 + \gamma h} \quad (2.3)$$

Siendo W el peso por unidad de longitud de la mezcla del tubo.

$$W = 2\gamma \int_0^h y(x) dx \quad (2.4)$$

Sustituyendo la expresión (4) en la expresión (3), se obtiene:

$$b = \frac{2\gamma}{p_o + \gamma h} \int_0^h y(x) dx \quad (2.5)$$

Finalmente expresando esta segunda condición de contorno (3) en función del perímetro del tubo L , que se expresa a continuación:

$$L = b + \int ds \quad (2.6)$$

Se obtiene:

$$L = \frac{2\gamma}{p_o + \gamma h} \int_0^h y(x) dx + 2 \int_0^h \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (2.7)$$

Para obtener la geometría del tubo, $y(x)$, se ha de especificar la tensión axial por unidad de longitud del tubo, que viene dada por la siguiente expresión:

$$T_{axial} = \frac{2}{L} \int_0^h (p_o + \gamma h) y(x) \quad (2.8)$$

Las soluciones se presentaron en los trabajos de:

- Liu (1981): mediante un trabajo experimental
- Kazimierowich (1984): mediante una aproximación numérica

Leshchinsky y su equipo realizan una comparación entre los resultados obtenidos con el modelo denominado GeoCoPS y con los trabajos desarrollados por Silvester (1986) y Liu (1981).

Los resultados del modelo GeoCoPS se representan en las siguientes gráficas:

- Altura del tubo / Presión de bombeo p_o para $\gamma_{mezcla}/\gamma_{agua}=1,2$
- Tensiones T y T_{axial} / Presión de bombeo p_o para $\gamma_{mezcla}/\gamma_{agua}=1,2$
- Altura máxima y mínima del tubo seco y sumergido / Perímetro del tubo

Los resultados que obtienen son representados en gráficas y finalmente plantean las siguientes consideraciones de diseño:

- En relación a las tensiones del geotextil, tanto en la dirección perimetral como longitudinal:

$$T_{\text{final}} = T_{\text{trabajo}} (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot F_4 \cdot F_5) \quad (2.9)$$

Se deben aplicar los siguientes coeficientes de seguridad:

- F_1 : Frente a los peligros de instalación (valor recomendado 1,3)
- F_2 : Frente a la degradación química (valor recomendado 1)
- F_3 : Frente a la degradación biológica (valor recomendado 1)
- F_4 : Frente a la fluencia, deformaciones (valor recomendado 1,5)
- F_5 : Frente a la resistencia de la costura (valor recomendado 2)

$$T_{\text{final}} = 3,9 \cdot T_{\text{trabajo}} \quad (2.10)$$

- En relación a la retención de partículas sólidas del geotextil:
  - Para sólidos con $\leq 50\%$ que pasa por el tamiz N° 200 (0.075mm)
 $O_{95} < 0,59 \text{ mm}$
  - Para sólidos con $> 50\%$ que pasa por el tamiz N° 200 (0.075mm)
 $O_{95} < 0,30 \text{ mm}$

Siendo O_{95} la mayor partícula que podría atravesar el geotextil.

- En relación a la altura final del tubo: se llega a la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{G_s(w_0 - w_f)}{1 - w_0 G_s} \quad (2.11)$$

Siendo:

G_s : Peso específico del sólido (se considera 2,70)

w_0, w_f : Contenido de agua inicial y final del material de relleno

$$w_0 = \frac{G_s - \gamma_{\text{mezcla}} / \gamma_{\text{agua}}}{G_s \left(\frac{\gamma_{\text{mezcla}}}{\gamma_{\text{agua}}} - 1 \right)} \quad (2.12)$$

$$w_f = \frac{G_s - \gamma_{\text{mezcla solidificada}} / \gamma_{\text{agua}}}{G_s - \gamma_{\text{mezcla solidificada}} / \gamma_{\text{agua}}} \quad (2.13)$$

γ_{mezcla} , $\gamma_{\text{mezcla solidificada}}$ y γ_{agua} : Peso unitario de la mezcla, de la mezcla solidificada y del agua, respectivamente.

2.5.4 Pilarczyk (1996)

Realiza un repaso general del empleo de geotextiles en algunas de sus diferentes tipologías: sacos, tubos, contenedores, colchones o cortinas. Añadiendo una más: las algas artificiales marinas.

Clasifica los tipos y aplicaciones de los sistemas de geotextil según:

- Unidades cerradas rellenas de arena, grava o mortero: sacos, colchones, tubos o contenedores
- Sacos de esteras abiertas y rellenos con piedras o asfalto
- Estructuras de moldes o formas de geotextil rellenos de arena
- Capas de geotextil para refuerzo de dunas
- Cortinas de geotextil para control de la erosión de las costas
- Algas artificiales para prevenir principalmente el socavamiento
- Defensas de limos con varias aplicaciones (contaminación)
- Geoceldas para el control de la erosión superficial
- Esteras de geocompuestos para el control de la erosión y el drenaje
- Filtros de los geotextiles
- Presas rellenas de agua o aire
- Otros sistemas

Respecto a las formas geosintéticas, indica que los colchones suelen utilizarse como protección del suelo y de las laderas. Los sacos son apropiados como protección de laderas, muros de contención, y para protección de pie. Empleándose a su vez, en la construcción de espigones, playas sustentadas y diques exentos. Y que los tubos y contenedores, al igual que los sacos, se emplean en la construcción de espigones, playas sustentadas y diques exentos. Todas ellas pueden usarse como estructuras individuales o combinando elementos.

En cuanto a las estructuras con relleno de arena, añade que en general pueden usarse como estructuras temporales para conocer la interacción y la respuesta de la naturaleza o como estructuras permanentes en zonas con poco oleaje ($H < 1\text{m}$), o en estructuras sumergidas.

Las geocortinas tienen diversas aplicaciones, entre las que cita como defensa para el control de la superficie en erosión. Debiendo estudiarse para cada caso concreto y clima.

A su vez, indica que las algas artificiales se utilizan para el control de la socavación de estructuras y plataformas offshore. Finalmente analiza la estabilidad de las piezas de geotextil, considerando los siguientes tipos:

a) Sacos rellenos de arena o mortero:

Para los sacos rellenos de arena o mortero con una relación ancho/largo no mayor de 1 a 3 y una proporción de llenado mayor del 70%, se puede aplicar la siguiente expresión, válida para $\zeta \leq 3$ y se tomará $\zeta=3$ siempre que $\zeta \geq 3$:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = c \cos \alpha \cdot \xi^{-1/2} \quad (2.14)$$

Siendo:

H_s = Altura de ola significativa (m)

Δ = Densidad relativa de los sacos = $(\rho_s - \rho_w) / \rho_w$

ρ_s = Densidad del saco (2000 Kg/m³ para arena y 2300 Kg/m³ para mortero)

ρ_w = Densidad del agua (Kg/m³)

D = Altura media del saco (m)

c = Coeficiente de estabilidad = 2,5

α = Pendiente de la estructura

ξ = Número de Iribarren = $\frac{\tan \alpha}{(H_s/L_o)^{1/2}}$

L_o = Longitud de onda en aguas profundas = $\frac{g \cdot T^2}{2\pi}$

b) Colchones rellenos de arena o mortero:

Para los colchones rellenos de arena o mortero, se puede aplicar la siguiente expresión, válida para $\xi \leq 3$ y se tomará $\xi = 3$ siempre que $\xi \geq 3$:

$$\frac{H_s}{\Delta D_{eq}} = c \cos \alpha \cdot \xi^{-3/2} \quad (2.15)$$

Siendo:

D_{eq} = Altura media del colchón (m)

El coeficiente de estabilidad depende de la relación entre la permeabilidad del colchón y la permeabilidad del suelo, K_m / K_s .

$$\begin{aligned} c &= 3 - 4 & \text{si} & K_m / K_s < 1 \\ c &= 4 - 6 & \text{si} & K_m / K_s \geq 1 \end{aligned}$$

c) Tubos rellenos de arena o mortero:

- Para tubos paralelos al eje de rotura del oleaje:

$$\frac{H_s}{\Delta B} = 1 \quad (2.16)$$

Siendo:

H_s = Altura de ola significativa (m)
 Δ = Densidad relativa de los tubos
 B = Ancho del tubo (m); $B = 1,1D$
 D = Diámetro inicial del tubo

En caso de disponer de dos tubos, el ancho tubo es $2B$

- Para tubos perpendiculares al eje de rotura del oleaje:

$$\frac{H_s}{\Delta L} = 1 \quad (2.17)$$

Siendo:

H_s = Altura de ola significativa (m)
 Δ = Densidad relativa de los tubos
 L = Longitud del tubo (m)

En los tubos de gran longitud (mayores de $3D$) rellenos con mortero, es posible que se produzcan grietas. Para evitarlo se recomienda considerar una longitud equivalente:

$$L < (3 \text{ ó } 4) D \quad (2.18)$$

Para los tres tipos: sacos, colchones y tubos, rellenos de arena y sometidos a la acción del oleaje, la altura de ola significativa es de hasta 1.5m, sin sobrepasar nunca de 2m, en los sacos y en los tubos.

2.5.5 Plaut y Klusman (1999)

Analizan los tubos de geotextil que descansan sobre una base deformable, cuando están sometidos a una presión hidrostática.

Suponiendo que el material de los tubos es una membrana inextensible de peso insignificante y que la base ejerce una presión hacia arriba proporcional a una deflexión hacia abajo, despreciando el rozamiento entre los tubos y en la cimentación.

Consideran dos configuraciones, un tubo sobre otro y un tubo sobre dos tubos.

Y obtienen las formas de equilibrio de los tubos numéricamente, calculando la tensión en cada tubo.

Figura 2.4: Geometría y esquema de dos tubos apilados (Plaut y Klusman 1999)

2.5.6 Bezuijen et al. (2000)

Estudian el comportamiento y la resistencia de sacos de geotextil, de grandes dimensiones, rellenos de arena, que tras ser fabricados en barcazas de abertura por fondo, son liberados, deslizando e impactando sobre el lecho.

2.5.7 Oumeraci et al. (2003)

Indican que la primera vez que se utilizaron en el mundo los sacos de geotextil, rellenos de arena en zonas próximas, como protección costera blanda, sostenible y reversible, fue en 1957, para la reparación de un dique en Holanda.

En un principio, debido a la falta de formulación fiable, para el análisis de la estabilidad de los sacos de geotextil rellenos de arena, se emplearon como medida de protección temporal. Posteriormente, con el desarrollo de un modelo hidráulico en la Universidad de Alemania, pasaron a ser una solución a largo plazo y se emplearon como protecciones frente a la erosión, en espigones, revestimientos o arrecifes artificiales.

El principal objetivo de su estudio es obtener un mayor conocimiento de la estabilidad y comportamiento hidráulico de las estructuras hechas con sacos de geotextil rellenos de arena.

Para ello en primer lugar se realizó un modelo a escala reducida, en el que se emplearon sacos de geotextil rellenos de arena, al 80%, de dimensiones de 0,25m x 0,1m x 0,06m. Para determinar el número de estabilidad N_s , utilizaron la aproximación de Wouters (1998):

$$N_s = \frac{H_s}{(\rho_E/\rho_w - 1) \cdot D_{50}} = \frac{C_w}{\sqrt{\xi_o}} \quad (2.19)$$

Siendo:

N_s = Número de estabilidad

H_s = Altura de ola significativa (m)

ρ_w, ρ_s = Densidad del agua y de la arena (Kg/m^3)

ρ_E = Densidad de un saco de arena (Kg/m^3) = $(1 - n) \cdot \rho_s + \rho_w \cdot n$

n = Porosidad del material

D_{50} = Espesor de la capa

C_w = Parámetro empírico que depende del Número de estabilidad

ξ_o = Número de Iribarren = $\frac{\tan \alpha}{(H_s/L_o)^{1/2}}$

α = Pendiente de la estructura

L_o = Longitud de onda en aguas profundas = $\frac{g \cdot T^2}{2\pi}$

Determinándose en este modelo el valor de $C_w \cong 2$

Posteriormente realizaron un ensayo a gran escala, con sacos rellenos de arena de volumen 150 l, con dimensiones 1,50m x 0,75m, sin rellenar.

- La fórmula de estabilidad, para sacos ubicados en la zona de la pendiente, obtenida:

$$N_s = \frac{Hs}{(\rho_E/\rho_W - 1) \cdot D} = \frac{2,75}{\sqrt{\xi_0}} \quad (2.20)$$

Siendo:

D= Diámetro característico del saco= l·senα
l = Longitud del saco en la dirección del oleaje
α = Pendiente de la estructura

- La fórmula de estabilidad, para sacos ubicados en la zona de la cresta, obtenida:

$$N_s = \frac{Hs}{(\rho_E/\rho_W - 1) \cdot D} < 0,79 + 0,09 \cdot \frac{R_C}{H_s} \quad (2.21)$$

Siendo:

R_C = Francobordo

A continuación realizaron un ensayo a gran escala, con sacos rellenos de arena de 25 l:

- La fórmula de estabilidad, para sacos ubicados en la zona de la pendiente: $N_s < 1,1$
- La fórmula de estabilidad, para sacos ubicados en la zona de la cresta:

$$N_s < 0,885 + 0,05 \frac{R_C}{H_s} \quad (2.22)$$

Comparando estos dos últimos ensayos, los sacos de menor dimensión, 25 l, son relativamente más estables que los de mayor dimensión, 150 l.

Finalmente se realizó un último ensayo con sacos de 25 litros unidos entre sí con autoadhesivo, sin obtener mejores resultados.

2.5.8 **Pilarczyk (2003)**

Plantea una visión general de los métodos disponibles para la estabilización y control de la erosión de las playas, con especial énfasis en soluciones alternativas con nuevos materiales.

Dentro de los sistemas alternativos se encuentran los arrecifes artificiales con varios diseños: por un lado los geo-sistemas (geotubos o geocontenedores) y por otro algunos sistemas patentados (ReefBalls o Aquareef).

Los arrecifes artificiales destacan por: ser menos efectivos en mares con marea y ondas largas, ser muy populares en Japón, y ser caros; debiéndose realizar previamente un estudio de coste/beneficio.

Las principales características de los geo sistemas son:

- Su simplicidad en construcción y puesta en obra
- Su bajo coste
- Su mínimo impacto medioambiental
- Su falta de criterios de diseño adecuados

A continuación se muestran dos sistemas patentados: Aquarref y ReefBalls.

Figura 2.5: Ejemplo de sistema patentado Aquareef (Pilarczyk 2003)

Figura 2.6: Ejemplo de sistema patentado ReefBalls (Pilarczyk 2003)

Los geo sistemas utilizan un geotextil de tejido sintético de alta resistencia relleno de arena o mortero. Que en función de su tipo se utilizan:

- Sacos: para la construcción de espigones, playas colgadas, diques exentos o como protección de pie de muros
- Colchones: como protección de pie de muros
- Tubos y contenedores: como construcción de diques exentos, espigones, playas colgadas. Y como terraplenes para recuperación de trabajos.
- Cortinas de geotextil: sistema BEROSIN

Su bajo coste y fácil ejecución pueden ser una buena alternativa para la protección de la costa en países en desarrollo.

2.5.9 Zhu et al. (2004)

Presentan los resultados de ensayos de laboratorio, en los que analizan el inicio del movimiento de los sacos de geotextil rellenos de arena, cuando se utilizan como protección de canales abiertos. Lo más destacable es el estado del arte que se incluye en su apartado introducción.

2.5.10 Recio-Molina y Yasuhara (2005)

Su trabajo consiste en una estructura de protección costera, aplicado en playas, que mediante el empleo de arena envuelta en geotextil, sirve por un lado de alternativa a los materiales tradicionales de escollera y hormigón, y por otro como revestimiento flexible.

Las ventajas y desventajas de las estructuras “Geotextile Wrap-around Revetments (GWR)” son:

– Ventajas:

- Puede usarse como protección contra el oleaje y corrientes
- Permite construir otras estructuras sobre ellas
- Los costes de construcción y de vida útil son pequeños comparados con estructuras duras, al existir una reducción en el volumen de trabajo, empleo de equipos poco sofisticado y empleo de material arenoso local
- Son estructuras flexibles que tienen un buen comportamiento bajo los ciclos hidrodinámicos

– Desventajas:

- Su construcción y diseño requiere consideraciones de las condiciones específicas del lugar y de las técnicas de geotextil
- Muchos de los parámetros usados en el diseño son empíricos, que comprende la confianza en diferentes condiciones
- Las estructuras GWR no son fáciles de reutilizar (a diferencia de otros sistemas flexibles)
- El fallo de una capa compromete la estabilidad de todo el revestimiento

De los ensayos realizados en laboratorio con estructuras GWR se deduce:

- La resistencia obtenida utilizando sacos cosidos es mayor que si se utilizan sacos no cosidos.
- La máxima altura de ola que un revestimiento puede soportar

Para determinar el número de estabilidad, N_s , de una estructura GWR se utiliza la aproximación de Wouters (1998) con un enfoque modificado:

$$N_s = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_E}{\rho_W} - 1\right) \cdot D} \quad (2.23)$$

Siendo:

D = Longitud transversal de una estructura GWR (m)

H_s = Altura de ola significativa (m)

ρ_w = Densidad del agua (kg/m^3)

ρ_E = Densidad de la arena (kg/m^3)

Se deduce que el número de estabilidad para estructuras GWR cosidas debe ser mayor de 3. Y Comparando las diferentes tipos de estructuras GWR analizadas deducen las ventajas y desventajas indicadas en la tabla 1.

Tipos	Ventajas	Desventajas
Con geotextil sin coser	Económico Facilidad de ejecución	Estable en oleajes pequeños Necesidad de protección al pie No se asegura la estabilidad a largo plazo
Con geo compuesto	Facilidad de ejecución Alta permeabilidad (pequeñas deformaciones)	Caro Necesidad de protección al pie No se asegura la estabilidad a largo plazo
Cosido con mortero	Sin deformaciones Alta resistencia al vuelco	Caro Necesidad de protección al pie Respuesta no deseada frente a asentamientos Dificultad de ejecución
Capas de geotextil cosidas	Pequeñas deformaciones No necesita protección al pie Adaptable a asientos diferenciales	Retrasa el tiempo de ejecución

Tabla 1: Comparación de estructuras GWR

2.5.11 Jones et al. (2006)

Su trabajo consiste en una guía práctica sobre las especificaciones técnicas que deben tener los proyectos de defensa de costas, utilizando tubos de geotextil.

- **Ámbito de trabajo:** incluye:
  - Provisión de plantas, mano de obra, equipos y materiales
  - Rendimiento de todas las operaciones relacionadas con la construcción de las estructuras de tubos de geotextiles entre secciones utilizando material de dragado.
- **Publicaciones aplicables:**
  - Publicaciones técnicas
- **Presentaciones o envíos:**
  - Los de tipo “GA” requieren la aprobación del gobierno
  - Los de tipo “FIO” son únicamente informativos
- **Entrega, almacenamiento y manipulación:**
  - Especifica las medidas adoptadas para evitar daños a los tubos durante el proceso de construcción
- **Materiales y construcción:**
  - La descripción debe ser lo más específica posible para asegurar la calidad
- **Instalaciones y equipos:**
  - Estos son determinados por el contratista
  - Las especificaciones requieren de mayor detalle

- Control de calidad:
  - Se debe establecer y mantener el control de calidad requerido
- La medición y el pago:
  - No se realizan mediciones independientes
  - El pago se realizará al precio contratado

2.5.12 Oh y Shin (2006)

Plantean un método de análisis de estabilidad hidrodinámica, basado en la teoría bidimensional del equilibrio límite y realizan ensayos de modelo hidráulico para verificar su viabilidad en tubos de geotextil sumergidos.

Figura 2.7: Esquema del análisis de estabilidad hidráulica en dos dimensiones (Oh y Shin 2006)

En el estudio de estabilidad hidráulica de los tubos de geotextil se analizan las principales causas de fallo de las estructuras de tubos de geotextil: deslizamiento, vuelco y rodamiento.

La carga hidrodinámica oscilante a la que se encuentra sometida el tubo de geotextil, se obtiene de la ecuación empírica de Hiori (1920).

$$P_w = 1,5 \cdot \rho_o \cdot H_{1/3} \quad (2.24)$$

Siendo:

P_W = Carga hidrodinámica oscilante

ρ_0 = Peso unitario del agua del mar

$H_{1/3}$ = Altura de ola significativa

El coeficiente de seguridad frente al deslizamiento $SF_{\text{deslizamiento}}$ es:

$$SF_{\text{deslizamiento}} = \frac{F}{P_h} = \frac{P_v \times \tan \phi'}{P_W \times h_{GT}} \quad (2.25)$$

Siendo:

P_h = Fuerza horizontal

F = Fuerza vertical

P_v = Sobrecarga debida a la presión y peso de gravedad del tubo

P_W = Carga hidrodinámica oscilante

h_{GT} = Altura efectiva

ϕ' = Ángulo de rozamiento entre el tubo y el lecho de arena

El coeficiente de seguridad frente al vuelco SF_{vuelco} es:

$$SF_{\text{vuelco}} = \frac{M_R}{M_O} = \frac{P_v \times \frac{B'}{2}}{P_W \times \frac{h_{GT}}{2}} \quad (2.26)$$

Siendo:

B' = Ancho de la superficie rectangular equivalente del tubo

El coeficiente de seguridad frente al rodamiento $SF_{\text{rodamiento}}$ es:

$$SF_{\text{rodamiento}} = \frac{Q_u}{Q_a} = \frac{cN_c + \left(\frac{1}{2}\right)\gamma_s B' N_\gamma}{\frac{P_W}{B - 2e'}} \quad (2.27)$$

Siendo:

c = Cohesión del terreno

N_c, N_γ = Factores de capacidad de rodamiento

γ_s = Peso del suelo sumergido

e' = Excentricidad de la carga hidrodinámica oscilante = $\frac{P_W \times h_{GT}}{3F}$

En los ensayos del modelo hidráulico se analiza la estabilidad, midiendo el desplazamiento frente al oleaje y la transmisión del oleaje.

Del análisis de estabilidad se deduce que en una sección de dos tubos y para una altura de ola significativa de 6m el desplazamiento es menor que para una sección de un tubo y la misma altura de ola significativa. A su vez para una sección de dos filas de tubo y profundidad cero por encima de la cresta resulta

más estable frente al oleaje, que para una sección de dos tubos y 0,5m de profundidad por encima de la cresta.

La transmisión del oleaje se calcula mediante la expresión:

$$R_{WTR} = \frac{H_T}{H_i} \quad (2.28)$$

Siendo:

R_{WTR} = Coeficiente de transmisión del oleaje

H_T = Altura de ola transmitida en la parte posterior del tubo de geotextil

H_i = Altura de ola incidente

La anchura y altura relativa de la cresta de la estructura sumergida son factores de gran influencia en la transmisión del oleaje.

2.5.13 Jackson et al. (2006)

Realizan una presentación en la que se indica inicialmente que las obras con contenedores y tubos de geotextil, para la defensa de las costas, están aumentando. Destacan su facilidad de realización y de desmontaje.

Las formulaciones clásicas para diques no son válidas. Indican que hay que profundizar ya que hay parámetros que no han sido suficientemente investigados, como: la rigidez, la fricción, la permeabilidad y el porcentaje de llenado.

Figura 2.8: Gráfica de la estabilidad para los contenedores rellenos de arena (Jackson et al. 2006)

Los objetivos fueron el diseño de grandes muros de defensa de costas y determinar si un revestimiento de escollera se podía sustituir por otro de dos filas de sacos de arena de $2,5\text{m}^3$.

Figura 2.9: Fallos esperables en el revestimiento de sacos (Jackson et al. 2006)

Intentan tener un mayor conocimiento de la salida o pérdida de una pieza (saco) del revestimiento.

Para su análisis presentan un cuadro de interacciones; siendo los factores importantes para la fabricación del geotextil:

- Tipo de material
- Grosor del saco
- Tamaño de los poros del saco

Figura 2.10: Fuerzas que actúan sobre los sacos de geotextil (Jackson et al. 2006)

La estabilidad afectará a las siguientes variables del muro:

- Permeabilidad del geosintético tras el muro y fijación del material al trasdós.
- Tipos de geosintéticos para los sacos:
  - Coeficiente de fricción
  - Permeabilidad
  - Peso y apilamiento de sacos, en función del tipo de relleno y del porcentaje de relleno.

2.5.14 Yasuhara y Recio-Molina (2007)

- Presentan el trabajo en 2005
- Se aplica en la playa de la Isla de Sylt, Alemania
- Sirve de aplicación en caso de desastres naturales

2.5.15 Heilman et al. (2008)

Analizan el comportamiento de los tubos de geotextil (GT) para la protección de dunas. Para ello evalúan la interacción de los GT con la playa, la protección de las infraestructuras públicas y otras mejoras del lado tierra. Determinando especialmente:

- Si los GT han incrementado la erosión de las playas adyacentes, impidiendo el libre movimiento de sedimentos o aumentando las reflexiones del oleaje y la socavación.
- Si los GT obstaculizan la recuperación de la playa tras un temporal.

Los principales impactos sobre la playa son:

- a. Socavación delante y en los lados de los GT.
- b. Si la erosión continúa, llega un momento en que la línea de orilla es el GT. A este proceso a veces se le llama “erosión pasiva”.
- c. A medida que la playa decrece, se altera la geomorfología natural de las playas y dunas.
- d. Dado que el GT retiene arena en su trasdós, acelera la erosión aguas abajo al reducirse el aporte.

- e. A medida que crece la erosión, el GT puede ser un saliente en la zona surf y crear una barrera parcial al transporte de sedimentos.
- f. Los impactos sociales incluyen aspectos estéticos negativos y un obstáculo para el acceso a la playa.

De la supervisión de los proyectos de dunas en Galveston, mediante los seguimientos de la Universidad de Texas, se detectó:

- Los GT pueden fallar eventualmente si tienen una exposición prolongada y directa a la acción del oleaje. Siendo eficaces a corto plazo o en situaciones ocasionales.
- Las mareas y temporales causan frecuentemente pérdida de material que recubre los GT.
- Los GT de Galveston no aumentaron la erosión en playas adyacentes.

Las principales conclusiones a las que se llegó en este estudio son:

- ✓ Se obtuvieron magnitudes similares de erosión y aumento de material en zonas con y sin GT.
- ✓ Pueden ser métodos prácticos y de relativo coste sin causar erosión significativa en playas adyacentes.
- ✓ Son adecuadas para la protección de las costas durante temporales.

2.5.16 Lawson (2008)

Hace un estudio general y bastante completo de los diferentes tipos de elementos de geotextil de contención de arenas.

Primero clasifica los geotextiles en:

- A. Tubos
- B. Contenedores
- C. Bolsas

Seguidamente realiza un estudio a cada uno de ellos, siendo más profundo el que realiza de tubos.

A - Tubos:

- Se comenzaron a construir y usar en los años 60. “Tubos Longard” con diámetros menores de 2m.
- En la década de los años 80 se utilizaron geotextiles para su construcción.
- Los diámetros varían de 1 a 6m.
- Se ubican en su posición vacíos y posteriormente se rellenan por distintas bocas, lo que exige:
  - Resistencia de una tensión máxima en el llenado.
  - Porosidad suficiente para la salida de agua y no de arena
- Las variables utilizadas son:
  - Diámetro teórico del tubo (D_t) o Circunferencia teórica (C_t).
  - Anchura de la base e asentamiento (b_t)
  - Anchura máxima del tubo (W_t)
  - Altura del tubo (H_t)
  - Área de la sección transversal del tubo (A_t)

Figura 2.11: Variables utilizadas para el diseño de un tubo (Lawson 2008)

– Aplicaciones:

- Revestimientos: tapados o expuestos
- Diques exentos
- Diques: tapados o expuestos
- Núcleo de diques
- Espigones

– Los estados límite de resistencia pueden ser:

○ Externos

- Deslizamiento $\frac{b_t}{H_t} \cong 1,5$
- Vuelco $\frac{b_t}{H_t} \cong 1,5$
- Rodamiento
- Estabilidad del conjunto
- Socavación del pie: instalación de una alfombra de geotextil con un pequeño tubo.

○ Internos:

- Rotura del geotextil
- Pérdida de material por el geotextil
- Deformación del material que contiene
- Asentamiento de la base

Figura 2.12: Movimientos de un tubo en sección (Lawson 2008)

– Las tensiones que soporta el tubo de geotextil pueden ser de dos tipos:

- Axial: en la dirección longitudinal del tubo, T_a
- Circular: en la dirección transversal, T_c

$$(T_a)_{max} = 0,63 \cdot (T_c)_{max} \quad (2.29)$$

– La tensión última del tubo de geotextil es:

$$(T_u)_{a \text{ ó } c} \geq FS \cdot T_{a \text{ ó } c} \quad (2.30)$$

Siendo: FS, el coeficiente de seguridad ($FS \approx 4 \text{ ó } 5$)

Figura 2.13: Tensiones en el geotextil del tubo (Lawson 2008)

– Las costuras y su resistencia son esenciales para el funcionamiento del tubo

– Los tubos de geotextil, se pueden apilar de tres formas:

- Pendiente suave: $1/n$ $n \geq 2$
- Escalón: $1/n$ $1 \leq n < 2$
- Pendiente en masa

– Las propiedades hidráulicas que se deben tener en cuenta son:

- El tipo de régimen que actúa sobre el geotextil
- El período de tiempo de exposición a este régimen hidráulico

– Las deformaciones de los tubos de geotextil llenos, se pueden agravar por:

- Llenado incompleto

- Licuefacción
- Consolidación de la arena
- Deformación del geotextil con el tiempo
- En ocasiones, la estructura de los tubos, se protege por cuatro motivos, especialmente:
  - Reducir el impacto de las fuerzas hidráulicas
  - Aumentar la vida útil de la obra
  - Protegerlo de fenómenos naturales externos
  - Contra el vandalismo

Seguidamente, se presentan una serie de acciones de protección.

B - Contenedores:

- Suelen tener un volumen entre 100 m³ y 700 m³.
- Se instalan utilizando barcazas en las que se introduce el material, se cierra el contenedor y se suelta el contenedor al agua por abertura inferior.
- La circunferencia requerida del geotextil es C_c :

$$C_c \geq 2,5 \left(\frac{A_f}{b_0} + b_0 \right); \quad A_f \leq 0,8A_b \quad (2.31)$$

Siendo:

A_f = Área de llenado de la sección transversal

A_b = Área de la sección transversal de la barcaza

b_0 = Ancho de la abertura de la barcaza

En la práctica: $\frac{A_f}{A_c} = 0,35 \text{ a } 0,7$ (normalmente 0,45 a 0,55)

$$A_c = \frac{C_c^2}{4\pi} \quad (2.32)$$

Siendo:

A_c = Área de la sección transversal del contenedor

Figura 2.14: Procedimiento de instalación de los contenedores de geotextil (Lawson 2008)

Figura 2.15: Definición de las áreas de llenado de un contenedor de geotextil (Lawson 2008)

- Los usos más comunes de los contenedores son:
  - Dique exento
  - Núcleo de un dique
  - Dique arrecife
  - Protección de pie de ladera
- Los elementos críticos de la tensión del geotextil son:

- La descarga de la gabarra o barcaza
- El impacto sobre el suelo; este suele ser el mayor
- Estudia los efectos hidráulicos ambientales en los contenedores.
- La protección de los geotextiles hacen que:
  - Se reduzca el impacto de las fuerzas hidráulicas sobre él.
  - Aumente la vida útil del geotextil.

Posteriormente indica una serie de tipos de protección.

C - Bolsas:

- Existen tres tipos básicos:
  - Sacos
  - Cajas
  - Colchones
- Sus dimensiones varían entre 0,05 m³ y 5 m³
- Existen tres formas básicas de apilamiento:
  - Siguiendo la pendiente
  - A soga
  - A tizón

Figura 2.16: Formas básicas de apilamiento de los tubos de geotextil (Lawson 2008)

- Los usos más frecuentes son:
  - Revestimientos
  - Espigones
  - Diques artificiales
  - Protección de pie de ladera
  - Prevención de socavación
  - Diques
- Los estados límite a los que deben diseñarse pueden ser:
  - Externos:
    - Deslizamiento
    - Vuelco
    - Rodadura
    - Estabilidad del conjunto
    - Socavación
    - Asentamiento
  - Internos:
    - Local: por deslizamiento o vuelco
    - Rotura del saco
    - Pérdida de material del saco
    - Deformación del saco

2.5.17 Mori et al. (2008)

Presentaron el abstract, pero no la ponencia, por lo que los datos que se pueden extraer son escasos.

Indican que hay una falta de conocimiento en la durabilidad de los geotextiles expuestos a ambientes marinos, siendo las principales causas:

- La degradación química, esencialmente debida a la exposición a los rayos ultravioleta (exposición solar), que al estar sumergidos se va reduciendo.
- Abrasión debido al rozamiento entre el geotextil y el sedimento.
- El problema del vandalismo.

A su vez plantean el desconocimiento en la forma final del geotextil lleno de arena, tanto de la estructura como del elemento, debido a:

1. El efecto del oleaje
2. A la socavación local
3. Angulo de rozamiento entre los sacos
4. Asentamientos
5. Pérdidas de material
6. Daños en el geotextil

El principal objetivo se centró en el análisis y la monitorización de una estructura formada por sacos de geotextil, verificando:

- La estabilidad del cuerpo de la estructura
- Durabilidad y estabilidad de los sacos de arena
- Condiciones de los materiales textiles.

La estructura consistió en cuatro espigones contruidos con sacos de geotextil cosido rellenos de arena, con un tamaño inicial de 2,5m x 1,5m x 0,5m, un volumen de 1,5m³ y un peso de 3,7 toneladas. Sumergidos a una determinada cota y aumentando su anchura a medida que lo hacía su calado.

Figura 2.17: Sección longitudinal y transversal de la construcción de un espigón (Mori et al. 2008)

De las inspecciones visuales de la estructura se dedujo:

- La mayoría de los sacos se rompieron por sus costuras.
- En la zona de la playa, donde los sacos están parcialmente cubiertos de arena, el fallo se produjo por abrasión.
- La porosidad de los sacos, muestra mucha variabilidad dependiendo de las condiciones ambientales de cada tramo.

2.5.18 Jackson et al. (2008)

En su ponencia, indican que los geocontenedores tienen la ventaja respecto a las obras de defensa tradicionales de:

- Coste
- Rapidez
- Fácilmente reversibles

Presentan ejemplos de uso de las estructuras realizadas con geocontenedores (sacos de geotextil rellenos de arena):

- Muros de protección: sacos de 1 a 4,5t
- Espigones: sacos de 1 a 2,5m³
- Tubos para playas apoyadas o sustentadas
- Arrecifes artificiales

2.5.19 Smith (2008)

Describe los usos históricos más frecuentes de los tubos de geotextil. En especial, se centra en contenedores para desechos.

Tipos:

— Tubos:

Rellenos con arena de la playa o similar, sin material no cohesivo o fino.

La tensión última del geotextil se encuentra en el rango de 60 a 120 KN/m.

Diámetro de 1 a 10m, Longitud de 20m a 30m hasta 100m.

— Contenedores:

Se rellenan en abierto y se cierran en la cántara de la gabarra.

Tensión última 600KN/m o más.

Volumen entre 100 y 700m³, longitud típica de 25m.

— Sacos:

Volumen de 0,05m³ a 5m³

Su forma puede ser: sacos, cajas y colchones

Características de los tubos:

- Permite pasar el agua a través del geotextil reteniendo la arena.
- Una proporción típica de la mezcla de llenado es 20/1 (agua/arena).
- Hay que proteger el fondo porque la salida del agua puede provocar socavación.
- Características físicas D_T o C_T. (C_T entre 4,5 y 27m) y longitud aproximada de 100m.
- Las tensiones en los tubos son máximas en el proceso de llenado.
Muestra las curvas de tensión de Palmerton (2002) para tubos de 3, 4 y 5 m de diámetro.
- Se debe exigir al fabricante una capacidad de tensión del geotextil, tensión última, mayor que la máxima tensión multiplicada por un coeficiente de seguridad:

$$T_{u, c} \text{ o } T_{u, a} \geq Fs(T_{max, c} \text{ o } T_{max, a} \text{ o } T_{max, s}) \quad (2.33)$$

Siendo:

T_s = tensión de la costura

T_a = tensión axial

T_c = tensión en circunferencia

Fs = Coeficiente de seguridad (de 4 a 5)

Características de los contenedores de geotextil:

- Varía su volumen desde 100 hasta 700 m³.
- El método de fabricación puede ser cerrado o abierto por la parte superior que se cierra una vez llenado.
- La tensión última debe ser al menos de 200 kN/m
- La máxima tensión se produce durante el impacto del contenedor con el suelo, una vez que es soltado por la gabarra o barcaza.

Características de las bolsas (sacos) de geotextil:

- Los pesos típicos de los geotextiles están entre 600 g/m² y 1200 g/m².
- La abrasión puede estar asociada con estructuras que se ven afectadas por el oleaje y arena.
- Hay que considerar el vandalismo.
- Su cosido debe resistir al menos el 60% de la tensión última.
- Los sacos de geotextil se diseñan como estructuras de gravedad, con una adecuada protección de pie.
- Hay que estudiar el deslizamiento entre sacos.
- La porosidad del geotextil ha de ser tal que no permita a largo plazo la pérdida de material fino.
- Los sacos de arena tienen la ventaja sobre otros tipos que son más fáciles de remplazar si una pieza se halla en peligro.

2.5.20 Pilarczyk (2008)

Presenta una serie recopilatorio de alternativas para la protección de costa, que podríamos dividirla en dos tipos básicos:

- Las realizadas con sistemas prefabricados como: el Aquareef, tanto para diques arrecife como para pie de perfil; o el ReefBalls; o le drenaje de playas.
- Las realizadas con geotextiles.

2.5.21 Wert et al. (2008)

Presentan los resultados de unos ensayos realizados en tanque sobre la permeabilidad de estructuras realizadas con sacos de geotextil rellenos de arena. El motivo que les lleva a realizar este estudio lo exponen en sus prolegómenos, indicando que la permeabilidad de las estructuras de sacos de geotextil rellenos de arena (GSC) tiene una influencia significativa en la estabilidad hidráulica de las estructuras cuando sobre ellas incide el oleaje.

Cuanto más permeable es un revestimiento mayor es su estabilidad. A pesar de su importancia tanto para el diseño como para la estabilidad de la estructura, no existe información suficiente para valorarla. La fórmula utilizada es la de Darcy:

$$Q = k i A \quad (2.34)$$

Dónde:

Q = Caudal

k = Coeficiente de permeabilidad de Darcy

A = A es el área transversal total de la capa filtro normal al flujo

i = Gradiente hidráulico = $\Delta h / \Delta l$ = constante

Δh = Diferencia de altura de agua delante y detrás de la capa filtro

Δl = Anchura de la capa filtro

Se ensayaron en dos tipos de estructuras:

- Vertical
- Revestimiento en talud

Se utilizaron dos tipos de saco grande y pequeño.

Se apilaron los sacos:

- Encadenados y en columna
- A tizón y a sogas
- En una fila y en dos filas

El resultado de los ensayos se puede resumir en los siguientes puntos:

- Efecto del tamaño de los huecos:
  - Estructura de una fila de sacos a tizón en columna: $k = 5 \cdot 10^{-2}$ m/s
  - Estructura de una fila de sacos a tizón encadenados: $k = 2 \cdot 10^{-2}$ m/s
- Efecto del tamaño del saco:
  - Estructura de una fila de sacos grandes a tizón encadenados:
 $k = 1,5 \cdot 10^{-2}$ m/s
  - Estructura de una fila de sacos pequeños a tizón encadenados:
 $k = 0,8 \cdot 10^{-2}$ m/s
- Efecto de la disposición de dos capas:
  - Estructura de dos filas de sacos a tizón encadenados: $k = 1,4 \cdot 10^{-2}$ m/s
  - Estructura de dos filas de sacos a sogas encadenados: $k = 0,6 \cdot 10^{-2}$ m/s
- Efecto del bloqueo de los huecos:
  - Estructura de una fila de sacos a tizón en columna: $k = 5 \cdot 10^{-2}$ m/s
  - Estructura de dos filas de sacos a tizón y sogas en columna:

$$k = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

- Efecto del número de capas:
  - Estructura de dos filas de sacos a tizón y sogas encadenados:

$$k = 0,9 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

- Estructura de tres filas de sacos a tizón, sogas y sogas encadenados:

$$k = 0,9 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

- Efecto con capas a tizón:
  - Estructura de una fila de sacos a tizón encadenados: $k = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$
  - Estructura de dos filas de sacos a tizón encadenados: $k = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$

También ensayaron la permeabilidad de revestimientos en talud de sacos de geotextil, llegando a la conclusión que su permeabilidad era $2 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$

Entre las conclusiones a las que llegaron puede destacarse:

- Si no se tienen datos disponibles de la permeabilidad de una estructura de sacos de geotextil rellenos de arena se puede suponer razonablemente un valor de 10^{-2} m/s
- El modo de disposición de los sacos en la estructura afecta a su permeabilidad
- La estabilidad hidráulica de los sacos de arena a sogas es menor que los dispuestos a tizón

2.5.22 Recio, J. (2008) y Recio y Oumeraci (2008, 2009)

Estudian las obras blandas y flexibles construidas con geotextiles como alternativa de las obras de defensa tradicionales.

Indican que no hay fórmula que tenga en cuenta las deformaciones en las estructuras.

Su investigación se ha centrado en los siguientes 6 puntos:

1. Cargas y esfuerzos inducidos por el oleaje sobre los contenedores de arena
2. Flujo de oleaje inducido en el geotextil

3. Movimiento interno de arena en el geotextil
4. Variación de las áreas de contacto entre los geotextiles vecinos durante la acción del oleaje
5. Tipos de desplazamiento de los geotextiles dentro de la estructura blanda
6. Efecto de las deformaciones en la estabilidad de la estructura de los geotextiles

A su vez desarrollan un modelo de flujo y dos de estructuras dinámicas que sirvieron para entender el comportamiento de las estructuras blandas de geotextil frente al oleaje.

Figura 2.18: Estructura ensayada en el modelo de flujo (Recio et al. 2009)

Las estructuras de geotextiles se usan como alternativa a las obras de defensa clásicas: muros, espigones, diques, revestimientos y arrecifes. Cambiando el hormigón y la escollera por sacos de arena.

Los modelos numéricos de comportamiento de la estructura analizan los procesos que afectan:

- A las deformaciones
- A la estabilidad

Los estudios se centran en la estabilidad hidráulica de los sacos de geotextiles bajo la acción del oleaje. Tiene como propósito los siguientes aspectos:

- i. Identificar el caos más crítico de los sacos bajo la acción del oleaje
- ii. Los movimientos internos de la arena en el saco y su efecto en la estabilidad
- iii. Efecto del ángulo de fricción entre los sacos de geotextil sobre la estabilidad
- iv. Efecto de las deformaciones del saco en la estabilidad

Localización crítica respecto a la acción del oleaje:

Encontraron que es más crítica la no rotura del oleaje que cuando rompe en ella. Siendo la subida y bajada del agua sobre la estructura la que causa mayores peligros.

Movimiento y redistribución de la arena dentro de saco debido a la acción del oleaje:

El oleaje hace que la zona del saco frente al oleaje aumente de cantidad de arena, reduciéndose en el resto hasta alcanzar un máximo en el ciclo 30. Esta emigración hace que las fuerzas de resistencia se reduzcan aumentando el riesgo de salida del saco de la estructura.

Fricción entre sacos:

El efecto del ángulo de fricción entre sacos es particularmente importante para la estabilidad, moviéndose en un rango entre 15° y 30°.

Efecto de la deformación del saco en la estabilidad:

Las deformaciones del saco afectan a la estabilidad en dos vías: I) Reduciendo la estabilidad frente al deslizamiento, y II) Reduciendo la estabilidad frente al vuelco

Los movimientos de sacos de arena de geotextil, debido a la acción directa del oleaje, que detectaron se muestran en la siguiente figura.

Figura 2.19: Movimiento de los sacos de arena de geotextil debido a la acción directa del oleaje (Recio y Oumeraci 2009)

La fórmula que proponen se basa en un tipo de saco que tiene las siguientes relaciones geométricas:

$$\begin{aligned} \text{Longitud} &= l_c \\ \text{Anchura} &= \frac{1}{2} l_c \\ \text{Altura} &= \frac{1}{5} l_c \end{aligned}$$

Con lo que el volumen del saco y las áreas de proyección del saco son:

$$V = l_c^3 / 10 \quad (2.35)$$

$$A_s = l_c^2 / 10 \quad (2.36)$$

$$A_T = l_c^2 / 2 \quad (2.37)$$

Las fuerzas de movimiento de los sacos debidas al oleaje en la estructura se definen como:

- Fuerza de arrastre:

$$F_D = 0,5 \cdot C_D \cdot \rho_w \cdot A_s \cdot u^2 \quad (2.38)$$

- Fuerza de inercia:

$$F_M = C_M \cdot \rho_w \cdot V \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.39)$$

- Fuerza de elevación:

$$F_L = 0,5 \cdot C_L \cdot \rho_w \cdot A_T \cdot u^2 \quad (2.40)$$

- Fuerza de resistencia del saco de arena sumergido:

$$F_{GSC} = \rho_{GSC} \cdot g \cdot V \quad (2.41)$$

Siendo:

ρ_w = Densidad del agua

ρ_s = Densidad de la arena

C_D, C_M y C_L = Coeficientes empíricos de las fuerzas de arrastre, inercia y de elevación

u = Velocidad horizontal de la partícula del agua inducida por el oleaje

$\frac{\partial u}{\partial t}$ = Aceleración horizontal de la partícula asociada al oleaje

$\rho_{GSC} = (\rho_s - \rho_w)$ = Densidad sumergida de la arena

V = Volumen de un saco de arena

A_S = Proyección del área del saco de arena en la dirección perpendicular al oleaje

A_T = Proyección del área del saco de arena en la dirección del oleaje

Figura 2.20: Esquema de fuerzas de movimiento debidas al oleaje (Recio et al. 2009)

Cuando actúa el oleaje sobre los sacos de geotextil, provoca el desplazamiento de la arena en su interior, haciendo que A_S aumente y A_T disminuya.

Figura 2.21: Efecto del movimiento de la arena en el interior del saco frente al deslizamiento (Recio et al. 2009)

1 - Estabilidad hidráulica de un saco de arena frente al deslizamiento:

Fuerza de resistencia horizontal > Fuerzas horizontales

$$\mu (F_{GSC} - F_L) \geq F_D + F_M \quad (2.42)$$

Siendo: μ = coeficiente de rozamiento entre los sacos de geotextil.

2 - Estabilidad hidráulica de un saco de arena frente al vuelco en un punto:

Momentos de las fuerzas resistentes > Momentos de las fuerzas actuantes

$$F_{GSC} \cdot r_s \geq (F_D + F_M) \cdot m_s + F_L \cdot r_s \quad (2.43)$$

Siendo:

r_s = Proyección horizontal de la distancia entre el centro de gravedad y el punto de rotación

m_s = Proyección vertical de la distancia entre el centro de gravedad y el punto de rotación.

El centro de gravedad va variando a medida que actúa el oleaje.

Figura 2.22: Estabilidad hidráulica de un saco de arena frente al deslizamiento y al vuelco (Recio et al. 2009).

Las conclusiones que se obtienen de la experimentación y de los resultados numéricos son:

- El punto crítico o la zona crítica de la pendiente del muro con respecto a la estabilidad hidráulica se sitúa justo debajo del nivel medio del mar en reposo (NMM).

- La fase más crítica para la estabilidad hidráulica sucede en el retorno del agua, a la altura justo debajo del NMM.
- Las deformaciones de los sacos contribuyen de manera decisiva en la estabilidad de la estructura.
- La deformación de los sacos se produce por el corrimiento de arena dentro del saco, que a su vez depende de su grado de llenado, siendo fundamental para la estabilidad de la estructura.
- La rotura de oleaje no es tan crítica para la estabilidad de la estructura, como podría esperarse.
- Los tipos de desplazamiento de los sacos de geotextil más relevantes son debidos al deslizamiento o al vuelco, dependiendo de la posición del saco en la estructura.
- La resultante de las fuerzas inducidas por la acción del oleaje en un saco de geotextil, es independiente de los sacos adyacentes.
- La fricción entre sacos tiene un efecto considerable sobre la estabilidad de la estructura.
- Los modelos numéricos también muestran que los puntos críticos para la estabilidad de la estructura se encuentran justo debajo del NMM y en la cresta de la estructura.

Las fórmulas de cálculo de la estructura de sacos son las siguientes, sustituyendo los datos de volúmenes y áreas de proyección en función de la longitud del saco l_c :

Sin tener en cuenta la deformación (para el deslizamiento):

$$I_c (\text{deslizamiento}) \geq u^2 \frac{(0,5 C_D + 2,5 C_L \mu)}{(\mu \Delta g - C_M \frac{\partial u}{\partial t})} \quad (2.44)$$

Con:

$$\Delta = \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1$$

Teniendo en cuenta la deformación:

(Deslizamiento)

$$I_c (\text{deslizamiento}) \geq u^2 \frac{(0,5 K_{SCD} C_D + 2,5 K_{OCL} C_L \mu)}{(\mu K_{SR} \Delta g - K_{SCM} C_M \frac{\partial u}{\partial t})} \quad (2.45)$$

(Vuelco)

$$I_c (\text{vuelco}) \geq u^2 \frac{(0,05 K_{OCD} C_D + 1,25 K_{OCL} C_L \mu)}{(0'5 \Delta K_{OR} g - 0'1 K_{OCM} C_M \frac{\partial u}{\partial t})} \quad (2.46)$$

2.5.23 Akter et al. (2009)

Los autores presentan un trabajo sobre los fallos observados en estructuras formadas por sacos de geotextil rellenos de sedimento, para validar un modelo numérico existente.

Aunque inicialmente indican que se pueden utilizar en estructuras costeras, se centran en observaciones realizadas de la aplicación de los sacos rellenos de sedimento, como estabilización de las laderas de los ríos. Utilizando para ello un canal y centrándose en tres tipos de fallos.

El uso de sacos de arena para estructuras costeras tiene más de 20 años.

Los fallos más comunes de sacos de geotextiles para estructuras costeras son:

- Rebasabilidad
- Deslizamiento
- Pérdida de material interior (arena)
- Salida de su posición
- Socavación de pie

Del análisis del comportamiento hidrodinámico de los sacos y de diferentes estudios, se obtienen los siguientes parámetros:

- El coeficiente de rugosidad es 0,6
- El ángulo de rozamiento de los sacos de geotextil rellenos de arena es 30° -35°
- El ángulo de deslizamiento entre dos sacos de geotextil es 50°
- El porcentaje de llenado de los sacos es 75 -80%
- La disposición óptima de los sacos es solapados al 50%

2.5.24 Harris y Sample (2009)

Presentan un trabajo en el que comparan los tubos únicos de geotextil con los que llaman multiceldas.

Los sacos terreros para la defensa de costas comenzaron a utilizarse en el siglo XVII en Holanda.

El estado del arte de la fabricación de geosintéticos hoy en día combinan los grandes esfuerzos con la resistencia a la abrasión, al punzonamiento, al desgarramiento y al deterioro por radiación ultravioleta.

Los tipos de materiales geosintéticos pueden ser:

- Geotextiles: de materiales porosos
- Geomembranas: de materiales no porosos

A su vez los tipos de contenedores se pueden clasificar en:

- Sacos rellenos de arena: de aproximadamente 40kg y 0,03m³
- Tubos
- Geocontenedores: de unos 100m de longitud y 5m de ancho
- Geosistemas
- Etc.

Siendo utilizados como estructuras de protección costera, paralelos a la costa o perpendiculares. Los de menor tamaño se pueden transportar llenos, mientras que los de mayor dimensión se deben llenar “in-situ”.

La forma de los contenedores se divide en:

- De célula simple
- Multicélula

A partir de aquí comparan las dos formas, concluyendo que la forma multicelular es más adecuada que la simple.

Finalmente concluyen que los sistemas de sacos o contenedores de arena, han resultado eficaces frente a la acción de los huracanes.

Figura 2.23: Comparación entre contenedores de multicélula y célula simple (Harris y Sample 2009)

2.5.25 Blacka et al. (2009)

Realizaron modelos físicos con oleaje monocromático con “mega contenedores” de geotextil de 4m de anchura con una, dos y tres líneas (4m, 8m y 12m) y analizaron el efecto amortiguador del oleaje de cada una de ellas, con tres períodos de oleaje: 5,4, 7,7 y 9,6s.

Efecto de la anchura de coronación del dique exento sumergido en la transmisión de oleaje:

- La reducción en el coeficiente de transmisión de oleaje que se obtiene aumentando la anchura de 4m a 8m, varía hasta un máximo de aproximadamente 0,2. Sin embargo hay muy poca reducción si se aumenta la anchura de 8m a 12m.
- Para períodos largos y grandes profundidades, la reducción más significativa en el coeficiente de transmisión se consigue aumentando la anchura de 4m a 8m. Sin embargo si se aumenta el ancho de 8m a 12m, la reducción es pequeña.
- Para períodos cortos la reducción del coeficiente de transmisión es pequeña al aumentar el ancho de coronación del dique exento sumergido.

Efecto de la profundidad (franco bordo) y período del oleaje en la transmisión de oleaje:

- El resultado muestra una clara tendencia a una mayor transmisión de oleaje asociado con un mayor dique sumergido y un mayor período.

Figura 2.24: Profundidad (franco bordo) de un dique exento sumergido (Blacka et al. 2009)

Estimación empírica de la transmisión de oleaje:

- Analizan diversos modelos y los compara con sus datos del modelo físico:
  - Dally, Dean y Dalrymple (1984)
  - Van der Meer (1991)
  - Van der Meer y d'Angremond (1991)
  - Briganti et al. (2004)

Llegando a la conclusión de que el que mejor se ajusta es el primero: Dally, Dean y Dalrymple (1984); aconsejando su uso.

2.5.26 Aminti et al. (2010)

Presentan el resultado de la monitorización de un dique arrecife construido con tubos de geotextil rellenos de arena en la playa de San Vincenzo (Italia).

Indican que los tubos de geotextil son una buena alternativa a las estructuras tradicionales de hormigón o escollera con relación a la reducción de costes, su reversibilidad y el impacto ambiental. Además el empleo de elementos hidráulicos de llenado, reducen el tiempo de ejecución.

Existe una cierta incertidumbre en la forma que adquirirá la obra con el tiempo debido a la acción continua del oleaje y los efectos como la socavación, la migración y la pérdida de material a través del geotextil, sometido a la abrasión debido a su interacción con la arena y la grava en la zona de aguas someras.

Para analizar la durabilidad de los geotextiles, sometidos a su vez a los efectos de la vegetación marina, dicen que el seguimiento en el terreno es el mejor método ya que los modelos físicos tienen sus limitaciones a la hora de representar de forma correcta la resistencia y la deformación en modelos a escala reducida.

Por todo ello, se realizó un experimento en campo, constituido por 100m de barrera longitudinal construida con tubos de geotextil, con el objetivo de tener información sobre:

- Forma inicial de los tubos
- Forma final de los tubos
- Variación y pérdida de material a medio plazo, socavación, etc.
- Análisis de la durabilidad a medio y largo plazo
- Morfodinámica local alrededor de la barrera
- Interacción de geotextiles con el crecimiento marino

La obra se ejecutó a la vez como un estudio experimental, con la finalidad de obtener información para poder utilizar en construcciones futuras, y como un dispositivo de emergencia con la finalidad de proteger la alimentación de las playas, mientras tanto.

Con relación al diseño, la estructura está sumergida a 0,5m de profundidad, tiene una longitud de 100m, colocada paralela a la costa y a una distancia de 80m de la playa. A su vez, los tubos tienen un diámetro nominal de 3,0m y una altura final de 1,6m ubicados a una profundidad media de 2,0m.

Debido a la acción del oleaje y las corrientes, se puede producir erosión, socavación, en la parte inferior del tubo. Por ello se incluyó en el diseño una plataforma de 10m de ancho, a modo de bese, de tejido filtrante, conocida como

plataforma de socavación. Utilizaron tres tipos de material: polipropileno no cosido, polipropileno cosido y geocompuesto de poliéster. Y dejaron una parte de la longitud del tubo sin proteger.

Para facilitar la estabilidad de la plataforma de socavación, se colocaron en sus bordes dos tubos de 33cm de diámetro, uno hacia el lado de aguas profundas y otro hacia el lado de aguas someras. Rellenos con material de dragado.

Respecto al proceso constructivo, requirió una duración de dos meses y dos operarios. La obtención de un resultado preciso a corto plazo en la ejecución de la plataforma de geotextil, necesita buen clima y buena visibilidad. Por otro lado, su ejecución, no interfiere con otras actividades de la playa, según dicen.

Figura 2.25: Sección de barrera litoral formada por tubo de geotextil sumergido (Aminti et al. 2010)

Para comprobar cómo se había comportado la obra, se realizaron tres batimetrías: Una antes de la instalación del tubo; otra un mes después de la finalización de la construcción; y la última tres meses después de la finalización de los trabajos. Al comparar la última batimetría con las dos anteriores, dedujeron que debido a la interacción del oleaje y la estructura había creado un tómbolo a 1m por debajo del nivel del mar, lo que indicaba que se había alcanzado el nivel de protección diseñado.

2.5.27 Yan y Chu (2010)

Presentan la construcción de un dique para el puerto chino en Tianjin a base de colchones de geotextil recubiertos de una manta con protección en el pie, de escollera.

A su vez, introducen el cálculo de las presiones que soporta el geotextil, que comparándolo con el método de Leshchinsky et al. (1996), da resultados muy parecidos.

$$p = \gamma(H - h) \quad (2.47)$$

$$2T = ph + \frac{1}{2}\gamma h^2 \quad (2.48)$$

Siendo:

H= Altura del dique

h= Altura del tubo inferior

γ = Peso unitario de la mezcla

p= Presión en el interior del tubo

T= Esfuerzo de tracción

Sustituyendo la ecuación (1) en la ecuación (2) se obtiene:

$$T = \frac{1}{2}\gamma(H - h)h + \frac{1}{4}\gamma h^2 \quad (2.49)$$

Conociendo los valores de H y γ , la ecuación queda en función de T y h.
Para H= 4,8m y $\gamma = 12\text{KN/m}^3$, se obtiene:

$$T = 6(4.8 - h)h + 3h^2 \quad (2.50)$$

Y si se reescribe la ecuación queda:

$$3h^2 - 28h + T = 0 \quad (2.51)$$

Para que tenga una solución real tiene que cumplir que:

$$28,8^2 - 12T^2 \geq 0 \quad (2.52)$$

Figura 2.26: Esfuerzos a los se encuentran sometidos los colchones de geotextil (Yan y Chu 2010)

Obteniendo un esfuerzo de tracción:

$$T \leq 69,12 \text{ KN/m}$$

La ecuación (2) se puede usar de manera aproximada para determinar el esfuerzo de tracción cuando el tubo se rellena bajo una presión dada de bombeo. Para $\gamma = 12 \text{ KN/m}^3$, se obtiene:

$$T = 0,5p_0h + 3h^2 \quad (2.53)$$

Estos valores se calculan en gráficas para $p_0=50 \text{ kPa}$ y $p_0=100 \text{ kPa}$.

Figura 2.27: Esquema de la sección del dique de Tianjin formado por colchones de geotextil (Yan y Chu 2010)

2.5.28 Jackson (2010)

Los factores de diseño de los diques arrecife los ordena en:

- Condiciones del lugar:
  - Batimetría
  - Oleaje
  - Corrientes, etc.
- Profundidad de coronación y transmisión del oleaje
- Longitud
- Anchura
- Profundidad del agua
- Distancia a la orilla

Una de las causas que se citan a menudo para no usar los diques arrecife, es que el set-up puede causar socavación en la zona del dique que mira hacia la costa.

Comportamiento de la transmisión del oleaje:

- Los diques en talud de pequeña coronación, reducen la altura de ola.
- Una pequeña reducción del oleaje, reduce la energía transmitida y el transporte de sedimentos.
- La reducción de energía está relacionada con los siguientes factores:
  - Altura de ola
  - Período
  - Ancho de coronación
  - Altura de coronación
  - Permeabilidad/Rugosidad

La construcción de los contenedores de geotextil rellenos de arena, proporciona, nuevas estructuras de ingeniería costera y el empleo de material de dragado contaminado.

2.5.29 Akter et al. (2010)

Habla de modelos hidráulicos para el estudio de revestimientos a base de sacos de geotextil para riberas de río y de los posibles tipos de fallo.

2.5.30 Hornsey et al. (2011)

Este trabajo describe el estado del arte con relación al diseño y a las especificaciones de los contenedores de geotextil rellenos de arena, GSC, considerando principalmente:

1. Su estabilidad
2. Un análisis de los últimos ensayos realizados en canal de oleaje, que evalúa la capacidad de llenado, el tamaño del contenedor, la pendiente de la estructura, la protección frente a la socavación,....
3. Su durabilidad
4. Los métodos y especificaciones que limitan los efectos sobre su vida útil: vandalismo, radiación solar,...

Respecto al diseño se plantean curvas y métodos de diseño, retención de arenas, socavamiento y protección.

El primer proyecto a gran escala en el que se usaron geotextiles rellenos de arena, se realizó en Australia, a finales de 1980 y principios de 1990. Se utilizaron tubos de pequeño tamaño (1,2m de diámetro) rellenos con material de dragado.

A finales de 1990 y principios de 2000, el método de fabricación de los contenedores de geotextil cambió para adaptarse a las exigencias de uso que la experiencia daba después de algunos años de seguimiento. Se sustituyeron los tubos por sacos de menor tamaño de arena apilados, de $0,75\text{m}^3$ y $2,5\text{m}^3$.

Las posibles opciones de los contenedores de geotextil rellenos de arena fueron:

- Los tubos de geotextil rellenos de arena, que se emplearon inicialmente fueron de geotextil cosido, con una sección transversal elíptica, de altura superior a 1m y longitud mayor de 20m.

- Posteriormente, se utilizaron pequeños sacos de geotextil no cosido con una altura menor de 1m y una longitud menor de 3m.

El diseño de los sistemas de geotextiles empleados en la protección costera lo dividieron según dos aspectos:

1. Estabilidad

2. Durabilidad

1) En el análisis de estabilidad de los contenedores de geotextil rellenos de arena:

- Se reconoció que la fórmula de Hudson no era apropiada para evaluar la estabilidad de los contenedores de geotextil rellenos de arena.
- Se normalizó el tamaño de los sacos de geotextil rellenos de arena a $0,75\text{m}^3$ y $2,5\text{m}^3$.
- Los ensayos consistieron en un revestimiento de dos filas de sacos con protección de pie, empleando un saco más.
- Se consideró que la estructura había fallado cuando el 10%, en una fila, o el 15%, en dos filas, de los sacos de geotextil se habían movido de su lugar.
- Los resultados de diseño para los geotextiles rellenos de arena de $0,75\text{m}^3$ y $2,5\text{m}^3$ se representan en dos gráficas que relacionan el tipo de sección y el tipo de saco con el período de pico y la altura máxima de ola que soportan.
- Se recomienda usar un geotextil que retenga el 95% de la arena.
- La protección contra la socavación se realiza poniendo en el pie otro saco por delante.

Figura 2.28: Sección tipo ensayada de dos filas de sacos de geotextil (Hornsey et al. 2011)

2) En el análisis de la durabilidad de los contenedores de geotextil rellenos de arena, se analiza:

- La resistencia frente a daños:
  - Accidentales (provocados por el impacto de una embarcación)
  - Vandalismo (cortes con cuchillo o perforaciones)
- La degradación por radiación solar
  - Se recomienda que resista un máximo de 2000 horas y un mínimo de 500 horas, al año.
- La resistencia a la abrasión
  - Se recomienda una resistencia mínima del 70% a los contenedores de geotextil de arena expuestos a aplicaciones costeras, tras ser sometidos a 80.000 ciclos de abrasión, con una mezcla de agua y grava fina.

2.5.31 Wilke y Hangen (2011)

Este estudio resume brevemente los métodos de diseño de los tubos de geotextil, para dar una breve visión de sus posibles aplicaciones, poniendo como ejemplos de uso proyectos ejecutados en Letonia e Italia.

Según dicen, tanto los materiales como la forma y llenado han ido variando a lo largo del tiempo.

Señalan que los métodos de diseño de los tubos de geotextil, se deben tener en cuenta los posibles mecanismos de fallo, que pueden ser:

- Externos: centrados en la estabilidad como un elemento monolítico
- Internos: centrados en la estabilidad entre la pared del tubo de geotextil y la arena

1 - Grado de llenado del tubo: Limita la posibilidad de migración de arena y define el movimiento del material a lo largo del tubo. Existen dos formulaciones básicas basadas en el peso y basadas en la sección del saco.

- En función de la altura: basado en Deltares (Steeg Van 2010)

$$P_h = \frac{h}{h_{100\%}} \quad (2.54)$$

Siendo:

P_h = Porcentaje de llenado en función de la altura

h = Atura del tubo lleno (m)

$h_{100\%}$ = Altura máxima del tubo lleno (igual al diámetro del tubo) (m)

Ratio de llenado = $\frac{h}{D}$

D = Diámetro del tubo lleno 100% (con sección transversal circulo) (m)

- En función de la sección transversal: basado en CUR (CUR 217,2006):

$$f = \frac{4\pi A}{S^2} \quad (2.55)$$

Siendo:

f = Grado de llenado

A = Sección transversal del área del tubo lleno (m²)

S = Perímetro del tubo (m)

2 - Análisis de estabilidad interno:

- Resistencia a la tracción de la tela del tubo:

Se determina por el método Leshchinsky (Leshchinsky, 1996), en el que mediante el programa de cálculo GeoCoPS 3.0, se detecta

el crecimiento casi exponencial de la fuerza de tracción, con el diámetro del tubo, en función de una mayor altura de llenado.

- Tamaño admisible de la abertura de la malla de geotextil:

Se recomienda que el material de llenado del tubo de geotextil sea arena, con una fracción máxima del 15% de finos (GRI, 1999).

Se determina mediante las siguientes dos fórmulas (CUR 217, 2006):

$$O_{90} < 5D_{10}C_u^{1/2} \quad (2.56)$$

$$O_{90} < 2D_{90} \quad (2.57)$$

Siendo:

O_{90} = Abertura que corresponde al D_{90} de los sólidos que pasan el geotextil (mm).

D_x = Tamaño del tamiz, con abertura rectangular, donde el x% de los granos pasa (mm).

C_u = Coeficiente de uniformidad $< \frac{D_{60}}{D_{10}}$

En caso de oleaje la abertura que corresponde al O_{90} se obtiene de:

$$O_{90} < 1,5D_{10}C_u^{1/2} \quad (2.58)$$

$$O_{90} < D_{90} \quad (2.59)$$

3 - Análisis de estabilidad externo:

- Estabilidad frente al oleaje (CUR 217)

$$\frac{H_S}{\Delta_t \cdot D_K} \leq 1 \quad (2.60)$$

Siendo:

H_S = Altura de ola significativa (m)

Δ_t = Densidad relativa

D_K = Espesor característico del tubo (m):

$D_K = h$ (Altura del tubo para un oleaje que incide perpendicular al tubo)

$D_K = L$ (Longitud del tubo para un oleaje que incide longitudinal al tubo)

- Estabilidad frente al oleaje (Deltares):

$$\frac{H}{\Delta\sqrt{BD}} < \frac{\sqrt{\lambda}}{\varphi^2(C_D + fC_L\lambda)} (f \cos \alpha \mp \sin \alpha) \quad (2.61)$$

Siendo:

H = Altura de ola (m)

B = Ancho máximo del tubo (m)

D = Altura máxima del tubo (m)

Δ = Densidad relativa

λ = Ratio entre B y D ($\lambda = B/D$)

φ = Coeficiente de velocidad del oleaje (Pilarczyk, 2000) $\varphi \sim 1-1,5$

C_D = Coeficiente de arrastre

C_L = Coeficiente de elevación

f = Coeficiente de fricción

α = Angulo de la pendiente ($^\circ$)

Recio determinó los coeficientes de dragado y elevación en un canal de oleaje con sacos de geotextil, en 2008. Obteniendo resultados muy dispersos. Como consecuencia de los trabajos de Deltares se destaca el incremento del rozamiento entre el tubo y la cimentación.

2.5.32 Steeg et al (2011)

Los diferentes elementos de geotextil rellenos de arena como los tubos de geotextil, los sacos de geotextil, o los colchones de geotextil, se pueden utilizar en muchas aplicaciones hidráulicas. Sin embargo, la incertidumbre en su comportamiento cuando se someten a oleaje, es uno de los principales motivos por los que no se utilizan de forma habitual en los trabajos de defensa costera. Por ello se realizan ensayos en modelo físico a gran escala, basados en la estabilidad de los sacos o tubos de geotextil sometidos a oleaje en el canal Delta de Deltares.

En primer lugar se realiza una revisión de los conceptos de estabilidad de los tubos y sacos de geotextil:

- Se plantean nueve mecanismos de fallo, Lawson (2008):
  - Externos: deslizamiento, vuelco, rodamiento, inestabilidad global y socavamiento de la base.

- Internos: rotura del geotextil, pérdida de material a través del geotextil y deformación o movimientos de arena en el contenedor.
- Las principales conclusiones a las que llegó Venis (1968), tras realizar varias pruebas con diferentes tamaños de sacos de arena, son:
  - A partir de un cierto valor, el tamaño del saco de arena donde comienza el cambio, es independiente de la escala del modelo.
  - A partir de una cierta velocidad, la arena de los sacos comienza a moverse, lo que provoca su inestabilidad.
  - La ley de Froude no es aplicable en las situaciones en las que se produce la migración de la arena en el saco.

Respecto a las dimensiones y características de los elementos de geotextil empleados en los ensayos, se indica:

- Sacos de geotextil: de dimensiones 2,75 x 5 x 0,55 m
- Tubos de geotextil:
  - Las formas y dimensiones de los tubos se determinaron con el método de Timoshenko.
  - Todos los tubos simples deslizaron.

Figura 2.29: Dimensiones de los sacos

La aproximación teórica que se obtiene en el análisis de estabilidad de un tubo de geotextil, sometido a oleaje es:

- Normalmente los mecanismos de fallo se describían utilizando números de estabilidad adimensionales como:

$$H_s/(\Delta D) \text{ o } H_s/(\Delta B)$$

- En Deltares (2010) se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{H_{rep}}{\Delta\sqrt{BD}} < \frac{\sqrt{\lambda}}{\varphi^2(C_D + fC_L\lambda)} (f \cos \alpha \mp \sin \alpha) \quad (2.62)$$

Siendo:

H_{rep} = Altura de ola representativa (m)

B = Ancho máximo del tubo (m)

D = Altura máxima del tubo (m)

Δ = Densidad relativa = $\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$

λ = Ratio entre B y D ($\lambda = B/D$)

φ = Coeficiente de velocidad del oleaje

C_D = Coeficiente de dragado

C_L = Coeficiente de elevación

f = Coeficiente de fricción

α = Angulo de la pendiente (°)

Si se asume que no hay run-down grandes, entonces el signo $\mp$ de la fórmula podría sustituirse por el signo $+$.

El efecto atenuador del oleaje lo representan con el siguiente parámetro adimensional:

$$\chi = \frac{H_{rep}}{H_s} = \sqrt{\frac{E_{b,tubo}}{E_i}} \quad (2.63)$$

Siendo:

χ = Coeficiente reductor

H_{rep} = Altura de ola representativa (m), atenuada por el tubo

H_s = Altura de ola significativa (m)

$E_{b,tubo}$ = Energía bloqueada en el tubo que es capaz de disipar

E_i = Energía incidente del oleaje = $E_{\text{transmisión}} + E_{b, \text{tubo}} + E_{b, \text{tubo y estructura}}$

$$\chi = \sqrt{C_{tr,st}^2 - C_{tr,st,tubo}^2} \quad (2.64)$$

Siendo:

$C_{tr,st}^2$ = Coeficiente de transmisión de la estructura

$C_{tr,st,tubo}^2$ = Coeficiente de transmisión de la estructura y el tubo

Del análisis de estabilidad con varios tubos, no se obtienen grandes mejoras respecto a la estabilidad.

2.5.33 Weggel et al. (2011)

Plantean el empleo de geotextiles para la deshidratación de lodos.

2.5.34 Cantré y Saathopff (2011)

Presentan un trabajo sobre el comportamiento estructural del geotextil cuando está reforzado con mallas.

Hablan de los primeros trabajos de diseño:

- Liu (1981)
- Métodos de cálculo:
  - Namias (1985)
  - Plaut y Suherman (1998)
  - Timoshenko (1940)

Las fuerzas máximas a las que está sometida la membrana del geotextil ocurren en los procesos de llenado.

2.5.35 Neves et al. (2011)

El objetivo de su trabajo fue realizar una serie de ensayos para investigar la eficiencia de varios sistemas para la defensa de una playa. Para ello ensayaron una serie de tipos de conjunto de tubos situados en diferentes posiciones de la playa usando diferentes tipos de tubos de geotextil rellenos de arena; de 1,6 y 3,25 m de diámetro del tubo teórico. Utilizaron como variables de análisis y diseño:

$$H/D \approx 0,6 \quad (2.65)$$

$$b/D \approx 0,9 \quad (2.66)$$

Siendo:

H = altura de ola

D = diámetro del tubo

b = anchura de la base del tubo en contacto con el suelo

Presentan varios ensayos en modelo físico usando la similitud de Froude.

Entre las conclusiones que presentan:

- Indican que las estructuras ensayadas se comportaron como eficientes para la protección de la costa.

- Parece más eficiente cuando se sitúa en la zona exterior.
- Se producen socavaciones al pie de los tubos tanto hacia el mar como hacia la costa

2.5.36 Khalilzad y Gabr (2011)

Tras los fallos detectados en diversos tubos de geotextil para la protección de la costa y el paso de huracanes en 2008, se estudió la estabilidad de los tubos y el efecto que ejerce en ellos el oleaje cuando hay sobreelevaciones del mar a causa de los temporales. Su trabajo indica que el fallo observado de los geotubos se debió a que se desplazaron y rodaron, además se produjo erosión en el suelo sobre el que se encontraban apoyados. Su estudio se basó en analizar la estabilidad externa de los geotubos debidas a la acción del oleaje y sobreelevaciones, como se indicado.

Los resultados a los que llegaron indicaban que el límite de equilibrio de las estructuras tenía coeficientes de seguridad menor que la unidad, aunque en ciertos casos se mantiene la altura y con la deformación lateral es admisible. Basándose en el análisis de las obras, concluían que para que el geotubo funcione, el módulo de elasticidad del material empleado en el relleno debe ser mayor de 1 MPa y el peso específico superior a 18 kN/m³.

2.5.37 Chu et al. (2011)

Presentan un trabajo interesante sobre las diversas soluciones teóricas de los tubos y contenedores que los autores llaman “Mats”, pudiéndose considerar como grandes colchones.

Dividen los tubos y los contenedores en dos tipos:

- Impermeables
- Permeables

Añadiendo los del tipo inflable.

Presentan las soluciones teóricas existentes para cada uno de ellos y también la que ellos han desarrollado.

Para grandes colchones:

- Impermeables y de fondo rígido:

$$y = H \left[\sqrt{1 - \frac{x^2}{H^2}} - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{H}{x} + \sqrt{\frac{H^2}{x^2} - 1} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{k} - \sqrt{2} + \ln(\sqrt{2} + 1) \right) \right] \quad (2.67)$$

Siendo:

$$A = \text{Área de la sección} = H^2 \left[\frac{1}{k} - (\sqrt{2} - \ln(\sqrt{2} + 1)) \right]$$

$$L = \text{Perímetro de la sección} = 2H \left[\frac{1}{k} + 1 - (\sqrt{2} - \ln(\sqrt{2} + 1)) \right]$$

$$b = \text{Base de contacto} = H \left[\frac{1}{k} - (\sqrt{2} - \ln(\sqrt{2} + 1)) \right]$$

$$T = \text{Tensión del geotextil} = \frac{1}{4} \gamma H^2$$

$$H = \text{Altura del geotextil; } k = H/B$$

$$B = \text{Anchura del geotextil}$$

Figura 2.30: Sección transversal de los colchones de geotextil rellenos de arena (Chuy Yan 2011)

- Impermeables y de fondo deformable:

Se asume que el fondo es elástico con una rigidez K_f , obteniendo como solución una ecuación diferencial no lineal.

Para tubos presenta las soluciones analíticas de:

- Kazimirowiez (1994)
- Leshchinsky et al. (1996)
- Plant y Suherman (1998)
- Malik (2009)
- Permeables, son aplicables las soluciones teóricas de:
  - Leshchinsky et al. (1996)
  - Shin y Oh (2004)

2.5.38 Lee y Douglas (2012)

Presentan la experiencia de dos proyectos de diques arrecife en las costas de Malasia, que se encuentran en erosión.

Los tubos de geotextil se emplearon como diques exentos, cercanos a la costa. El llenado de los tubos se realiza en diferentes intervalos, mediante el bombeo de una mezcla de arena y agua. Una vez rellenos, estos tubos dependen de su masa para resistir la acción del oleaje, pasando a ser una estructura de protección costera.

Figura 2.31: Secciones típicas del tubo durante y después de su llenado (Lee y Douglas 2012)

Previamente se realiza un pequeño repaso teórico, muy interesante, en el que se plantean las propiedades hidráulicas y de rigidez del tubo:

- La resistencia final a tracción del tubo va desde 100KN/m a más de 200KN/m.
- Recibe un tratamiento frente a la resistencia ultravioleta durante su fabricación.
- Presenta una resistencia significativa frente a la meteorización y la abrasión.
- Respecto a la eficacia de la filtración del tubo:

- El tamaño del poro efectivo para retener la arena ha de ser menor de 180 micras.
- La capacidad de filtración viene dada por la expresión:

$$\frac{O_{95}}{D_{85}} \leq 3 \quad (2.68)$$

Siendo:

O_{95} = Tamaño de los poros de la tela que retiene el 95%

D_{85} = Tamaño del grano de arena del percentil 85%

Las aplicaciones de los tubos de geotextil, para la protección costera en erosión son:

- Como revestimiento: los tubos de geotextil aumentan la estabilidad de la estructura y contienen una plataforma para evitar la socavación.
- Como dique exento a arrecife: los tubos de geotextil se colocan a una cierta distancia de la costa para disipar el oleaje, pudiendo estar sumergidos o no.
- Como espigones: pudiendo estar recubiertos de piedra en función de las circunstancias.

Figura 2.32: Sección transversal de diseño con tubo geotextil (Lee y Douglas 2012)

2.5.39 Yasuhara et al. (2012)

Justifican el empleo de geotextiles en la lucha contra los desastres naturales debidos al cambio climático.

Estudian las variables que más afectan a los riesgos existentes debidos al cambio climático.

Plantean posibles aplicaciones como soluciones basadas en estructuras de protección costera, con GWR o geotubos.

Figura 3.33: Ejemplos de geotubos para proteger las zonas costeras (Yasuhara et al. 2012, tomada de Lawson, 2006)

2.5.40 Dassanayake y Oumeraci (2012)

Los sacos de geotextil rellenos de arena (GSC), se utilizan cada vez más, como alternativa a las obras duras.

Surgen debido a la necesidad del empleo de materiales más versátiles y soluciones innovadoras para el diseño de nuevas estructuras de protección costera, así como para la mejora de las existentes, incluyendo entre otras, el refuerzo de dunas o la protección frente a la socavación.

El empleo de los sacos de geotextil rellenos de arena, es una solución de bajo coste, blanda, reversible y con una historia de más de 50 años en aplicaciones hidráulicas y marítimas. Estas obras tienen las características:

- Bajo coste
- Reversibles
- Blandas

Debido a las diferencias existentes tanto en su gravedad, como en su flexibilidad, entre los sacos de arena rellenos de geotextil y la escollera o los bloques, las fórmulas de diseño son diferentes.

Algunos de los posibles modos de fallo de las estructuras formadas por sacos de geotextil rellenos de arena (GSC) son:

- El vuelco
- El deslizamiento
- La deformación
- La pérdida de material
- El socavamiento

Las principales propiedades ingenieriles de los sacos de geotextil rellenos de arena (GSC) que se analizan son:

- Coeficiente de llenado de arena
- Fricción entre sacos

Coeficiente de llenado de arena:

Es un parámetro que afecta a la deformación de los sacos y la resistencia frente al deslizamiento, que influye directamente en la estabilidad hidráulica de la estructura de los sacos rellenos de arena.

Según las investigaciones realizadas, la estabilidad aumenta con el incremento del coeficiente de llenado.

El cálculo del coeficiente de llenado de arena, se calcula en base al volumen máximo teórico que se obtiene de la fórmula de Robin (2004).

$$V_{max} = a^3 \left[\frac{b}{\pi a} - 0.142(1 - 10^{-\frac{b}{a}}) \right] \quad (2.69)$$

Siendo:

a = Longitud del saco vacío

b = Ancho del saco vacío

Los valores entre los que se encuentra el coeficiente de llenado de arena son el 80% y el 120%.

Figura 2.34: Variables de las dimensiones del saco

Fricción entre los sacos de geotextil rellenos de arena (GSC):

De las investigaciones realizadas se deduce que la fricción entre los sacos de geotextil rellenos de arena (GSC), afecta a la estabilidad hidráulica de la estructura.

Se puede usar la fórmula de Recio (2007).

La fricción entre los sacos de geotextil rellenos de arena (GSC), depende de:

- las propiedades de fricción de los geotextiles
- el área de contacto entre dos sacos
- la longitud de solape
- el coeficiente de llenado de arena
- el tipo de material de relleno

Realizan dos ensayos, uno de la extracción del saco de la estructura (tracción) y otro de oleaje, en los que se analizan las siguientes variables:

- El coeficiente de llenado de arena
- La pendiente de la estructura
- La fricción entre los sacos de geotextil (cosidos y no cosidos) rellenos de arena (GSC)
- El método de apilamiento (en tándem o escalonados) para el análisis de la estabilidad.

En el ensayo de resistencia a extracción, para geotextiles cosidos, el ángulo de fricción es 13.33° y para geotextiles no cosidos, el ángulo de fricción es 22.62° .

Del ensayo de resistencia a tracción se deduce un valor del 50% mayor para las fuerzas de fricción, que el obtenido teóricamente mediante el ensayo de corte directo, para los geotextiles no cosidos, con un coeficiente de llenado entre el

90% y el 100%. Sin embargo, los métodos de apilamiento no presentan efectos importantes para los dos tipos de geotextil.

En el ensayo de oleaje se analiza el efecto del francobordo en la estabilidad hidráulica de la estructura, considerando la fórmula de estabilidad de Wouters (1998):

$$N_S = \frac{H_S}{(\rho_{GSC}/\rho_W - 1) \cdot D} = \frac{C_W}{\sqrt{\xi_0}} \quad (2.70)$$

Siendo:

N_S = Número de estabilidad (-)

H_S = Altura de ola significativa (m)

ρ_W = Densidad del agua (Kg/m^3)

ρ_{GSC} = Densidad de un saco de geotextil relleno de arena (Kg/m^3)

C_W = Parámetro empírico que depende del número de estabilidad, N_S

ξ_0 = Número de Iribarren = $\frac{\tan \alpha}{(H_S/L_0)^{1/2}}$

D = Espesor de la capa (m); $D = l_c \sin \alpha$ y l_c = longitud de un saco GSC

α = Pendiente de la estructura

L_0 = Longitud de onda en aguas profundas = $\frac{g \cdot T^2}{2\pi}$

Vidal et al. (1992) mostraron la relación entre el francobordo y el número de estabilidad ($R_c^* = H_S/D_{50}$) considerando cuatro categorías de daños: DC1 movimiento incipiente, DC2 daño menor, DC3 daño medio y DC4 fallo total.

A su vez, se valoró el efecto del coeficiente de llenado de arena y el tipo de geotextil de los sacos rellenos de arena en la estabilidad hidráulica de la estructura, concluyendo que los sacos de geotextil rellenos de arena GSC al 100% son más estables que los rellenos al 80%, y que el daño es mayor en los geotextiles cosidos que en los no cosidos.

2.5.41 Hornsey (2012)

Este artículo da un repaso general a varias obras costeras y portuarias, cuatro en total, realizadas en Australia desde 1979.

2.5.42 Bezuijen y Pilarczyk (2012)

En la ponencia que presentan dan un repaso a dos aplicaciones que tienen los geotextiles en la ingeniería de costas: como capa filtro y revestimiento de laderas; y como estructuras de geotextiles rellenos de arena.

Las estructuras realizadas con contenedores o tubos de geotextil rellenos de arena, indican, que es una alternativa para estructuras duras de escollera.

Escriben que recientemente se ha realizado ensayos en grandes tanques de Deltares y de Hannover para determinar los mecanismos de estabilidad de estas estructuras bajo la acción del oleaje. Muestran que el grado de llenado del geotextil y la posición de la obra respecto al nivel del mar tiene una gran importancia.

El grado de llenado viene determinado por:

$$d_{fill} = 4\pi \frac{A}{L^2} \quad (2.71)$$

Dónde:

A = Área de la sección

L = Perímetro de tubo de geotextil

La forma de la sección es importante porque con ella se determina la altura del tubo o contenedor. Mecánicamente, el geotextil se comporta como una membrana. Esto significa que, como los autores dicen, una parte de la curvatura del geotextil viene determinada por la relación entre la tensión del geotextil y la presión que se ejerce sobre él:

$$\frac{T}{r} = p \quad (2.72)$$

Dónde:

T=Tensión a que está sometido el geotextil

r=Curvatura del geotextil

p=Presión que ejerce el relleno sobre el geotextil

En la práctica solamente es posible el llenado hasta un grado del 96%

La estabilidad de los tubos viene determinada por la fórmula que se halló en los ensayos del gran tanque de Deltares (Van Steeg y Vastenburg 2010):

$$\frac{C H_s}{\Delta \sqrt{BD}(f \cos \alpha + \sin \alpha)} \leq 0,65 \quad (2.73)$$

Siendo:

H_s = Altura de ola significativa

Δ = Densidad relativa del tubo de geotextil

B = Anchura del tubo de geotextil

D = Altura del tubo de geotextil

f = coeficiente de fricción del tubo de geotextil

α = Pendiente representativa de la estructura que soporta el tubo de geotextil

C = Constante dependiente del peralte de la ola y varía entre 0,5 y 0,65

(*) *La fórmula que presentan estos autores aparece la raíz cuadrada de H_s , en vez de H_s como así es en original de (Van Steeg y Vastenburg 2010; Van Steeg et al. 2011) por lo que se ha rectificado, suponiendo un error de imprenta.*

2.6. ANÁLISIS DE LAS PUBLICACIONES MÁS DESTACADAS

Las primeras publicaciones que aparecieron, lo hicieron no para presentar un catálogo de este tipo de obras, sino para mostrar toda una serie de obras alternativas a las tradicionales, o duras, con la finalidad de que sirviesen como protección de la costa y a su vez fuesen unas obras económicas.

A continuación se presentan unos ejemplos característicos de estas publicaciones, no indicando, por ello que no existan otras, que en su gran mayoría se basan en estas y que a continuación se resume su contenido.

2.6.1 CERC (1984)

Coastal Engineering Research Center (1984). "Shore Protection Manual. Volume II", Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers.

Este famoso manual de costas contiene en su volumen II, en el capítulo 6 una serie de tipos de obras que pudieran considerarse como blandas, alguna de ellas se incluirán en el manual de obras de bajo coste para defensa de costas que a continuación se describe. No incluye en ese manual y sí aquí los captadores eólicos de arena para recrecimiento de dunas y playa seca formado por estacadas lineales. Aunque, en general no incluye el comportamiento de las obras blandas; salvo en dos aspectos: el indicado de captadores de arena y la regeneración de playas.

2.6.2 **USACE (1984 y 2004)**

U.S. Army Corps of Engineers (1984). *“Low cost shore protection. A property owner’s guide”*. University Press of the Pacific.

Se trata de una guía con el mismo contenido y finalidad que la que se expone a continuación pero con versiones diferentes.

U.S. Army Corps of Engineers (2004). *“Low cost shore protection. A guide for engineers and contractors”*. University Press of the Pacific.

Se trata de una guía que tiene la finalidad de dar a conocer una serie de métodos de protección costera de bajo coste.

Los métodos que se describen son apropiados para aguas protegidas o de profundidad moderada, sin aconsejarse su uso en aguas costeras profundas sometidas directamente a la acción del oleaje.

Describe el problema de la erosión, para lo cual hace referencia a la importancia de la forma de la costa y a las causas que lo provocan.

Como posibles soluciones plantea tres alternativas básicas:

1. No realizar ninguna acción.
2. La reubicación de estructuras en peligro
3. La de tomar una serie de medidas correctoras, como construcción de:
  - Tablestacados y muros de contención
  - Revestimientos
  - Espigones
  - Diques
  - Rellenos de playas
  - Vegetación
  - Sistemas de infiltración y drenaje
  - Aplanamiento de la pendiente
  - Playas colgadas

Respecto a la importancia de su diseño, lo divide en dos aspectos: funcional y estructural. Y en cada uno de ellos destaca:

- Diseño funcional
  - Los tipos de formas costeras: acantilados, playas y humedales
  - Aplicaciones en la costa
  - Condiciones en el área general
- Diseño estructural

- Nivel del agua
- Resistencia
- Flexibilidad
- Protección del pie
- Filtración
- Protección “Flank”
- Altura de la estructura
- Factores medioambientales
  - Corrosión y congelación
  - Luz ultravioleta
  - Fauna marina
  - Heladas
  - Vandalismo y robo

Respecto a los métodos de protección costera de bajo coste, los clasifica en:

- Tablestacados y muros de protección
  - De tablestacas construidos con:
    - Madera tratada
    - Acero
    - Aluminio
    - Fibrocemento
  - De postes construidos con:
    - Malla metálica y sacos apilados
    - Madera tratada
    - Troncos sin tratar
    - Neumáticos
    - Traviesas de ferrocarril y perfiles tipo H
  - De muros construidos con:
    - Tubos “Longard”
    - Neumáticos
    - Tuberías o tubos de hormigón
- Revestimientos
  - De escombros construidos con:
    - Piedra de cantera y escollera
    - Hormigón
  - De bloques de hormigón de diferentes patentes:
    - “Gobi (Erco)” y “Jumbo” sobre un geotextil
    - “Turfblocks” o “Monoslabs”
    - “NamiRings”
    - “Control”
    - “Shiplap”
    - “Lock-Gard”
    - “Terrafix”

- De sacos o colchones apilados, de varios tipos:
  - “Burlap Bags”
  - “Sand Pillows”
  - “Dura Bags”
  - “Fabriform Nylon Mat”
- De gaviones
- De antiguos barriles de combustible de acero
- De losas de hormigón
- De balasto y geotextil
- Diques
  - Diques flotantes contruidos con:
    - Neumáticos de caucho
    - Otros materiales
  - Diques fijos contruidos utilizando:
    - Tubos “Longard”
    - Sacos rellenos de arena
    - Sacos rellenos de cemento
    - Gabiones
    - “Z-Wall”
    - “Surgebreaker”
    - “Sandgrabber”
    - Piedra de cantera
    - Pilotes de madera y maleza
    - Pilotes de madera y neumáticos
- Espigones de varios tipos:
  - De sacos apilados
  - De gaviones
  - De antiguos barriles de combustible de acero
  - De piedra de cantera
  - De tubos “Longard”
  - De pilotes de madera
  - De cajones de madera rellenos con piedra
- Regeneración de playas
- Vegetación
  - De marismas
  - De dunas y playas
- En playas colgadas, empleando materiales como:
  - Tablestacas
  - Cajas de hormigón

Finalmente realiza varios ejemplos de diseño y describe una selección de casos históricos.

Figura 2.35: Diferentes tipos de protecciones de bajo coste asimilables a blandas

2.6.3 **USACE (1995)**

U.S. Army Corps of Engineers (1995). *“Design of Coastal Revetments, Seawalls, and Bulkheads”*, U.S. Army Corps of Engineers (EM 1110-2-1614).

Este manual técnico está dedicado a facilitar el diseño de las obras de defensa de costas: Revestimientos, muros, y muros de contención.

Entre la diversa tipología de obras de defensa de costas, muestra algunas que pueden considerarse como obras blandas. Así utiliza sacos y vegetación como defensa de pie de muros para evitar la socavación de su pie. Contempla los revestimientos de sacos para obras de emergencia; pero rellenos de lechada o de cemento, no de arena. También presenta muros en los que se usa sacos de arena, directamente formando la estructura o como relleno interior de estructuras sencillas como tablestacados de madera. Finalmente también contempla la

protección como diques longitudinales contruidos con tubos Longart –patente de polietileno relleno de arena- que son los precedentes de los tubos de geotextil.

2.6.4 Lyne (2003)

Lyne Dare, J. (2003). “*Alternative Shore Protection Strategies: Innovative Options and Management Issues*”. Marine Resource Management Program. College of Oceanic and Atmospheric Sciences. Oregon State University. Corvallis, OR 97333.

Presenta un documento sobre técnicas alternativas de protección litoral, entre las que destaca las dunas artificiales.

Figura 2.36: Sección transversal de construcción de bermas con material grueso (Lyne 2003)

Las dunas artificiales surgen como alternativa a la disminución de dunas naturales, debido a la acción humana. Consisten en la utilización de sacos o tubos rellenos de arena, recubiertos de arena y sobre los que se realiza una revegetación, compatible con el entorno natural.

2.6.5 CUR (2004, 2006)

CUR (2004). “*CUR214: Geotextielezandelementen*”, Stichting CUR, Gouda.

CUR (2006). “*CUR217: Ontwerpen met geotextielezandelementen*”, Stichting CUR, Gouda.

En dos guías técnicas presentan las variables de diseño de tubos de geotextil, que han sido utilizadas por muchos de los especialistas del tema. Dado que éstas están publicadas en holandés y no se ha tenido acceso a ellas, los datos de ella se recogen de otras publicaciones, especialmente de Kriel (2012).

Recomienda usar una formula muy parecida por la presentada por Pilarczyk (2000) para calcular la altura de ola límite de resistencia del tubo. Según CUR (2006) el tubo que está 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:

$$\frac{H_s}{\Delta_t D_k} \leq 1 \quad (2.74)$$

Siendo:

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)

Δ_t = Peso relativo del tubo o peso relativo del conjunto.

En la publicación de 2006, muestran un método simplificado y la forma del tubo viene determinada por su coeficiente de llenado, obtenida teóricamente, que se muestra en la tabla adjunta, donde R es el radio teórico cuando está el tubo llenado al 100%, y las otras variables se explican en la figura que se muestra a continuación.

Figura 2.37: Variables usadas para determinar la forma de la sección de un tubo de geotextil dependiendo del porcentaje de llenado

En la publicación de 2004, presentan las fuerzas a las que está sometido un tubo de geotextil. En total son tres fuerzas, a saber:

1. Presión de bombeo, constante en todo el tubo, PP
2. Presión del material de relleno, PM
3. Presión hidrostática, PW

Figura 2.38: Diagrama de fuerzas sobre el tubo de geotextil (CUR 2004)

Las fuerzas de reacción en la parte superior e inferior del tubo vienen dadas por las siguientes expresiones:

$$R_A = \left(\frac{P_P - P_{WB}}{2} \right) h + \left(\frac{P_M - P_{W0}}{6} \right) h \quad (2.75)$$

$$R_B = \left(\frac{P_P - P_{WB}}{2} \right) h + \left(\frac{P_M - P_{W0}}{3} \right) h \quad (2.76)$$

2.6.6 **USACE (2006)**

U.S. Army Corps of Engineers (2006). "Coastal Engineering Manual, Part V (Chapter 3: Shore Protection Projects)", U.S. Army Corps of Engineers (EM 1110-2-1110).

En el apartado Combinaciones y Nuevas Tecnologías del capítulo 3 perteneciente al Coastal Engineering Manual, se hace referencia a los “contenedores” de geotextil rellenos de arena y a su diseño.

Respecto a los “contenedores” de geotextil utilizados indica que pueden ser de varias formas; sacos o tubos rellenos de arena. Que se utilizan como revestimientos en protección de dunas, diques cercanos a la costa y espigones. Y que entre los años ochenta y noventa hubo una mejora importante tanto en la calidad de los materiales, como en sus aplicaciones costeras.

Con relación a la vida útil de los sacos de geotextil rellenos de arena, indica que depende de muchos factores. En un proyecto de Carolina del Norte, se detectó que sometidos a grandes temporales, se obtienen mejores resultados frente a otro tipo de estructuras. Y que su vida útil a largo plazo, aún no se ha determinado.

2.6.7 Van Steeg y Vastenburg (2010)

Van Steeg, P y Vastenburg, E.W. (2010). *“Large scale physical model test on the stability of geotextile tubes”*, Deltares (nº 1200162-000)

Este informe técnico de Deltares muestra los resultados de los ensayos realizados en el Gran Canal de Deltares de diferentes estados de tubos de geotextil con el objeto de determinar la estabilidad de ellos.

El ensayo consistió en analizar el comportamiento de los tubos de geotextiles rellenos de arena en tres posiciones básicas diferentes, con algunas variantes de ellas: la primera era situar un tupo de geotextil sobre una plataforma horizontal, tras una pendiente, con la cota del geotextil a la altura del nivel medio del mar, teniendo una altura de referencia la cintura de una persona; la segunda era similar pero con dos tubos de geotextil consecutivos en horizontal; y 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 2.39: Esquema general de los ensayos en el gran canal de Deltares
(Van Steeg y Vastenburg 2010)

Entre las conclusiones que llegaron –también mostradas en una publicación posterior de Steeg et al. (2011)- caben destacar las siguientes:

Estabilidad de un tubo simple:

La fórmula de estabilidad a la que llegan es:

$$\frac{\chi H_s}{\Delta \sqrt{BD}(f \cos \alpha + \sin \alpha)} \leq 0,65 \quad (2.77)$$

Siendo:

H_s = Altura de ola significativa

Δ = Densidad relativa del tubo de geotextil

B = Anchura del tubo de geotextil

D = Altura del tubo de geotextil

f = coeficiente de fricción del tubo de geotextil

α = Pendiente representativa de la estructura que soporta el tubo de geotextil

χ = Factor de corrección para la energía de rebase dada por la siguiente ecuación:

$$\chi = \sqrt{C_{t,ss}^2 - C_{t,ss+tubo}^2}$$

Con:

$$C_t = \left(-0,3 \frac{R_c}{H_s} + 0,75 (1 - e^{-0,5 \xi_p}) \right) \cos^{2/3} \beta$$

Dónde:

$$0,0075 \leq C_t \leq 0,8$$

$$1 < \xi_p < 3$$

$$0^\circ \leq \beta \leq 70^\circ$$

$$1 < B_{\text{cresta}}/H_s < 4$$

Siendo:

C_t = Coeficiente de transmisión

$C_{t,ss}$ = Coeficiente de transmisión en una situación con solamente soporte de la estructura

$C_{t,ss+tubo}$ = Coeficiente de transmisión en una situación con soporte de la estructura y tubo

H_s = Altura de ola significativa (m)

R_c = Altura de la cresta (m)

β = Ángulo del oleaje incidente ($^\circ$)

ξ_p = Número de Iribarren

Figura 2.40: Esquema de las variables usadas (Van Steeg y Vastenburg 2010)

Estabilidad de múltiples tubos:

Dos tubos no significan incremento de estabilidad, según se indica, y por lo tanto dicen, es de aplicación la fórmula de estabilidad para un solo tubo.

Conclusiones generales respecto a la estabilidad:

En todos los ensayos el falo vino por el deslizamiento de tubo no por la deformación de éste debido a la migración de la arena dentro de él, según dicen.

Deformación de los tubos:

La deformación de los tubos es función del porcentaje de llenado; a mayor porcentaje, menor deformación. Para un solo tubo:

$$S_{tubo} = -0,41 p_{h,b} + 31,3$$

Siendo:

$$S_{tubo} = (D_{deformado} - D_{inicial})/D_{inicial}$$

$p_{h,b}$ = Porcentaje de llenado directamente después de construirse, en peso, debiendo estar en la horquilla:

$$41\% \leq p_{h,b} \leq 74\%$$

2.6.8 PIANC (2011)

P.I.A.N.C. (2011). *"The application of geosynthetics in waterfront areas"*. PIANC, 13.

Es una de las publicaciones monográficas que el PIANC realiza habitualmente. Está dedicada a las obras que pueden realizarse con geosintéticos en la costa. En primer lugar realizan un inventario de tipo de obras que se realizan con geotextiles:

- Diques en talud y arrecifes
- Revestimientos
- Diques
- Protección de playas y dunas
- Playas apoyadas
- Espigones y diques de encauzamiento
- Muros
- Tuberías
- Estructuras pilotadas

A continuación presenta la variedad de geosintéticos existentes en el mercado, sus propiedades básicas, funciones, exigencias y consideraciones de diseño. Y seguidamente entra en las aplicaciones que los geotextiles tienen en las obras marítimas y costeras:

- Diques en talud y arrecifes artificiales

- Revestimientos t protección de ladera
- Diques
- Playas y dunas
- Espigones
- Playas apoyadas
- Muros
- Protección de tuberías y cables
- Plataformas
- Protección contra la socavación

Seguidamente destaca los diferentes aspectos de diseño y características que deben tener los materiales en este tipo de obras, como:

- Capa filtro/retenciones
- Permeabilidad
- Tensiones y elongaciones
- Costuras y solapes
- Deformaciones
- Estabilidad
- Durabilidad

El último de los capítulos está dedicado a las ejecuciones de obra y aspectos constructivos a tener en cuenta.

Finalmente se adjuntan cuatro anejos muy interesantes a la hora del cálculo y consideraciones técnicas de este tipo de obras, que, en su gran mayoría, son reflejo de estudios ya reflejados en este trabajo en el apartado anterior o en este mismo como los trabajos de Lawson (2006) o Van Steeg y Vastenburg (2010). Estos anejos son:

- Criterios geométricos para los filtros de geotextil
- Métodos de ensayo de abrasión y caída de piedras
- Estabilidad de sacos, tubos y contenedores de geotextil
- Ensayos normalizados

2.6.9 Rousset et al. (2012)

Rousset, A., Buisson, P. y Descours, C. (2012). “*Soluciones alternativas para la protección de costas*”. BRGM, ONF (Francia) con la contribución de ANCORIM, Red Atlántica para la Gestión de Riesgos Costeros.

El presente documento trata, en primer lugar, la erosión del litoral atlántico; en segundo lugar, enumera un conjunto de soluciones alternativas orientadas a proteger las costas frente a la erosión; y finalmente concluye con un capítulo dedicado a la gestión del litoral.

Respecto a las soluciones alternativas de protección de las costas, destaca dos métodos, los “duros” y los “blandos”. Con relación a los métodos “blandos”, define sus principales características: pensados para trabajar con la naturaleza, su vida útil es reducida, son reversibles y dependen tanto de sus características propias, como de los cambios del medio ambiente a escala mundial o local.

Plantea un debate sobre el límite de los métodos “duros” y los métodos “blandos”, para lo cual indica que la reversibilidad de una construcción permite diferenciar las soluciones “blandas” de las soluciones “duras”. Destacando que la técnica “blanda” constituye una técnica fácilmente reversible (con pocas repercusiones) a diferencia de las grandes construcciones, que desestabilizan el entorno además de suponer un coste elevado en caso de eliminación.

Propone algunas soluciones que caracteriza como “blandas”:

- Las construcciones con geotextiles

Son construcciones concebidas para mantener la arena. Su disposición puede ser de forma perpendicular o longitudinal a la línea de costa. Están formadas por tejidos permeables de fibras sintéticas con forma de bolsa o de espiral y su llenado se realiza mediante una bomba de presión.

- Los arrecifes artificiales

Reducen la acción de las olas en las playas, disminuyen la deriva litoral y favorecen el crecimiento de una playa, reduciendo la erosión. Actúan como rompeolas sumergidos y generalmente están formados por bolsas o espirales de geotextiles.

- Los pilotes hidráulicos

Están formados por pilotes de madera colocados en posición vertical sobre el sedimento, dejando una separación regular. Su disposición puede ser paralela o perpendicular a la costa. Se utilizan para disipar la

energía de las olas sobre la playa, limitando así el transporte de sedimentos y favoreciendo la estabilidad de la playa. Se utilizan para disipar la energía de las olas sobre la playa, limitando así el transporte de sedimentos y favoreciendo la estabilidad de la playa.

– El drenaje de las playas

Permite reducir el nivel freático de las playas y el agua depositada por ascenso-descenso de las olas y crear una zona no saturada bajo la superficie de la orilla, próxima a la línea de costa.

Plantea dos objetivos, drenar el nivel freático, con la finalidad de favorecer el depósito de sedimentos y drenar la zona de ascenso o descenso, obteniendo un aporte sedimentario mayor a la cantidad de sedimento arrastrado.

– El by-passing (trasvase de sedimento)

Tiene como objetivo restablecer el freno al transporte litoral, permitiendo que los sedimentos rebasen de un modo artificial un obstáculo natural. Existen varios tipos, el by-pass hidráulico, el by-pass mecánico y el by-pass marítimo.

– La regeneración artificial de playas

Consiste en dotar a las playas de material, por medio de camiones, dragas marinas, etc., para compensar el desequilibrio del litoral debido a la erosión natural y a los impactos antrópicos. El material se extiende por medio de maquinaria. Las recargas pueden ser en momentos puntuales o de forma regular.

2.6.10 Greenwood et al. (2012)

Greenwood, J. H., Schroeder, H. F. y Voskamp, W. (2012). “*Durability of Geosynthetics*”. CUR Building and Infrastructure. Report 243. Stichting CURNET, Gouda, The Netherlands.

Es una guía basada en las propiedades de la durabilidad de los materiales de tipo geosintético.

Los tipos de materiales geosintéticos, hechos con diferentes polímeros, se dividen en:

- Geotextiles
  - Cosidos
  - No cosidos
    - Unido térmicamente
    - Unido mecánicamente (mediante aguja perforada)
- Geomembranas
- Geosintético Clayliner
- Geo-red
- Geo-celdas
- Geo-manta
- Geocompuesto
- Geofoam

Según Koerner (2005) las principales ventajas de los geosintéticos son:

- Se fabrican bajo un control de calidad
- Su rapidez de ejecución
- Reemplazan los recursos naturales
- Tienen precios competitivos

Las condiciones ambientales que afectan a los geosintéticos son:

- La temperatura del terreno
- La lluvia
- El tipo de terreno y el tamaño de las partículas
- El método de instalación
- La composición química del terreno
- La intensidad de los rayos ultravioleta

Finalmente, describe los principales mecanismos de degradación:

- Oxidación
- Hidrólisis
- Desgaste
- Resistencia a la fluencia
- Compresión lenta
- Daños mecánicos
- Métodos de predicción de su vida

2.6.11 Kriel (2012)

Kriel, H.J. (2012). *“Hydraulic stability of multi-layered sand-filled geotextile tube breakwaters under wave attack”*, Stellenbosch University (tesina de master).

En su tesina de master, presenta los resultados de ensayos de laboratorio usando tubos de geotextil en diez formas y posiciones diferentes.

Figura 2.41: Esquema de los diferentes ensayos que presenta Kriel (2012)

Tras un concienzudo análisis de los resultados de todos los ensayos, en sus conclusiones dice:

1. Estabilidad de estructuras de un solo tubo: Se puede usar el método modificado de Goda cuyos resultados son coherentes con los que se

obtiene con Van Steeg y Vastenburg (2010), siendo más versátil el primero de ellos.

2. Estabilidad de estructuras de capas múltiples:

- Circulo de deslizamiento: Indica se puede producir antes que falle la estructura por deslizamiento.

3. Consideraciones de diseño:

- Fuerzas y otras variables
- Clima de oleaje
- Localización de la estructura
- Nivel del agua
- Fallos

2.6.12 Bezuijen y Vastenburg (2012)

Bezuijen, A. y Vastenburg, E. W. (2012). *"Geosystems: Design Rules and Applications"*, CRC Press.

Se basa en el empleo de los geotextiles en la construcción aplicada a la ingeniería costera. Distinguen cuatro tipos de elementos de arena de geotextil, cada uno con propiedades específicas: geobags, geocolchones, tubos de geotextil y contenedores de geotextil.

Los capítulos "Introducción" y "Aspectos generales de diseño" son seguidos por cuatro capítulos de la misma estructura que se ocupan de los distintos sistemas. Cada uno de estos cuatro capítulos comienza con una descripción general con aplicaciones y termina con un ejemplo de cálculo. Los aspectos de diseño se tratan en los párrafos restantes.

Se basa en una investigación encargada por la Rijkswaterstaat holandesa y Delft Cluster. La realización de la versión holandesa fue coordinada por un comité CUR. La versión inglesa es una traducción de la versión holandesa (CUR-publicación 217). Sin embargo, se han añadido nuevos desarrollos y el texto fue revisado de nuevo y mejorado.

2.7. CATÁLOGOS Y MARCAS ESPECIALIZADAS SOBRE OBRAS DE GEOTEXTIL

En este apartado se presenta una recopilación de catálogos y marcas que entre sus productos aparecen las obras blandas, en el aspecto definido inicialmente. Dentro de él existen diversas patentes, que se muestran también.

I. HUESKER, Synthetic GmbH

“SoilTain® Tubes for Coastal Protection”.

“Geosynthetics in Hydraulic Engineering. Filtration, Separation, Protection, Containment, Reinforcement and Sealing”.

La empresa Huesker es propietaria, entre otras, de la patente SoilTain®Tube, que es uno de los tipos de obra blanda, consistente en un tubo de geotextil, relleno de cemento o arena mediante métodos hidráulicos o mecánicos. Entre sus posibles aplicaciones destacan, las dunas artificiales, los arrecifes artificiales, los diques y los espigones. Una de sus características es su bajo coste, al emplearse materiales de zonas próximas frente a otros más caros.

La combinación de los geotextiles cosidos y no cosidos garantiza una gran retención del material interior, combinada con su alta permeabilidad. Las dimensiones de los tubos (longitudes y diámetros) se pueden ajustar a las posibles necesidades. Obteniendo buenos resultados cuando se someten a la acción del oleaje y representando una buena solución medioambiental.

A su vez, la empresa emplea la patente SoilTain®Sandbags, consistente en sacos de geotextil para la protección costera frente a la erosión. Las dimensiones varían desde 0,3m³ a mayores volúmenes. El geotextil cosido proporciona una alta resistencia y poca deformación. Sin embargo para sacos de pequeñas dimensiones, utiliza el geotextil no cosido.

II. ASPO. Armas y Soria, Proyectos y Obras, S.L.

“Técnicas de restauración de litorales arenosos afectados por procesos erosivos”.

La empresa Aspo utiliza varias técnicas para la protección del litoral frente a procesos erosivos, mediante el empleo de diferentes patentes:

- Los Geotubes (SDRS) para el sistema de restauración dunar con enterramiento.
- Las estructuras ReefBall, que son estructuras no reflexivas de hormigón en masa para la disminución de la energía y la acumulación del sedimento.
- La tecnología Protec-tube II, consiste en aplicar tubos multicelda tramos costeros con superficie restringida y elevada pendiente.

III. TENCATE. Geosynthetics Austria GmbH.

“Geosystemsfor marine applications”.

La empresa Tencate ha desarrollado una tecnología, para la protección de la línea de costa, mediante la aplicación de sus patentes en diferentes estructuras como, núcleos de dunas, diques o espigones.

Las dos patentes desarrolladas son:

- TenCateGeotube®systems (tubos de geotextil)
- TenCateGeocontainer®systems (sacos de geotextil)

También ha desarrollado un método para realizar tubos de geotextil continuos. Su análisis técnico se presentó en el artículo técnico siguiente:

Van Zijl, P.M.N., Vlasblom, W.J., De Gijt, J.G., Broos, E.J. y De Boer, J. (2006). *“Feasibilitystudy of thecontinuousgeotube®”*, Terra et Aqua, 102, 19-24.

IV. INVERSIONES DUCAL, S.A.

“Regeneración sostenible de playas y estabilización costera”.

La empresa Inversiones Ducal, estudia la viabilidad de la aplicación de sacos o tubos de tejido geosintético relleno de arena, para la protección y estabilización de estructuras costeras, como rompeolas, arrecifes artificiales o diques.

Concretamente analizan la posibilidad de patentar un dispositivo para la regeneración natural de playas, mediante el empleo de geotubos.

A lo largo de las publicaciones que se han presentado sus resúmenes, se ha ido mostrando una serie de módulos o artificios patentados destinados a reducir la erosión, cuando no aumentar la superficie de la playa, como:

Acuareef (Pilarczyk 2003)

ReefBalls (Pilarczyk 2003)

Espigones permeables (Herraiz 2012)

En la mayoría de los casos de este tipo de módulos, la obra en sí no parece muy natural, pero sí son elementos fácilmente montables y desmontables, por lo que se ha supuesto que entran dentro del campo que este trabajo nos ocupa.

Es muy probable que existan más patentes y empresas dedicadas a este tipo de obras, por lo que este muestrario no puede considerarse ni cerrado ni completo.

2.8. CLASIFICACIÓN DE PUBLICACIONES, AUTORES, POR TIPO DE OBRAS

Finalmente, se muestran, a modo de listado, las publicaciones que anteriormente se han mostrado; pero ordenadas por tipo de obra que trata cada una de ellas, ordenadas por orden cronológico.

Tubos de geotextil

- Liu (1981)
- Silvester (1986)
- Leshchinsky y Leshchinsky (1996)
- Pilarczyk (1996)
- Plaut y Klusman (1996)
- Pilarczyk (2003)
- Jones et al. (2006)
- Oh y Shin (2006)
- Heilmanet al. (2008)
- Lauson (2008)
- Pilarczyk (2008)
- Smith (2009?)
- Amintiet al. (2010)
- Van Steeg y Vastenburg (2010)
- Wilke y Hangen (2011)
- Steeg et al. (2011)
- Cantré y Saathoff (2011)

- **Neves et al. (2011)**
- **Chu et al. (2011)**
- **Khalilzad y Gabr (2011)**
- **Yasuhara et al. (2012)**
- **Lee y Douglas (2012)**
- **HUESKER, SyntheticGmbH**
- **ASPO, S.L.**
- **TENCATE, Geosynthetics Austria GmbH**
- **INVERSIONES DUCAL, S.A**

Sacos de geotextil

- **Pilarczyk (1996)**
- **Pilarczyk (2003)**
- **Oumeraci et al. (2003)**
- **Zhu et al. (2004)**
- **Recio y Yasuhara (2005)**
- **Jackson et al. (2006)**
- **CoastalEngineeringResearch Center (2006)**
- **Mori et al. (2008)**
- **Lawson (2008)**
- **Jackson et al. (2008)**
- **Smith (2008)**
- **Recio (2008)**
- **Recio y Oumeraci (2009)**
- **Atker et al. (2009)**
- **Atker et al. (2010)**
- **Hornsey et al. (2011)**
- **Steeg et al. (2011)**
- **Dassanayake y Oumeraci (2012)**
- **HUESKER, SyntheticGmbH**
- **TENCATE, Geosynthetics Austria GmbH**
- **INVERSIONES DUCAL, S.A.**

Contenedores de geotextil

- **Bezuijen et al. (2000)**
- **Pilarczyk (2003)**
- **Recio (2008)**
- **Lauson (2008)**
- **Smith (2009?)**
- **Blacka et al. (2009)**
- **Jackson (2010)**

- **Hornsey et al. (2011)**
- **Steeg et al. (2011)**

Colchones de geotextil

- **Pilarczyk (1996)**
- **Yan y Chu (2010)**
- **Chu et al. (2011)**

Capítulo 3

ESTUDIO DE TIPOLOGÍAS Y COMPORTAMIENTO

ÍNDICE

3.1.	ASPECTOS GENERALES	3.3
3.2.	MATERIAL DE RELLENO	3.6
3.2.1.	Elección del material de relleno	3.6
3.2.2.	Pérdidas de arena en las piezas de geotextil. Exigencias técnicas.....	3.7
3.2.3.	Pérdidas de arena en la pieza en las operaciones de llenado.....	3.10
3.2.4.	Exigencias al mortero como material de relleno	3.11
3.3.	GEOTEXTILES: TIPOLOGÍA Y PROPIEDADES. ELECCIÓN.....	3.13
3.3.1.	Tipología de los geotextiles.....	3.13
3.3.2.	Propiedades de los geotextiles	3.16
3.3.3.	Elección de los geotextiles.....	3.24
3.4.	TIPOS DE PIEZAS DE GEOTEXTIL. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES	3.25
3.4.1.	Bolsas de geotextil	3.26
3.4.2.	Tubos de geotextil	3.27
3.4.3.	Contenedores de geotextil.....	3.28
3.4.4.	Cortinas de geotextil	3.28
3.5.	DISPOSICIÓN DE LAS PIEZAS DE GEOTEXTIL EN LA ESTRUCTURA	3.29
3.5.1.	Disposición de las bolsas o sacos de geotextil.....	3.29
3.5.2.	Disposición de los tubos de geotextil.....	3.31
3.6.	TIPOLOGÍA Y EJEMPLOS DE LAS ESTRUCTURAS BÁSICAS DE GEOTEXTIL	3.33
3.6.1.	Estructuras auxiliares o complementarias.....	3.33
3.6.2.	Estructuras independientes de geotextil.....	3.35
3.7.	APLICACIONES MÁS FRECUENTES DE LAS ESTRUCTURAS DE GEOTEXTIL	3.39
3.7.1.	Revestimientos.....	3.39
3.7.2.	Muros	3.41
3.7.3.	Protección contra el deslizamiento de ladera	3.42
3.7.4.	Protección contra la socavación.....	3.42
3.7.5.	Protección de dunas	3.43
3.7.6.	Espigones	3.44
3.7.7.	Diques exentos y arrecife.....	3.44
3.8.	UBICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE GEOTEXTIL RESPECTO A LA COSTA. SOLICITACIONES A CONSIDERAR.....	3.44
3.8.1.	Ubicación de la estructura de geotextil respecto al perfil de la costa	3.45
3.8.2.	Ubicación de la obra respecto al tipo de costa.....	3.51
3.8.3.	Altura de ola de cálculo a considerar en el diseño	3.56

Capítulo 3

ESTUDIO DE TIPOLOGÍAS Y COMPORTAMIENTO

El primero de los aspectos a tener en cuenta a la hora de diseñar, estudiar o analizar las obras realizadas con piezas de geotextil rellenas con material, es conocer las exigencias que se dan en cada uno de los elementos; tanto en su composición, como en su tipología y en su comportamiento. A ello se dedica este capítulo, en el que todo ello se ha resumido, con el título de: “Estudio de tipologías y comportamiento”.

Primeramente se describe tanto el tipo de material de relleno: la arena o la mezcla de mortero, como el material que lo recubre: el geotextil. A continuación, se da un repaso a los tipos de piezas o elementos de geotextil, que constituyen las estructuras (sacos de geotextil, tubos de geotextil y contenedores de geotextil). El siguiente paso es describir los tipos de estructuras básicas que pueden realizarse con estas piezas (independientes o auxiliares). Posteriormente, se muestra la disposición de las piezas de geotextil, en las estructuras: (en perfil o en planta). Seguidamente, se indica la ubicación de las estructuras respecto a la costa, haciendo referencia a las solicitaciones a considerar. Y finalmente se hace referencia a las aplicaciones más frecuentes, indicando algunos ejemplos.

3.1. ASPECTOS GENERALES

Los elementos de geotextil, utilizados para la construcción de obras de defensa de la costa, son piezas tridimensionales fabricadas con materiales textiles, genéricamente conocidos como geo-sintéticos, que se rellenan con material, del tipo arena o mezcla de mortero. Forman un subgrupo, de una amplia gama de soluciones, denominados geosistemas. Estas piezas o elementos se pueden utilizar como alternativa, en la realización de estructuras para la defensa de la costa, a otras constituidas con materiales tradicionales, por ejemplo la escollera o el hormigón, formando estructuras independientes o formando estructuras auxiliares de otras más complejas como el núcleo de estructuras costeras tradicionales, como por ejemplo, de arrecifes, diques o espigones.

El uso de estas piezas tiene diversas ventajas, la principal es poder utilizar material de la zona donde se ubica la estructura, evitando así gastos de transporte. En comparación con los materiales tradicionales, la aplicación de las piezas o elementos de geotextil rellenos de arena puede añadir considerables ventajas para la ejecución de obras y ofrecer soluciones muy compatibles con el medio ambiente y de menor coste. Aunque ofrece muchas dudas y reticencias con relación a su eficacia cuando se someten directamente a la acción del oleaje. Especialmente cuando este es de cierta importancia.

Pero también, en muchos casos, la aplicación de los geotextiles mejora la calidad y la integridad de las estructuras, especialmente en su fase de ejecución. Uno de los ejemplos típicos de la ventaja del uso del geotextil es su aplicación como capa de filtro o núcleo de espigones o diques.

Al utilizar las piezas o elementos de geotextil en una estructura marítima, es imprescindible, asegurarse de su estabilidad, evitando su movimiento en la estructura. Debido a que las piezas o elementos de geotextil rellenos de arena son vulnerables a los daños mecánicos y al desgaste, más fácilmente que los materiales convencionales.

Las piezas de geotextil se disponen constituyendo estructuras, que pueden ser a su vez estructuras independientes; esto es, deben resistir por sí solas la acción del clima marítimo y servir de defensa de las costas, o servir como estructuras auxiliares, en combinación con otros materiales convencionales.

Figura 3.1: Pasos para la realización de obras costeras con geotextiles

El uso de estas estructuras blandas en la ingeniería de costas, especialmente cuando actúan como estructuras independientes, pasa por tener un diseño y método de cálculo que dan una certeza de su comportamiento estructural. Ello pasa, no solamente por conocer la resistencia a las solicitaciones sino saber los lugares y situaciones de la costa donde son útiles y con un uso duradero. Esta indeterminación es probablemente el mayor obstáculo para su utilización de forma habitual en la ingeniería de costas.

La mayor parte de las reglas de diseño son de carácter empírico en la naturaleza, lo que significa que la experiencia existente es necesaria para diseñar nuevas estructuras. Por esta razón, es un desafío el diseño de una estructura en la que sólo está disponible una limitada experiencia.

En los siguientes apartados se irá describiendo las diferentes consideraciones que se deben realizar en cada uno de los pasos, indicados en la figura anterior, para constituir una estructura con piezas de geotextil rellenas de material, cuyo esquema se indica a continuación.

3.2. MATERIAL DE RELLENO

El material que constituye el relleno de las piezas de geotextil puede ser muy diverso. Inicialmente éste era un mortero de arena y cemento (Silvester 1986) que una vez relleno y dispuesto en su lugar, fraguaba formando una estructura semi-rígida. Este primer tipo de material, ha desaparecido prácticamente como uso para el relleno de este tipo de piezas.

Al mismo tiempo, se fue desarrollando la utilización de la arena como material de relleno. Convencionalmente podría usarse todo tipo de material procedente del suelo: todo uno, tierra, arena, grava, gravilla, etc. Si bien su elección no depende exclusivamente del material disponible sino también principalmente, del lugar donde se ubica la obra y del tipo de geotextil.

Con relación al lugar donde se va a realizar la obra es conveniente utilizar un material similar al existente en la zona de trabajo; dado que si alguna pieza perdiese material, éste no sería extraño al lugar. Con relación al tipo de geotextil, se debe exigir al material de relleno que no fragüe, para evitar la aparición de esfuerzos diferenciales que puedan provocar la rotura de la pieza o la mala disposición de la pieza en la estructura

3.2.1. Elección del material de relleno

Las anteriores consideraciones desaconsejan utilizar materiales que no tengan una cierta uniformidad en su distribución granulométrica. Por tanto a efectos de relleno solamente se consideran los siguientes materiales:

- Arenas
- Gravillas
- Gravas

La elección de cada uno de ellos dependerá de, al menos, las siguientes consideraciones:

- * Tipo de material natural en la zona donde se va a realizar la obra
- * Disponibilidad del material
- * Disponibilidad del equipo de relleno y movimiento de las piezas
- * Tipo de geotextil a utilizar
- * Metodología de cálculo a utilizar

Tal y como se ha indicado anteriormente, es muy conveniente que se utilice un material de relleno muy similar y de características parecidas al material de la zona donde se va a disponer la obra, ya que cualquier fuga por ejemplo, por rotura, integraría fácilmente el material en el medio. A demás puede, en determinadas circunstancias, disponerse de material, abaratando considerablemente los costes.

La disponibilidad del material es esencial a la hora de elegir el tipo y es habitual que deba necesitarse para posteriores trabajos.

Materiales más óptimos y con mayor facilidad de obtención puede que necesiten equipos más costosos y pesados para rellenar las piezas, cerrarlas y ponerlas en obra.

El tipo de geotextil viene condicionado por, al menos tres exigencias:

- 1) Estanqueidad de la pieza
- 2) Resistencia de la pieza a las tensiones y durabilidad
- 3) Adaptación al medio y al paisaje

La primera de ellas, estanqueidad de la pieza, obliga a que los huecos del textil impidan la fuga de la mayor parte del material. Lo cual está garantizado en el caso de utilizar gravas y gravillas como material de relleno, pero no cuando se utiliza la arena. En este caso, las exigencias se estudian y analizan en el apartado siguiente.

La metodología de cálculo de las estructuras es esencial, dado que sin ella no se puede diseñar con una cierta certeza. La mayoría de las formulaciones son solamente aptas cuando el material de relleno de la pieza es arena. Por ello, hay que asegurarse cuando se vaya a utilizar grava, que las fórmulas de cálculo son adecuadas para ello.

3.2.2. Pérdidas de arena en las piezas de geotextil. Exigencias técnicas

La pérdida de material en una pieza de geotextil, puede ser debida a dos causas principalmente:

- Rotura de la pieza
- Porosidad, a través del geotextil

La primera de las causas, rotura del saco, no se tratará en este documento. La segunda de las causas, porosidad o pérdida de material a través del geotextil, analiza la abertura entre los hilos del tejido, existiendo las siguientes vías de estudio:

- Efecto filtro (PIANC 2011)
- Tamaño admisible de la arena (CUR 217, 2006)
- Capacidad de filtración (Lee y Douglas 2012)

a) Efecto filtro (PIANC 2011): Lo estudia como una capa filtro, considerando el tamaño de abertura $O_{90,W}$, que es la abertura efectiva del geotextil donde el 90% del material es retenido en un ensayo de granulometría en húmedo usando:

- ISO 12956:2010: “Geotextiles and geotextile-related products -- Determination of the characteristic opening size”

Normalmente se requiere que esta abertura sea menor que un percentil determinado de la distribución granulométrica, d_y , multiplicado por un coeficiente x , esto es:

$$O_{90,W} < x \cdot d_y \text{ (mm)}$$

Figura 3.2: Concepto de abertura de los hilos en un geotextil

b) Tamaño admisible de la malla (CUR 217, 2006): Está realizado específicamente para obras constituidas con piezas de geotextil rellenas de arena.

Se recomienda que el material de llenado del geotextil sea arena, con una fracción máxima del 15% de finos (GRI, 1999). Se determina mediante las siguientes dos fórmulas (CUR 217, 2006):

$$O_{90} < 5D_{10}C_u^{1/2}$$

Siendo:

O_{90} = Abertura que corresponde al D_{90} de los sólidos que pasan el geotextil (mm).

D_x = Tamaño del tamiz, con abertura rectangular, donde el x% de los granos pasa (mm).

C_u = Coeficiente de uniformidad $< \frac{D_{60}}{D_{10}}$

$$O_{90} < 2D_{90}$$

En caso de oleaje la abertura que corresponde al O_{90} se obtiene de:

$$\begin{aligned} O_{90} &< 1,5D_{10}C_u^{1/2} \\ O_{90} &< D_{90} \end{aligned}$$

c) Capacidad de filtración (Lee y Douglas 2012): Viene determinada para tubos de geotextil, que, en una primera aproximación, se puede suponer válida para sacos o bolsas de geotextil. El tamaño del poro efectivo para retener la arena ha de ser menor de 180 micras. La capacidad de filtración viene dada por la expresión:

$$\frac{O_{95}}{D_{85}} \leq 3$$

Siendo:

O_{95} = Tamaño de los poros de la tela que retiene el 95%

D_{85} = Tamaño del grano de arena del percentil 85%

3.2.3. Pérdidas de arena en la pieza en las operaciones de llenado

En el apartado anterior se ha analizado la pérdida de arena en una pieza cuando ésta se encuentra en una estructura, pero como indica Pilarczyk (2000), debe considerarse también las pérdidas de material, que se producen durante el proceso de llenado de la pieza.

Según el autor anteriormente citado, durante el llenado con arena de las piezas o elementos de geotextil, estos también están sometidos a una carga dinámica. La pérdida inicial de arena no es grave durante el proceso de llenado, sin embargo, no debe haber pérdida de material de relleno a través del tiempo. Los criterios de retención son conservadores y basados en una pieza rellena de arena cubierto con una alta carga hidráulica.

	Arena ($D > 60\mu\text{m}$)
Carga hidráulica estacionaria (corrientes)	$O_{90} < 5 \cdot D_{10} C_u^{1/2}$ y $O_{90} < 2 D_{90}$
Carga hidráulica dinámica (oleaje)	$O_{90} < 1,5 \cdot D_{10} C_u^{1/2}$ y $O_{90} < D_{90}$

O_{90} =Tamaño de la abertura del poro del geotextil correspondiente al diámetro de la fracción de arena retenida al 90%(Según el método de tamizado en húmedo).

D_x =Tamaño de la abertura del poro del geotextil a través del cual la fracción x% de la arena pasa.

C_u = Coeficiente de uniformidad de la arena.

Tabla 3.1: Criterios de retención recomendados para geotextiles geométricamente cerrados
(Fuente: Bezuijen y Vastenburg 2013)

A su vez, dicho autor indica que para una curva granulométrica de arena más pronunciada ($C_u < 2$), y una carga hidráulica moderada, los criterios pueden ser menores en cierta medida, con un tamaño de abertura un poco mayor, por ejemplo, $D_{90} < O_{90} < 2 \cdot D_{90}$.

Los resultados de algunos ensayos realizados, como por ejemplo, los realizados a gran escala en el canal de Deltares, han revelado que este criterio no es válido cuando la arena puede moverse dentro del geotextil en la estructura. Los criterios que se incluyen en la tabla anterior suponen que hay una cierta tensión de confinamiento sobre los

granos de arena. En este caso, el lavado de finos será limitado debido a que la arena actúa como filtro natural. Sin embargo, si el geotextil se puede mover y no siempre hay una tensión de confinamiento, no se puede formar un filtro natural y, por tanto una cantidad considerable de partículas finas pueden pasar a través del geotextil. Ante esta situación serán necesarios criterios de retención más estrictos, como los de Heibaum (2005).

3.2.4. Exigencias al mortero como material de relleno

Aunque hoy en día no es habitual el uso de este relleno, resulta interesante conocer las exigencias que deben darse a esta mezcla, ya que no se ha desechado su uso.

La mezcla de mortero como material de relleno en estructuras de geotextil es de gran importancia para elementos o piezas de grandes dimensiones y con una larga duración en el tiempo, pudiéndose llegar a deteriorar el geotextil que lo recubre, en ese espacio de tiempo. El mortero utilizado debe ser tal que se distribuya por todo el interior del elemento de geotextil, de manera uniforme.

Normalmente, cada fabricante de elementos o piezas de geotextil rellenos con mezcla de mortero, tiene su propia fórmula para dicha mezcla. Por otro lado, Silvester (1986) proporcionó algunos conceptos sobre la aplicación de morteros como material de relleno in-situ, para elementos de grandes dimensiones, cuya resistencia a compresión podría ser la quinta parte de la resistencia a compresión del hormigón y donde el geotextil tiene solo una función de molde.

El tamaño del elemento o pieza de geotextil de la estructura debe ser tan grande que sea casi improbable su perturbación debido al oleaje. Los esfuerzos de compresión, cortante y tracción están asociados a cargas dinámicas. Además la resistencia a compresión de estos elementos debe soportar el desgaste del oleaje, con arena en suspensión, que erosiona las superficies. Y no es tan imprescindible el deterioro del geotextil, debido a la radiación ultravioleta (Silvester 1986).

Los requisitos de la mezcla de mortero, son:

1. Debe ser una mezcla tal que fluya por todo el interior del elemento de geotextil, sin necesidad de otros elementos auxiliares.
2. Debe tener una resistencia de tracción igual que la de la piedra caliza.
3. Debe tener un peso específico igual o mayor que el de la piedra caliza
4. Debe ser lo más barato posible, con los materiales disponibles.

Las proporciones, recomendadas por Silvester (1986), como punto de partida de los ensayos in-situ, son:

- Arena de playa / (escoria + cemento) = 5,0
- Escoria / (escoria + cemento) = 0,6 en peso
- Agua de mar / (escoria + cemento) = 1,18 en peso
- Detergente / (Escoria + cemento) = 0,25 % en peso

Obteniendo los siguientes valores, de las proporciones anteriores:

- Resistencia a compresión a 28 días = 11 MPa
- Resistencia a tracción a 28 días = 1,4 MPa
- Peso específico = 2,07

3.3. GEOTEXTILES: TIPOLOGÍA Y PROPIEDADES. ELECCIÓN

Cuando se utilizan los elementos de geotextil rellenos de arena, sus propiedades y su comportamiento juegan un papel crucial. Este apartado proporciona un resumen de los tipos, las propiedades fundamentales de los geotextiles y la elección del tipo de geotextil, en diferentes aplicaciones dentro de la ingeniería de costas. Las fuentes básicas utilizadas han sido principalmente: Pilarczyk (2000), Hornsey (2011), PIANC (2011) y finalmente Bezuijen y Vastenburg (2013), además de las diferentes normas que se recogen en el apartado.

3.3.1. Tipología de los geotextiles

Antes de comenzar a describir los tipos de geotextiles, parece aconsejable definir el término geotextil. Entre todos, el más completo, parece ser el que proporcionan Bezuijen y Vastenburg (2013).

“Geotextil es el nombre que se le asigna a los textiles permeables o redes de material plástico utilizadas en contacto con el suelo o la roca. Los geotextiles se utilizan como separadores entre capas de suelo, como refuerzo o como filtro. Los geotextiles difieren unos de otros de acuerdo al material polimérico utilizado para su fabricación. Los tipos más comunes son el poliéster y el polipropileno, como se detallará posteriormente”.

Para apreciar la diferencia entre los geotextiles no tejidos o no cosidos y los geotextiles tejidos o cosidos, se presenta la siguiente figura, muy esclarecedora de ello.

Figura 3.3: Geotextiles no tejidos y tejidos (Fuente: PIANC 2011)

Lo primero que se debe tener en cuenta es el propio material que genéricamente lo hemos denominado como “geotextil”, éste englobaría no un exclusivo material sino un tipo cuya clasificación podemos hallar en PIANC (2011) que lo toma de Saathoff (2003) y que en forma resumida se presenta a continuación:

Geo sintéticos:

1. Permeables

- Geotextiles
  - Tejidos
  - No tejidos
  - De punto
- Relacionado o asociado con el geotextil
  - Geo rejilla
  - Geo red
  - Geo celda
  - Geo estera

2. No permeables

- Geo membranas
  - Poliméricas
    - 1. Elastométricas
    - 2. Termoplásticas
  - Bituminosos
- Relacionado o asociado con la geo membrana
  - Revestimiento con arcilla sintética

Figura 3.4: Clasificación de materiales geo sintéticos (según PINAC 2011)

En ocasiones, a los geotextiles se les añade un revestimiento para aumentar sus propiedades y mejorar su comportamiento. Son frecuentemente usados contra el punzonamiento debido al vandalismo o al contacto con otras piezas naturales, como la escollera.

Estos revestimientos, asociados con el geotextil, se han enumerado anteriormente. Su descripción y uso más frecuente, es el siguiente:

- Geo rejillas o geo mallas: son materiales que tienen una apariencia de malla abierta. Siendo utilizadas para refuerzo de suelos y para la fabricación de gaviones.
- Geo redes: son materiales tipo malla abierta formados por dos conjuntos de hebras poliméricas gruesas y paralelas interactuando en un ángulo constante. Se utilizan como dren entre dos capas impermeables.
- Geo celdas: son redes tridimensionales relativamente gruesas construidas por tiras de planchas de polímero. Las tiras se juntan para formar celdas interconectadas y posteriormente se rellenan de material. Uno de los ejemplos de su aplicación es para fijar las raíces de las plantas en taludes.
- Geo esteras: son esteras tridimensionales fabricadas por la extrusión de monofilamentos. Son muy permeables pudiendo reducir la erosión costera.

Figura 3.5: Geo celdas, geo redes y geo esteras (Fuente: PIANC 2011)

3.3.2. Propiedades de los geotextiles

Las principales propiedades de los geotextiles, que se deben tener en cuenta son:

- a) Propiedades físicas
- b) Permeabilidad
- c) Resistencia a tracción y deformación
- d) Degradación
- e) Durabilidad

A continuación se describe cada una de ellos:

a) Propiedades físicas

Los geotextiles se fabrican a partir de polímeros, los más destacables son los cinco siguientes (PIANC; Pilarczyk 2000):

1. Poliéster (PET)
2. Polipropileno (PP)
3. Polietileno (PE), que puede ser a su vez:
  - a. Polietileno de alta densidad (HDPE)
  - b. Polietileno de baja densidad (LDPE)
4. Poliamida (PA), con las especies PA6 y PA6.6
5. Cloruro de polivinilo (PVC)

Entre paréntesis se indica la nomenclatura con la que se conoce a cada uno de ellos. Y así nos referiremos a ellos en adelante. Dentro de ellos, los más frecuentemente usados en la ingeniería civil, son los materiales de PET, PP y en menor grado los materiales de PE. Sin embargo, en la ingeniería ambiental se utilizan principalmente los materiales de PE y con menor frecuencia los materiales de PET, debido a su predominante componente química.

Los PP y PET son considerados como los materiales más utilizados en los elementos de geotextil rellenos de arena para funciones de separación, filtración y de contención. Sin embargo, si el geotextil se mantiene sometido a esfuerzos en las piezas o elementos de una estructura, el uso de poliéster podría resultar ventajoso debido a que a largo plazo mejora las posibilidades de carga de dichos elementos (Bezuijen y Vastenburg 2013).

En la siguiente tabla se indican algunas de las principales propiedades de las materias primas de los geotextiles: densidad, resistencia, módulo de elasticidad y deformación.

Materia prima	Densidad (kg/m ³)	Resistencia (N/mm ²)	Módulo de elasticidad (N/mm ²)	Deformación en rotura (%)
PET	1.380	800-1.200	12.000-18.000	8-15
PP	900	400-600	2.000-5.000	10-40
PE (LDPE) PE(HDPE)	920	80-250 350-600	200-1.200 600-6.000	20-80 10-45
PA	1.140	700-900	3.000-4.000	15-30
PVC	1.250	20-50	10-100	50-150

Tabla 3.2: Propiedades de las materias primas de los geotextiles (Pilarczyk 2000)

Cuando se utilizan PP y PE debajo del agua, se debe tener en cuenta que la densidad de estos materiales (entre 900 y 950 kg/m³), es más baja que la del agua, por lo que estos materiales flotarán.

b) Permeabilidad

El geotextil debe tener la suficiente permeabilidad para no obstaculizar el flujo de agua a través de él, por ejemplo: en la protección de taludes donde una permeabilidad inadecuada, puede dar lugar a una estructura con una gran cantidad de poros que favorezcan la inestabilidad de la pendiente.

La relación empírica que normalmente se utiliza, es aquella en la que la permeabilidad del geotextil, según lo medido en un ensayo de índice, debe ser 10 veces la permeabilidad del suelo protegido. Esta relación, a veces resulta incómoda, dado que la permeabilidad del geotextil es función de su espesor, y el espesor del geotextil incorporado en una estructura es a menudo desconocida. En otros casos puede haber caída de presión hidráulica a través del geotextil.

c) Resistencia a tracción y deformación

Normalmente, las mayores cargas sobre el geotextil, se aplican durante la fase de construcción. Por lo que, su resistencia a tracción y su deformación deben ser capaces de resistir las cargas impartidas durante el llenado, la colocación y el transporte. Dependiendo del método de construcción, la resistencia a tracción, la deformación y el tipo de geotextil utilizado, se deben tener diferentes consideraciones.

Los geotextiles cosidos, normalmente, tienen una resistencia a la tracción relativamente alta y una deformación máxima pequeña, mientras que los geotextiles no cosidos tienen una resistencia a la tracción relativamente baja y una deformación máxima alta. Para medir estos parámetros se utilizan el módulo de Young E y el módulo de rigidez J del geotextil, que se expresan en función de su máxima carga de tracción admisible (T_m) y de su deformación correspondiente.

$$E = \frac{T_m}{\varepsilon_m \cdot t_g} \quad (1.1)$$

$$J = E \cdot t_g = \frac{T_m}{\varepsilon_m} \quad (1.2)$$

Dónde:

t_g = espesor del geotextil [m];

ε_m = deformación máxima del geotextil [-].

T_m , se define como la máxima carga de tracción admisible en el geotextil, igual a la resistencia máxima a la tracción del geotextil (PIANC 2011).

Debe tenerse en cuenta que, en realidad, normalmente hay una relación no lineal entre la resistencia a tracción y la deformación, por lo tanto el módulo de rigidez obtenido de esta manera es sólo una aproximación del comportamiento real de la rigidez.

En la siguiente tabla se indica la resistencia a tracción del geotextil (T_m) y su correspondiente deformación, para varios materiales.

Materiales	T_m[kN/m]	ε_{max}[%]	J[kN/m]	$T_m * \varepsilon_{max}$[kN/m]
Poliéster (PET)	100-1.600	8-15	870-16.000	8-210
Polipropileno (PP)	40-300	10-15	320-2.400	4-45
Polietileno (PE)	20-50	20-30	80-200	4-15
Membrana	7-70	50-100	9-90	4-70

T_m = Resistencia a la tracción del geotextil (kN/m).

ε_m = Deformación a la máxima resistencia a tracción admisible del geotextil (%).

J = Módulo de rigidez del geotextil (kN/m).

Tabla 3.3: Resistencia a tracción y deformación (PIANC, 2011)

d) Degradación

La degradación del geotextil puede ser debida fundamentalmente a las siguientes causas:

1. Accidentes
2. Degradación por radiación solar
3. Abrasión
4. Acción química
  - a. Oxidación
  - b. Hidrólisis
  - c. Otras acciones químicas
5. Acciones biológicas

1.- Los accidentes son todas aquellas acciones mecánicas fortuitas que atacan a la integridad del geotextil, como pueden ser la rotura por elementos auxiliares, que fisuran o rompen el geotextil. Hay que tener en cuenta, como indica Hornsey (2011), que cuanto menor sea su dimensión menor influencia y más fácil será su reparación.

2.-Una cantidad importante de los geotextiles, se encuentran expuestos a la radiación solar; pero éstos, con el tiempo se acaban degradando. En ocasiones, para reducir este efecto se utilizan inhibidores (PIANC 2011) como es el carbón negro; por lo que algunos geotextiles tienen color negro. Pero este aspecto no

parece el más saludable desde el punto de vista estético y paisajístico. En otras ocasiones lo que se le hace es recubrirlo con arena, escollera, material vegetal...

3.- La abrasión que se produce en los sacos de geotextil rellenos de arena es debida principalmente a la acción continuada del agua con arena en suspensión, conchas y fragmentos de otros materiales marinos. Por tanto son especialmente importantes en la zona de acción directa del oleaje próximo a la orilla, aguas someras.

Para estudiar la resistencia a la abrasión de los geotextiles se pueden utilizar diversos métodos (Hornsey 2011); pero los más extendidos y reconocidos son tres (PIANC 2011):

- ASTM D4886 - 10 "Standard Test Method for Abrasion Resistance of Geotextiles (Sand Paper/Sliding Block Method)"
- UNE-EN ISO 13427:1999 "Geotextiles y productos relacionados con geotextiles. Simulación del deterioro por abrasión (ensayo del bloque deslizante). (ISO 13427:1998)"
- Tambor Rotatorio ("German Rotaing Dum"), del BAW Federal Waterways Engineering & Research Institute, cuyas publicaciones: "Guidelines for Testing Geotextiles for Navigable Waterways" son del año 1994

El último de los métodos, conocido como de tambor rotatorio, se desarrolló específicamente para geotextiles que se utilizasen en la costa y vías de navegación, sometiendo al material a 80.000 ciclos de acción de agua con arena y gravilla (Hornsey 2011) por lo que parece el más específico de ellos.

4.- Los geotextiles, se encuentran también sometidos a diversas acciones químicas, que la monografía del PIANC (2011) muestra como específicas la oxidación y la hidrólisis, influyendo la temperatura en estos procesos. Además a lo largo de la vida útil de la pieza, ésta se verá influenciada por los productos químicos que puedan estar en contacto con ella.

5.- Finalmente, se debe tener presente la acción biológica sobre los geotextiles ya que las bacterias pueden afectar a las propiedades del geotextil (PIANC 2011). Dentro de este grupo podrían enmarcarse la colonización que se produce por seres vivos en los geotextiles.

e) Durabilidad del geotextil

Esta propiedad está íntimamente relacionada con la degradación del geotextil, expuesta en el punto anterior. Si bien la durabilidad del geotextil tiene como finalidad el conocer la vida útil del geotextil a utilizar en la obra.

Para estudiar la durabilidad de los geotextiles se deben seguir las dos siguientes normas:

- I. ASTM D4355-07 “Standard Test Method for Deterioration of Geotextiles by Exposure to Light, Moisture and Heat in a Xenon Arc Type Apparatus”
- II. UNE-EN 12224:2001 “Geotextiles and geotextile-related products – Determination of the resistance to weathering” o “Geotextiles y productos relacionados. Determinación de la resistencia al envejecimiento a la intemperie”

La vida útil de las estructuras construidas con geotextiles, se rige principalmente por la durabilidad del geotextil utilizado (Pilarczyk 2000, PIANC 2011). Las propiedades de los geotextiles pueden cambiar con el tiempo debido a:

1. Radiación UV
2. Oxidación
3. Hidrólisis
4. Exposición química y biológica
5. Daños mecánicos
6. Fluencia y/o relajación

1.- Radiación ultra-violeta (UV): Producida por la radiación solar. A medida que el geotextil envejece, la oxidación puede ocurrir a través de una combinación de factores como la temperatura, la radiación UV y el medio ambiente. Y con el tiempo, puede provocar que el geotextil se vuelva quebradizo. Para combatir esto, se añaden antioxidantes y estabilizadores de UV al material de base del geotextil. Estos regulan la calidad a largo plazo del geotextil.

En la tabla 3.4 se resume de manera cualitativa la resistencia inherente del geotextil para diversos tipos de exposición.

2.- Oxidación: Los productos químicos y las bacterias situadas en las proximidades del geotextil también pueden ser perjudiciales, en ciertas circunstancias. El poliéster es,

por ejemplo, susceptible a un fuerte ambiente alcalino y el polipropileno, se ve a veces afectado negativamente, por agentes oxidantes fuertes.

3.- Hidrólisis: Cuando los geotextiles de poliéster se colocan en contacto con el agua una reacción química, conocida con el nombre de hidrólisis, puede reducir su fuerza con el tiempo. La velocidad de acción de la hidrólisis es muy lenta, pero puede ser acelerada al aumentar los niveles de pH. Para los geotextiles fabricados con alto peso molecular, o polímeros de poliéster de alto módulo, la tasa de reducción de la resistencia debido a la hidrólisis es insignificante en condiciones hidráulicas (donde no hay exposición a UV).

Materia prima	Poliéster		Polipropileno		Polietileno	
Duración exposición	Corta	Larga	Corta	Larga	Corta	Larga
Ácidos diluidos	++	+	++	++	++	++
Ácidos concentrados	0	-	++	+	++	++
Alcalinos diluidos	++	0	+	++	++	++
Alcalinos concentrados	0	-	++	++	++	++
Sal	++	++	++	++	++	++
Aceite mineral	++	++	+	0	+	0
Glycol	++	0	++	++	++	++
Micro-organismos	++	++	++	++	++	++
Luz UV	+	0	0	-	0	-
Luz UV*	++	+	++	+	++	+
Calor seco hasta 100°C	++	++	++	+	+	0
Vapor hasta 110°C	0	-	0	-	+	0
Absorción de líquidos	++	++	++	++	++	++
Detergentes	++	++	++	++	++	++

Corta = Desde la fabricación hasta la instalación

Larga = Durante la vida útil

* = Resistencia después de añadir estabilizadores UV

++= Buena resistencia; += Resistencia razonable; 0= Resistencia pobre; - =Sin resistencia

Tabla 3.4: Resistencia de los geotextiles frente a diferentes entornos (Santvoort, 1994)

4.- La exposición química y biológica: pueden influir sobre las propiedades del geotextil a largo plazo.

5.- Los daños mecánicos, a los que se ven sometidos los geotextiles, suelen suceder tanto durante su instalación, como durante su vida útil. La temperatura durante su instalación puede tener un efecto importante, siendo más importante en otros ámbitos de la ingeniería no relacionados con la ingeniería de costas, donde su efecto si lo hay es mínimo.

6.- La fluencia: es otro fenómeno asociado, en el que el geotextil se deforma bajo una carga aplicada. Esta deformación puede ser tal que el material en última instancia falle. En la tabla 3.5 se muestra la resistencia a la tracción permisible modificada de varios geotextiles, por permitir los efectos de la fluencia. El Polipropileno (PP) y el polietileno (PE) pueden debilitarse debido a la fluencia por esfuerzos de tracción medianos después de un período de tiempo relativamente corto. El poliéster muestra una buena resistencia a la fluencia y por lo tanto puede ser utilizado con eficacia para resistir cargas a largo plazo. Sin embargo, los elementos de geotextil rellenos de arena sometidos a cargas de tracción sólo se producen durante su colocación. Una vez que el elemento ha sido colocado, las cargas de tracción aplicadas tienden a ser pequeñas y por lo tanto los efectos de la fluencia son insignificantes.

Porcentaje de tracción máxima debida a la fluencia			
Material	2 Años	10 Años	50 Años
Poliéster	75%	70%	60%
Polipropileno	50%	40%	25%
Polietileno	50%	40%	25%

Tabla 3.5: Resistencia a la tracción admisible como porcentaje de los resistencia a la tracción original debido a la fluencia a 20°C (Bezuijen y Vastenburg 2013).

3.3.3. Elección de los geotextiles

Los geotextiles realizan varias funciones en la ingeniería de costas, algunas de sus principales funciones son: refuerzo, filtro o separación, drenaje y control de la erosión. Dependiendo de sus funciones, las aplicaciones de los geotextiles serán diferentes.

Debe considerarse especialmente que cumpla con todas las propiedades expuestas en el apartado anterior. Teniendo en cuenta dónde se situará, el fin requerido, el material, el grado de llenado, etc.

Por tanto en la elección de los geotextiles se deben identificar las propiedades necesarias para cada una de sus aplicaciones. Por ejemplo, la resistencia y la rigidez son dos propiedades imprescindibles cuando se utiliza el geotextil como refuerzo, lo que implica materiales fuertes, relativamente rígidos y permeables. Además los cambios de temperatura, el arrastre y las alteraciones tienen graves consecuencias sobre los esfuerzos. Solo los geotextiles de poliéster cosidos y las rejillas de poliéster con alto módulo de elasticidad son adecuados como material de refuerzo.

En la siguiente tabla se indican los tipos de geotextiles, con sus propiedades y sus aplicaciones, que pueden servir de reseña para la elección de los geotextiles, que aconsejan los trabajos de Pilarzyc (2000).

Geotextil	Propiedades	Aplicaciones		
Tejidos	Resistencia Rigidez Permeabilidad No porosos	Refuerzo	Filtro	
No tejidos	Dúctil/Elástico No poroso Permeable		Filtro	
Geomembranas	Dúctil/Elástico Estanco Impermeable			Pantalla

Tabla 3.6: Aplicaciones de los geotextiles en función de sus propiedades (Pilarczyk 2000)

Para las piezas de geotextil de grandes dimensiones, normalmente se utilizan los geotextiles cosidos, debido a que tienen la misma resistencia en las dos dimensiones, que varía entre 80 kN/m y 200 kN/m. Los geotextiles no cosidos se utilizan para piezas de geotextil de menores dimensiones, con una resistencia entre 30kN/m y 50kN/m. Aunque su resistencia es menor que la de los geotextiles tejidos, sin embargo su mayor deformación permite absorber una considerable cantidad de energía en el momento del impacto. La baja resistencia y gran elongación se traduce en piezas de geotextil deformables de geotextil tejido y de menor volumen.

3.4. TIPOS DE PIEZAS DE GEOTEXTIL. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES

Los módulos o piezas que se realizan con este producto rellenos de arena son básicamente de cuatro tipos, cuyo comportamiento y, por tanto su diseño, es completamente diferente. De todos ellos, en este documento solamente se analizarán en profundidad, las bolsas y los tubos de geotextil rellenos de arena.

1. Bolsas (entre 0,05 y 5 m³ pieza)
  - Sacos
  - Almohadas
  - Colchones
2. Tubos (1 a 6 m de diámetro de sección transversal)
  - Simples
  - Continuos
3. Contenedores (entre 100 y 700 m³)
4. Cortinas (no tiene relleno de arenas, en dos dimensiones)

Los usos más frecuentes dados a este tipo de piezas de geotextil, son los que se muestran las aplicaciones que aparecen en el trabajo de Pilarczyk (2000).

USOS SEGÚN TIPO DE PIEZA DE GEOTEXTIL PARA PROTECCIÓN COSTERA				
TIPO/USO	Bolsas	Tubos	Contenedores	Cortinas
Espigón	X	X		
Revestimiento	X	X		X
Protección de ladera	X	X		X
Protección de pie de estructura	X			
Dique arrecife		X		
Dique exento		X	X	
Núcleo de dique o espigón		X	X	X

Tabla 3.7: Aplicaciones de los tipos de piezas o elementos de geotextil (Pilarczyk 2000)

A continuación se describen los cuatro tipos de piezas o elementos de geotextil y posteriormente, se considerarán sus características y propiedades.

3.4.1. Bolsas de geotextil

Las bolsas son lo que, en general; se llaman sacos; pero algunos autores, como Lawson (2008) lo diferencian en función de su forma. La metodología de trabajo es similar en los sacos y bolsas, aunque su comportamiento es diferente según sean las dimensiones. No existen trabajos específicos que definan sus propiedades según las dimensiones; solamente los investigadores plantean o estudian un número limitado de ellos, por lo que a la hora de conocer su diseño y su comportamiento estructural hay que restringirse a ese tipo de piezas y en las condiciones estudiadas. Son probablemente las piezas más versátiles; si bien, su facilidad de puesta en obra y precio varía con su tamaño.

Se definen por sus dimensiones, normalmente el volumen y el porcentaje de llenado; oscilando entre 0,3 y 10 m³, y entre 80 y 120 %. Pudiendo estar, a su vez, cerradas mediante cosido o no.

Algunos autores definen las tres dimensiones de las bolsas, mientras que otros facilitan la superficie de la bolsa vacía.

Figura 3.6: Dimensiones de las bolsas de geotextil

3.4.2. Tubos de geotextil

Los tubos comenzaron a usarse en los años setenta del pasado siglo, utilizando patentes como los denominados tubos “Longard”. En la actualidad son las piezas más extendidas para el uso de estructuras de defensa de costas y, probablemente las que más se ajustan a un diseño genérico. Necesitan de un equipo más sofisticado que los sacos; pero las estructuras resultantes pueden exponerse directamente a la acción del oleaje con más seguridad que las anteriores.

Se sitúan en su ubicación vacíos y se rellenan por varios accesos o bocas de llenado, lo que requiere una tensión máxima de llenado y una porosidad que permita la salida del agua pero no de la arena. Variando los diámetros entre 1 y 6 m.

Las variables utilizadas (Lawson 2008) son:

- Diámetro teórico del tubo (D_t) o Circunferencia teórica (C_t).
- Anchura de la base de asentamiento (b_t)
- Anchura máxima del tubo (W_t)
- Altura del tubo (H_t)
- Área de la sección transversal del tubo (A_t)

Figura 3.7: Secciones del tubo de geotextil durante y después de su llenado

3.4.3. Contenedores de geotextil

Son las piezas más grandes que se realizan con geotextil y arena. Sus dimensiones se suelen medir en volumen, oscilando entre 100 y 700 m³. Necesitan de equipos especiales para su puesta en servicio. No son muy comunes su uso para protección de costa, salvo para grandes arrecifes o diques.

Se realizan in situ y se trasladan a su ubicación, usando para ello gabarras o barcazas con abertura de fondo. Uno de los estudios más importantes es conocer las tensiones que produce en el geotextil en el impacto al soltarlo de la barcaza y chocar contra el fondo.

Figura 3.8: Llenado, traslado y disposición de los contenedores de geotextil

3.4.4. Cortinas de geotextil

No son esencialmente piezas, sino más bien elementos auxiliares. Sirven como capa filtro entre el terreno y la capa resistente en las riberas de los ríos. También se usan como protectores contra la socavación por fondo de los tubos, en estructuras de defensa costera. En este caso se colocan dos tubos auxiliares a ambos lados extremos para dejar la cortina o manta estable.

3.5. DISPOSICIÓN DE LAS PIEZAS DE GEOTEXTIL EN LA ESTRUCTURA

A continuación se indican las disposiciones de las piezas de geotextil rellenas de arena: bolsas o sacos, tubos y contenedores, en las estructuras de geotextil.

3.5.1. Disposición de las bolsas o sacos de geotextil

La forma en que se apilan las bolsas o sacos de arena para formar una estructura tiene efectos en su estabilidad, ya que su resistencia depende en gran medida de la trabazón; pero también esta disposición tiene un efecto directo en la permeabilidad de la estructura: Cuanto más permeable es un revestimiento mayor es su estabilidad. A pesar de su importancia tanto para el diseño como para la estabilidad de la estructura, no existe información suficiente para valorarla (Wert et al 2008). La fórmula que se utiliza para valorar la permeabilidad es la de Darcy:

$$Q = k i A$$

Dónde:

Q = Caudal

k = Coeficiente de permeabilidad de Darcy

A = A es el área transversal total de la capa filtro normal al flujo

i = Gradiente hidráulico = $\Delta h / \Delta l$ = constante

Δh = Diferencia de altura de agua delante y detrás de la capa filtro

Δl = Anchura de la capa filtro

Entre las conclusiones que estos autores llegan (Wert et al. 2008), tras una serie de ensayos, destacan:

- Si no se tienen datos disponibles de la permeabilidad de una estructura de sacos de geotextil rellenos de arena se puede suponer razonablemente un valor de 10^{-2} m/s
- El modo de disposición de los sacos en la estructura afecta a su permeabilidad
- La estabilidad hidráulica de los sacos de arena a soga es menor que los dispuestos a tizón

Las formas básicas de apilamiento que podemos encontrar en una estructura de bolsas o sacos de arena son (Lawson 2008):

1. Según el perfil:
  - a. Siguiendo el perfil
  - b. Horizontal
2. Según las dimensiones del saco:
  - a. Soga
  - b. Tizón
3. Según la disposición de las capas:
  - a. Encadenados
  - b. Columnas
4. Según el número de capas:
  - a. Monocapa
  - b. Multicapa

Figura 3.9: Disposición de los sacos de arena en el perfil

Figura 3.10: Posición del saco en la estructura

Figura 3.11: Posición de las capas de sacos

3.5.2. Disposición de los tubos de geotextil

En muchas aplicaciones de la Ingeniería de Costas la altura de un tubo de geotextil puede ser suficiente para reducir la erosión. Sin embargo, en algunas ocasiones es necesario apilar varios tubos de geotextil con el objetivo de alcanzar la altura necesaria para evitar la erosión.

La siguiente figura muestra tres tipos de disposición o apilamiento de los tubos de geotextil. La figura (a) muestra los tubos de geotextil apilados constituyendo una pendiente tendida. En la que es lo suficientemente tendida como para asegurar que los tubos de la parte superior no interactúan directamente con los tubos de la parte inferior. Por lo que las tensiones generadas en los tubos rellenos son el resultado únicamente del llenado, y no están influenciadas por la carga adicional de los tubos superiores.

Figura 3.12a: Disposición de los tubos de geotextil en una pendiente tendida

La figura (b) muestra los tubos de geotextil apilados constituyendo una pendiente más pronunciada. En la que los tubos superiores interactúan directamente con los tubos inferiores, influyendo las tensiones generadas en los tubos inferiores. Plaut y Filz (2008) determinaron las expresiones para obtener las tensiones generadas en los tubos inferiores debido a la presencia de los tubos superiores.

Figura 3.12b: Disposición de los tubos de geotextil en una pendiente más pronunciada

La figura (c) muestra los tubos de geotextil apilados constituyendo una pendiente masa-gravedad. La presencia de tubos en la parte superior genera tensiones, al igual que las deformaciones existentes en la parte inferior de los tubos de geotextil. Estas situaciones fueron analizadas por Plaut y Filz (2008) y por Plaut y Suherman (1998).

Figura 3.12c: Disposición de los tubos de geotextil en una pendiente más pronunciada

3.6. TIPOLOGÍA Y EJEMPLOS DE LAS ESTRUCTURAS BÁSICAS DE GEOTEXTIL

Las estructuras básicas de geotextil, se componen de piezas o de elementos tipo bolsas, sacos, tubos, contenedores o cortinas; tales que, dependiendo de su función, se pueden disponer en las estructuras de forma independiente o de manera auxiliar. Por lo que las estructuras de geotextil se pueden dividir fundamentalmente en dos tipos, dependiendo de la función asignada en la obra:

- 1) Estructuras auxiliares o complementarias de otra estructura más compleja
- 2) Estructuras independientes de otra estructura

En lo sucesivo, solamente se considerarán las estructuras, realizadas con piezas de geotextil del tipo: bolsas o sacos y tubos, dejando aparte los contenedores y cortinas, de uso muy infrecuente en la ingeniería de costas.

3.6.1. Estructuras auxiliares o complementarias

A la vez, las estructuras auxiliares o complementarias formadas por piezas o elementos de geotextil, pueden ser de dos tipos:

- Estructuras permanentes
- Estructuras temporales

3.6.1.1. **Estructuras auxiliares o complementarias permanentes**

Las estructuras auxiliares o complementarias de otra estructura se constituyen con piezas o elementos de geotextil, formando una parte fija de otra estructura más compleja.

Sus principales aplicaciones suelen ser:

- Núcleo de estructuras para la defensa de la costa: diques, espigones, etc.
- Núcleo de dunas regeneradas
- Protección contra la socavación: pie de estructuras o pie de dunas

Algunos ejemplos en los que se han aplicado este tipo de estructuras, han sido reflejados por diferentes autores. Así, Heilman et al. (2008) mostraron la utilización de

tubos de geotextil, como núcleo de las dunas situadas en las playas de la ciudad de Galveston, en el estado de Texas. Yan y Chu (2010) mostraron su aplicación como núcleo de diques en el puerto de Tianjin, China.

Figura 3.13: Ejemplos de piezas de geotextil como estructuras auxiliares

3.6.1.2. Estructuras auxiliares o complementarias temporales

Las estructuras auxiliares o complementarias de tipo temporal, se suelen construir de manera complementaria a otra estructura más compleja, con un período de aplicación inferior a la vida útil de dicha estructura y suelen ser eliminadas o retiradas tras finalizar su funcionalidad.

Un ejemplo de su aplicación, se indica en la siguiente figura, correspondiente a la ejecución de un dique en la playa de Langebaan, situada en África del Sur. Donde se utilizaron otro tipo de sacos de geotextil a modo de piezas o elementos auxiliares, para servir de base o apoyo, a maquinaria pesada, con el objeto de evitar desperfectos en la estructura principal. Una vez finalizada su función, estos sacos fueron retirados (EnviroRock 2004).

Figura 3.14: Ejemplo de dique auxiliar temporal construido con sacos de geotextil en la playa de Longebaan, (Fuente: EnviroRock 2004)

3.6.2. Estructuras independientes de geotextil

Las estructuras básicas de geotextil del tipo independientes, se constituyen únicamente de piezas o elementos de geotextil, formando estructuras por sí mismas, para la defensa de la costa.

Los tipos de estructuras independientes, formadas únicamente por piezas o elementos de geotextil, suelen ser básicamente:

- Espigones
- Diques exentos y diques arrecife
- Revestimientos longitudinales

A continuación se da un repaso de cada uno de ellos, poniendo algún ejemplo de su utilización.

3.6.2.1. Espigones

En la realización de espigones se suelen utilizar sacos o bolsas de geotextil, aunque también se pueden usar tubos de geotextil, estando en ambos casos rellenos de arena.

Como ejemplo de su uso se ha elegido el realizado en la costa este de los EE.UU. Para evitar la erosión costera en la playa de Isla Bald Head, en Carolina del Norte, se utilizaron tubos de geotextil, con lo que se produjo una mejora litoral frente al transporte de material, estando limitado su movimiento, disminuyendo la erosión (Ten Kate 2004).

Figura 3.15: Ejemplo de espigones con tubos de geotextil en la playa de la Isla Bald Head, Carolina del Norte (Fuente: Ten Kate 2004)

3.6.2.2. Diques exentos y diques arrecife

Para este tipo de estructuras se han usado sacos y tubos; si bien, las estructuras de sacos han tenido muchos más problemas, como en el ejemplo que a continuación se expone. Como se aprecia las estructuras formadas por diques exentos realizadas con tubos de geotextil se han comportado más eficazmente. Se pueden realizar compuestas de un único tubo o formando grupos.

Algunos autores reflejaron ejemplos de aplicación para el caso de diques exentos y diques arrecife como estructuras independientes de geotextil. El trabajo de Mori y Fantini (2010) tenía por objeto estudiar la eficacia de los diques exentos, mediante el empleo de tubos de geotextil, en las costas italianas de la Toscana, para lo cual se realizaron cuatro tramos con diferentes características determinando cuál de ellos sería el más eficaz. Con esta misma finalidad, Mori et al. (2008) mostraron la construcción de espigones mediante sacos de geotextil, con un volumen de 1,5 m³. Presentando

roturas en las costuras y debido a la abrasión en la zona de playa seca. Otro ejemplo de aplicación son las costas de EE.UU. habitualmente protegidas con tubos de geotextil contra los huracanes que anualmente les azotan. Cuyo comportamiento dependía del grado de fuerza de los huracanes.

El número de estructuras independientes realizadas con geotextil en la costa es cada vez es mayor. En este contexto puede destacarse el proyecto de realización de los diques arrecifes en la costa este de Corea del Sur reflejado por Oh y Shin (2006), cuyo esquema se muestra en la figura adjunta.

Figura 3.16: Sección del dique arrecife en la playa de Young-Jin en Korea (Oh y Shin 2006)

3.6.2.3. Revestimientos longitudinales

Los revestimientos contruidos a lo largo de la costa se pueden realizar mediante sacos o tubos de geotextil. Normalmente reciben un oleaje residual y suelen aplicarse o en zonas de playa seca o inter mareal. Cuando está directamente en contacto continuo con el agua suele ser en zonas protegidas, con poca agitación.

Uno de los ejemplos de revestimiento longitudinal mediante el empleo de sacos de geotextil como estructuras independiente de defensa de la costa se sitúa al oeste de la isla de Sylt, en Alemania (Oumeraci y Recio 2010). Por tratarse de una zona castigada por los temporales, existieron importantes problemas de erosión costera en las proximidades de una zona acantilada. Y al tratarse de una zona ubicada en una reserva natural, no se pudieron aplicar otras soluciones, mediante el empleo de

hormigón, denominadas soluciones duras. Por lo que se utilizaron sacos de geotextil rellenos de arena. Éstos cumplieron dos funciones; la de filtro, para evitar la pérdida de sedimento y la de refuerzo e incremento de la estabilidad del terraplén. Finalmente la estructura soportó varias tormentas durante los sucesivos inviernos, cumpliendo los objetivos esperados y sin causar daños al geotextil.

Otros dos ejemplos de aplicación de las piezas de geotextil como revestimientos longitudinales los describe el trabajo de Amigot et al. (2007). El primero de ellos, se sitúa en la playa de Wangerooge, en Alemania, utilizando sacos de geotextil como revestimiento longitudinal. Mientras que el segundo, se sitúa en la playa de Vero, en Florida, como se aprecia en la siguiente figura, en este se utilizaron tubos de geotextil para el refuerzo de una duna.

Figura 3.17: Ejemplo de revestimiento con tubos de geotextil en la playa de Vero, Florida (Amigot et al. 2007)

Pero a la hora de elegir el diseño, tipo de pieza, dimensiones, etc., es necesario conocer las solicitaciones a las que estará sometida la pieza y el conjunto de la estructura de la que forma parte. De ello se ocupa el siguiente apartado.

3.7. APLICACIONES MÁS FRECUENTES DE LAS ESTRUCTURAS DE GEOTEXTIL

Las aplicaciones dadas a las estructuras formadas por piezas o elementos de geotextil rellenos de arena son muy diversas; con resultados diferentes. En general son aptas para el refuerzo de estructuras situadas en el estrán o hasta aguas someras; pero no han dado buenos resultados, en general, cuando se sitúan en el exterior. De cualquier forma, los usos dados a estas estructuras son:

- Revestimientos
- Muros
- Protección contra el deslizamiento de laderas
- Protección contra la socavación
- Protección de pie de dunas
- Espigones
- Diques exentos y arrecifes

3.7.1. Revestimientos

El objetivo habitual de estos revestimientos es reforzar el perfil para evitar un incremento de erosión o exposición ante la acción marina. Pueden estar situados respecto a la línea de orilla: en playa seca, o en aguas someras. En 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.

A la vista de la literatura que se han ido describiendo en el capítulo 2, debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar un revestimiento de sacos de arena:

- La pendiente del revestimiento debe ser igual o menor a 1/1

- La pendiente debe tener una capa filtro de geotextil y sobre ella dos capas de sacos, debiendo estar, al menos, la exterior a tizón y encadenada
- El volumen en m³ por m de revestimiento ha de ser al menos de 0,6
- El pie del revestimiento debe protegerse al menos con dos filas de sacos con al menos dos alturas
- La altura del revestimiento ha de ser tal que se eviten los rebases
- El fallo del revestimiento debe considerarse en tres fases (para dos capas):
  - Inicio de peligro 0 – 2% (sacos con fallo)
  - Peligro moderado 2 - 15%
  - Fallo de la estructura > 15%
- Los revestimientos de sacos, cuando soportan una acción directa del oleaje lo hacen con alturas moderadas; así, a modo de ejemplo se muestra los datos que presenta Hornsey et al (2011) comparando sus resultados con los de Oumeraci et al (2003):

REVESTIMIENTO DE SACOS DE 0,75 m³ llenos al 80%			
Pendiente	T_p (s)	Altura de ola de diseño H_s (m)	
		Oumeraci et al (2003)	Hornsey et al (2011)
1/1	5	1,73	1,7
	10	1,09	1,5
	15	0,83	1,3
1/1,5	5	1,56	1,5
	10	0,98	1,3
	15	0,75	1,1
1/2	5	1,29	1,3
	10	0,81	1,1
	15	0,62	0,9

Tabla 3.8: Clasificación de revestimientos de sacos (Oumeraci et al. 2003 y Hornsey 2011)

Figura 3.18: Revestimiento de sacos de protección de costa

3.7.2. Muros

Los muros de sacos o bolsas de geotextil rellenos de arena tiene, básicamente, la diferencia respecto a 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 encadenados. Debe protegerse la parte superior para que no se produzca socavación por rebase, al igual que debe protegerse en pie de la estructura para socavación. Los efectos y comportamiento son similares a los muros de playa convencionales. Suele usarse para evitar erosión en zonas donde por continuada acción marina se pretende proteger un bien.

Figura 3.19: Muros de sacos de geotextil rellenos de arena

3.7.3. Protección contra el deslizamiento de ladera

Otro de los usos que los especialistas le han dado a las estructuras de sacos 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 3.20: Uso de los sacos de geotextil rellenos de arena como protección contra el deslizamiento de ladera en el borde del mar

3.7.4. Protección contra la socavación

La interacción del oleaje y un muro u obra vertical o casi vertical en una playa tiende a formar una socavación de pie. Los sacos de geotextil rellenos de arena pueden ser usados 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 3.21: Sacos de geotextil rellenos de arena como protección contra la socavación de las estructuras

3.7.5. Protección de dunas

Las bolsas o sacos de geotextil rellenas de arena se han usado, al igual que los tubos, para protección de los pies de dunas, con el fin de reducir su erosión o retrasar el colapso a 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 3.22: Sacos de geotextil rellenos de arena para la protección de pie de duna

Debe realizarse en talud, evitando pendientes fuertes de la estructura para así evitar en lo posible las posibles reflexiones que la obra pueda provocar.

3.7.6. 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 3.23: Estructuras de defensa de costa de sacos de geotextil rellenos de arena

3.7.7. Diques exentos y arrecife

Esta modalidad de obras de defensa de 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, por el contrario, son estructuras más frágiles frente a la acción del oleaje, habiéndose producido algunos fracasos en su uso.

3.8. UBICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE GEOTEXTIL RESPECTO A LA COSTA. SOLICITACIONES A CONSIDERAR

La elección del tipo de estructura y piezas de geotextil que la forman, así como su cálculo y diseño, vendrá determinado por las solicitaciones que debe resistir,

especialmente por la acción del clima marítimo. Por tanto, el primer paso a dar es conocer los condicionantes climáticos marítimos a los que estará sometida la estructura.

Estos condicionantes pueden considerarse desde dos aspectos complementarios. El primero de ellos se refiere a la ubicación que tiene la obra respecto al perfil, y por tanto, al desarrollo de la energía del oleaje en él. El segundo es el tipo de costa respecto a la intensidad del oleaje que incide en ella.

Por lo tanto, hay que estudiar para cada tipo de obra, donde se ubica respecto a:

- 1) La zona del perfil de la costa
- 2) Tipo de costa

3.8.1 Ubicación de la estructura de geotextil respecto al perfil de la costa

Siguiendo el trabajo de Weggel (1988), analizado y utilizado en otros trabajos (CEDEX 2010, Peña 2013), las acciones de oleaje esperables sobre una estructura a lo largo del perfil van variando de acción e intensidad. Este autor americano distingue desde este punto de vista, seis zonas que se representan en la figura adjunta. Se consideran cuatro variables básicas: la longitud, L ; el tiempo, T ; y la masa, M o la fuerza, F .

Figura 3.24: Clasificación de las estructuras según Weggel 1998 (CEDEX 2010)

Siendo:

- Para el nivel de marea:
  - Z_a = la semi carrera de marea
  - Z_s = la elevación del mar en temporal

- Para el alcance de la ola en la costa:

R = el run-up

- Las distancias de referencia:

D = la 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_i = altura de ola local.

Respecto a ello estas son las principales características de cada una de las zonas:

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

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

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 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, sucediendo únicamente en eventos extraordinarios.

$$H_1 \cong 0$$

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 períodos de retorno muy elevados.

En esta zona 1, la altura de ola no es la acción más importante a tener en cuenta; siendo válidos, desde el punto de vista de cualquier tipo de pieza básica, saco o tubo, no siendo necesario aplicar fórmula de resistencia a esta acción.

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

$$\frac{H_0}{g T^2} \frac{1}{s} \left(\frac{Z_a}{H_0} + \frac{Z_s}{H_0} \right) < \frac{X_w}{g T^2} < \frac{H_0}{g T^2} \frac{1}{s} \left(\frac{Z_a}{H_0} + \frac{Z_s}{H_0} + \frac{R}{H_0} \right)$$

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 inter mareal (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. Por ello puede considerarse la altura de ola inapreciable, solamente incidiendo en ella una corriente de agua de baja intensidad.

$$H_2 \cong \ll H_{residual} \cong 0$$

Por lo que, las acciones debidas al oleaje que pueden presentarse en una estructura de geotextil, situada en esta zona son nulas y solamente hay que considerar la corriente de agua debida al desarrollo final del run-up.

En esta zona 2, no habría que valorar la consideración de la aplicación de la fórmula de resistencia, en cualquier tipo de pieza básica de geotextil debido al oleaje, 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.

$$\frac{H_0}{g T^2} \frac{1}{s} \left(\frac{Z_a}{H_0} \right) < \frac{X_w}{g T^2} < \frac{H_0}{g T^2} \frac{1}{s} \left(\frac{Z_a}{H_0} + \frac{Z_s}{H_0} \right)$$

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 produzcan mareas o elevaciones excepcionales; por tanto con períodos de retorno largos. Y aun así, el oleaje que alcance no puede considerarse más que residual, incidiendo con un flujo de agua empujado por el run-up de muy corta altura.

$$H_3 \cong < H_{residual} \cong 0$$

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

- Zona 4: Estructura situada dentro del rango de marea y con su base sumergida durante parte del ciclo de marea. Expresada mediante la siguiente ecuación.

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

La zona del perfil de playa situada dentro del rango de marea corresponde a la denominada frente de playa (beachface) (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.

$$H_4 \cong H_{residual} \ll H_b$$

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:

$$\frac{d}{H_0} > \frac{Z_a}{H_0}$$

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. Por lo que para su cálculo debe considerarse la ola en rotura y el impacto que sobre la estructura produce.

$$H_5 \cong H_b$$

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:

$$\frac{H_0}{H_i} \frac{d}{H_0} - \frac{Z_a}{H_0} > 1,28$$

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 sometido una estructura de geotextil en esta zona del perfil de playa, se caracteriza por ser un oleaje desarrollado ($H_6 = H'_0$), 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, a modo de resumen.

Zona	Oleaje	Solicitaciones
1	Nulo	$H_1 \cong 0$
2	Nulo	$H_2 \cong \ll H_{residual} \cong 0$
3	Lámina de agua	$H_3 \cong < H_{residual} \cong 0$
4	Residual	$H_4 \cong H_{residual} \ll H_b$
5	En rotura	$H_5 \cong H_b$
6	Desarrollado	$H_6 \cong H_0$

Tabla 3.9: Solicitaciones de una estructura de geotextil según la zona del perfil de la costa

Figura 3.25: Clasificación de las zonas del perfil de una playa

3.8.2 Ubicación de la obra respecto al tipo de costa

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

A su vez, las principales solicitaciones consideradas a las que se encuentra sometida una estructura de geotextil, serán diferentes en función del tipo de costa en la que se encuentre situada.

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

Si la obra se encuentra en profundidades indefinidas, esta altura de ola de cálculo sería $(H_{1/3})_{\max}$ y la denominaremos H_o . 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 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, la altura de ola procedente desde profundidades indefinidas H_o se vería reducido. Así podríamos clasificar las costas en:

- Abiertas
- Poco protegidas
- Medianamente protegidas
- Protegidas
- Muy protegidas

A ellas habría que añadir aquellas costas como rías, estuarios o bahías muy cerradas en las que el oleaje exterior penetra en un tramo corto, siendo más importante el oleaje local. Este tipo de costa se clasifica como: Costa cerrada.

La definición que podría hacerse 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.

Figura 3.26: Tipos de costa según su protección frente al oleaje

- 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.

- 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.

- Costa muy protegida: se considera que una costa está muy protegida, cuando solamente le llega 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.

- 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 proyecto o anteproyecto de obra, que es lo indicado en los párrafos anteriores.

Este método aproximado puede realizarse por dos vías. La primera de ellas consiste, en tomar, como escala de valores de altura de ola, una escala como la escala de

Beaufort (1948), aunque podrían tomarse otras escalas como la de Douglas (1917) o la de Frujita-Pearson (1971); determinar la reducción de uno o varios escalones respecto a uno inicial en costa abierta, de la escala cuando el lugar donde se va a ubicar la estructura es otro tipo de costa.

Así tendríamos para los tipos de costa definidos anteriormente:

- a) Costa abierta: Nivel de la escala correspondiente a la máxima altura de ola significativa en ese lugar.
- b) Costa poco protegida: Un escalón menos respecto al nivel de la escala correspondiente a una costa abierta.
- c) Costa medianamente protegida: Dos escalones menos respecto al nivel de la escala correspondiente a una costa abierta.
- d) Costa protegida: Tres escalones menos respecto al nivel de partida de la escala correspondiente a una costa abierta.
- e) Costa muy protegida: Cuatro escalones menos respecto al nivel de partida de la escala correspondiente a una costa abierta.

Así por ejemplo si en una costa abierta la altura de ola $H_o = (H_{1/3})_{\max}$ se encuentra en el nivel 6, en el que las alturas de ola se sitúan en el escalón entre 7 y 4m. Si tuviésemos que evaluar cuanto sería la altura de ola para los otros tipos de costa sería:

- a) Costa poco protegida: nivel 5, en el que las alturas de ola se situarían entre 3m y 4m, con un valor medio de 3m.
- b) Costa medianamente protegida: nivel 4, en el que las alturas de ola se situarían entre 2m y 3m, con un valor medio de 2m.
- c) Costa protegida: nivel 3, en el que las alturas de ola se situarían entre 1m y 2m, con valor medio de 1m.
- d) Costa muy protegida: nivel 2, en el que las alturas de ola serían menores de 1m, con un valor medio de 0,6m.

Escala	Velocidad del viento		Descripción	Altura del oleaje		Condiciones en mar	Condiciones en tierra
	Kph	Nudos		Metros	Pies		
0	<1	<1	Calma	0	0	Superficie del mar lisa.	El humo sube verticalmente.
1	2-4	1-2	Ventolina	0.1	0.3	Superficie del mar rugosa.	El movimiento del viento es visible en el humo
2	6-19	3-10	Brisa suave	0.6	2	Oleaje de longitud corta. Rompimiento parcial de crestas. Espuma cristalina.	El viento se siente en la piel y las hojas susurran. Las hojas en constante movimiento.
3	20-28	11-15	Brisa moderada	1	3.3	Incremento en la longitud del oleaje. Rompimiento parcial de crestas. Espuma blanca. El sonido es suave y se disipa rápidamente.	El polvo y papel suelto se eleva. Pequeñas ramas comienzan a moverse.
4	30-37	16-20	Brisa regular	2	6.6	Oleaje de longitud mediana. Rompimiento total de crestas. Espuma blanca. El sonido es suave pero perdura por más tiempo.	Ramas de tamaño moderado se mueven. Pequeños árboles comienzan a balancearse.
5	39-48	21-26	Brisa fuerte	3	9.9	Oleaje de longitud mediana e incremento en la altura del oleaje. Superficie del mar con áreas de espuma blanca. El sonido es fuerte.	Ramas grandes se mueven. Los cables silban. Se hace difícil el uso de sombrillas. Depósitos vacíos de basura se vuelcan.
6	50-61	27-33	Temporal moderado	4	13.1	Superficie del mar encrespado. La espuma tiende a alinearse en bandas en la dirección del viento.	Los árboles se mueven. Se requiere un esfuerzo para caminar contra el viento. Se puede sentir el balanceo en los últimos pisos de edificaciones altas.
7	63-87	34-47	Temporal regular	7	23	Incremento de la longitud y altura del oleaje como de la longitud de sus crestas. Las bandas de espuma acortan distancia.	Se rompen las ramas de los árboles. Los carros son desviados por la fuerza del viento. Se caen pequeños árboles, señales de construcciones temporales y barricadas. Daños en carpas.
8	89-117	48-63	Temporal fuerte	11.5	37.7	Oleaje de gran altura y longitud de cresta. Rompimiento constante del oleaje. Formación rápida de bandas de espumas. Superficie del mar con grandes áreas de espuma blanca. Visibilidad reducida.	Se rompen los árboles o son sacados de raíz. Árboles jóvenes son doblados y deformados. Se levantan láminas mal sujetadas de los techos. Daños extendidos en la vegetación. En la mayoría de techos se desprenden láminas.
9	>117	>63	Huracán	>14	>46	Oleaje de enorme altura en constante rompimiento. El aire está saturado de agua pulverizada por el viento. Visibilidad mínima.	Daños considerables y extendidos en la vegetación. Algunas ventanas rotas. Daños estructurales a casas móviles y edificaciones mal construidas. Basura arrojada o lanzada por el viento.

Figura 3.27: Escala Beaufort (1948) (Fuente: Diccionario Náutico)

Otro 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:

Tipo de costa	Solicitaciones: $Cr \cdot H_o$
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	$H'_o = 0,1 \cdot H_o$

Tabla 3.10: Coeficientes reductores de oleaje según el tipo de costa

3.8.3 Altura de ola de cálculo a considerar en el diseño

La altura de ola de cálculo que debe considerarse a la hora de diseñar una estructura con piezas o elementos de geotextil, podría escribirse como:

$$H_{c \text{ geotextil}} = H_o \cdot C_{\text{reductor perfil}} \cdot C_{\text{reductor costa}}$$

Así por ejemplo, para diseñar una estructura de geotextil situada en una costa medianamente protegida y en la zona 5 del perfil de la costa, la altura de ola de cálculo será:

- 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).

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

- b) Por situarse en una costa medianamente protegida, correspondiente al nivel cuatro de la escala de Beaufort (1948), el oleaje se reduce el 40%, debiendo considerarse una altura de ola igual al 0,6 de su valor.

$$C_{reductor\ costa} = 0,6$$

- 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 y en una costa medianamente protegida, será:

$$H_{c\ geotextil} = H_b \cdot 0,6$$

- d) Finalmente, si esta altura de ola de cálculo $H_{c\ geotextil}$ pertenece a los límites de la altura de ola obtenidos de las formulaciones de diferentes autores, para los que una estructura de geotextil es estable, entonces la estructura de geotextil será estable. En caso contrario, la estructura de geotextil está situada en una zona donde será inestable.

Considerando la fórmula de Pilarczyk (1996), para la que una estructura de geotextil es estable si la altura de cálculo máxima para una obra es inferior o igual a 1,5m, entonces:

$$1,5m \geq 0,6 \cdot H_b \rightarrow H_b \leq 2,5m$$

Luego para $H_b > 2,5m$ la fórmula de Pilarczyk (1996) no es válida y como consecuencia una estructura de geotextil situada en esa zona de la costa y del perfil no será estable.

Otro ejemplo, para diseñar una estructura de geotextil situada en una costa poco protegida en una zona 4 del perfil de la costa, la altura de ola de cálculo será:

- a) Por ubicarse la estructura de geotextil en la zona 4 del perfil de la costa, denominada frente de playa, se debe considerar una altura de ola coincidente con la lámina de agua de un oleaje residual.

$$H_O \cdot C_{reductor\ perfil} = H_{residual}$$

- b) Por situarse en una costa poco protegida, correspondiente al nivel cinco de la escala de Beaufort (1948), el oleaje se reduce el 20%, debiendo considerarse una altura de ola igual al 0,8 de su valor.

$$C_{reductor\ costa} = 0,8$$

- c) Con lo que la altura de ola de cálculo, de una estructura de geotextil rellena de arena, será:

$$H_{c\ geotextil} = H_{residual} \cdot 0,8$$

- d) Finalmente, si esta altura de ola de cálculo $H_{c\ geotextil}$ pertenece a los límites de la altura de ola obtenidos de las formulaciones de diferentes autores, para los que una estructura de geotextil es estable, entonces la estructura de geotextil será estable, ya que en caso contrario:

Considerando la fórmula de Pilarczyk (1996), para la que una estructura de geotextil es estable si la altura de cálculo máxima para una obra es inferior o igual a 1,5m, entonces:

$$1,5m \geq 0,8 \cdot H_r \rightarrow H_r \leq 1,9m$$

Luego para $H_r > 1,9m$ la fórmula de Pilarczyk (1996) no es válida y como consecuencia una estructura de geotextil situada en esa zona de la costa y del perfil no será estable. Algo que es lógico pues es muy difícil que una altura de ola residual supere casi los dos metros.

Capítulo 4

METODOLOGÍA PROPUESTA EN EL CRITERIO DE DECISIÓN DE LOS LUGARES ADECUADOS PARA SU USO

ÍNDICE

4.1.	ESTRUCTURAS COMPUESTAS DE SACOS O BOLSAS DE GEOTEXTIL.....	4.4
4.1.1.	Tipos y características de los sacos de geotextil.....	4.4
4.1.2.	Dimensiones de los sacos de geotextil	4.4
4.1.3.	Mecanismos de fallo de los sacos de geotextil	4.6
4.1.3.1.	Estado límite externo	4.7
4.1.3.2.	Estado límite interno.....	4.13
4.1.3.2.1.	Inestabilidad local.....	4.13
4.1.3.2.2.	Rotura del saco de geotextil	4.15
4.1.3.2.3.	Deformación de la bolsa	4.20
4.1.4.	Formulaciones para el cálculo de estabilidad de los sacos de geotextil	4.20
4.1.4.1.	Fórmula de Pilarczyk (1996).....	4.23
4.1.4.2.	Fórmula de Wouters (1998).....	4.24
4.1.4.3.	Fórmula de Oumeraci et al (2002).....	4.25
4.1.4.4.	Fórmula de Recio (2007) y Recio & Oumeraci (2010)	4.26
4.1.4.5.	Fórmula de Mori (2008) y Mori et al (2008)	4.28
4.1.4.6.	Fórmula de Dassanayake y Oumeraci (2013)	4.29
4.1.4.7.	Método de cálculo de Coghlan et al. (2009).....	4.35
4.1.5.	Validez y limitaciones de las formulaciones para sacos de geotextil.....	4.36
4.1.5.1.	Limitaciones de la fórmula de Pilarczyk (1996)	4.37
4.1.5.2.	Limitaciones de la fórmula de Wouters (1998).....	4.37
4.1.5.3.	Limitaciones de la fórmula de Oumeraci et al. (2002, 2003)	4.41
4.1.5.4.	Limitaciones de la fórmula de Mori(2008) y Mori et al. (2008)	4.45
4.1.5.5.	Limitaciones de la fórmula de Dassanayake y Oumeraci(2013)	4.48
4.1.5.6.	Limitaciones del método de cálculo de Coghlan et al. (2009).....	4.50
4.1.6.	Resumen de las limitaciones en formulaciones consacosdegeotextil.....	4.52
4.1.7.	Estructuras realizadas con sacos de geotextil rellenos de arena	4.54
4.1.7.1.	Revestimientos con sacos de geotextil rellenos de arena.....	4.56
R.S.1.	Revestimiento– Playa de Jumeirah en Dubai (Emiratos Árabes Unidos) .	56
R.S.2.	Revestimiento - Playa de Stocktonen Nueva Gales del Sur (Australia) ..	4.58
R.S.3.	Revestimiento–Playa de Maroochydoreen Queensland (Australia).....	4.60
R.S.4.	Revestimiento - Playa de Kelso en KwaZulu-Natal (Sudáfrica).....	4.62
R.S.5.	Revestimiento -Playa de Amanzimtoti (Sudáfrica)	4.64
R.S.6.	Revestimiento - North Beach en la Bahía de Jeffrey (Sudáfrica)	4.66
R.S.7.	Revestimiento - Playa de Kelly (Sur África)	4.68
4.1.7.2.	Espigones con sacos de geotextil rellenos de arena	4.70
E.S.1.	Espigones en la playa de Maroochydore (Australia).....	4.70
E.S.2.	Espigón en Clifton Springs (Australia).....	4.72
E.S.3.	Espigones en Langebaan (Sudáfrica).....	4.74
4.2.	ESTRUCTURAS COMPUESTAS DE TUBOS DE GEOTEXTIL	4.76
4.2.1.	Formas y dimensiones de los tubos de geotextil.....	4.76
4.2.2.	Consideraciones de los tubos de geotextil.....	4.81

4.2.2.1.	El porcentaje de llenado y la deformación.....	4.81
4.2.2.2.	La tensión del geotextil.....	4.85
4.2.2.3.	La socavación en el pie	4.94
4.2.2.4.	La permeabilidad.....	4.95
4.2.3.	Mecanismos de fallo de los tubos de geotextil.....	4.96
4.2.3.1.	Mecanismos de fallo externos	4.96
4.2.3.2.	Mecanismos de fallo internos.....	4.98
4.2.4.	Formulaciones para el cálculo de estabilidad de los tubos de geotextil.....	4.99
4.2.4.1.	Fórmula de Pilarczyk (2000)	4.99
4.2.4.2.	Fórmula de CUR 217 (2006).....	4.101
4.2.4.3.	Fórmula de Van Steeg y Vastenburg (2010).....	4.101
4.2.5.	Validez y limitaciones de las formulaciones para tubos de geotextil	4.105
4.2.5.1.	Limitaciones de la fórmula de Pilarczyk (2000).....	4.105
4.2.5.2.	Limitaciones de la fórmula de CUR 217 (2006)	4.105
4.2.5.3.	Limitaciones de la fórmula de Van Steeg y Vastenburg (2010).....	4.106
4.2.6.	Resumen de las limitaciones en formulaciones con tubos de geotextil	4.107
4.2.7.	Estructuras realizadas con tubos de geotextil rellenos de arena.....	4.108
4.2.7.1.	Obras auxiliares con tubos de geotextil	4.109
	O.A.1. Núcleo de diques en las islas artificiales Amwaj de Bahrein (Dubai) ...	4.109
	O.A.2. Núcleo de diques en la provincia de Esmeraldas (Ecuador).....	4.111
	O.A.3. Refuerzo de dunas en Beach Haven (Nueva Jersey)	4.113
4.2.7.2.	Espigones con tubos de geotextil	4.115
	E.T.1. Espigón en la playa de Kirra, Queensland (Australia)	4.115
	E.T.2. Espigones con forma de T en Upham Beach (Florida)	4.117
4.2.7.3.	Diques con tubos de geotextil.....	4.119
	D.T.1. Diques arrecife en la playa de Narrow Neck (Australia).....	4.119
	D.T.2. Diques exentos en la playa de Young-Jin (Corea del Sur).....	4.121
	D.T.3. Diques exentos y espigón en el Dorado Royale (Méjico).....	4.123
	D.T.4. Diques sumergidos en las playas de la costa de Cancún (Méjico).....	4.125
	D.T.5. Dique longitudinal en Enkhuizen (Holanda)	4.126

Capítulo 4

METODOLOGÍA PROPUESTA EN EL CRITERIO DE DECISIÓN DE LOS LUGARES ADECUADOS PARA SU USO

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta a la hora de estudiar o analizar las estructuras realizadas con elementos de geotextil rellenos de arena, es conocer las variables, los criterios de diseño y sus limitaciones.

Los pasos a dar en este capítulo se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Análisis de las características de los elementos de geotextil rellenos de arena que van a formar la estructura de defensa de la costa.
- Mecanismos de fallo de las estructuras y de las piezas que lo forman.
- Análisis de la validez y limitaciones de las fórmulas de cálculo y estabilidad de las piezas y estructuras.
- Ejemplos de estructuras de piezas de geotextil rellenas de arena, realizadas en las costas.

Así mismo, estos puntos se desarrollan para las estructuras formadas por dos tipos de piezas de geotextil rellenas de arena:

- 1- Sacos o bolsas de geotextil rellenas de arena
- 2- Tubos de geotextil rellenos de arena

La metodología propuesta considera por un lado, las características de las piezas o elementos de geotextil rellenos de arena, por otro lado, los mecanismos de fallo de las estructuras y piezas que se constituyen. Y fundamentalmente, determina las limitaciones de altura de ola significativa en las fórmulas de estabilidad existentes. De tal forma, que considerando los ejemplos de las obras más representativas existentes en diferentes costas de todo el mundo, se analizan siguiendo el siguiente esquema: localización, descripción, clasificación en función de la zona del perfil y del tipo de costa en el que se ubican, clima marítimo de la zona y comportamiento de cada obra.

4.1. ESTRUCTURAS COMPUESTAS DE SACOS O BOLSAS DE GEOTEXTIL

Las piezas que genéricamente se denominan sacos, nombre más antiguo por el que se conocen, engloba las piezas que algunos autores denominan bolsas, almohadas o colchones (Lawson 2008).

4.1.1. Tipos y características de los sacos de geotextil

Estos tres tipos de piezas referidas anteriormente (sacos, almohadas y colchones) de geotextil rellenas de arena, se diferencian únicamente en la forma y tamaño, que dependerá de la aplicación que requieran, según Lawson (2008). Su versatilidad en el tamaño y forma hace que sea muy complicada la normalización de cálculo sobre una tipología concreta de piezas o sacos ya que su comportamiento estructural individual y de conjunto, dependerá del tamaño, relaciones dimensionales, tipo de relleno, etc.

Las costuras son uno de los puntos más delicados de este tipo de piezas; requiriéndose normalmente un doble cosido para piezas de 1 m^3 o mayores (PIANC, 2011) y este cosido ha de ser tal que debe resistir al menos el 60% de la tensión última del geotextil (Smith 2008).

4.1.2. Dimensiones de los sacos de geotextil

Los sacos de geotextil tienen dos formas básicas de medirse: a) por su volumen; y b) por sus dimensiones.

Figura 4.1: Dimensiones de los sacos de geotextil

El volumen indica la robustez de la pieza, pero no su estructura geométrica, esencial para conocer la resistencia estructural. El volumen normal, según todos los trabajos,

oscila entre 0,05 y 5 m³. Un dato complementario con el dato volumétrico, para conocer el comportamiento de los sacos es su dimensión; pero aquí, también se encuentran diferencias, ya que mientras algunos autores dan las tres dimensiones de la bolsa, otros dan la superficie de la bolsa vacía.

La relación entre las dimensiones de los sacos vacíos y su capacidad llenos viene dada por la solución que a este problema dio Robin (2004) (Dassanayake y Oumeraci 2013), aunque debe indicarse que se realizó para superficies indeformables:

$$V_{max} = a^3 \left[\frac{b}{\pi a} - 0.142(1 - 10^{-\frac{b}{a}}) \right] \quad (4.1)$$

Siendo:

a = Longitud del saco vacío

b = Ancho del saco vacío

Las piezas no tienen por qué diseñarse para ir completamente llenas (100%). Existen trabajos (PIANC 2011, Dassanayake y Oumeraci 2013) que aconsejan el llenado de los sacos de geotextil al 80%, mientras los últimos trabajos de Dassanayake y Oumeraci (2013) mostraron que el llenado de los sacos al 100% facilitaba un 36% más de estabilidad a la estructura cuando el Número de Iribarren era de 5.

Debe tenerse en cuenta que una bolsa rellena de arena no es una pieza rígida y, por tanto, se va adaptando a la estructura. Por otro lado su capacidad de licuefacción hace que se reduzca el rozamiento entre las piezas y, como consecuencia el engarce entre ellas, afectando a la estabilidad final de la estructura.

Pero, la mayoría de las fórmulas de estabilidad de las estructuras realizadas con sacos de geotextil solamente tienen en cuenta el espesor de los sacos, y no el resto de las dimensiones. Recio y Oumeraci (2008) intentaron normalizar las dimensiones de los sacos de geotextil para que sus fórmulas de diseño vinieran en función de su longitud. Trabajando con sacos con forma de paralelepípedo que tenían las siguientes relaciones geométricas:

$$\begin{aligned}\text{Longitud} &= l_c \\ \text{Anchura} &= \frac{1}{2} l_c \\ \text{Altura} &= \frac{1}{5} l_c\end{aligned}$$

Con lo que el volumen de la bolsa y las áreas de proyección del saco son:

$$V = l_c^3/10 \quad (4.2)$$

$$A_s = l_c^2/10 \quad (4.3)$$

$$A_T = l_c^2/2 \quad (4.4)$$

Figura 4.2: Relación entre las dimensiones de una bolsa según Recio y Oumeraci (2008)

4.1.3. Mecanismos de fallo de los sacos de geotextil

Al diseñar una estructura con sacos de geotextil rellenos de arena, se deben tener en cuenta los siguientes mecanismos de fallo (Lawson 2008):

1. Estado límite externo
2. Estado límite interno

En el primero de los casos se estudian los movimientos que pueden producirse utilizando una pieza en la estructura, una bolsa, o con el conjunto de piezas. Mientras que en el segundo de los casos lo que se estudia es el comportamiento de la propia bolsa individual y de los elementos que la componen.

4.1.3.1. Estado límite externo

El análisis del estado del conocimiento, nos indica que se han desarrollado dos vías para el estudio de los estados límite de una estructura con sacos de geotextil rellenos de arena:

- a. La que presenta Lawson (2008)
- b. La que presenta Jackson (2006) y Recio y Oumeraci (2008, 2009).

De manera resumida, los movimientos que considera cada una de ellas es:

a. Lawson (2008):

Este autor considera que las piezas y la estructura formada por ellas puede tener seis tipos de movimientos distintos, a saber:

- Deslizamiento
- Vuelco
- Rodamiento
- Estabilidad del conjunto
- Socavación
- Asentamiento

Los tres primeros obedecen a la estabilidad, de las piezas dentro del conjunto, mientras que los tres últimos son los movimientos de la estructura como un conjunto único.

Realmente, en su estudio, cuando habla de estos estados límites externos se limita a indicar que son los mismos que aparecen en los tubos; pero el comportamiento de estas estructuras y sus elementos no es igual. Solamente se puede considerar estos tres primeros movimientos – deslizamiento, vuelco y rodamiento- en la capa superior de la estructura; mientras que los tres siguientes – estabilidad del conjunto, socavación y asentamiento- sí que parecen sean propios de estas estructuras, al igual que cualquiera otra.

La estabilidad de conjunto se suele referir a la estabilidad de ladera de la estructura. Por ello se debe estudiar el círculo de deslizamiento. Además, el fallo en el

asentamiento se puede evitar mediante un estudio de capacidad portante del terreno y subsidencia esperable.

Figura 4.3: Estabilidad externa a la estructura (Lawson 2008)

La socavación frente a la estructura se puede minimizar mediante dos técnicas: La primera de ellas consiste en ampliar el pie de la estructura con dos sacos; la segunda sería proteger el pie con una manta de geotextil con un tubo de arena de cierre.

Figura 4.4: Protección contra la socavación del pie de la estructura

b. Jackson (2006) y Recio y Oumeraci (2008, 2009):

Consideran tres movimientos que pueden producir el fallo en la estructura. Sin tener en cuenta los movimientos del conjunto de la estructura. Como complemento del anterior a la hora de analizar los mecanismos de fallo de una estructura de sacos.

- Rebase
- Salida de la pieza
- Socavación en el pie

Figura 4.5: Tipos de fallos en las estructuras de sacos de arena

El rebase del oleaje sobre la estructura provoca que las piezas más elevadas puedan sufrir dos movimientos debidos al ímpetu del agua sobre ellas: La caída de la pieza arrastrada por la corriente de retorno; o el vuelco por el impacto del agua sobre la junta elevando y haciendo girar la pieza tierra adentro.

Para evitar el efecto del rebase y el consiguiente fallo de la estructura, Jackson (2006) recomienda poner piezas, sacos, con mayor peso en la parte superior de la estructura.

Figura 4.6: Efecto del rebase sobre la estructura de sacos de arena

El estudio de la salida de una pieza de la estructura lo han realizado en profundidad Recio (2008), y Recio y Oumeraci (2008, 2009).

Figura 4.7: Fuerzas actuantes sobre un saco de la estructura (Recio 2008, Recio y Oumeraci 2008, 2009)

Si se considera un saco de la estructura, las fuerzas de movimiento, a las que estará sometido, debidas a la acción del oleaje sobre la estructura son:

Fuerza de arrastre:

$$F_D = 0,5 \cdot C_D \cdot \rho_w \cdot A_S \cdot u^2 \quad (4.5)$$

Fuerza de inercia:

$$F_M = C_M \cdot \rho_w \cdot V \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4.6)$$

Fuerza de elevación:

$$F_L = 0,5 \cdot C_L \cdot \rho_w \cdot A_T \cdot u^2 \quad (4.7)$$

Fuerza de resistencia del saco de arena sumergido (Peso):

$$F_{GSC} = \rho_{GSC} \cdot g \cdot V \quad (4.8)$$

Siendo:

ρ_w = densidad del agua [Kg/m³]

ρ_s = densidad de la arena [Kg/m³]

C_D, C_M y C_L = coeficientes empíricos de las fuerzas de arrastre, inercia y de elevación [-]

u = velocidad horizontal de la partícula del agua inducida por el oleaje [m/s]

$\frac{\partial u}{\partial t}$ = aceleración horizontal de la partícula asociada al oleaje [m/s²]

$\rho_{GSC} = (\rho_s - \rho_w)$ = densidad sumergida de la arena [Kg/m³]

V = volumen de un saco de arena [m³]

A_S = proyección del área del saco de arena en la dirección perpendicular al oleaje

A_T = proyección del área del saco de arena en la dirección del oleaje

Figura 4.8: Áreas de los sacos considerados para el cálculo de fuerzas sobre él (Recio 2008, Recio y Oumeraci 2008, 2009)

Para que una pieza o bolsa, no se salga de la estructura debe cumplir (Recio 2008, Recio y Oumeraci 2008, 2009):

Fuerza de resistencia horizontal > Fuerzas horizontales

$$\mu (F_{GSC} - F_L) \geq F_D + F_M \quad (4.9)$$

Siendo: μ = coeficiente de rozamiento entre los sacos de geotextil.

Para que una pieza o saco, no vuelque, en la parte superior de la estructura, debe cumplir (Recio 2008, Recio y Oumeraci 2008, 2009):

Momentos de las fuerzas resistentes > Momentos de las fuerzas actuantes

$$F_{GSC} \cdot r_s \geq (F_D + F_M) \cdot m_s + F_L \cdot r_s \quad (4.10)$$

Siendo:

r_s = proyección horizontal de la distancia entre el centro de gravedad y el punto de rotación

m_s = proyección vertical de la distancia entre el centro de gravedad y el punto de rotación.

Figura 4.9: Estabilidad de un saco frente al vuelco (Recio y Oumeraci 2009)

El centro de gravedad va variando a medida que actúa el oleaje ya que la arena del saco va moviéndose; lo que quiere decir que debe estudiarse también el comportamiento interno del saco, esto es su estabilidad interna y su estado límite.

4.1.3.2. Estado límite interno

El saco o bolsa de geotextil relleno de arena no es una pieza rígida y como tal se pueden producir movimientos internos dentro de la pieza que pueden estar unidos o no a los movimientos o estabilidad externa estudiada anteriormente. Para su análisis se ha seguido tanto los trabajos de Lawson (2009) como los de Recio y Oumeraci (2008, 2009). Lawson (2008) clasifica estas inestabilidades internas en cuatro tipos:

- a. Inestabilidad local
- b. Rotura del saco de geotextil
- c. Pérdida de material del saco
- d. Deformación del saco

Figura 4.10: Inestabilidades internas de los sacos (Lawson 2008)

4.1.3.2.1. *Inestabilidad local*

La inestabilidad local se refiere a los movimientos que una pieza, saco, hace en la estructura, debido a movimientos de la arena que se producen dentro del saco.

Figura 4.11: Movimientos de la arena dentro del saco y efectos que produce

Estos movimientos pueden ser, básicamente, debido a dos causas, que en ocasiones se producen conjuntamente:

1. La presión de la estructura sobre el saco hace que la arena emigre hacia el exterior formándose una bolsa más ancha en la cara que mira hacia el oleaje; cuyo efecto inmediato es la reducción de anchura del saco dentro de la estructura y el traslado del centro de gravedad hacia el exterior.
2. La acción del oleaje hace que una parte del saco tienda a elevarse, formándose pequeños vórtex que la favorece, emigrando arena de un lado del saco hacia la zona más exterior de la estructura. La alternancia de subida y bajada de este tramo del saco, coincidiendo con la incidencia del oleaje y su retorno, tiende a sacar al saco de su posición.

Es frecuente que las dos acciones anteriores se produzcan a la vez, cuyo resultado final es la salida de la pieza o saco de la estructura. En ambos casos el efecto es el mismo, con el traslado del centro de gravedad y, por tanto la aplicación de fuerzas y momentos, que se han visto en el apartado anterior.

4.1.3.2.2. Rotura del saco de geotextil

La rotura del saco de geotextil se puede producir, básicamente, por las siguientes causas.

- La tensión del geotextil ha llegado a su estado límite
- Resistencia de las costuras
- Vandalismo
- Degradación (abrasión, radiación ultra-violeta, etc.)

Figura 4.12: Tipos de rotura más comunes en sacos de geotextil rellenos de arena

1. Tensión límite del geotextil

El geotextil con el que está hecho el saco suele tener una densidad que oscila entre 600 y 1.200 g/m² (Smith 2008). Tras ser rellena la bolsa o saco y sometida a una carga se encuentra en tensión que depende del grado de llenado de ésta y de su compresión dentro de la estructura. Cuando la tensión supera un determinado límite, tensión última, puede partir o romperse. Para calcular esta tensión última podemos recurrir a dos métodos:

a) El primero de ellos sería el que se utiliza para los tubos de geotextil (Smith 2008) en los que la tensión última del geotextil sería la tensión máxima a la que puede estar sometida en la estructura, incluyendo las costuras, multiplicada por un coeficiente de seguridad, esto es:

$$T_{ultima} = Fs \cdot T_{máxima \text{ de trabajo}} \quad (4.11)$$

Siendo habitual adoptar un valor del coeficiente de seguridad (F_s) entre 4 y 5; pero hay que tener en cuenta que este factor o coeficiente, Smith (2008) lo facilita para tubos y por tanto a falta de datos para sacos podría tomarse también el mismo.

b) La monografía del PIANC (2011) adopta una formulación parecida, que recoge de BS 8006: 1995. En ella, la tensión de diseño viene determinada por:

$$T_d = T_{CR} / f_m \quad (4.12)$$

Dónde:

- T_d = Tensión de diseño del geotextil por unidad de longitud [kN/m]
- T_{CR} = La extrapolación reducida de la resistencia a la rotura del refuerzo al final de la vida de diseño, debido a la fluencia [kN/m]
- f_m = Es un coeficiente que viene definido por $f_m = f_{m1} \times f_{m2}$ [-]
- $f_{m1} = f_{m11} \times f_{m12}$ [-]
- $f_{m2} = f_{m21} \times f_{m22}$ [-]
- f_{m11} = Coeficiente dependiente de la manufactura [-]
- f_{m12} = Coeficiente dependiente de la extrapolación de los resultados de los ensayos [-]
- f_{m21} = Coeficiente dependiente de la susceptibilidad al peligro [-]
- f_{m22} = Coeficiente dependiente de las condiciones medioambientales [-]

2. Resistencia de las costuras

También debe tenerse en cuenta que, dependiendo del tipo de geotextil usado para la fabricación de sacos, la pieza puede sufrir elongaciones debido a la tensión a que se encuentran sometidas (PIANC 2011). Además uno de los puntos débiles de los sacos rellenos de arena son los cierres o costuras. Siguiendo los datos que suministra la monografía del PIANC (2011) la resistencia de las costuras depende de su tipología, considerando cinco:

- Labios juntos: Aguanta entre el 30 y 50% de la tensión de fabricación
- Mariposa: Aguanta entre el 40 y 70% de la tensión de fabricación
- Con doblez: Aguanta entre el 30 y 60% de la tensión de fabricación
- Doble doblez: Aguanta entre el 50 y 70% de la tensión de fabricación
- Solape: Aguanta más del 70% de la tensión de fabricación

Figura 4.13: Tipos de costura en el cierre de los sacos de geotextil (PIANC 2011)

3. Vandalismo

El vandalismo es uno de los graves inconvenientes con los que se encuentran las estructuras compuestas con piezas de geotextil. Los actos más frecuentes son la realización de punzones o cortes sobre los elementos (sacos o tubos) que hacen que estas piezas queden inservibles. Cuando la obra se encuentra en tierra es cuando más problemas de este tipo aparecen, pudiéndose cubrir con arena o escollera. A finales de 1990 las piezas de geotextil rellenas de arena se recubrían con poliuretano, proporcionando una mejora limitada con considerables repercusiones en los costos.

Figura 4.14: Degradación del geotextil por vandalismo (Fuente: Hornsey et al. 2011)

Debe tenerse en cuenta que cuanto más grandes sean las piezas más graves son las consecuencias para la estructura, ya que para sacos pequeños, el porcentaje deteriorado en volumen de la estructura es pequeño; mientras que para tubos continuos estos actos hacen irreversible la estructura, o al menos de muy difícil reparación. Esta circunstancia hace que este tipo de piezas no sean especialmente adecuadas para ir al aire y sin protección.

En 2001 se desarrolló un geotextil compuesto, consistente en un geotextil estándar recubierto en la parte exterior de un geotextil de fibra gruesa que permite atrapar la arena sobre el geotextil proporcionando mayor protección contra cortes o punzones. Es importante que la capa externa esté unida correctamente a la capa interna para proporcionar protección al contenedor (Hornsey et al 2011).

4. Degradación del geotextil

Otra causa muy común es la abrasión que produce la arena, los fragmentos de conchas o de coral en un roce continuado con los elementos o piezas de geotextil debido a la acción del agua. Esto puede ser un factor importante para las estructuras situadas en la zona surf, donde el movimiento del agua y de material se produce continuamente y en las estructuras sumergidas.

*Figura 4.15a: Abrasión de un saco de geotextil en la zona de rotura
(Fuente: Hornsey et al. 2011)*

Los ensayos de resistencia a la abrasión de los geotextil fueron descritos por Heerten (2010) y RPG (1994). A su vez, Heibaum (2008) indicó los resultados de

diferentes ensayos de abrasión realizados en el Instituto de Ingeniería Alemán (BAW), de Karlsruhe.

Figura 4.15b: Daños por abrasión tras de 8 años (Oumeraci y Dassanayake 2013)

Hoy en día se dispone de ensayos de resistencia a la abrasión basados en el de Stoll modificado, que se aplican para materiales tejidos. Sin embargo, el ensayo más apropiado para los geotextiles utilizados en aplicaciones costeras, es el ensayo de tambor giratorio, desarrollado en el Instituto Alemán de Investigación en 1994. Este ensayo somete al geotextil junto con una mezcla de agua y grava fina a un oleaje de 80.000 ciclos, midiendo el porcentaje de su resistencia al final. Recomendando para las aplicaciones en la Ingeniería de Costas de los sacos de geotextil rellenos de arena, una resistencia mínima a la abrasión del 70% después de un oleaje de 80.000 ciclos.

La radiación ultra-violeta también degrada al geotextil, motivo por lo que es necesaria la mejora de sus propiedades para incrementar su durabilidad o proteger la pieza de la acción solar. La norma ASTM D4355 define los ensayos a realizar sobre el geotextil, para sus aplicaciones como separación o filtro. A continuación se muestran los resultados de los ensayos de resistencia a la radiación ultra-violeta a largo plazo, realizados sobre sacos de geotextil rellenos de arena utilizados en Australia. Observando la duración a largo plazo, mínima para 500horas y máxima para 2.000horas.

Figura 4.16: Ensayo de resistencia a la radiación ultra-violeta (Hornsey et al. 2011)

4.1.3.2.3. Deformación de la bolsa

Los sacos de geotextil varían de volumen debido a los cambios producidos al estar en tensión; produciéndose alargamientos de la pieza que pueden oscilar entre el 6% y el 30% dependiendo del tipo de geotextil usado (PIANC 2011), pudiendo en ocasiones alcanzar hasta el 50%. Este efecto lleva a cargar en ocasiones los sacos con el 120% de su capacidad (Dassanayake y Oumeraci 2013).

Debe tenerse en cuenta que esta deformación de la pieza no produzca cambios en las características del geotextil como tensiones, retención de arena, etc. O al menos que sean adaptables dentro del diseño de la estructura y no alterar las características para las que fue diseñada.

4.1.4. Formulaciones para el cálculo de estabilidad de los sacos de geotextil

Tradicionalmente el cálculo de la estabilidad de los sacos de geotextil rellenos de arena utilizaba las fórmulas planteadas para la escollera y se basaban en la fórmula de Hudson (1956), y esta a su vez se basó en la de Iribarren (1948).

Las fórmulas disponibles se basan en el concepto del número de estabilidad y en el equilibrio de fuerzas. Las fuerzas provocadas por el oleaje en la escollera son: la fuerza de rozamiento F_D , la fuerza de elevación F_L y la fuerza de inercia F_M . La fuerza de estabilización es la fuerza gravitacional F_G .

Planteando el equilibrio de fuerzas, se deduce que la suma de las fuerzas de rozamiento y de elevación, divididas entre la fuerza de gravedad, es proporcional a:

$$\frac{F_D + F_L}{F_G} \approx \frac{\rho_w D_n^2 v^2}{g(\rho_s - \rho_w) D_n^3} = \frac{v^2}{g \Delta D_n} \quad (4.13)$$

Siendo:

D_n = la longitud equivalente de un cubo = $\left(\frac{W}{\rho_s}\right)^{1/3}$ [m]

W = es el peso de la escollera [Kg]

ρ_s y ρ_w = densidad de la arena y del agua respectivamente [Kg/m³]

v = velocidad del agua [m/s²]

Sustituyendo $v \approx (gH)^{1/2}$ siendo H la altura de ola H_s y g la aceleración de la gravedad, en la expresión anterior, se obtiene el Número de estabilidad N_s :

$$N_s = \frac{H}{\Delta D_n} \quad (4.14)$$

Siendo:

$$\Delta = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) \quad (4.15)$$

Considerando las propiedades geométricas del equilibrio de fuerzas que actúa sobre los sacos de geotextil rellenos de arena de la siguiente figura y las fuerzas provocadas por el oleaje Hudson (1956), propuso la siguiente fórmula:

$$N_s = \frac{H}{\Delta D_n} = (K \cdot \cot \alpha)^{1/3} \quad (4.16)$$

Dónde:

α = ángulo de la pendiente del revestimiento [°]

K = coeficiente de estabilidad obtenido experimentalmente [-]

Figura 4.17: Fuerzas sobre la escollera en un revestimiento (Hudson 1956)

El peso medio de cada pieza utilizada (escollera, bloques, etc.) se obtiene de la siguiente expresión:

$$W_{50} = \frac{\rho_s g H^3}{K \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)^3 \cot \alpha} \quad (4.17)$$

Dónde:

K = parámetro empírico que depende de la rugosidad, la forma y la superficie de contacto de cada material utilizado (escollera, piedra, etc...).

Para determinar el tipo de saco, altura de ola que resiste, etc., se han desarrollado un número determinado de fórmulas que son de aplicación para una estructura específica. Las formulaciones más usuales son las correspondientes a los autores:

1. Pilarczyk (1996)
2. Wouters (1998)
3. Oumeraci et al (2002)
4. Recio (2007) y Recio y Oumeraci (2010)
5. Mori (2008) y Mori et al (2008)
6. Dassanayake y Oumeraci (2012)

Además de estas formulaciones, algunos autores como Coghlan et al. (2009) presentaron, un método de diseño sobre la estabilidad de los sacos de geotextil, basada en los resultados de una serie ensayos, resumidos en gráficas.

A continuación se presenta cada una de estas fórmulas que sirven para diseñar las piezas de sacos de geotextil que formarán las estructuras de defensa de la costa. Se incluye cuando el autor o autores presentan las limitaciones a estas formulaciones. Como en algunos casos no están incluidas estas limitaciones, más tarde se determinarán para todas ellas.

4.1.4.1. **Fórmula de Pilarczyk (1996)**

Definida para el cálculo y diseño de los sacos rellenos de arena o mortero con una relación ancho/ largo no mayor de 1 a 3 y una proporción de llenado mayor del 70%. Se puede aplicar la siguiente expresión, válida para $\xi \leq 3$ y se tomará $\xi = 3$ siempre que $\xi \geq 3$:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = c \cos \alpha \cdot \xi^{-1/2} \quad (4.18)$$

Dónde:

H_s = Altura de ola significativa [m]

Δ = Densidad relativa de los sacos $= (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$ [-]

ρ_s = Densidad delabolsa (2.000 Kg/m³ para arena y 2.300 Kg/m³ para mortero)

ρ_w = Densidad del agua [Kg/m³]

D = Altura media del saco [m]

c = Coeficiente de estabilidad = 2,5 [-]

α = Pendiente de la estructura [°]

ξ = Número de Iribarren $= \frac{\tan \alpha}{(H_s/L_0)^{1/2}}$ [-]

L_0 = Longitud de onda en aguas profundas $= \frac{g \cdot T^2}{2\pi}$ [m]

La altura de ola significativa máxima para la que se determina la fórmula para sacos de hasta 1.5m, sin sobrepasar nunca de 2m.

Figura 4.18: Variables para la fórmula de Pilarzcyk (1996)

4.1.4.2. **Fórmula de Wouters (1998)**

Basándose en la fórmula de Hudson (1956) y en los datos experimentales de Porraz (1979), Tekmarine (1982) y Jacobs & Kobayaski (1983), Wouters propuso la siguiente fórmula de estabilidad considerando el equilibrio de momentos de la fuerza de elevación F_r , la fuerza de rozamiento F_D y la fuerza de gravedad F_G .

$$Ns = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_E}{\rho_w} - 1\right) D} = \frac{C_w}{\sqrt{\xi_0}} \quad (4.19)$$

En vez del peso del material utilizado (escollera, bloques, etc.), utilizó el espesor D de la capa del revestimiento definido por las siguientes expresiones.

$$D = l_c \sin \alpha \quad (4.20)$$

$$l_c = \frac{H_s \sqrt{\xi_0}}{\left(\frac{\rho_E}{\rho_w} - 1\right) C_w \sin \alpha} \quad (4.21)$$

Dónde:

H_s = Altura de ola significativa [m]

Δ = Densidad relativa de los sacos $= (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$ [-]

D = Espesor del revestimiento [m]

ξ_0 = Número de Iribarren [-]

α = Pendiente de la estructura [°]

l_c = Longitud del saco [m]

C_w = Parámetro empírico derivado de $Ns = 2,0$ [-]

Figura 4.19: Fuerzas que actúan en un saco de geotextil en un revestimiento (Wouters 1998)

4.1.4.3. Fórmula de Oumeraci et al (2002)

Basándose en ensayos de modelos a gran escala y en la fórmula de Wouters (1998), Oumeraci et al. (2002) presentaron las siguientes fórmulas para estructuras tipo revestimientos con sacos de geotextil rellenos de arena. Diferenciando las fórmulas para los sacos situados en el talud de un revestimiento de las de los sacos situados en la parte superior o cresta del revestimiento.

A – Sacos situados en el talud del revestimiento:

$$N_{s,slope} = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_E}{\rho_w} - 1\right) D} < \frac{C_w}{\sqrt{\xi_0}} \quad (4.22)$$

$$D = l_c \sin \alpha \quad (4.23)$$

$$l_c = \frac{H_s^{\frac{3}{4}} \sqrt{T}}{\left(\frac{\rho_E}{\rho_w} - 1\right) C_w \left(\frac{2\pi}{g}\right) \sqrt{\frac{\sin(2\alpha)}{2}}} \quad (4.24)$$

B – Sacos situados en la parte superior o cresta del revestimiento:

$$N_{s,crest} = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_E}{\rho_w} - 1\right) D} < 0,79 + 0,09 \frac{R_c}{H_s} \quad (4.25)$$

$$D = l_c \sin \alpha \quad (4.26)$$

$$l_c = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_E}{\rho_w} - 1\right) \left(0,79 + 0,09 \frac{R_c}{H_s}\right) \sin \alpha} \quad (4.27)$$

Dónde:

N_s = Número de estabilidad [-]

H_s = Altura de ola significativa [m]

ρ_E = Densidad del saco de geotextil [Kg/m^3]

ρ_w = Densidad del agua [Kg/m^3]

D = Anchura de la capa de sacos [m]

ξ_0 = Número de Iribarren = $\frac{\tan \alpha}{(H_s/L_0)^{1/2}}$ [-]

α = Pendiente de la estructura [$^\circ$]

R_c = francobordo de la estructura [m]

l_c = Longitud del saco [m]

C_w = Parámetro empírico derivado de N_s [-]

Figura 4.20: Posiciones críticas de los sacos en un revestimiento (Oumeraci et al. 2002)

4.1.4.4. Fórmula de Recio (2007) y Recio & Oumeraci (2010)

Fue desarrollada por Recio para su tesis doctoral dirigida por Oumeraci, posteriormente ambos mejoraron los trabajos. La fórmula considera dos tipos básicos de fallos en un revestimiento: vuelco y deslizamiento. Sus coeficientes los determinaron realizando diversos ensayos de modelo físico a escala reducida, en el canal de oleaje de la Universidad de Braunschweig, en Alemania.

El tipo de saco que consideran tiene las siguientes relaciones geométricas, que son en función de la longitud del saco l_c los volúmenes y áreas de proyección.

Longitud = l_c

Anchura = $\frac{1}{2} l_c$

Altura = $\frac{1}{5} l_c$

Estas fórmulas determinan la longitud que debe tener un saco para que no se produzca deslizamiento o vuelco, de los sacos.

Sin tener en cuenta la deformación por vuelco:

$$I_c (\text{deslizamiento}) \geq u^2 \frac{(0,5 C_D + 2,5 C_L \mu)}{(\mu \Delta g - C_M \frac{\partial u}{\partial t})} \quad (4.28)$$

Con:

$$\Delta = \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \quad (4.29)$$

Teniendo en cuenta la deformación por deslizamiento y vuelco:

$$I_c (\text{deslizamiento}) \geq u^2 \frac{(0,5 K_{SCD} C_D + 2,5 K_{SCL} C_L \mu)}{(\mu K_{SR} \Delta g - K_{SCM} C_M \frac{\partial u}{\partial t})} \quad (4.30)$$

$$I_c (\text{vuelco}) \geq u^2 \frac{(0,05 K_{OCD} C_D + 1,25 K_{OCL} C_L \mu)}{(0'5 \Delta K_{OR} g - 0'1 K_{OCM} C_M \frac{\partial u}{\partial t})} \quad (4.31)$$

Siendo:

C_D, C_M y C_L = Coeficientes empíricos derivados de las fuerzas de arrastre, inercia y elevación [-].

$K_{SCD}, K_{SCL}, K_{SCM}, K_{SR}, K_{OCD}, K_{OCL}, K_{OCM}, K_{OR}$ = Coeficientes derivados de la fuerzas de arrastre, elevación y de inercia, en la deformación frente al deslizamiento y al vuelco, empíricos [-].

Deformation Factors and Force Coefficients for the Stability Formulae			
GSC-Structure	Sliding	Overturning	Force Coefficients
Single GSC on Sea Bed 	$KS_{CD} = 1.40$ $KS_{CM} = 1.00$ $KS_{CL} = 0.94$ $KS_R = 0.70$	$KO_{CD} = 1.54$ $KO_{CM} = 1.1$ $KO_{CL} = 0.80$ $KO_R = 0.92$	$C_D = -2 \times 10^{-5} Re + 6.81$ with $1.3 \leq C_D \leq 6.5$ $C_M = 0.60$ $C_L = 1 \times 10^{-5} Re - 0.612$ with $0.2 \leq C_L \leq 1.4$
Group of GSCs on Sea Bed (i. e. Scour Protection) 	$KS_{CD} = 1.40$ $KS_{CM} = 1.00$ $KS_{CL} = 0.94$ $KS_R = 0.70$	$KO_{CD} = 1.54$ $KO_{CM} = 1.1$ $KO_{CL} = 0.80$ $KO_R = 0.92$	$C_D = -6 \times 10^{-5} Re + 14.70$ with $4 \leq C_D \leq 11$ $C_M = 0.50$ $C_L = 1 \times 10^{-5} Re - 0.669$ with $0.4 \leq C_L \leq 1.3$
Submerged GSC-Breakwaters (Artificial Reef) 	$KS_{CD} = 1.40$ $KS_{CM} = 1.00$ $KS_{CL} = 0.94$ $KS_R = 0.70$	$KO_{CD} = 1.54$ $KO_{CM} = 1.1$ $KO_{CL} = 0.80$ $KO_R = 0.92$	$C_D = -9 \times 10^{-5} Re + 23.04$ with $4 \leq C_D \leq 15$ $C_M = 0.30$ $C_L = 1 \times 10^{-5} Re - 0.587$ with $0.3 \leq C_L \leq 1.2$
GSC- Revetments (CREST GSC) 	$KS_{CD} = 1.40$ $KS_{CM} = 1.00$ $KS_{CL} = 0.94$ $KS_R = 0.70$	$KO_{CD} = 1.54$ $KO_{CM} = 1.1$ $KO_{CL} = 0.80$ $KO_R = 0.92$	$C_D = -2 \times 10^{-5} Re + 6.81$ with $1.3 \leq C_D \leq 6.5$ $C_M = 0.60$ $C_L = 1 \times 10^{-5} Re - 0.612$ with $0.2 \leq C_L \leq 1.4$
GSC- Revetments (SLOPE GSC) 	$KS_{CD} = 1.40$ $KS_{CM} = 1.00$ $KS_{CL} = 0.94$ $KS_R = 1.60$	Not applicable (GSC pulled out seaward)	$C_D = -3 \times 10^{-5} Re + 8.9$ with $2.5 \leq C_D \leq 9$ $C_M = 0.30$ $C_L = 1 \times 10^{-5} Re - 0.587$ with $0.3 \leq C_L \leq 1.2$

Figura 4.21: Coeficientes de deslizamiento y vuelco (Recio 2007)

4.1.4.5. Fórmula de Mori (2008) y Mori et al (2008)

Está basada en la fórmula de Oumeraci (2003), utilizando para ello datos experimentales y aplicado a estructuras sumergidas, teniendo en cuenta que la fórmula original era para revestimientos.

$$N_s = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_E}{\rho_w} - 1\right) D} < \frac{C_w}{\sqrt{\xi_0}} \quad (4.32)$$

Siendo:

N_s = Número de estabilidad [-]
 H_s = Altura de ola significativa [m]
 ρ_E = Densidad delabolsa de geotextil [Kg/m³]
 ρ_w = Densidad del agua [Kg/m³]

D = Anchura de la capa de los sacos [m]

ξ_0 = Número de Iribarren = $\frac{\tan \alpha}{(H_S/L_O)^{1/2}}$ [-]

C_w = Parámetro empírico derivado del número de estabilidad N_s [-]

Teniendo en cuenta los resultados experimentales, la fórmula parece ser aplicable a un valor del Número de Iribarren, ξ_0 , comprendido entre 1,5 y 4. Sin embargo, cuando el Número de Iribarren es inferior a 1,5 la fórmula de estabilidad de Mori (2008) no es válida.

El talud de la pendiente en la estructura sumergida considerada fue de 1:2.

4.1.4.6. Fórmula de Dassanayake y Oumeraci (2013)

Con el objeto de mejorar la fórmula de estabilidad para sacos de geotextil que constituyen una estructura sumergida, desarrollaron una nueva en la universidad de Braunschweig definiendo las curvas de estabilidad de las figuras que se muestran a continuación.

$$N_s \sqrt{\xi_0} = A \left(\frac{R_c}{H} \cdot \frac{1}{\xi_0} \right)^2 + B \left(\frac{R_c}{H} \cdot \frac{1}{\xi_0} \right) + C \quad (4.33)$$

Siendo:

N_s = Número de estabilidad [-]

H = Altura de ola, H_m para un oleaje regular y $H_{2\%}$ para un oleaje irregular [m]

H_m = Altura de ola incidente para un oleaje regular a una profundidad media (en la parte superior del talud) [m]

$H_{2\%}$ = Altura media del 2% de las mayores alturas de ola incidentes en una serie (media de las 20 alturas más altas en un oleaje con 1.000 olas considerando una distribución Rayleigh en la que $H_{2\%} = 1.4 H_s$ [m]

R_c = Francobordo [m]

L_o = Longitud de onda en aguas profundas = $g T^2 / 2\pi$ [m]

ρ_s = Densidad del saco de geotextil [Kg/m³]

ρ_w = Densidad del agua [Kg/m³]

ξ_0 = Número de Iribarren = $\frac{\tan \alpha}{(H_S/L_O)^{1/2}}$ [-]

α = Pendiente de la estructura [°]

l_c = Longitud del saco [m]

A , B , C = Parámetros empíricos que dependen del tipo de geotextil y del porcentaje de llenado, obtenidos de los ensayos [-]

Figura 4.22: Curva de estabilidad para estructuras sumergidas con sacos de geotextil no tejido y rellenos al 80% (Oumeraci y Dassanayake 2013)

Figura 4.23: Curva de estabilidad para estructuras sumergidas con sacos de geotextil no tejido y rellenos al 100% (Oumeraci y Dassanayake 2013)

Figura 4.24: Curva de estabilidad para estructuras sumergidas con sacos de geotextil tejido y rellenos al 80% (Oumeraci y Dassanayake 2013)

A su vez introdujeron dos nuevos conceptos importantes para variar y mejorar los resultados del cálculo teórico: A) El concepto de fallo y B) Los efectos de diversas características de la estructura.

Figura 4.25: Estructura ensayada por Dassanayake y Oumeraci (2013)

A) Concepto de fallo: Se considera cinco escalones, a saber:

- 1° **No hay fallo:** Menos del 10% de los sacos se han movido; pero ninguno se ha salido de la estructura
- 2° **Fallo incipiente:** Entre el 10 y 50% de los sacos se han movido; pero solamente se han salido de la estructura menos del 5%
- 3° **Fallos menores:** Más del 50% de los sacos se han movido; pero solamente entre el 5 y 20% se han salido de la estructura
- 4° **Fallos medios:** Entre el 20 y 40% de los sacos de la estructura se han salido de ella
- 5° **Fallo total:** Más del 40% de los sacos se han salido de la estructura

B) Efectos de diversas características:

Se consideran las siguientes características, tomando como bolsa tipo el relleno al 80% de la estructura:

1. Francobordo
2. Llenado del saco
3. Tipo de geotextil
4. Ángulo de inclinación de la pieza en la estructura

- 1- **Francobordo:** En la gráfica siguiente se muestra la variación que tiene el número de estabilidad cuando varía el francobordo modificado que viene dado por:

$$R^* = (R_c/H_s) / \xi_0 \quad (4.34)$$

Figura 4.26: Efecto del franco bordo sobre el número de estabilidad de la estructura de sacos rellenos de arena al 80% (Dassanayake y Oumeraci 2013)

A medida que el francobordo va reduciéndose, por debajo de cero, el número de estabilidad crece. Por lo que los resultados de estos autores se pueden aplicar a estructuras de baja cota realizadas con sacos de geotextil rellenos de arena.

2- **Llenado del saco:** Consideran dos grados de llenado de los sacos; uno al 80% y otro al 100%, con un franco bordo $R_c = 0$. El resultado se muestra en la gráfica siguiente.

Figura 4.27: Efecto del grado de llenado del saco de arena de geotextil, 80 o 100%, en el número de estabilidad de la estructura (Dassanayake y Oumeraci 2013)

Como puede apreciarse; la estructura con sacos llenos el 100% pueden tener un número de estabilidad el 36% más alto que si se hubiera hecho con sacos llenos al 80%. Por tanto las estructuras realizadas con sacos de geotextil rellenos de arena al 100% son más estables.

3- **Tipo de geotextil:** Estudiaron básicamente dos tipos de geotextil para la realización de los sacos: Los tejidos (“woven”) y los no tejidos (“non-woven”). La comparación de ensayos con uno y con otro se muestra en la gráfica siguiente.

Los resultados, teniendo en cuenta que el geotextil no tejido tenía un ángulo de fricción de $22,64^\circ$, mientras que el del tejido era de $13,33^\circ$, muestran cómo puede

alcanzar un 40% más el número de estabilidad si se utiliza geotextil no tejido que si se usa tejido, favoreciendo la estabilidad de la estructura frente al oleaje.

Figura 4.28: Efecto del tipo de geotextil del saco de arena de geotextil, llenado al 80, en el número de estabilidad de la estructura, en continuo no tejido y en trazos tejido (Dassanayake y Oumeraci 2013)

4- **Ángulo de inclinación de la pieza en la estructura:** Como se aprecia en la siguiente figura se indica que son más estables las estructuras en las que los sacos están inclinados 15° respecto a la horizontal que las estructuras compuestas por sacos colocados horizontalmente.

Figura 4.29: Efecto del ángulo de inclinación del saco de arena de geotextil, horizontal y a 15° , llenado al 80, en el número de estabilidad de la estructura (Dassanayake y Oumeraci 2013)

4.1.4.7. Método de cálculo de Coghlan et al. (2009)

El cálculo de diseño de los sacos, se realiza mediante gráficas obtenidas experimentalmente. Las siguientes figuras representan las curvas para el cálculo de la estabilidad obtenidas como resultado de los ensayos realizados para un oleaje irregular al que se somete a un revestimiento de doble capa, compuesto por sacos de geotextil no-tejido rellenos de arena, para tres tipos de pendientes (1V:1H, 1V:1,5H y 1V:2H) y diferentes periodos de pico. Siendo las dimensiones de los sacos de geotextil utilizados:

$$l_c = 1,6 \text{ m}, b_c = 1,2 \text{ m y } h_c = 0,40 \text{ m (0,75 m}^3\text{)}$$

$$l_c = 2,4 \text{ m}, b_c = 1,8 \text{ m y } h_c = 0,65 \text{ m (2,5 m}^3\text{)}$$

Destacando que estas curvas sólo se pueden aplicar a estructuras compuestas por sacos de geotextil, con análogas características a las de los sacos ELCOROCK, con los que se realizaron los ensayos.

Figura 4.30: Gráfica de estabilidad para sacos de geotextil de 2,5 m³ (Coghlan et al. 2009)

Al comparar los resultados obtenidos por Coghlan et al. (2009) con los de Oumeraci et al. (2003) se detecta que en función de la altura de ola y del período de pico, la estabilidad de los sacos llenos al 80% de su capacidad es mayor en comparación con la estabilidad de los sacos llenos con menor capacidad.

Figura 4.31: Gráfica de estabilidad para sacos de geotextil de 0,75 m³ (Coghlan et al. 2009)

4.1.5. Validez y limitaciones de las formulaciones para sacos de geotextil

Uno de los puntos clave para el uso de las formulaciones anteriores es conocer en qué rango de altura de ola es válida su aplicación. Con ello se conocerá en qué lugares de la costa y del perfil de la playa son aptas éstas, y por tanto su cálculo y diseño.

Aunque algunos autores en sus trabajos claramente indican su limitación respecto a la altura de ola, otros autores no lo hacen, lo que puede dar lugar a confusión y a su uso fuera del rango para el que fueron determinadas.

La variable altura de ola significativa H_s que aparece en las fórmulas indicadas anteriormente, puede acotarse y determinarse para los estados límite superior e inferior. Considerando en las formulaciones las variables que los autores muestran en sus trabajos, siendo éstas:

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

4.1.5.1. Limitaciones de la fórmula de Pilarczyk (1996)

La expresión de la fórmula de Pilarczyk (1996), válida para $\xi \leq 3$, es la siguiente:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = 2,5 \cdot \cos \alpha \cdot \xi^{-1/2} \quad (4.35)$$

Según indicó el propio autor, la altura de ola significativa a la que se someten los sacos de geotextil rellenos de arena debe ser inferior a 1,5m sin sobrepasar nunca los 2m, para garantizar la estabilidad de la estructura diseñada con esta fórmula.

4.1.5.2. Limitaciones de la fórmula de Wouters (1998)

La expresión de la fórmula de Wouters (1998) para revestimientos, como ya se ha indicado anteriormente, es la siguiente:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = \frac{2,0}{\sqrt{\xi_o}} \quad (4.36)$$

El valor máximo que puede alcanzar la altura de ola significativa que garantiza la estabilidad de un revestimiento compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena se determina definiendo los valores máximos de las variables de la expresión:

- Δ = Densidad relativa máxima de los sacos de geotextil [-]

Según Pilarczyk (2000), la densidad relativa de los sacos de geotextil rellenos de arena varía entre 0,9 y 1. Para determinar el valor máximo de la altura de ola significativa, se considera el mayor valor posible de la densidad relativa igual a 1.

- ξ_0 = Número de Iribarren mínimo [-]

En la siguiente figura se aprecia la gráfica que relaciona el cociente $H_s/\Delta D$, con el Número de Iribarren ξ_0 . Esta gráfica se ha obtenido de los diferentes ensayos de estabilidad realizados con sacos de geotextil por diferentes autores, Jacobs & Kobayaski (1983), Tekmarine (1982) y Porraz et al. (1979). A partir de ella y teniendo en cuenta que para obtener el valor máximo de la altura de ola el valor del Número de Iribarren ha de ser el menor posible, se considera el mínimo valor del Número de Iribarren que se aprecia en la gráfica igual a 1.

Figura 4.32: Gráfica de estabilidad obtenida de diferentes ensayos realizados (Pilarczyk 2000)

- α = Pendiente máxima de la estructura [°]

Siendo los valores más comunes correspondientes a los taludes de una playa de 1:2 ó 1:3 y por ser la pendiente de la estructura igual a la pendiente de la playa en la que se sitúa, se considera una estructura de talud 1:3 o lo que es lo mismo una estructura con pendiente de valor 18,4°.

- D = Ancho máximo de la capa de los sacos = $l_c \cdot \sin \alpha$ [m]

La longitud máxima de los sacos se obtiene de la expresión de Recio y Oumeraci (2008), en la que se ha considerado el mayor volumen admisible de los sacos de geotextil, de 5m³.

$$V = \frac{l_c^3}{10} \quad (4.2)$$

Por lo que:

$$l_c = \sqrt[3]{10 \cdot V} = \sqrt[3]{10 \cdot 5} = 3,68 \text{ m}$$

Siendo el ancho máximo de la capa de los sacos:

$$D = 3,68 \cdot \sin 18,4^\circ = 1,16 \text{ m}$$

Con lo que el valor máximo de la altura de ola significativa, a la que se puede someter a un revestimiento compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena, que garantiza la estabilidad de la estructura será:

$$H_s = \frac{2,0 \cdot \Delta D}{\sqrt{\xi_o}} = \frac{2,0 \cdot 1 \cdot 1,16}{1} = 2,32 \text{ m}$$

El valor mínimo que puede alcanzar la altura de ola significativa que garantiza la estabilidad de un revestimiento compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena se determina definiendo los valores mínimos de las variables de la expresión:

- Δ = Densidad relativa mínima de los sacos de geotextil [-]

Según Pilarczyk (2000), la densidad relativa de los sacos de geotextil rellenos de arena varía entre 0,9 y 1. Por ser el valor mínimo de la densidad relativa a determinar, se considera el valor menor posible de la densidad relativa igual a 0,9.

- ξ_0 = Número de Iribarren máximo [-]

Al determinar el valor mínimo de la altura de ola significativa, el Número de Iribarren ha de ser el mayor posible. De la gráfica de la figura anterior (4.22), se considera el valor mayor del Número de Iribarren igual a 11.

- α = Pendiente mínima de la estructura [°]

Siendo los valores más comunes correspondientes a los taludes de una playa de 1:2 ó 1:3 y por ser la pendiente de la estructura igual a la pendiente de la playa en la que se sitúa, se considera una estructura de talud 1:3 o lo que es análogo una estructura con pendiente de valor 18,4°.

- D = Ancho mínimo de la capa de los sacos = $l_c \cdot \text{sen} \alpha$ [m]

La longitud mínima de los sacos se obtiene de la expresión de Recio y Oumeraci (2008), en la que se ha considerado el menor volumen admisible para los sacos de geotextil de 0,05m³.

Por lo que:

$$l_c = \sqrt[3]{10 \cdot V} = \sqrt[3]{10 \cdot 0,05} = 0,79 \text{ m}$$

Siendo el ancho mínimo de la capa de los sacos:

$$D = 0,79 \cdot \text{sen } 18,4^\circ = 0,25 \text{ m}$$

Con lo que el valor mínimo de la altura de ola significativa que resisten los sacos será:

$$H_s = \frac{2,0 \cdot \Delta D}{\sqrt{\xi_0}} = \frac{2,0 \cdot 0,9 \cdot 0,25}{\sqrt{11}} = 0,13 \text{ m}$$

Por lo tanto, los valores límites de la altura de ola significativa a la que puede someterse un revestimiento compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena, que garantiza su estabilidad según la formulación de Wouters (1998), serán:

$$0,13 \text{ m} \leq H_S \leq 2,32 \text{ m}$$

4.1.5.3. Limitaciones de la fórmula de Oumeraci et al. (2002, 2003)

La expresión de la fórmula de Oumeraci et al. (2002, 2003) para los sacos de geotextil situados en el talud de un revestimiento, como ya se ha indicado anteriormente, es la siguiente:

$$\frac{H_S}{\Delta D} = \frac{2,8}{\sqrt{\xi_0}} \quad (4.37)$$

El valor máximo que puede alcanzar la altura de ola significativa que garantiza la estabilidad de los sacos de geotextil rellenos de arena situados en el talud de un revestimiento según la fórmula de Oumeraci et al. (2002, 2003) se determina definiendo los valores máximos de las variables de la expresión:

- Δ = Densidad relativa máxima de los sacos de geotextil [-]

Según Pilarczyk (2000), la densidad relativa de los sacos de geotextil rellenos de arena varía entre 0,9 y 1. Por ser el valor máximo de la densidad relativa a determinar, se considera el mayor valor de la densidad relativa igual a 1.

- ξ_0 = Número de Iribarren mínimo [-]

Al determinar el valor máximo de la altura de ola, el Número de Iribarren ha de ser el menor posible. De la gráfica de la figura anterior (4.21) se considera el valor mínimo del Número de Iribarren igual a 1.

- α = Pendiente máxima de la estructura [°]

Siendo los valores más comunes correspondientes a los taludes de una playa de 1:2 ó 1:3 y por ser la pendiente de la estructura igual a la pendiente de la playa en la que

se sitúa, se considera una estructura de talud 1:3 o lo que es lo mismo una estructura con pendiente de valor 18,4°.

- $D = \text{Ancho máximo de la capa de los sacos} = l_c \cdot \text{sen} \alpha \text{ [m]}$

La longitud máxima de los sacos se obtiene de la expresión de Recio y Oumeraci (2008), en la que se ha considerado el mayor volumen admisible de los sacos de geotextil, de 5m³.

$$V = \frac{l_c^3}{10} \quad (4.2)$$

Por lo que:

$$l_c = \sqrt[3]{10 \cdot V} = \sqrt[3]{10 \cdot 5} = 3,68 \text{ m}$$

Siendo el ancho máximo de la capa de los sacos:

$$D = 3,68 \cdot \text{sen } 18,4^\circ = 1,16 \text{ m}$$

Con lo que el valor máximo de la altura de ola significativa que resisten los sacos será:

$$H_s = \frac{2,8 \cdot \Delta D}{\sqrt{\xi_0}} = \frac{2,8 \cdot 1 \cdot 1,16}{1} = 3,25 \text{ m}$$

El valor mínimo que puede alcanzar la altura de ola significativa que garantiza la estabilidad de los sacos de geotextil rellenos de arena situados en el talud de un revestimiento se determina definiendo los valores mínimos de las variables de la expresión:

- $\Delta = \text{Densidad relativa mínima de los sacos de geotextil [-]}$

Según Pilarczyk (2000), la densidad relativa de los sacos de geotextil rellenos de arena varía entre 0,9 y 1. Por ser el valor máximo a determinar, se considera el mayor valor posible de la densidad relativa igual a 1.

- ξ_0 = Número de Iribarren máximo [-]

Al determinar el valor mínimo de la altura de ola, el Número de Iribarren ha de ser el mayor posible. De la gráfica de la figura anterior 4.21, se considera el valor máximo del Número de Iribarren igual a 11.

- α = Pendiente mínima de la estructura [°]

Siendo los valores más comunes correspondientes a los taludes de una playa de 1:2 ó 1:3 y por ser la pendiente de la estructura igual a la pendiente de la playa en la que se sitúa, se considera una estructura de talud 1:3 o lo que es lo mismo una estructura con pendiente de valor 18,4°.

- D = Ancho mínimo de la capa de los sacos = $l_c \cdot \sin \alpha$ [m]

La longitud mínima de los sacos se obtiene de la expresión de Recio y Oumeraci (2008), en la que se ha considerado el menor volumen admisible de los sacos de geotextil de 0,05m³.

Por lo que:

$$l_c = \sqrt[3]{10 \cdot V} = \sqrt[3]{10 \cdot 0,05} = 0,79 \text{ m}$$

Siendo el ancho mínimo de la capa de los sacos:

$$D = 0,79 \cdot \sin 18,4^\circ = 0,25 \text{ m}$$

Con lo que el valor mínimo de la altura de ola significativa que resisten los sacos será:

$$H_s = \frac{2,8 \cdot \Delta D}{\sqrt{\xi_0}} = \frac{2,8 \cdot 0,9 \cdot 0,25}{\sqrt{11}} = 0,18 \text{ m}$$

Por lo tanto, los valores límites de la altura de ola significativa a la que puede someterse un saco de geotextil situado en el talud de un revestimiento compuesto por

sacos de geotextil rellenos de arena, que garantiza su estabilidad según la formulación de Oumeraci et al (2002, 2003), serán:

$$0,18 \text{ m} \leq H_s \leq 3,25 \text{ m}$$

La expresión de la fórmula de Oumeraci et al. (2002, 2003) para los sacos de geotextil rellenos de arena situados en la parte superior de un revestimiento, como ya se ha indicado anteriormente, es la siguiente:

$$\frac{H_s}{\Delta D} < 0,79 + 0,09 \cdot \frac{R_c}{H_s} \quad (4.38)$$

Despejando la altura de ola significativa, H_s , de la expresión anterior en función del valor del francobordo, R_c , se obtienen las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} (H_s - 0,79 \cdot \Delta D) \cdot H_s &\leq 0,09 R_c \\ R_c &\geq 11,1 (H_s - 0,79 \Delta D) = 11,1 H_s^2 - 8,8 H_s \cdot \Delta D \\ \text{Si } R_c &= 0 \rightarrow H_s = 0 \text{ y } H_s = 0,79 \cdot \Delta D = 0,92 \text{ m} \end{aligned}$$

Para determinar el valor máximo que puede alcanzar la altura de ola significativa que garantiza la estabilidad de una estructura sumergida a poca profundidad compuesta por sacos de geotextil rellenos de arena se ha considerado:

$$0 = 22,2 \cdot H - 8,8 \rightarrow H_s = 0,4 \rightarrow R_c = -1,7 \text{ m y } H_{s \max} = 0,92 \text{ m}$$

Figura 4.33: Representación de la altura de ola en función del francobordo

Por tanto, la altura de ola significativa que garantiza la estabilidad de los sacos de geotextil rellenos de arena situados en la parte superior del talud de un revestimiento, según la formulación de Oumeraci et al. (2002, 2003), estará comprendida entre:

$$0 \text{ m} \leq H_S \leq 0,92 \text{ m}$$

4.1.5.4. Limitaciones de la fórmula de Mori (2008) y Mori et al. (2008)

La expresión de la fórmula de Mori (2008) y Mori et al. (2008), para estructuras sumergidas compuestas por sacos de geotextil rellenos de arena, se basa en la formulación de Oumeraci et al. (2002, 2003) para revestimientos.

$$\frac{H_S}{\Delta D} = \frac{2,8}{\sqrt{\xi_0}} \quad (4.37)$$

El valor máximo que puede alcanzar la altura de ola significativa que garantiza la estabilidad de un revestimiento compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena según la fórmula de Mori (2008) y Mori et al. (2008) se determina definiendo los valores máximos de las variables de la expresión anterior.

- Δ = Densidad relativa máxima de los sacos de geotextil [-]

Según Pilarczyk (2000), la densidad relativa de los sacos de geotextil rellenos de arena varía entre 0,9 y 1. Por ser el valor máximo de la densidad relativa a determinar, se considera el mayor valor de la densidad relativa igual a 1.

- ξ_0 = Número de Iribarren mínimo [-]

Al determinar el valor máximo de la altura de ola, el Número de Iribarren ha de ser el menor posible. De la gráfica de la figura 4.21, se considera el valor mínimo del Número de Iribarren igual a 1.

- α = Pendiente máxima de la estructura [°]

Siendo los valores más comunes correspondientes a los taludes de una playa de 1:2 ó 1:3 y por ser la pendiente de la estructura igual a la pendiente de la playa en la que

se sitúa, se considera una estructura de talud 1:3 o lo que es lo mismo una estructura con pendiente de valor 18,4°.

- $D = \text{Ancho máximo de la capa de los sacos} = l_c \cdot \text{sen} \alpha \text{ [m]}$

La longitud máxima de los sacos se obtiene de la expresión de Recio y Oumeraci (2008), en la que se ha considerado el mayor volumen admisible de los sacos de geotextil, de 5m^3 .

$$V = \frac{l_c^3}{10} \quad (4.2)$$

Por lo que:

$$l_c = \sqrt[3]{10 \cdot V} = \sqrt[3]{10 \cdot 5} = 3,68 \text{ m}$$

Siendo el ancho máximo de la capa de los sacos:

$$D = 3,68 \cdot \text{sen } 18,4^\circ = 1,16 \text{ m}$$

Con lo que el valor máximo de la altura de ola significativa que resisten los sacos será:

$$H_s = \frac{2,8 \cdot \Delta D}{\sqrt{\xi_0}} = \frac{2,8 \cdot 1 \cdot 1,16}{1} = 3,25 \text{ m}$$

El valor mínimo que puede alcanzar la altura de ola significativa que garantiza la estabilidad de un revestimiento compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena se determina definiendo los valores mínimos de las variables de la expresión:

- $\Delta = \text{Densidad relativa mínima de los sacos de geotextil [-]}$

Según Pilarczyk (2000), la densidad relativa de los sacos de geotextil rellenos de arena varía entre 0,9 y 1. Por ser el valor mínimo a determinar, se considera el menor valor posible de la densidad relativa igual a 0,9.

- ξ_0 = Número de Iribarren máximo [-]

Al determinar el valor mínimo de la altura de ola, el Número de Iribarren ha de ser el mayor posible. De la gráfica de la figura anterior 4.21, se considera el valor máximo del Número de Iribarren igual a 11.

- α = Pendiente mínima de la estructura [°]

Siendo los valores más comunes correspondientes a los taludes de una playa de 1:2 ó 1:3 y por ser la pendiente de la estructura igual a la pendiente de la playa en la que se sitúa, se considera una estructura de talud 1:3 o lo que es lo mismo una estructura con pendiente de valor 18,4°.

- D = Ancho mínimo de la capa de los sacos = $l_c \cdot \sin \alpha$ [m]

La longitud mínima de los sacos se obtiene de la expresión de Recio y Oumeraci (2008), en la que se ha considerado el menor volumen admisible de los sacos de geotextil de 0,05m³.

Por lo que:

$$l_c = \sqrt[3]{10 \cdot V} = \sqrt[3]{10 \cdot 0,05} = 0,79 \text{ m}$$

Siendo el ancho mínimo de la capa de los sacos:

$$D = 0,79 \cdot \sin 18,4^\circ = 0,25 \text{ m}$$

Con lo que el valor mínimo de la altura de ola significativa que resisten los sacos será:

$$H_s = \frac{2,8 \cdot \Delta D}{\sqrt{\xi_0}} = \frac{2,8 \cdot 0,9 \cdot 0,25}{\sqrt{11}} = 0,18 \text{ m}$$

Por lo tanto, los valores límites de la altura de ola significativa a la que puede someterse un estructura sumergida compuesta por sacos de geotextil rellenos de arena, que garantiza su estabilidad según la formulación de Mori (2008) y Mori et al. (2008), serán:

$$0,18 \text{ m} \leq H_s \leq 3,25 \text{ m}$$

Debe tenerse en cuenta que en la aplicación de ésta fórmula no se ha considerado el francobordo de la estructura, ni su altura, que son fundamentales para conocer las solicitaciones sobre ella.

A demás se supone que la horquilla de altura de ola es la que impacta sobre la estructura y, por tanto, debiera determinarse por la teoría de ondas, la altura H_o que sobrepasa la estructura y que produce el impacto en el dique sumergido.

En cualquier caso, tomando la limitación de H'_o como H_o se estaría del lado de la seguridad.

Figura 4.34: Estructura sumergida compuesta con sacos de geotextil

4.1.5.5. Limitaciones de la fórmula de Dassanayake y Oumeraci (2013)

La nueva fórmula de estabilidad desarrollada por Dassanayake y Oumeraci (2013) para estructuras sumergidas, es la siguiente:

$$Ns\sqrt{\xi_0} = A \left(\frac{R_C}{H} \cdot \frac{1}{\xi_0} \right)^2 + B \left(\frac{R_C}{H} \cdot \frac{1}{\xi_0} \right) + C \quad (4.33)$$

Dónde:

A, B y C: Parámetros empíricos obtenidos de los ensayos [-]

Según se indica en los trabajos realizados en la Universidad de Braunschweig por los autores citados, el rango de validez de los parámetros de esta nueva fórmula de estabilidad y los valores de sus parámetros empíricos son los siguientes:

Parámetro	Rango de validez
Francobordo relativo: $R^* = R_c/H_m$	$-2 \leq R^* \leq 1,2$
Proporción de llenado: FR	$80\% \leq FR \leq 100\%$
Ángulo de rozamiento: ϕ	Tejidos: $13,33^\circ$ ($\tan \phi = 0,237$) No-tejidos $22,62^\circ$ ($\tan = 0,417$)
Pendiente de la estructura: α	1:1
Profundidad relativa en el pie: d/L_o y H_m/d	$0,01 \leq d/L_o \leq 0,04$ y $0,125 \leq H_m/d \leq 0,8$
Ancho superior de la estructura:	$2 \cdot l_c$, siendo la longitud del saco

Tabla 4.1: Validez de los parámetros de la fórmula de Oumeraci y Dassanayake (2013)

Parámetros empíricos	A	B	C
Sacos de geotextil no-tejido y rellenos al 80%	20	3,0	2,4
Sacos de geotextil no-tejidos y rellenos al 100%	30	0,5	3,6
Sacos de geotextil tejidos y rellenos al 80%	20	0,6	1,3

Tabla 4.2: Parámetros empíricos de la fórmula de Oumeraci y Dassanayake (2013)

Para determinar las limitaciones de la altura de ola significativa de esta nueva fórmula de estabilidad, se consideran las proporciones geométricas de los sacos de geotextil utilizados en el modelo del ensayo a escala reducida: 10:5:1.

Teniendo en cuenta el máximo volumen de los sacos de geotextil que se puede presentar en la realidad es de $5m^3$. Y conociendo la longitud de los sacos de geotextil del modelo a escala reducida: 0,14m.

Volumen de un saco de geotextil relleno en el modelo: $V_m = a \cdot 0,5a \cdot 0,1^a = 0,05 a^3$

Volumen de un saco de geotextil en la realidad: $V_r = 5 \text{ m}^3$

$$V_m = V_r \rightarrow 0,05 a^3 = 5; a_r = 4,6\text{m}$$

Factor de escala: $\lambda = \frac{V_m}{V_r} = \frac{a_m}{a_r} = \frac{0,14}{4,6} = 0.03$ y Escala: $E = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0.03} = 33$

Y dado que los límites de las alturas de ola, en el ensayo a escala reducida fueron:

- Para sacos no tejidos rellenos al 80%: $0,05 \leq H_s \leq 0,24$
- Para sacos no tejidos rellenos al 100%: $0,04 \leq H_s \leq 0,11$
- Para sacos tejidos y no tejidos rellenos al 80%: $0,07 \leq H_s \leq 0,16$

Los valores límite de la altura de ola significativa, para los cuales una estructura sumergida compuesta por sacos de geotextil rellenos de arena es estable, según la nueva fórmula de estabilidad desarrollada por Dassanayake y Oumeraci (2013) serán:

- Para sacos no tejidos rellenos al 80%: $1,65 \leq H_s \leq 7,92$
- Para sacos no tejidos rellenos al 100%: $1,32 \leq H_s \leq 3,63$
- Para sacos tejidos y no tejidos rellenos al 80%: $2,31 \leq H_s \leq 5,28$

Por lo tanto, el rango de validez de la altura de ola significativa a la que puede someterse una estructura sumergida, compuesta por sacos de geotextil rellenos de arena, que garantiza su estabilidad según esta nueva fórmula, será el mayor posible:

Para sacos no tejidos rellenos al 80%: $1,65 \leq H_s \leq 7,92$

4.1.5.6. Limitaciones del método de cálculo de Coghlan et al. (2009)

Como se aprecia en las gráficas propuestas por el equipo de Coghlan (2009), las limitaciones de los valores de la altura de ola significativa que garantizan la estabilidad de un revestimiento de doble capa formado por sacos de geotextil ELCOROCK rellenos de arena, en función del período de pico, de la pendiente del revestimiento y del volumen de los sacos, son las siguientes:

- Sacos de geotextil ELCOROCK con un volumen de $0,75\text{m}^3$:

	Tp = 5s	Tp = 10s	Tp=15s
1V:1,5H	Hs $\leq 1,5\text{m}$	Hs $\leq 1,3\text{m}$	Hs $\leq 1,1\text{m}$
1V:1H	Hs $\leq 1,7\text{m}$	Hs $\leq 1,5\text{m}$	Hs $\leq 1,3\text{m}$
1V:2H	Hs $\leq 1,3\text{m}$	Hs $\leq 1,1\text{m}$	Hs $\leq 0,9\text{m}$

Tabla 4.3: Limitaciones de altura de ola para sacos ELCOROCK ($0,75\text{m}^3$)

- Sacos de geotextil ELCOROCK con un volumen de $2,5\text{m}^3$:

	Tp = 5s	Tp = 10s	Tp=15s
1V:1,5H	Hs $\leq 2\text{m}$	Hs $\leq 1,75\text{m}$	Hs $\leq 1,5\text{m}$
1V:1H	Hs $\leq 2,3\text{m}$	Hs $\leq 2\text{m}$	Hs $\leq 1,75\text{m}$
1V:2H	Hs $\leq 1,75\text{m}$	Hs $\leq 1,5\text{m}$	Hs $\leq 1,2\text{m}$

Tabla 4.4: Limitaciones de altura de ola para sacos ELCOROCK ($2,5\text{m}^3$)

De ambas tablas se deduce que los mayores valores de la altura de ola significativa, para los que un revestimiento con doble capa de sacos de geotextil ELCOROCK es estable, se obtienen con una pendiente 1V:1H e independientemente de su volumen. Por lo que para estar del lado de la seguridad consideraremos dicha pendiente, al alcanzarse las alturas de ola más desfavorables para la estabilidad del revestimiento.

4.1.6. Resumen de las limitaciones en formulaciones con sacos de geotextil

A modo de resumen de los apartados anteriores a continuación se indica en la siguiente tabla las limitaciones de la altura de ola significativa en las formulaciones relativas a la estabilidad de la estructura para los diferentes autores.

Autor	Tipo de estructura	Limitación
Pilarczyk (1996)	Revestimientos	$H_s \leq 2,0 \text{ m}$
Wouters (1998)	Revestimientos	$0,13 \text{ m} \leq H_s \leq 2,32 \text{ m}$
Oumeraci et al (2002, 2003)	Revestimientos (talud)	$0,18 \text{ m} \leq H_s \leq 3,25 \text{ m}$
	Revestimientos (cresta)	$0 \text{ m} \leq H_s \leq 0,98 \text{ m}$
Mori (2008) y Mori et al. (2008)	Estructuras sumergidas	$0,18 \text{ m} \leq H_s \leq 3,25 \text{ m}$
Dassanayake y Oumeraci (2013)	Estructuras sumergidas	$1,65 \text{ m} \leq H_s \leq 7,92 \text{ m}$
Coghlanet al. (2009)	Revestimientos doble capa - Sacos ELCOROCK-0,75m ³ Si 1V:1HyTp=5s Si 1V:1H y Tp=10s Si 1V:1H y Tp=15s	$H_s \leq 1,7 \text{ m}$ $H_s \leq 1,5 \text{ m}$ $H_s \leq 1,3 \text{ m}$
	- Sacos ELCOROCK-2,5 m ³ Si 1V:1H y Tp=5s Si 1V:1H y Tp=10s Si 1V:1H y Tp=15s	$H_s \leq 2,3 \text{ m}$ $H_s \leq 2,0 \text{ m}$ $H_s \leq 1,75 \text{ m}$

Tabla 4.5: Limitaciones de las formulaciones para estructuras con sacos de geotextil

En la siguiente tabla se indican las formulaciones de cada uno de los autores, para las diferentes estructuras compuestas por sacos de geotextil y sus limitaciones.

Autor	Fórmula	Limitaciones
Pilarczyk (1996) <u>Revestimientos</u>	$\frac{H_s}{\Delta D} = 2,5 \cdot \cos \alpha \cdot \xi^{-1/2}$	$H_s \leq 2,0\text{m}$
Wouters (1998) <u>Revestimientos</u>	$\frac{H_s}{\Delta D} = \frac{2,0}{\sqrt{\xi_0}}$	$0,1\text{m} \leq H_s \leq 2,0\text{m}$
Oumeraci et al. (2002, 2003) <u>Talud del revestimientos</u> <u>Cresta del revestimiento</u>	$\frac{H_s}{\Delta D} = \frac{2,8}{\sqrt{\xi_0}}$ $\frac{H_s}{\Delta D} < 0,79 + 0,09 \frac{R_c}{H_s}$	$0,18\text{m} \leq H_s \leq 3,25\text{m}$ $0\text{m} \leq H_s \leq 1,0\text{m}$
Mori (2008) y Mori et al. (2008) <u>Estructura sumergida</u>	$\frac{H_s}{\Delta D} = \frac{2,8}{\sqrt{\xi_0}}$	$0,18\text{m} \leq H_s \leq 3,25\text{m}$
Dassanayake y Oumeraci (2013) <u>Estructura sumergida</u>	$N_s \sqrt{\xi_0} = A \left(\frac{R_c}{H} \cdot \frac{1}{\xi_0} \right)^2$ $+ B \left(\frac{R_c}{H} \cdot \frac{1}{\xi_0} \right)$ $+ C$	$1,65\text{m} \leq H_s \leq 7,92\text{m}$
H_s = Altura de ola significativa [m] Δ = Densidad relativa de los sacos = $(\rho_s - \rho_w)/\rho_w$ [-] D = Ancho de la capa de los sacos = $l_c \cdot \sin \alpha$ [m] l_c = Longitud del saco [m] α = Pendiente de la estructura [°] R_c = Francobordo [m] ξ_0 = Número de Iribarren = $\frac{\tan \alpha}{(H_s/L_0)^{1/2}}$ [-]		

Tabla 4.6: Formulaciones y limitaciones de las estructuras compuestas por sacos de geotextil

4.1.7. Estructuras realizadas con sacos de geotextil rellenos de arena

En la actualidad no existen muchas zonas en las que se hayan utilizado estructuras compuestas por sacos de geotextil rellenos de arena. En la mayoría de las ocasiones se han realizado obras con piezas o elementos de geotextil en zonas donde el oleaje que incide sobre las estructuras es pequeño y de poca intensidad. Las estructuras más frecuentes son los revestimientos, seguidos de los espigones, siendo las menos frecuentes los diques exentos y los arrecifes artificiales. Son cada vez más frecuentes los usos de estructuras formados por piezas de geotextil para obras auxiliares; tanto provisionales en fase de construcción como permanentes en núcleos para diques, espigones, etc.

A continuación se muestran algunas obras existentes de estructuras realizadas con sacos de geotextil. Para ello se han clasificado por su tipo, siendo principalmente revestimientos y espigones. Y en función de la duración de su vida útil, permanentes y temporales.

Cada una de las obras se describe siguiendo el siguiente esquema:

- Localización de la obra
- Descripción de la obra: Tipo de estructura
- Clasificación de la obra: Situación respecto al perfil de la playa y de la costa
- Clima marítimo en la zona: Altura de ola máxima esperable sobre la obra
- Resultados y comportamiento

Las obras consideradas en el análisis han sido las siguientes:

➤ *Revestimientos con sacos de geotextil*

- RS1.- Revestimiento -Playa de Jumeirah en Dubai (Emiratos Árabes Unidos)
- RS2.- Revestimiento -Playa de Stockton en Newcastle (Australia)
- RS3.- Revestimiento - Playa de Maroochydore en Queensland (Australia)
- RS4.- Revestimiento - Playa de Kelso en KwaZulu-Natal (Sudáfrica)
- RS5.- Revestimiento - Playa de Amanzimtoti en KwaZulu-Natal (Sudáfrica)

- RS6.- Revestimiento - North beach en KwaZulu-Natal (Sudáfrica)
- RS7.- Revestimiento - Playa de Kelly en Port Alfred (Sudáfrica)

➤ *Espigones con sacos de geotextil*

- ES1.- Espigones - Playa de Maroochydhore en Queensland (Australia)
- ES2.- Espigón - Puerto de Clifton Spring en Victoria (Australia)
- ESE.- Espigones - Playa de Langebaan en el Cabo Occidental (Sudáfrica)

Figura 4.35: Localización de las obras con sacos de geotextil (Fuente: www.googleearth.es)

4.1.7.1. Revestimientos con sacos de geotextil rellenos de arena

R.S.1. Revestimiento– Playa de Jumeirah en Dubai (Emiratos Árabes Unidos)

Localización de la obra

La obra se ubica en la zona norte de la playa de Jumeirah, una de las principales playas de la costa de Dubai, perteneciente a los Emiratos Árabes Unidos.

Figura 4.36: Situación de la playa de Jumeirah (Fuente: www.googleearth.es)

Descripción de la obra

Revestimiento realizado en 2003, compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena, de dimensiones:

- Sacos de 2t (1,5m x 1,10m x 0,40m) situados en el talud
- Sacos de 5t (2,4m x 1,8m x 0,65m) situados en el pie

Figura 4.37: Sección del revestimiento (Fuente: Weerakoon et al. 2003)

Clasificación de la obra

La obra se sitúa en la zona 3 del perfil longitudinal de una playa, por encima de las mareas normales y por debajo de las elevaciones excepcionales, y pertenece a un tipo de costa medianamente protegida, por ubicarse frente al mar entre dos espigones.

*Figura 4.38: Revestimiento – Playa de Jumeirah
(Fuente: Saathoff et al. 2007 y Weerakon et al. 2003)*

Clima marítimo en la zona

Debido a la falta de datos de oleaje que incide en la playa, se determina teóricamente la altura de ola, considerando la longitud del fetch máximo y utilizando la fórmula de Iribarren.

$$H_s = 1,2 \sqrt[4]{F(Km)} = 1,2 \sqrt[4]{864} = 6,5 \text{ m}$$

Resultados y comportamiento

Buen comportamiento durante su vida útil, por su disposición en cascada y por la capa de protección anti vandálica de los sacos, que incrementó su durabilidad. En la actualidad ha sido retirado para la realización de un carril bici en su emplazamiento.

*Figura 4.39: Revestimiento de geotextil en la playa de Jumeirah año 2003
(Fuente: Mocke et al. 2006)*

R.S.2. Revestimiento - Playa de Stockton en Nueva Gales del Sur (Australia)

Localización de la obra

La obra se sitúa en la playa de Stockton, al norte de la desembocadura del río Hunter y frente al club de surf de Nueva Gales del Sur, al sudeste del continente australiano.

Figura 4.40: Situación de la playa de Stockton (Fuente: www.googleearth.es)

Descripción de la obra

Revestimiento de 48m de longitud y 4,5m de altura, compuesto por dos capas de sacos de geotextil no tejido, rellenos de arena, de 2t (1,5 x 1,2m x 0,45m) y con un volumen de $0,75\text{m}^3$.

Figura 4.41: Sección tipo del revestimiento - Playa de Stockton (Fuente: Hornsey et al. 2011)

Clasificación de la obra

El revestimiento se sitúa en la zona 3 del perfil longitudinal de una playa, por encima de las mareas normales y por debajo de las elevaciones excepcionales y en una costa poco protegida.

Figura 4.42: Situación de la obra en la playa de Stockton (Fuente: www.googleearth.es)

Clima marítimo en la zona

Al igual que en el ejemplo anterior, debido a la falta de datos de oleaje, se determina teóricamente la altura de ola considerando la longitud del fetch máximo y aplicando la fórmula de Iribarren.

$$H_s = 1,2^4 \sqrt{F(Km)} = 1,2^4 \sqrt{1.975} = 8 \text{ m}$$

Resultados y comportamiento

A pesar de ser realizada con carácter provisional en 1996, el revestimiento resultó estable durante 14 años. Integrándose con la vegetación y la arena del entorno.

Figura 4.43: Revestimiento - Playa de Stockton en 2009 (Fuente: Wishaw et al. 2011)

R.S.3. Revestimiento–Playa de Maroochydore en Queensland (Australia)

Localización de la obra

La obra se sitúa en la playa ubicada al sur de la desembocadura del río Maroochy, en la ciudad de Maroochydore, al sudeste de Queensland, Australia.

Figura 4.44: Situación de la playa de Maroochydore (Fuente: www.googleearth.es)

Descripción de la obra

Revestimiento realizado en el año 2001, de 200m de longitud y 2,5m de altura, formado por sacos de geotextil no tejido rellenos de arena con un volumen de $0,75 \text{ m}^3$, formando una sola capa, con una pendiente 1V:0,27H.

Figura 4.45: Sección tipo del revestimiento (Fuente: Hornsey et al. 2011)

Clasificación de la obra

El revestimiento se sitúa en la zona 4 del perfil longitudinal de una playa, dentro del rango de marea y con su base sumergida durante parte del ciclo de marea y en un tipo de costa muy protegida.

Figura 4.46: Localización de la obra en el perfil de la playa y en el tipo de costa (Fuente: Hornsey et al. 2011)

Clima marítimo de la zona

Por tratarse de zona una sometida a grandes mareas se ha tomado como caso más desfavorable en pleamar y debido a la falta de datos de oleaje, se ha tenido que determinar teóricamente la altura de ola, considerando la longitud del fetch máximo y aplicando la fórmula de Iribarren.

$$H_s = 1,2\sqrt[4]{F(Km)} = 1,2\sqrt[4]{1,73} = 1,37 \text{ m}$$

Resultados y comportamiento

Se realizó en 2001 como medida de protección urgente frente a la elevada erosión existente en la playa, debido fundamentalmente a la acción del oleaje en pleamar y los temporales de verano, mejorando la situación erosiva.

Figura 4.47: Revestimiento - Playa de Maroochydore (Fuente: www.elcorock.com)

R.S.4. Revestimiento - Playa de Kelso en KwaZulu-Natal (Sudáfrica)

Localización de la obra

El revestimiento se ubica en el talud situado al pie del conjunto hotelero Happy Wanderers, en la playa de Kelso, perteneciente a la provincia de KZN, de Sudáfrica.

Figura 4.48: Localización revestimiento – Playa de Kelso (Fuente: www.googleearth.es)

Descripción de la obra

El revestimiento fue realizado tras un fuerte temporal en 2007. Tiene una longitud de 100m y está compuesto por 7 capas de sacos de geotextil, de $2,76\text{m}^3$, rellenos de arena, Siendo las dimensiones de los sacos de $2,3 \times 2 \times 0,6\text{m}$, dispuestos a soga.

Figura 4.49: Sección del revestimiento – Playa de Kelso

Clasificación de la obra

El revestimiento se sitúa en la zona 3 del perfil longitudinal de la playa, por encima de las mareas normales y por debajo de las elevaciones excepcionales, y el tipo de costa al que pertenece es abierta.

Figura 4.50: Localización en perfil de playa y en tipo de costa (Fuente: www.googleearth.es)

Clima marítimo en la zona

Debido a la falta de datos de oleaje y la dificultad de obtener el fetch máximo en la zona mediante la fórmula de Iribaren, como se puede apreciar en la parte superior izquierda de la figura 4.48. Al pertenecer a un tipo de costa abierta, se puede suponer que pueden alcanzar unas alturas de ola superiores a los cinco metros en aguas profundas.

$$H_s \geq 5 \text{ m}$$

Resultados y comportamiento

El revestimiento resulta estable hasta la actualidad, sin apreciarse averías que impidan su funcionamiento.

Figura 4.51: Revestimiento - Playa de Kelso en marzo de 2008 (Fuente: www.Kaytech.co.za)

R.S.5. Revestimiento -Playa de Amanzimtoti (Sudáfrica)

Localización de la obra

El revestimiento se ubica en la playa de Amanzimtoti, pertenece a la provincia de KwaZulu-Natal, en Sudáfrica.

Figura 4.52: Localización revestimiento - Playa de Amanzimtoti (Fuente: www.googleearth.es)

Descripción de la obra

El revestimiento, se realizó tras un fuerte temporal en 2007. Tiene una longitud de 150m y está compuesto por 7 filas de sacos de geotextil rellenos de arena de dimensiones 2,3 x 2,0 x 0,6 m (2,76 m³), dispuestos a soga.

Figura 4.53: Ejecución del revestimiento – Playa de Amanzimtoti (Fuente: www.Kaytech.co.za)

Clasificación de la obra

Situada en la zona 3 del perfil longitudinal de una playa, por encima de las mareas normales y por debajo de las elevaciones excepcionales, y en un tipo de costa poco protegida.

Figura 4.54: Localización en perfil de playa (Fuente: www.googleearth.es , foto: Frank Horn)

Clima marítimo en la zona

Debido a la falta de datos de oleaje y la dificultad de obtener el fetch máximo en la zona mediante la fórmula de Irribaren, como se puede apreciar en la parte superior izquierda de la figura 4.52. Al pertenecer a un tipo de costa abierta, se puede suponer que pueden alcanzar alturas de ola superiores a los cinco metros en aguas profundas.

$$H_s \geq 5 \text{ m}$$

Resultados y comportamiento

El revestimiento ha resultado estable hasta la fecha y con un buen comportamiento frente a los temporales de la zona, quedando integrado con el entorno.

Figura 4.55: Revestimiento – Playa de Amanzimtoti en julio de 2008
(Fuente: www.Kaytech.co.za)

R.S.6. Revestimiento - North Beach en la Bahía de Jeffrey (Sudáfrica)

Localización de la obra

El revestimiento se ubica en la playa norte de la Bahía de Jeffrey, perteneciente a la región del Cabo Oriental, en Sudáfrica.

Figura 4.56: Localización del revestimiento de la Bahía de Jeffrey
(Fuente: www.googleearth.es)

Descripción de la obra

Revestimiento con longitud de 100m, compuesto por 7 capas de sacos de geotextil rellenos de arena, de dimensiones 2.3 x 2.0 x 0.6 m, (0,76m³), dispuestos a soga.

Figura 4.57: Vista del revestimiento - Bahía de Jeffrey (Fuente: www.Kaytech.co.za)

Clasificación de la obra

Situada en la zona 3 del perfil longitudinal de una playa, por encima de las mareas normales y por debajo de las elevaciones excepcionales, y en un tipo de costa poco protegida.

Figura 4.58: Localización de la obra en el tipo de costa (Fuente: www.googleearth.es)

Clima marítimo en la zona

Debido a la falta de datos de oleaje y la dificultad de obtener el fetch máximo en la zona mediante la fórmula de Iribarren, como se puede apreciar en la parte superior izquierda de la figura 4.52. Al pertenecer a un tipo de costa abierta, se puede suponer que se pueden alcanzar alturas de ola superiores a los cinco metros en aguas profundas.

$$H_s \geq 5 \text{ m}$$

Resultados y comportamiento

El revestimiento resultó estable y con un buen comportamiento integrándose en el entorno, como se puede apreciar en la fotografía del año 2011.

Figura 4.59: Comportamiento revestimiento - Bahía de Jeffrey en 2011 (Fuente: www.Kaytech.co.za)

R.S.7. Revestimiento - Playa de Kelly (Sur África)

Localización de la obra

El revestimiento se ubica en la playa de Kelly, situada en las proximidades del Puerto de Alfred, en Sudáfrica.

Figura 4.60: Localización del revestimiento de la playa de Kelly (Fuente: www.googleearth.es)

Descripción de la obra

Revestimiento compuesto por varias capas de sacos de geotextil rellenos de arena, para proteger el talud del aparcamiento de la erosión.

Figura 4.61: Ejecución del revestimiento de la playa de Kelly (Fuente: www.Kaytech.co.za)

Clasificación de la obra

Situada en la zona 3 del perfil longitudinal de una playa, por encima de las mareas normales y por debajo de las elevaciones excepcionales y en un tipo de costa abierta.

*Figura 4.62: Localización obra en perfil de playa y en tipo de costa
(Fuente: www.googleearth.es)*

Clima marítimo en la zona

Por la falta de datos de oleaje y la magnitud del fetch máximo en la zona, como se puede apreciar en la figura 4.60. Al pertenecer a un tipo de costa abierta, es probable que las alturas de ola puedan alcanzar cinco metros.

$$H \geq 5 \text{ m}$$

Resultados y comportamiento

El revestimiento sin averías apreciables, quedó cubierto por la vegetación de la zona, como puede apreciarse en la figura adjunta.

*Figura 4.63: Comportamiento del revestimiento de la playa de Kelly
(Fuente: www.Kaytech.co.za)*

4.1.7.2. Espigones con sacos de geotextil rellenos de arena

E.S.1. Espigones en la playa de Maroochydore (Australia)

Localización de la obra

La obra se sitúa en la playa de Maroochydore, ubicada en la costa de Sunshine, en el estado de Queensland, al este del continente australiano.

Figura 4.64: Localización de los espigones - Playa de Maroochydore (Fuente: www.googleearth.es)

Descripción de la obra

Compuesta por espigones de 100m de longitud y 2,5m de altura formados por 4 filas de sacos de geotextil no tejido rellenos de arena con un volumen de $2,5 \text{ m}^3$ apilados en forma de pirámide, que alcanzan una altura de 2,5m.

Figura 4.65: Sección de los espigones - Playa de Maroochydore (Hornsey et al 2011)

Clasificación de la obra

El morro de los espigones se sitúa en la zona 5 del perfil longitudinal de una playa, dentro del mar en marea baja y pertenecen a un tipo de costa abierta.

Figura 4.66: Localización en el perfil de la playa (Fuente: www.googleearth.es, foto: Mcoquin)

Clima marítimo en la zona

No se han podido obtener datos de oleaje de la zona donde se ubica la playa, lo que ha obligado a determinar la altura de ola usando formulaciones teóricas aproximadas. Considerando la longitud del fetch máximo y utilizando la fórmula de Iribarren.

$$H = 1,2^4 \sqrt{F(Km)} = 1,2^4 \sqrt{1.400} = 7,3 \text{ m}$$

Resultados y comportamiento

En la obra se aprecia la pérdida de material en los sacos, disminuyendo su resistencia y el desplazamiento de su posición original, dificultando un buen comportamiento. Desconociendo las causas de su deterioro.

Figura 4.67: Comportamiento espigones de la playa de Maroochydyore en 2007 (Fuente: www.googleearth.es, Foto: Geoffre y Garret)

E.S.2. Espigón en Clifton Springs (Australia)

Localización de la obra

La obra se sitúa en el puerto de Clifton Springs, ubicado en la bahía de Port Phillips, en la ciudad de Geelong, perteneciente al estado de Victoria, al sur de Australia.

*Figura 4.68: Localización del espigón del puerto de Clifton Springs
(Fuente: www.googleearth.es)*

Descripción de la obra

Espigón realizado en septiembre de 2004, de 100m de longitud y 2 m de altura, formado por sacos de geotextil de 2,5 m³ de volumen, en el puerto de Clifton Springs, para reducir la transmisión del oleaje, facilitando la entrada de los barcos.

*Figura 4.69: Sección del espigón del puerto de Clifton Springs
(Fuente: www.geofabrics.com.au)*

Clasificación de la obra

El morro del espigón se encuentra en una zona, en la que el oleaje realiza un movimiento de ascenso-descenso, fuera de la zona de rompientes, correspondiente a la zona 6 del perfil longitudinal de una playa. Y según se aprecia en la figura 4.68 el tipo de costa al que pertenece es muy protegida.

Por lo que la obra se sitúa en la zona 6 del perfil longitudinal de una playa y en un tipo de costa muy protegida.

Clima marítimo en la zona

Debido a la falta de datos de oleaje en la playa, se determina teóricamente la altura de ola, considerando la longitud del fetch máximo y utilizando la fórmula del CERC, 1977.

$$H = 0,76 \cdot \sqrt{F} = 0,76 \cdot \sqrt{48} = 5,26 \text{ m}$$

Resultados y comportamiento

En la figura adjunta se aprecia el buen comportamiento de la obra al proporcionar una mayor protección al puerto y una mejora del equipamiento del lugar. Posteriormente, se realizaron dos espigones pequeños para capturar la deriva de arena localizada.

Figura 4.70: Espigón del puerto de Clifton Springs
(Fuente: www.geofabrics.com.au)

E.S.3. Espigones en Langebaan (Sudáfrica)

Localización de la obra

Los espigones se sitúan en la ciudad de Langebaan, en la bahía de Saldanha, a unos 135km de Ciudad del Cabo, en Sudáfrica.

Figura 4.71: Localización del espigón de Langeeban (Fuente: www.googleearth.es)

Descripción de la obra

Son dos espigones tienen una longitud de unos 350m y 250m, respectivamente y un ancho medio en la base de unos 14,4m y están, formados por sacos de geotextil de dimensiones 2,7m x 2,0m x 0,5m y un volumen de 2,5m³.

Figura 4.72: Vista del espigón de la ciudad de Langebaan (Fuente: McClarty et al. 2006)

Clasificación de la obra

El morro de ambos espigones se encuentra en la zona 6 del perfil, donde se alcanza un oleaje desarrollado sin rotura. El tipo de costa al que pertenecen es protegida, como se observa en la figura adjunta, por lo que los oleajes que les pueden llegar son muy locales.

Clima marítimo en la zona

La obra se sitúa en una zona restringida, por lo que no se tienen datos de oleaje. Para determinar la altura de ola aproximada, se ha utilizado la fórmula del CERC, 1977, obteniendo una altura de.

$$H = 0,76\sqrt{F(Km)} = 0,76\sqrt{48} = 2,5 \text{ m}$$

Resultados y comportamiento

El comportamiento estructural de los espigones, según se aprecia con los datos obtenidos y en la siguiente figura, ha sido bueno, sin averías de importancia que destacar.

Figura 4.73: Espigón norte en diciembre de 2004 (Fuente: McClarty et al. 2006)

4.2. ESTRUCTURAS COMPUESTAS DE TUBOS DE GEOTEXTIL

Los tubos de geotextil comenzaron a ser utilizados como estructuras de defensa de costa en la década de 1960. Los primeros tubos se patentaron con la denominación de tubos “Longard”, eran de pequeño diámetro teórico (menos de 2m) y demostraron una utilidad limitada debido a su inestabilidad, especialmente frente a la acción del mar. Utilizaban un geotextil tejido con un forro interior impermeable para presurizar el tubo con agua antes del relleno de arena. El mayor problema de estas estructuras era su estabilidad debido especialmente al vuelco, por lo que su uso fue limitado, terminando por no utilizarse.

Posteriormente durante la década de 1980 se fueron desarrollando nuevos tubos de geotextil de gran diámetro, con geotextiles tejidos y sin forro interior impermeable. La principal ventaja de estos tubos era su gran masa encapsulada, de estructura tubular, diseñada para reducir los problemas de estabilidad que tenían las generaciones anteriores de estructuras compuestas por tubos de geotextil. Además durante esta década también se desarrollaron tubos de pequeño diámetro teórico (menos de 1,5m). Hoy en día los diámetros teóricos de los tubos de geotextil que se utilizan van desde 1m a 10m, con una longitud máxima de 100-200m y se usan en diversas aplicaciones costeras en todo el mundo, siendo las longitudes más frecuentes de unos 20-30m.

4.2.1. Formas y dimensiones de los tubos de geotextil

Los tubos de geotextil se rellenan uniformemente para que tengan una sección circular; pero el peso propio hace que esa sección se transforme en otra ovalada. Por tanto, uno de los primeros aspectos a tener en cuenta a la hora de diseñar una obra de costa con tubos de geotextil es la forma y dimensiones que alcanza al consolidarse. Suponiendo un tubo con sección teórica circular de radio R , al depositarlo en el terreno su forma cambia formando una especie de ovoide que viene definida por: altura del tubo (h), anchura del tubo (b), anchura del contacto ($b-2r$), radio menor del ovoide (r) y altura sobre la anchura máxima del ovoide $a=h-r$, figura 4.74. Por lo que la anchura del tubo pasa de un valor $2R$ a otro b superior, aumentando la superficie de contacto y la anchura horizontal del tubo, habiendo pasado de “ R ” a “ b ”, mientras que la altura se reduce de “ $2R$ ” a “ h ”.

Predecir la forma de un tubo relleno de material de grano grueso es más fácil que de uno relleno de material de grano fino, debido a la sedimentación inmediata y a la efectividad del drenaje libre del material de grano grueso. En el caso de material de grano fino, el proceso de consolidación es más complicado debido a las partículas finas en suspensión no homogéneas, la obstrucción de los huecos del geotextil, y el proceso de llenado por etapas (Oh y Shin 2006).

Figura 4.74: Sección de un tubo de geotextil relleno al 80% y al 100% (CUR 217 2006)4

Los métodos numéricos utilizados para determinar la forma del tubo se basan en el método de Timoshenko (CUR 2006). Este método considera que la tensión de tracción en el geotextil es constante a lo largo de la sección del tubo con la excepción de la longitud que está en contacto con la superficie inferior, que el material no tiene ninguna rigidez de flexión, y que el material de relleno es un líquido. Además en este

método hay que tener en cuenta, que no se desarrollan tensiones de cizallamiento, entre el tubo y la suspensión.

La ecuación diferencial no lineal resultante, utilizada para determinar la forma del tubo no tiene una solución sencilla, por lo que se debe resolver mediante cálculo numérico (Leshchinsky et al. 1996). Debido a su complejidad, se utilizan modelos numéricos como el desarrollado en el software GeoCoPS (Leschinsky 2007) disponible en el mercado. El documento CUR 217 (2006) presenta métodos simplificados para resolver el cálculo de las fuerzas y las formas de los tubos cuyas soluciones son similares a las soluciones obtenidas mediante el software GeoCoPS.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las principales variables de la forma de un tubo para diferentes porcentajes de llenado, siendo R el radio teórico del tubo de llenado al 100%, r el radio de los extremos del ovoide del tubo de ambos lados de la recta de la base del tubo geotextil, b el ancho del tubo de geotextil y h la altura del tubo de geotextil.

Porcentaje llenado (%)	r (m)	b (m)	h (m)
100	1.000R	2.000R	2.000R
95	0.700R	2.279R	1.593R
90	0.584R	2.396R	1.421R
85	0.499R	2.485R	1.287R
80	0.430R	2.561R	1.172R
75	0.371R	2.627R	1.069R
70	0.320R	2.686R	0.976R
65	0.275R	2.740R	0.889R
60	0.235R	2.790R	0.807R

Tabla 4.7: Dimensiones del tubo para diferentes porcentajes de llenado (CUR 217 2006)

El perímetro resultante de la sección de un tubo de geotextil como el de la figura anterior, suponiendo un coeficiente de llenado del 100% y una forma circular, se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$S = (2 \cdot \alpha^2 + \pi - 2) \cdot R + M = 2 \cdot \pi \cdot R \quad (4.34)$$

Siendo:

$$\alpha = \frac{b}{r} \quad (4.35)$$

$$M = \pi \cdot \alpha^2 \cdot r \cdot \frac{\sqrt{1 + \frac{35}{72} \cdot m^2 + \frac{2}{15} \cdot m^4}}{1+m} \quad (4.36)$$

$$m = \frac{a-b}{a+b} = \frac{\alpha-1}{\alpha+1} \quad (4.37)$$

Dónde:

S = perímetro de la sección del tubo [m]

M = semi-perímetro de una elipse [m]

b = semi-eje mayor de una elipse [m]

a = semi-eje menor de la elipse [m]

r = radio de curvatura de la elipse en el eje horizontal [m]

R = el radio teórico del tubo de llenado al 100% [m]

El área de la sección de un tubo de geotextil como el de la figura anterior, suponiendo un porcentaje de llenado de “f” y una forma circular inicial se obtiene igualando la sección teórica a la sección real:

$$A = f \cdot \pi \cdot R^2 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot a^3 \cdot r^2 + 2 \cdot \alpha^2 \cdot r^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \pi - 2\right) \cdot r^2 \quad (4.38)$$

Dónde:

A = área de la sección del tubo de geotextil [m²]

f = porcentaje de llenado en tanto por uno [-]

Las fórmulas necesarias para calcular el ancho y la altura de la sección de un tubo de geotextil con un porcentaje de llenado en función del radio de curvatura vienen dadas por:

$$b = 2 \cdot \alpha^2 \cdot r \quad (4.39)$$

$$h = (1 + \alpha) \cdot r \quad (4.40)$$

Dónde:

b = ancho del tubo de geotextil [m]

h = altura del tubo de geotextil [m]

El diseño de los tubos de geotextil rellenos se basa teóricamente en la tensión superficial de una gota de agua que se encuentra sobre una superficie lisa. Los métodos de cálculo originales fueron desarrollados para diseñar contenedores de membranas para el almacenamiento y transporte de fluidos (Cantre y Saathoff 2011).

La experiencia de campo ha demostrado que es posible rellenar tubos de geotextil al 80% del máximo teórico. El material de dragado utilizado para el relleno de los tubos de geotextil puede ser cualquier material capaz de ser transportado hidráulicamente (Oh y Shin 2006). Si bien, cuando se usan en el ámbito de la ingeniería de costas, el material de relleno debe ser similar y de una calidad semejante a los materiales existentes en la zona, no siendo válidos materiales con características físicas diferentes o con algún grado de contaminación. Solamente se deben utilizar arenas limpias no contaminadas medioambientalmente.

En relación a la estabilidad de los tubos de geotextil, la forma y la deformación juegan un papel significativo. Un tubo con bajo porcentaje de llenado será más resistente a la rodadura y al deslizamiento que un tubo muy relleno, debido a que la superficie de rozamiento es mayor, necesitando una mayor fuerza horizontal debido al oleaje, y debido a un aumento de la distancia entre el punto de giro y el centro de gravedad del tubo.

4.2.2. Consideraciones de los tubos de geotextil

Las principales consideraciones a tener en cuenta a la hora de diseñar obras con tubos de geotextil son:

- El porcentaje de llenado y la deformación
- La tensión del geotextil
- La socavación en el pie
- La permeabilidad

4.2.2.1. El porcentaje de llenado y la deformación

El llenado de los tubos de geotextil se realiza in-situ, de un material compuesto de una mezcla de arena y agua que facilita el llenado realizado mediante bombeo. El material de relleno se bombea hacia el interior del tubo a través de las diversas bocas de llenado separadas unas entre sí a una distancia determinada, a lo largo de la parte superior del tubo. Para poder realizar esta operación se deben utilizar tubos de geotextil de tipo poroso.

Durante el bombeo del material en el interior del tubo, al ser permeable el geotextil, permite que el exceso de agua pase a su través, mientras que el material de relleno retenido alcanza una masa compactada estable dentro del tubo. Para ello se debe tener cuidado con la pérdida de material fino, a través de los poros del geotextil; no debiendo sobrepasar un porcentaje determinado. Con respecto a las aplicaciones en la costa tipo de relleno utilizado es arena (Lawson 2008), cuya granulometría debe estar acorde con las dimensiones de los poros del geotextil para reducir al mínimo las pérdidas de material.

En la siguiente figura se representa una sección genérica de un tubo de geotextil en el que se aprecian las diferentes bocas de llenado a lo largo de la longitud del tubo de geotextil y la tubería de bombeo, por la que se rellena el tubo, mediante el bombeo de la mezcla de arena y agua, como se ha indicado anteriormente.

Figura 4.75: Sección longitudinal típica de los tubos de geotextil (Lawson 2008)

El tejido del geotextil utilizado, debe tener, al menos, tres características fundamentales para el buen funcionamiento del conjunto del tubo de geotextil, como pueden ser:

- Tener la fuerza de tracción requerida y la rigidez necesaria para resistir las tensiones mecánicas aplicadas durante el llenado y durante toda su vida útil.
- Tener las propiedades hidráulicas necesarias para retener el relleno de arena y prevenir la erosión bajo una variedad de condiciones hidráulicas.
- Tener la durabilidad requerida para permanecer intacto durante su vida útil.

Los tubos de geotextil se describen normalmente definiendo su diámetro teórico, en Europa y en Asia, o definiendo su perímetro teórico (CT), en el Norte y el Sur de América. Cuando se trata de su aplicación en la ingeniería de costas, los parámetros fundamentales son la altura del tubo, el ancho del tubo y el ancho de la base del tubo, además de su longitud.

En la siguiente figura se aprecian los principales parámetros, definidos en el párrafo anterior, tanto en términos teóricos, como una vez asentado el tubo de geotextil relleno de arena.

Figura 4.76: Parámetros teóricos (a) y parámetros ingenieriles (b) de los tubos (Lawson 2008)

En una estructura compuesta por varias capas de tubos de geotextil, la capa inferior de los tubos recibirá la mayor carga, al soportar a su vez el peso de los tubos situados en las capas superiores, como se indica en la figura 4.77. Esta carga provoca la deformación del tubo inferior, que dependerá de las características del material de relleno (granulometría, forma, etc.) y del porcentaje de llenado de la arena, lo que se da lugar a su hermeticidad o grado unión entre los granos que constituyen la arena.

Figura 4.77: Deformación de los tubos de geotextil sometidos al peso de los tubos superiores (Cantré 2002)

La deformación produce una pérdida de altura en el tubo geotextil. Van Steeg y Vastenburg (2010) obtuvieron una fórmula de cálculo para determinar esta pérdida de altura del tubo de geotextil, considerando porcentajes de llenado del 41% al 74%.

$$S_{tubo} = -0.41p_{h.b} + 0.323 \quad (4.40)$$

$$S_{tubo} = \frac{D_{deformado} - D_{inicial}}{D_{inicial}} \quad (4.41)$$

Dónde:

$p_{h.b}$ = Porcentaje de llenado que depende de la altura [-]

$D_{deformado}$ = Altura del tubo deformado [m]

$D_{inicial}$ = Altura inicial después del llenado [m]

En estructuras compuestas de un único tubo de geotextil, debido a la menor disminución de altura en la deformación, proporcionará una mayor estabilidad, frente a estructuras compuestas de varios tubos de geotextil.

El movimiento de la arena en el interior del tubo depende, en gran medida, del porcentaje de llenado. Un porcentaje de llenado bajo permite a la arena moverse más fácilmente, dentro del tubo de geotextil; mientras que los tubos con altos porcentajes

de llenado muestran muy poco movimiento o migración de la arena dentro del tubo. Habitualmente los tubos geotextil se rellenan a su máxima capacidad o próximo a ella, con porcentajes mayores del 80%. Por lo que es poco probable que la migración interna de la arena dentro de un tubo geotextil sea un mecanismo de fallo habitual para una estructura que consta de tubos de geotextil con altos porcentajes de llenado, como indican Van Steeg y Vastenburg (2010).

El geotextil debe trabajar fundamentalmente como un filtro, permitiendo el paso del agua, pero a la vez, reteniendo las partículas del suelo. Con el fin de optimizar el drenaje del agua a través del geotextil, es importante la porosidad del geotextil considerado. Si la porosidad del geotextil es grande, se perderían las partículas más finas. A la inversa, si la porosidad del geotextil es demasiado pequeña, una presión excesiva podría superar la resistencia del geotextil, dando lugar a la rotura del mismo (CUR217 2006 ó Koerner & Koerner 2006).

En el documento CUR 217 (2006), se definen las siguientes fórmulas, para asegurar la estanqueidad de la arena.

$$O_{90} \leq D_{90} \quad (4.42)$$

$$O_{90} < 1.5 D_{10} C_u^{1/2} \quad (4.43)$$

Dónde:

O_{90} = abertura del tejido que corresponde al D_{90} del material que atraviesa el geotextil

D_x = tamaño de las aberturas rectangulares del tamiz teórico donde el x% de los granos de arena pasa a su través

C_u = coeficiente de uniformidad (D_{60}/D_{10})

4.2.2.2. La tensión del geotextil

La fuerza del geotextil y la resistencia en las costuras son las principales consideraciones de diseño a tener en cuenta con el objetivo de resistir las presiones durante el llenado y la vida de la obra. Suponiendo que la tensión en el geotextil es constante a lo largo de su perímetro, ésta se puede expresar mediante la siguiente expresión:

$$T = p \cdot r \quad (4.44)$$

Dónde:

T = tensión del geotextil [kN/m]

p = presión hidráulica en el material de relleno [kPa]

r = radio en una ubicación aleatoria en la sección transversal [m].

Para determinar la tensión que soporta el geotextil, se utiliza el denominado método de Timoshenko (CUR 217, 2006), que facilita una solución analítica; pero debido a la complejidad de su solución se simplifica utilizando modelos numéricos, como el denominado GeoCoPS (Leschinsky 1996). El método de Timoshenko se puede resolver gráficamente, aunque se comete normalmente un error aproximado del 10%, por lo que sólo es aconsejable para estimaciones rápidas, o aquellos casos en los que admita esta banda de error.

Figura 4.78: Método de Timoshenko para calcular la tensión del geotextil (CUR 2006)

En el cálculo de la tensión cortante en el geotextil según CUR 214 (2004), se deben tener en cuenta tres fuerzas:

- Presión de bombeo (P_P), constante sobre el perímetro
- Presión de material de relleno (P_M)
- La presión de agua (P_W) - sólo para tubos sumergidos

A continuación se indican las expresiones para obtener las fuerzas o esfuerzos de reacción y se muestra el diagrama de fuerzas en la sección de un tubo de geotextil.

Esfuerzo cortante en la parte superior del tubo:

$$R_A = \left(\frac{P_P - P_{WB}}{2} \right) h + \left(\frac{P_M - P_{WO}}{6} \right) h \quad (4.45)$$

Esfuerzo cortante en la parte inferior del tubo:

$$R_B = \left(\frac{P_P - P_{WB}}{2} \right) h + \left(\frac{P_M - P_{WO}}{3} \right) h \quad (4.46)$$

Dónde:

P_{WB} = Presión del agua en la parte superior

P_{WO} = Presión del agua en la parte inferior

Figura 4.79: Diagrama de fuerzas del tubo de geotextil (CUR 2004)

En la siguiente figura se muestran los resultados obtenidos por el CUR (2004) relativos a las tensiones de tracción y presión interior (carga hidráulica) mediante modelización numérica realizada para un tubo geotextil de 12 metros de diámetro, bajo diferentes porcentajes de llenado. A la vez, como se aprecia en la figura, a medida que se incrementan los porcentajes de llenado, se incrementa la tensión de tracción del tubo de geotextil.

Figura 4.80: Tensión de tracción, carga hidráulica y porcentaje de llenado correspondiente a diferentes formas de un tubo de 12 m de diámetro (CUR 2004)

Durante el proceso de llenado de los tubos de geotextil y durante toda su vida útil, las tensiones se generan en las tres direcciones del tubo son: tangencial o circunferencial (T_c); longitudinal o lo largo de la longitud del eje del tubo geotextil, axial (T_a) y en las conexiones del relleno o puertos del tubo geotextil (T_p).

Figura 4.81: Tensiones en el tubo de geotextil (D. Leshchinsky & O. Leshchinsky 1996)

El análisis de las tensiones generadas en los tubos de geotextil es complicado, debido a la geometría del tubo. Además, el material de relleno dentro de tubos de geotextil es inicialmente líquido, es decir, con resistencia a cortante cero, y luego durante un tiempo relativamente corto, se transforma a material sólido, es decir, con una resistencia a cortante interna. Para estructuras hidráulicas y marinas donde el material de relleno contiene arena, el período de tiempo que tarda en cambiar un material a sólido es muy corto (a diferencia del relleno con material fino), y por lo tanto, los métodos de análisis basados en la hipótesis de un relleno resistente al esfuerzo cortante son más apropiados para este tipo de aplicaciones.

El procedimiento normalmente utilizado para determinar las tensiones en los tubos de geotextil consiste en determinar primero la tensión circunferencial o tangencial T_c , después la tensión axial o longitudinal T_a , y finalmente la tensión de conexión o del puerto T_p .

Figura 4.82: Tensiones en el tubo de geotextil (Lawson 2008)

Se han utilizado dos enfoques para analizar la tensión circunferencial o tangencial generada en los tubos de geotextil: la teoría de la membrana y la mecánica de medios continuos.

Los métodos de la teoría de la membrana han sido propuestos por varios investigadores (Liu 1981; Kazimierowicz 1994; Leschinsky et al. 1996; Plaut y Suherman 1998; Palmerton 2002). Una importante característica de los métodos basados en la teoría de la membrana es que el relleno se supone como un líquido sin resistencia al rozamiento interno. El proceso de llenado puede ser modelado a lo largo del tubo con la forma rellena resultante. Si bien estos métodos surgen para determinar la forma de los tubos de llenado de geotextil razonablemente bien, no determinan la tensión circunferencial o tangencial en el geotextil demasiado bien cuando se usa arena como el relleno confinado. El principal motivo de esto es que la arena de relleno vuelve a una fase sólida con relativa rapidez una vez que ha entrado en el tubo geotextil, con las tensiones posteriores que actúa sobre el geotextil bastante diferente de la fase líquida.

Figura 4.83: Tensión máxima circunferencial según Palmerton (2002) (Lawson 2008)

La mecánica de medios continuos también se ha utilizado para modelar el comportamiento del tubo de geotextil (Seay 1998; Cantré 2002). Si bien este enfoque puede modelar la distribución de la tensión alrededor del perímetro de un tubo de geotextil resistente al rozamiento de llenado, este método es prácticamente imposible utilizar para modelar el proceso de llenado. Como el proceso de llenado tiene un efecto importante en la forma final del tubo geotextil, también tiene un efecto importante sobre las tensiones del geotextil. Sin embargo, dónde los métodos continuos han demostrado ser muy útiles es en la modelización de las deformaciones de las estructuras compuestas con tubos de geotextil sobre las cimentaciones blandas, ya que pueden tener en cuenta la compleja distribución de la tensión vertical en la base de un tubo de geotextil razonablemente bien lleno.

La siguiente figura determina la obtención de la máxima tensión tangencial del tubo de geotextil $[T_{max}]_c$, en función de la relación entre la altura y el diámetro del tubo de

geotextil, para los diámetros del tubo de geotextil de 3, 4 y 5m. Cuando se diseña un tubo geotextil, es importante considerar la magnitud de la tensión tangencial, en las costuras del tubo de geotextil resultante.

Figura 4.84: Distribución de la tensión circunferencial (a) y su aproximación en función de $[T_{\max}]_c$ (Lawson 2008)

Las tensiones longitudinales o axiales generadas a lo largo de la longitud de los tubos de geotextil durante el llenado son función de la presión de llenado y de la altura del tubo. La Figura 4.85 muestra la máxima tensión longitudinal o axial $[T_{\max}]_a$ expresada en términos de la máxima tensión tangencial o circunferencial $[T_{\max}]_c$ usando el procedimiento de Palmerton (2002). Siendo un ajuste muy bueno, la siguiente relación: $[T_{\max}]_a = 0,63 [T_{\max}]_c$.

Figura 4.85: Máxima tensión axial de un tubo de geotextil según Palmerton (2002)
(Fuente: Lawson 2008)

La resistencia a tracción última de un tubo de geotextil, incluyendo las costuras, viene expresada por:

$$[Tu]_c \text{ o } [Tu]_a \geq FS ([T]_c \text{ o } [T]_a) \quad (4.47)$$

Dónde:

Tu = resistencia a la tracción en el dirección circunferencial o axial del tubo [KN]

T = tensión alrededor del tubo en la dirección circunferencial o axial [KN]

FS = coeficiente de seguridad = 4 ó 5 [-]

4.2.2.3. La socavación en el pie

Durante el uso de los tubos de geotextil individuales para la protección de la costa, se detectó que la acción del oleaje sobre el propio tubo rara vez hacía que el tubo no fallase. Este fallo era debido, al desequilibrio de las fuerzas que actúan sobre el tubo y a la socavación provocada por las olas en la zona de contacto de mayor profundidad, lo que generaba un desplazamiento en dicha zona de contacto, paralelo a la longitud del tubo, y como consecuencia su colapso (Weggel 2005).

Figura 4.86: Desplazamiento de la erosión bajo el tubo de geotextil (Wegel 2005)

Planteando el equilibrio de fuerzas normales a la superficie de contacto del tubo de geotextil, en su centro de gravedad, que se indican en la parte izquierda de la figura 4.86, se obtiene la siguiente expresión:

$$\delta = \frac{B}{2} - y_c \tan \theta \quad (4.48)$$

Dónde:

θ = ángulo de la pendiente de la playa [°]

B= ancho de la base en contacto [m]

y_c = distancia del centro de gravedad del tubo a la cimentación [m]

δ = distancia de la normal al punto de inicio del movimiento [m]

Suponiendo que el rozamiento es suficiente para evitar el deslizamiento del tubo hacia el mar, el vuelco se produce cuando el momento provocado por la fuerza normal al cimiento en el punto de inicio del movimiento es superior al momento provocado por la componente del peso perpendicular al cimiento en dicho punto, o lo que es lo mismo cuando la distancia de la normal al punto de inicio del movimiento δ alcanza un valor nulo. Esta distancia depende sólo de la pendiente de la playa y de la relación de la altura del centro de la sección transversal del tubo a su anchura de la base.

La principal solución para estabilizar el tubo de geotextil y evitar el vuelco del tubo, debido a la socavación, es posicionamiento de dos tubos de anclaje a ambos lados del tubo principal, conectados a éste por una estera o manto de geotextil con el fin de impedir su movimiento debido a la socavación hacia el lado tierra.

4.2.2.4. La permeabilidad

La permeabilidad del geotextil es relativamente importante para el relleno de los elementos de geotextil rellenos de arena.

En el estudio realizado por Van Steeg y Vastenburg (2010) sobre la estabilidad de estructuras compuestas por tubos de geotextil concluyeron que el flujo de agua a través del geotextil y la arena es tan pequeño que puede despreciarse con respecto al factor de escala.

La importancia de la permeabilidad entra en juego cuando se consideran las fórmulas de estabilidad y las fuerzas que actúan. Debido a que la permeabilidad de una estructura compuesta por tubos de geotextil no sólo ejerce fuerzas de ascenso en los tubos superiores de la estructura, sino que también se ejerce fuerzas horizontales, debido al transporte de arena dentro de los tubos.

4.2.3. Mecanismos de fallo de los tubos de geotextil

Los tubos de geotextil se comportan como unidades de masa - gravedad, y por lo tanto para su diseño se pueden seguir los procedimientos estándares de evaluación de los posibles mecanismos de fallo, tanto externos como internos, para obtener un diseño seguro, indicados en la siguiente figura.

Figura 4.87: Mecanismos de fallo a) externos y b) internos de los tubos de geotextil
(Fuente: Lawson 2008)

4.2.3.1. Mecanismos de fallo externos

Los mecanismos de fallo externos, son aquellos mediante los cuales se produce la pérdida de estabilidad de un elemento de geotextil relleno de arena y como consecuencia la pérdida de estabilidad del conjunto de la estructura.

A continuación se describen cada uno de ellos y se indican las exigencias técnicas para que no se produzcan o se minimice lo más posible su acción:

(i). Deslizamiento:

Se produce cuando el tubo se mueve transversalmente a su eje, debido al oleaje o a otros agentes marinos externos.

Las formulaciones para evaluar la estabilidad de los tubos de geotextil sometidos a una variedad de condiciones hidráulicas fueron desarrolladas por diferentes autores, entre los que destacan Pilarczyk (2000) y el CUR 217 (2006). Hay que tener en cuenta que los tubos de geotextil cuanto más pequeño es su diámetro teórico, más vulnerables son, siendo relevante cuando $D.T. < 2 \text{ m}$.

(ii). Vuelco:

Se produce cuando el tubo cambia de posición girando longitudinalmente, por elevación de su lado más expuesto al oleaje.

Análogamente para el vuelco las formulaciones para evaluar la estabilidad de los tubos de geotextil sometidos a una variedad de condiciones hidráulicas fueron desarrolladas por diferentes autores, entre los que destacan Pilarczyk (2000) y el CUR 217 (2006).

(iii). Rodamiento:

Se produce cuando el tubo gira según su eje central debido al asentamiento de uno de sus extremos.

Puede ser de gran importancia si el cimiento sobre el que se apoya el tubo de geotextil no es rígido o el tubo de geotextil es grande. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que la distribución del peso del tubo de geotextil en suelos de cimentación blandos es muy eficiente.

(iv). Estabilidad global:

Se produce cuando dos o más tubos modifican su posición inicial debido al oleaje o a otros agentes marinos externos, provocando el fallo del conjunto.

Se debe tener en cuenta sólo cuando se utilizan varios tubos de geotextil. En este caso, el análisis de estabilidad debería tener en cuenta cambios tanto en el nivel de agua externo como en el nivel del agua dentro de la estructura.

(v). Socavación:

Se produce cuando la erosión debida al oleaje o a otros agentes marinos provoca la eliminación de una parte del cimiento del tubo.

La socavación de la cimentación en los bordes de los tubos de geotextil, puede llevar a la socavación y al vuelco del tubo de geotextil. Este fenómeno puede suceder tanto durante el proceso de llenado o durante la vida útil del tubo. Durante el llenado, una gran cantidad de agua se expulsa a través del geotextil, y esto puede causar la erosión y la socavación del tubo geotextil, si no se toman medidas para prevenirlo.

(vi). Asentamiento:

Se produce cuando todo el cimiento desciende verticalmente, provocando el movimiento vertical de todo el tubo.

Se puede reducir si los tubos de geotextil se construyen sobre cimentaciones compresibles. Entonces están obligados a cumplir unos requisitos específicos de la altura para estructuras hidráulicas (por ejemplo, rompeolas), y se debe realizar una evaluación del efecto de los asentamientos de la cimentación.

Los tubos de geotextil son elementos muy estables, debido a la dimensión en el contacto de su base.

4.2.3.2. Mecanismos de fallo internos

Los mecanismos de fallo internos son aquellos que afectan al comportamiento e integridad interno del tubo. Se distinguen tres tipos:

(i). Rotura:

Se produce cuando una parte del geotextil deja de cubrir la arena al no resistir los esfuerzos generados, provocando la pérdida de la misma. Siendo las zonas más susceptibles las costuras.

(ii). Erosión:

Se produce cuando existe la pérdida de arena en el tubo a través del geotextil debido al estado en el que se encuentra el mismo.

(iii). Deformación:

Se produce cuando existe un cambio en la forma o geometría del tubo de geotextil, debido a la disminución del volumen de arena inicial.

4.2.4. Formulaciones para el cálculo de estabilidad de los tubos de geotextil

Las diferentes formulaciones se basan en los resultados obtenidos en diferentes ensayos a escala reducida y desarrollados principalmente por Pilarczyk (2000), CUR 217 (2006) y por Van Steeg y Vastenburg (2010). Todas las fórmulas de estabilidad consideradas, corresponden a aquellos tubos de geotextil cuya disposición es perpendicular a la dirección del oleaje.

4.1.7.1. **Fórmula de Pilarczyk (2000)**

Dicha fórmula se obtuvo del análisis de estabilidad de un tubo de geotextil apilado sobre otros tubos con la parte superior del tubo coincidiendo con el nivel medio del agua, de un estudio realizado para Nicolon por DelftHydraulics (1994), cuyo esquema de fuerzas se muestra en la siguiente figura.

En dicho estudio hubo que tener en consideración la reducción del periodo del oleaje, de la altura del tubo y del nivel de agua, para tener un efecto positivo sobre la estabilidad. Finalmente, se concluyó que la altura crítica del oleaje era igual al diámetro teórico del tubo.

Figura 4.88: Esquema de fuerzas que actúan sobre el tubo (Pilarczyk 2000)

Considerando el momento de resistencia al vuelco frente al oleaje, en el punto P de la figura 4.88, se determinó la siguiente expresión:

$$M_0 = \frac{3}{4}(1+k)H\frac{1}{2}h_1^2\rho_w g \quad \text{por m lineal} \quad (4.49)$$

Dónde:

k = coeficiente de reflexión ($\approx 0,45$) [-]
 H = altura de ola [m]
 h₁ = altura del tubo [m]
 ρ_w = densidad del agua [kg/m³]
 g = aceleración debida a la gravedad [m/s²]

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

$$H < \frac{4}{3} = Ab \frac{\Delta_t}{h_1^2(1+k)} \quad (4.50)$$

Dónde:

A = área de la sección del tubo de geotextil [m²]
 Δ_t = (ρ_s-ρ_w)/ρ_w = densidad relativa del tubo de geotextil [-]

La expresión anterior 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:

$$\frac{H_s}{\Delta_t b} < 1 \quad (4.51)$$

Dónde:

H_s = Altura de ola significativa [m]
 Δ_t = Densidad relativa del tubo de geotextil [-]
 b = Ancho máximo del tubo [m]

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

4.1.7.2. Fórmula de CUR 217 (2006)

CUR 217 es una guía en la que se recomienda usar una fórmula 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:

$$\frac{H_s}{\Delta_t D_k} \leq 1 \quad (4.52)$$

Dónde:

H_s = Altura de ola significativa [m]

D_k = Ancho 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) [m]

Δ_t = Densidad relativa del tubo o de la estructura [-]

4.1.7.3. Fórmula de Van Steeg y Vastenburger (2010)

Para probar la estabilidad de los tubos de geotextil rellenos de arena bajo la acción del oleaje, se ensayaron varios modelos físicos a gran escala en el canal de flujo de Deltares con una escala aproximada de 1:2 a 1:4, para las diferentes configuraciones que se muestran en la figura 4.90. Todos los fallos provinieron del deslizamiento de los tubos. La migración de la arena para los tubos rellenos a menos del 70% provocaba la disminución de la estabilidad, siendo mínima en tubos con altos porcentajes de llenado (Van Steeg y Vastenburger 2010).

Como las fórmulas de estabilidad anteriores no tenían en cuenta muchos factores de entrada posibles se sugirió una nueva fórmula de estabilidad adimensional que incorporase factores relativos a la estabilidad hidráulica.

Finalmente la nueva expresión de estabilidad desarrollada para un solo tubo de geotextil, fue la siguiente suponiendo que el nivel medio del mar coincide con la parte superior de la estructura.

$$\frac{\chi \cdot H_s}{\Delta_t \sqrt{BD}(f \cos \alpha + \sin \alpha)} \leq 0.65 \quad (4.53)$$

Dónde:

H_s = Altura de ola significativa [m]

Δ_t = Densidad relativa del tubo de geotextil [-]

B = Ancho del tubo de geotextil [m]

D = Altura de la estructura de tubos de geotextil [m]

f = Coeficiente de rozamiento de los tubos de geotextil [-]

α = Pendiente de la estructura [°]

χ = Factor de reducción por la pérdida de energía debido al rebase [-]

ξ_p = Parámetro de rotura [-]

El factor de reducción χ se determina gráficamente en la siguiente figura en función de H/D y del parámetro de rotura.

Figura 4.89: Factor de reducción χ (Fuente: Van Steeg y Vastenburg 2010)

La colocación de dos tubos de geotextil uno detrás del otro no aumentó la estabilidad hidráulica. El motivo fue atribuido a la presión hidrostática causada por el agua atrapada entre los dos tubos y las presiones de agua hidrodinámicas causadas por la acción del oleaje, lo que provocó el desplazamiento de uno de los tubos.

Se recomienda la misma fórmula para un tubo de geotextil colocado por separado.

Es posible que el círculo de deslizamiento de la estructura se produzca antes que el fallo debido al deslizamiento del tubo superior por un fuerte oleaje. Este problema fue detectado por Van Steeg y Vastenburg (2010) en su modelo físico, que consideraba un coeficiente de rozamiento de 0,5 entre el geotextil y la estructura de apoyo. Para evitar el deslizamiento de los tubos de geotextil inferiores se pueden incorporar tubos adicionales en la capa inferior o una zanja pre-dragado para retener la capa inferior de los tubos.

Figura 4.90: Esquema general de los ensayos realizados
(Fuente: Van Steeg y Vastenburg 2010)

4.1.7.4. Fórmulas de Oh y Shin (2006)

Analizaron la estabilidad de los tubos de geotextil basándose en un análisis bidimensional, en el que consideraron la sección rectangular equivalente, que se muestra en la figura 4.91. Determinando los siguientes coeficientes de seguridad:

- Coeficiente de seguridad frente al deslizamiento:

$$SF_{deslizamiento} = \frac{F}{P_h} = \frac{P_v \times \tan \phi'}{P_w \times h_{GT}} \quad (4.54)$$

Dónde:

P_h = fuerza horizontal [kN]

F = fuerza vertical [kN]

P_v = carga hidrodinámica sobre el tubo de geotextil y peso del tubo [kN/m]

P_w = carga hidrodinámica debida al oleaje [kN/m]

h_{GT} = altura del tubo de geotextil [m]

ϕ = ángulo de rozamiento entre tubo de geotextil y el cimiento de arena [°]

- Coeficiente de seguridad frente al vuelco:

$$SF_{vuelco} = \frac{M_R}{M_O} = \frac{P_v \times \frac{B'}{2}}{P_w \times \frac{h_{GT}}{2}} \quad (4.55)$$

Dónde:

B' = ancho de la sección rectangular equivalente [m]

- Coeficiente de seguridad frente al rodamiento:

$$SF_{rodamiento} = \frac{Q_u}{Q_a} = \frac{cN_c + \left(\frac{1}{2}\right)\gamma_s B' N_\gamma}{\frac{P_w}{B' - 2e'}} \quad (4.56)$$

Dónde:

c = coeficiente de cohesión del terreno [-]

N_c y N_γ = coeficientes de rodamiento [-]

γ_s = peso del suelo sumergido

e' = excentricidad de la carga hidrodinámica oscilante [m].

$$e' = \frac{P_w \times h_{GT}}{3F} \quad (4.57)$$

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 de un tubo y la misma altura de ola significativa.

Figura 4.91: Esquema de fuerzas considerando un rectángulo equivalente
(Fuente: Oh y Shin2006)

4.2.5. Validez y limitaciones de las formulaciones para tubos de geotextil

Para el uso de las formulaciones anteriores resulta fundamental conocer en qué rango de altura de ola es válida su aplicación. Con ello se conocerá en qué lugares de la costa y del perfil de la playa son aptas éstas y por tanto su cálculo y diseño.

La variable altura de ola significativa H_s que aparece en las fórmulas indicadas anteriormente, puede acotarse y determinarse. A su vez en las formulaciones se consideran las variables que los autores muestran en sus trabajos, indicadas anteriormente. A continuación se indican las limitaciones de estas fórmulas.

4.2.5.1. Limitaciones de la fórmula de Pilarczyk (2000)

La expresión de la fórmula de Pilarczyk (2000) para diques sumergidos, como ya se ha indicado anteriormente (4.51), es la siguiente:

$$\frac{H_s}{\Delta_t b} < 1 \quad (4.51)$$

Según Pilarczyk (2000), el límite de la altura de ola significativa a la que puede estar sometido un dique compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena, continuamente expuestos a la acción de un oleaje, es $H_s = 1,5\text{m}$ (máx 2m), debido a la inestabilidad interna de la arena o a su posible migración dentro del tubo. Recomienda utilizar en el diseño de los tubos una longitud $l < 2 \cdot d$, siendo d = diámetro medio del tubo.

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

La expresión de la fórmula de CUR 217 (2006) para diques sumergidos formados por tubos de geotextil, como ya se ha indicado anteriormente (4.52), es la siguiente:

$$\frac{H_s}{\Delta_t D} < 1 \quad (4.52)$$

Dónde:

D = altura tubo de geotextil (si su orientación es perpendicular al oleaje)

ó

D = longitud tubo de geotextil (si su orientación es paralela al oleaje)

Para determinar la altura de ola significativa que garantiza la estabilidad de un dique sumergido compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena, se definen los valores de las variables del denominador de la expresión anterior:

- Δ = Densidad relativa de los tubos de geotextil [-]

Según Kriel (2012), la densidad relativa de los tubos de geotextil puede ser igual a 1.

- D = Diámetro del tubo de geotextil[m]

Si se considera un diámetro teórico máximo, de 2m, como recomienda Lawson (2008), entonces el máximo valor que puede alcanzar la altura de ola significativa que garantiza la estabilidad de un dique sumergido compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena sería, sustituyendo en 4.52 el siguiente:

$$H_s \leq \Delta_t \cdot D = 1 \cdot 2m = 2m \quad (4.58)$$

4.2.5.3. Limitaciones de la fórmula de Van Steeg y Vastenburg (2010)

La expresión de la fórmula de Van Steeg y Vastenburg (2010) para diques formados por tubos de geotextil, como ya se ha indicado anteriormente (4.53), es la siguiente:

$$\frac{\chi \cdot H_s}{\Delta_t \sqrt{BD}(f \cos \alpha + \sin \alpha)} \leq 0.65 \quad (4.53)$$

Si se consideran los valores límites de las variables de la expresión anterior, obtenida de los ensayos realizados por Van Steeg y Vastenburg (2010) en el gran canal de Deltares. Y se toma el valor máximo del diámetro recomendado por Lawson (2008), que es igual a 2m, se obtendría:

$$0,6 < \frac{H_s}{D} < 4 \quad (4.59)$$

Con lo que, los valores límite de la altura de ola significativa para la expresión 4.53, anterior, serían:

$$1,2 \text{ m} \leq H_s \leq 8 \text{ m} \quad (4.60)$$

4.2.6. Resumen de las limitaciones en formulaciones con tubos de geotextil

A modo de resumen de los apartados anteriores a continuación se indica en la siguiente tabla las formulaciones de cada uno de los autores, para las diferentes estructuras compuestas por tubos de geotextil rellenos de arena y sus limitaciones.

Autor	Fórmula	Limitaciones
Pilarczyk (2000) <u>Dique sumergido</u>	$\frac{H_s}{\Delta_t b} < 1$	$H_s \leq 1,5 \text{ m}$
CUR 217 (2006) <u>Dique sumergido</u>	$\frac{H_s}{\Delta_t D} < 1$	$H_s \leq 2 \text{ m}$
Van Steeg y Vastenburg (2010) <u>Dique sumergido</u>	$\frac{\chi \cdot H_s}{\Delta_t \sqrt{BD} (f \cos \alpha + \sin \alpha)} \leq 0,65$	$1,2 \text{ m} \leq H_s \leq 8 \text{ m}$
H_s = Altura de ola significativa [m] Δ_t = Densidad relativa de los tubos = $(\rho_s - \rho_w)/\rho_w$ [-] D = Diámetro efectivo de los tubos = $l_c \cdot \sin \alpha$ [m] b = Ancho de los tubos [m] α = Pendiente de la estructura [°] χ = Factor de reducción por la pérdida de energía debido al rebase [-] f = Coeficiente de rozamiento de los tubos de geotextil [-]		

Tabla 4.8: Formulaciones y limitaciones para diseño de estructuras compuestas por tubos de geotextil

4.2.7. Estructuras realizadas con tubos de geotextil rellenos de arena

En la mayoría de las ocasiones las zonas en las que se han utilizado estructuras compuestas por tubos de geotextil rellenos de arena, se caracterizan por ser zonas donde el oleaje que incide sobre las estructuras es pequeño y de poca intensidad. Las estructuras compuestas por tubos de geotextil rellenos de arena estudiadas y analizadas, se pueden dividir en: obras auxiliares, como núcleos de diques o revestimientos de dunas; y obras principales, como espigones, diques exentos y diques arrecife.

A continuación se muestran los ejemplos de estructuras realizadas con tubos de geotextil, que se han estudiado y analizado en este documento. Además, se han clasificado éstas obras realizadas con tubos de geotextil por el tipo de estructura y obra.

Cada una de las obras se describe siguiendo el siguiente esquema:

- Localización de la obra
- Descripción de la obra: Tipo de estructura
- Clasificación de la obra: Situación respecto al perfil de la playa y de la costa
- Clima marítimo en la zona: Altura de ola máxima esperable sobre la obra
- Resultados y comportamiento

Figura 4.92: Localización de las obras con tubos de geotextil (Fuente: www.googleearth.es)

4.2.7.1. Obras auxiliares con tubos de geotextil

Se han estudiado tres obras auxiliares situadas en Dubai, Ecuador y EE.UU., con las características que se indican a continuación.

O.A.1. Núcleo de diques en las islas artificiales Amwaj de Bahrein (Dubai)

Localización de la obra

La obra se encuentra ubicada a 1,6Km de la costa continental en una isla artificial del extremo nororiental de Murharraq en Bahrein, perteneciente a un archipiélago del Golfo Pérsico, al este de Arabia Saudí.

Figura 4.93: Localización de las islas artificiales Amwaj (Fuente: www.googleearth.es)

Descripción de la obra

Núcleo de diques en islas artificiales con tubos de geotextil recubiertos de escollera.

- Tubos de geotextil (inferiores): perímetro 13m y altura 2,6m.
- Tubos de geotextil (superiores): perímetro 13m y altura 2,0m.

Figura 4.94: Sección tipo de las islas artificiales Amwaj (Fuente: Forler et al. 2002)

Núcleo de diques en talud formado por tubos de geotextil, recubiertos de escollera:

- Tubos de geotextil (superiores): perímetro 23m y altura 3,0m.

Figura 4.95: Sección transversal de los diques rompeolas (Fuente: Forler et al. 2002)

Clasificación de la obra

La obra se sitúa en la zona 6 del perfil longitudinal de una playa y con relación al tipo de costa en la que se ubica, corresponde a una costa protegida.

Clima marítimo en la zona

Debido a la falta de datos de oleaje en la playa, se determina teóricamente la altura de ola, considerando la longitud del fetch máximo y utilizando la fórmula de Iribarren.

$$H = 1,2 \sqrt[4]{F(Km)} = 1,2 \sqrt[4]{640} = 6,03 \text{ m}$$

Resultados y comportamiento

Buen comportamiento y rapidez de ejecución, lo que redujo su gasto.

Figura 4.96: Vista aérea de las islas artificiales Amwaj (Fuente: www.tencate.com)

O.A.2. Núcleo de diques en la provincia de Esmeraldas (Ecuador)

Localización de la obra

Los diques se ubicaron frente al club náutico Stella Maris, Casa Blanca, en la provincia de Esmeraldas, en la costa del Pacífico de Ecuador.

Figura 4.97: Localización de Esmeraldas (Ecuador) (Fuente: www.googleearth.es)

Descripción de la obra

Núcleo de dique formado por tubos de geotextil de unos 15m de perímetro y una longitud de 25m, dispuestos en forma de pirámide, recubiertos con escollera.

Figura 4.98: Sección tipo del dique de Stella Maris (Ecuador) (Fuente: www.geotec.biz)

Clasificación de la obra:

La obra se sitúa en la zona 5 del perfil longitudinal de una playa, como puede apreciarse en la siguiente figura; y en un tipo de costa abierta.

Clima marítimo de la zona

Debido a la falta de datos de oleaje y la dificultad de obtener la longitud del fetch máximo en la playa mediante la fórmula de Iribarren, como se muestra en la figura 4.97. Al pertenecer a un tipo de costa abierta, se puede suponer que se pueden alcanzar alturas superiores a los cinco metros en aguas profundas.

$$H \geq 5m$$

Figura 4.99: Altura de ola significativa en Stella Maris (Ecuador) (Fuente: www.tencate.com)

Resultados y comportamiento

Rapidez de ejecución y buen comportamiento a largo plazo, al quedar en el interior de la estructura.

Figura 4.100: Vista del dique de Stella Maris (Ecuador) (Fuente: www.tencate.com)

O.A.3. Refuerzo de dunas en Beach Haven (Nueva Jersey)

Localización de la obra

El refuerzo de las dunas se realizó en Beach Haven, en la costa de Nueva Jersey perteneciente al Océano Atlántico.

Figura 4.101: Localización de Beach Haven (Nueva Jersey) (Fuente: www.googleearth.es)

Descripción de la obra

El refuerzo de las dunas estaba formado por tres tubos de geotextil de unos 200m de longitud, colocados en forma de pirámide.

Figura 4.102: Sección tipo del refuerzo de dunas en Beach Haven (Fuente: www.tencate.com)

Clasificación de la obra

Los tubos de geotextil se sitúan en la zona 1 del perfil longitudinal de una playa y en un tipo de costa abierta.

Figura 4.103: Localización en el perfil de la playa (Fuente: www.tencate.com)

Clima marítimo de la zona

Debido a la dificultad de obtener el fetch máximo mediante la fórmula de Iribarren. Al pertenecer a un tipo de costa abierta, se puede suponer que se alcanzan alturas de ola superiores a los cinco metros en aguas profundas.

$$H_s \geq 5 \text{ m}$$

Resultados y comportamiento

Actualmente no se han obtenido datos que lleven a la conclusión de un mal comportamiento a largo plazo.

Figura 4.104: Vista de Beach Haven antes y después de la obra (Fuente: www.tencate.com)

4.2.7.2. Espigones con tubos de geotextil

Solamente se han hallado dos obras de tipo espigón formadas por tubos de geotextil, una en Australia y otra en EE.UU.

E.T.1. Espigón en la playa de Kirra, Queensland (Australia)

Localización de la obra

La playa de Kirra se sitúa en la ciudad costera de Gold Coast, al sur de Brisbane la capital del estado de Queensland, en la costa este de Australia.

Figura 4.105: Localización de la playa de Kirra (Fuente: www.googleearth.es)

Descripción de la obra

Espigón de 120m de longitud y 5m de altura, formado por tubos de geotextil rellenos de arena.

Figura 4.106: Sección transversal del espigón de la playa de Kirra (Fuente: Restall et al 2002)

Clasificación de la obra

El morro de la obra se sitúa en la zona 5 del perfil longitudinal de una playa o zona activa del surf, y en un tipo de costa abierta.

Clima marítimo en la zona

La altura de ola en la zona era de 1,5m y la altura de ola en aguas profundas durante los temporales superaba los 12m (Restall et al. 2002).

Resultados y comportamiento

Debido a los daños causados por el vandalismo, se realizaron ensayos con recubrimientos mediante betún y otras técnicas con parches de secado rápido.

El empleo de los tubos de geotextil se tradujo en un ahorro de aproximadamente un 40% frente a las técnicas tradicionales, según los autores (Restall et al. 2002).

El espigón fue una solución temporal para conservar la arena suministrada tras su regeneración, mientras se encontraban soluciones a largo plazo. La obra fue diseñada para una vida útil de cinco años, sin embargo ha alcanzado una edad de 15 años.

Figura 4.107: Espigón en la playa de Kirra (Fuente: Restall et al. 2002)

E.T.2. Espigones con forma de T en Upham Beach (Florida)

Localización de la obra

La obra se sitúa en la playa de Upham Beach, en el condado de Phineas, perteneciente a la costa este del Golfo de México, en Florida (EE.UU.).

Figura 4.108: Localización de la playa de Upham (Florida)
(Fuente: www.googleearth.es)

Descripción de la obra

Espigones con forma de T, con una longitud de 60m y un ancho de 3,5m.

Figura 4.109: Sección tipo de los espigones en T (Fuente: Elko y Mann 2007)

Clasificación de la obra

Los espigones se sitúan en la zona 5 del perfil longitudinal de una playa y en un tipo de costa abierta.

Figura 4.110: Vista en planta de los espigones en T (Florida)
(Fuente: www.googleearth.es)

Clima marítimo de la zona

Debido a la falta de datos de oleaje en la playa, se determina teóricamente la altura de ola, considerando la longitud del fetch máximo y utilizando la fórmula de Iribarren.

$$H = 1,2\sqrt[4]{F(Km)} = 1,2\sqrt[4]{1.635} = 7,6m$$

Resultados y comportamiento

La obra resultó una buena alternativa para reducir la frecuencia de la regeneración de la playa (Elko y Mann 2007).

Figura 4.111: Vista de la playa de Upham en 2013
(Fuente: www.googleearth.es, foto: Mario Kaupe)

4.2.7.3. Diques con tubos de geotextil

D.T.1. Diques arrecife en la playa de Narrow Neck (Australia)

Localización de la obra

La obra se sitúa en la playa de Narrow Neck, en la ciudad costera de Gold Coast, al sur de Brisbane, la capital del estado de Queensland.

Figura 4.112: Localización de la playa de Kirra (Fuente: www.googleearth.es)

Descripción de la obra

El arrecife artificial Narrow Neck es una gran estructura sumergida de 400m x 200m, situado en el extremo norte de Surfers Paradise, en la Costa Dorada de Australia.

Con el fin de seguir atrayendo a turistas, se construyó un arrecife con un doble propósito utilizando los tubos de geotextil, proteger la playa y crear condiciones favorables y seguras para la práctica del surf.

Figura 4.113: Vista aérea del arrecife artificial de Narrow Neck (Fuente: Jacson y Hornsey 2003)

Clasificación de la obra

La obra se sitúa en la zona 6 del perfil longitudinal de una playa y en un tipo de costa abierta.

Clima marítimo en la zona

La altura de ola significativa varió entre 1,2m y 2,0 m, según los trabajos de Jacson y Hornsey (2003), alcanzando un valor de 3,2 m durante los grandes temporales. Procediendo éstos del este y los vientos del mar hacia tierra.

Resultados y comportamiento

La ejecución de la obra resultó complicada debido a que la poca profundidad de la ubicación de la obra dificultaba la disposición de los tubos mediante barcos, por el poco calado existente, provocando la retirada y sustitución de los tubos defectuosos.

*Figura 4.114: Playa de Narrow Neck antes (1996) y después de su regeneración (2003)
(Fuente: Jacson et al. 2005)*

D.T.2. Diques exentos en la playa de Young-Jin (Corea del Sur)

Localización de la obra

La obra se ubica en playa de Young-Jin, situada en la costa este de Corea del Sur.

Figura 4.115: Localización de la playa de Joung-Jin (Fuente: www.googleearth.es)

Descripción de la obra

La obra se constituye por dos tubos de geotextil, uno situado junto al otro, a modo de diques exentos. A una profundidad de 3,0 m y a unos 90-100m de la costa. Abarcando una longitud de costa de aproximadamente 250m.

Las dimensiones de los tubos de geotextil fueron:

- Perímetro de 9,5m (diámetro de 3,5m)
- Longitud de 50m
- Altura efectiva de 1,8 m
- Ancho de 4,2 m (llenado de aprox. 77%)

En la parte inferior de los tubos se instaló una manta de tela para proteger al terreno frente a la socavación. El borde de la tela se plegaba hacia atrás unos 0,5 m y se cosían juntos formando un pequeño tubo de anclaje lleno de arena, a cada lado.

Estos pequeños tubos, denominados de anclaje, sirven para proteger a la estructura frente a la socavación durante la acción de los temporales, (ver figura 4.116).

Figura 4.116: Sección tipo de la estructura en la playa de Young-Jin (Corea)
(Fuente: Oh y Shin 2006)

Clasificación de la obra

La obra se sitúa en la zona 6 del perfil longitudinal de una playa y en un tipo de costa medianamente protegida.

Clima marítimo de la zona

Debido a la falta de datos de oleaje en la playa, se determina teóricamente la altura de ola, considerando la longitud del fetch máximo y utilizando la fórmula de Iribarren.

$$H = 1,2\sqrt[4]{F(Km)} = 1,2\sqrt[4]{1.513} = 7,5 \text{ m}$$

Resultados y comportamiento

Esta obra favoreció el incremento del ancho de playa a lo largo de toda su longitud, en una magnitud de más de 10m. Algo que era bastante complicado en la zona, debido a la ubicación de Joung-Jin. Esta zona suele verse muy afectada por los temporales que se registran en el mar del Japón.

D.T.3. Diques exentos y espigón en el Dorado Royale (Méjico)

Localización de la obra

Los diques exentos y el espigón se sitúan en la costa noreste de Quintana Roo, frente a la isla de Cozumel, en México, en la península de Yucatán.

Figura 4.117: Localización de El Dorado Royale (México) (Fuente: www.googleearth.es)

Descripción de la obra

Los diques exentos se situaron a una profundidad de 2m y posteriormente se construyó otro dique adicional para proteger la cimentación de un espigón en T, a una profundidad de 4m, utilizando tubos de geotextil.

Figura 4.118: Vista de la obra en El Dorado Royale (México) (Fuente: www.geotubes.com)

Clasificación de la obra

Los diques exentos y el espigón en T se sitúan en la zona 6 del perfil longitudinal de una playa y en un tipo de costa medianamente protegida.

Figura 4.119: Vista de los diques exentos en El Dorado Royale (Méjico)
(Fuente: www.tencate.com)

Clima marítimo de la zona

Debido a la falta de datos de oleaje en la playa, se determina teóricamente la altura de ola, considerando la longitud del fetch máximo y utilizando la fórmula de Iribarren.

$$H = 1,2\sqrt[4]{F(Km)} = 1,2\sqrt[4]{2.940} = 8,8 \text{ m}$$

Resultados y comportamiento

Como se aprecia en la siguiente figura, en el año 2011, los diques no presentan un aspecto, lo que repercute en su comportamiento, debido a la pérdida de las propiedades y resistencia del geotextil de los tubos que constituyen los diques.

Figura 4.120: Diques rompeolas en El Dorado Royale (Méjico) en 2011
(Fuente: www.googleearth.es, foto: Jim Mansfield)

D.T.4. Diques sumergidos en las playas de la costa de Cancún (Méjico)

Localización de la obra

Los diques se ubican en las playas de Cancún, en Quintana Roo (Méjico), en la península de Yucatán.

Figura 4.121: Localización de los diques en la costa de Cancún (Méjico)
(Fuente: www.googleearth.es)

Descripción de la obra

Las principales fases en las que consiste la obra son:

- Paso 1: Disposición tubos de geotextil GT500 paralelos a la línea de costa.
- Paso 2: Vertido de arena hasta un ancho de playa de unos 60m.
- Paso 3: Disposición de los diques sumergidos a una profundidad de 2,5m.

Figura 4.122: Sección de la obra en la costa de Cancún (Méjico) (Fuente: www.geotubes.com)

Clasificación de la obra:

La obra se sitúa en la 6 del perfil longitudinal de una playa y en un tipo de costa medianamente protegida.

Figura 4.123: Localización de los diques en las playas de Cancún (Méjico)
(Fuente: www.geotubes.com)

Clima marítimo de la zona

Debido a la falta de datos de oleaje en la playa, se determina teóricamente la altura de ola, considerando la longitud del fetch máximo y utilizando la fórmula de Iribarren.

$$H = 1,2\sqrt[4]{F(Km)} = 1,2\sqrt[4]{2.800} = 8,7m$$

Resultados y comportamiento

Como se parecía en la siguiente figura, la erosión afectaba a las edificaciones antes de la ejecución de la obra, sin embargo, tras su finalización el ancho de playa se incrementa, protegiendo a las edificaciones.

Figura 4.124: Vista de la playa de Cancún antes y después (Fuente: www.geotube.com)

D.T.5. Dique longitudinal en Enkhuizen (Holanda)

Localización de la obra

El dique se ubica al noroeste de Holanda y al norte de Amsterdam, entre Enkhuizen y Lelystad, para permitir el acceso a los grandes barcos al puerto de Markermeer.

Figura 4.125: Localización de Enkhuizen (Holanda) (Fuente: www.googleearth.es)

Descripción de la obra

Dique longitudinal cuyo núcleo está formado por una longitud de dos tubos de geotextil tejido de 7,5km con un diámetro teórico de 4m, sobre un geotextil PP80L y recubiertos con éste, rellenos con material de dragado y recubiertos con escollera.

Figura 4.126: Sección del dique de Enkhuizen (Holanda) (Fuente: www.tencate.com)

Clasificación de la obra:

La obra se sitúa en la 6 del perfil longitudinal de una playa y en un tipo de costa cerrada.

Figura 4.127: Disposición de la escollera sobre el tubo de geotextil
(Fuente: www.tencate.com)

Clima marítimo de la zona

Debido a la falta de datos de oleaje en la zona, se determina teóricamente la altura de ola significativa, considerando la longitud del fetch máximo y utilizando la fórmula del CERC (1977), al ser un tipo de costa cerrada.

$$H = 0,76 \cdot \sqrt{F(Km)} = 0,76 \cdot \sqrt{42} = 4,9m$$

Resultados y comportamiento

No se han detectado fallos hasta la fecha, proporcionando la mejora de la distribución del tráfico de barcos en la zona.

Figura 4.128: Vista del dique de Enkhuizen (Holanda) (Fuente: www.tencate.com)

Capítulo 5

RESULTADOS, DISCUSIÓN Y VALIDACIÓN

ÍNDICE

5.1. INTRODUCCIÓN	5.3
5.2. LUGARES ADECUADOS PARA EL USO DE ESTRUCTURAS COSTERAS DE SACOS O BOLSAS DE GEOTEXTIL	5.4
5.2.1. Zonas costeras aptas para la aplicación de las formulaciones de diseño de revestimientos compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena	5.4
5.2.1.1. Formulaciones para revestimientos con sacos de geotextil	5.5
5.2.1.2. Uso de las formulaciones para revestimientos con ejemplos reales	5.17
5.2.2. Zonas costeras aptas para la aplicación de las formulaciones de diseño de diques o espigones compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena	5.26
5.2.2.1. Formulaciones para diques o espigones con sacos de geotextil	5.26
5.2.2.2. Uso de las formulaciones para diques o espigones con ejemplos reales	5.33
5.3. LUGARES ADECUADOS PARA EL USO DE ESTRUCTURAS COSTERAS DE TUBOS DE GEOTEXTIL	5.39
5.3.1. Zonas costeras aptas para la aplicación de las formulaciones de diseño de revestimientos compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena	5.39
5.3.1.1. Formulaciones para revestimientos con tubos de geotextil	5.40
5.3.1.2. Uso de las formulaciones para revestimientos con ejemplos reales	5.50
5.3.2. Zonas costeras aptas para la aplicación de las formulaciones de diseño de diques compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena	5.62
5.3.2.1. Formulaciones para diques con tubos de geotextil	5.62
5.3.2.2. Uso de las formulaciones para diques con ejemplos reales	5.72
5.4. ELEMENTOS DE MEJORA PARA EL USO DE ESTRUCTURAS COSTERAS DE ELEMENTOS DE GEOTEXTIL	5.83
5.4.1. Elementos de mejora de estructuras compuestas por sacos de geotextil	5.83
5.4.1.1. Celdas con grava en la parte superior e inferior de la estructura	5.83
5.4.1.2. Sistema de anclaje de los sacos de geotextil mediante redes	5.84
5.4.1.3. Sistema de anclaje mediante correas alrededor de cada saco de geotextil y fijados a toda la estructura	5.85
5.4.2. Elementos de mejora de estructuras compuestas por tubos de geotextil	5.85
5.4.2.1. Sistema de anclaje de los tubos de geotextil mediante correas alrededor de toda la sección transversal de la estructura	5.86
5.4.2.2. Sistema de anclaje de los tubos mediante correas y tubos de PVC	5.87
5.4.2.3. Tubos de geotextil con sección transversal de multi-celdas	5.89
5.4.3. Elementos de mejora frente a la subida del nivel del mar debido al Cambio Climático	5.90

Capítulo 5

RESULTADOS, DISCUSIÓN Y VALIDACIÓN

5.1. INTRODUCCIÓN

Una vez analizado el comportamiento de las estructuras costeras realizadas con piezas de geotextil rellenas de arena, estudiado las diferentes formulaciones existentes para el cálculo o diseño, y clasificado las diferentes zonas de la costa respecto a ellas. El siguiente paso es conocer la idoneidad de cada uno de los tipos de estructuras de geotextil respecto a la costa.

Por ello, este capítulo se centra en obtener los resultados de la investigación y con ello, acotar las zonas de la costa donde se puede diseñar una obra de defensa, compuesta por piezas de geotextil rellenas de arena. Finalmente, se añade un nuevo análisis, que pretende introducir elementos de mejora en estas estructuras tan versátiles, rápidas de ejecución y prácticas, para la mejora de su resistencia estructural respecto al oleaje y demás agentes.

Los principales puntos a desarrollar en este capítulo son los siguientes:

1. Lugares adecuados en la costa para el uso de estructuras formadas por piezas de geotextil rellenas de arena como defensa y validación con ejemplos reales.
2. Elementos de mejora para aumentar la capacidad de las estructuras compuestas por piezas o elementos de geotextil rellenos de arena.

Así mismo, estos puntos se desarrollan para las estructuras formadas por dos tipos de piezas fabricadas con geotextil rellenas de arena:

- Sacos o bolsas de geotextil rellenas de arena.
- Tubos de geotextil rellenos de arena.

Finalmente se ha tenido en cuenta aquellas estructuras realizadas con estas piezas, no siendo de aplicación, en principio, para otro tipo de piezas realizadas con geotextil y rellenas de arena. Y no se han considerado los usos auxiliares de sacos y tubos para estructuras, que son realmente interesantes y mejoran, en muchos casos,

la metodología y tiempos realización de una obra costera, ya que en estas obras el elemento resistente no es este tipo de piezas.

5.2. LUGARES ADECUADOS PARA EL USO DE ESTRUCTURAS COSTERAS DE SACOS O BOLSAS DE GEOTEXTIL

No todos los lugares de la costa resultan adecuados para el uso de determinadas estructuras compuestas por sacos de geotextil rellenas de arena. Por lo que resulta esencial, a la hora de diseñar una estructura con elementos de este tipo, conocer en qué zonas es adecuada su ubicación. Por ello, siguiendo la zonificación de la costa realizada en el capítulo anterior, en este apartado se determinan aquellas zonas de la costa donde se pueden ubicar las estructuras compuestas de sacos o bolsas de geotextil rellenas de arena.

5.2.1. Zonas costeras aptas para la aplicación de las formulaciones de diseño de revestimientos compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena

En el capítulo anterior se han indicado las limitaciones que tienen las diversas fórmulas de cálculo de las estructuras tipo revestimientos compuestos por sacos o bolsas de geotextil respecto a la intensidad del oleaje a soportar. El siguiente escalón se centra en encontrar en qué zonas de la costa se puede asegurar que cumplen las limitaciones dadas por las fórmulas de diseño.

Con el objetivo de analizar las zonas de la costa, en las que son aplicables las diferentes formulaciones existentes relativas a los revestimientos compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena, se considera su ubicación en las distintas posiciones tanto a lo largo del perfil longitudinal de una playa, como en los diferentes tipos de costa definidos en el capítulo anterior.

Posteriormente se definen unas tablas en las que se indican a modo de esquema las zonas aptas en la costa para la aplicación de dicha formulación. Seguidamente se validan las zonas aptas para la aplicación de las formulaciones mediante la verificación con diferentes ejemplos de obras realizadas en la costa en diferentes países del mundo. Y finalmente se indicarán posibles elementos de mejora con relación a la capacidad de los revestimientos compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena.

Debido a que, la intensidad del oleaje de las zonas 1, 2 y 3 del perfil longitudinal de una playa, normalmente, es prácticamente nula, se consideran como una sola zona.

Análogamente, se clasifican las formulaciones relativas a la estabilidad de las estructuras compuestas por sacos o bolsas de geotextil en función del tipo de estructura a utilizar: revestimientos y espigones o diques.

5.2.1.1. **Formulaciones para revestimientos con sacos de geotextil**

En la determinación de los lugares de la costa adecuados, para la ubicación de estructuras tipo revestimiento, compuestas por sacos de geotextil rellenos de arena, se consideran las diferentes fórmulas de diseño relativas a su estabilidad, cuando este tipo de estructuras se someten a la acción del oleaje, al igual que las limitaciones de la altura de ola significativa, determinadas en el capítulo anterior, siendo éstas:

- Pilarczyk (1996):

$$\frac{H_S}{\Delta D} = 2,5 \cdot \cos \alpha \cdot \xi^{-1/2} \quad H_S \leq 2,0m$$

- Wouters (1998):

$$\frac{H_S}{\Delta D} = \frac{2}{\sqrt{\xi_0}} \quad 0,1m \leq H_S \leq 2,0m$$

- Oumeraci et al. (2003): distingue la posición de los sacos en el revestimiento:

- Sacos del talud de un revestimiento:

$$\frac{H_S}{\Delta D} = \frac{2,8}{\sqrt{\xi_0}} \quad 0,2m \leq H_S \leq 3,2m$$

- Sacos de la cresta o parte superior de un revestimiento:

$$\frac{H_S}{\Delta D} < 0,79 + 0,09 \frac{R_C}{H_S} \quad 0m \leq H_S \leq 1,0m$$

Para estar del lado de la seguridad, se van a considerar los valores superiores del rango de validez de las alturas de ola significativa, 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 rellenos de arena.

A su vez, hay que destacar que para diseñar con la fórmula de Oumeraci et al. (2003), se debe diferenciar la posición de los sacos en la propia estructura. El primer paso a dar es analizar las restricciones por tipos de costa en cuatro tramos del perfil de playa:

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

- Tipo de costa abierta

Si un revestimiento compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena, se sitúa en las zonas 1, 2 ó 3 del perfil longitudinal de una playa, correspondiente a la playa seca y a la zona inter mareal (foreshore), definidas en el capítulo 3, 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 el revestimiento es de muy baja intensidad, no superando los límites establecidos de 1m, 2m ó 3,2m.

- 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 revestimiento compuesto por sacos 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 significativa 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 ó 3 del perfil longitudinal de una playa, se podrá diseñar con la fórmula indicada. Y en consecuencia este tipo de estructuras se podrá situar en las zonas 1, 2 y 3 del perfil longitudinal de una playa perteneciente a los restantes tipos de una costa.

2) Zona 4 del perfil longitudinal de una playa

- Tipo de costa abierta

Si un revestimiento compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena, se sitúa en la zona 4 del perfil de una playa y se halla en 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, como se indicó en el capítulo 3, por lo que no superará nunca el valor de 1m, 2m y 3,2m. 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 revestimiento compuesto por sacos 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.

3) 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 1m, 2m ó 3,2 m, 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 revestimiento compuesto por sacos 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:

$$H_{c \text{ geotextil}} = H_O \cdot C_{\text{reductor perfil}} \cdot C_{\text{reductor costa}}$$

- 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).

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

- 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 0,8y 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 revestimiento 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:

$$H_b \leq \frac{2m \text{ (Pilarczyk 1996 y Wouters 1998) } \acute{o} \text{ } 3,2 \text{ (Oumeraci et al. 2003)}}{0,8}$$

Si el tipo de costa es medianamente protegida:

$$H_b \leq \frac{2m \text{ (Pilarczyk 1996 y Wouters 1998) } \acute{o} \text{ } 3,2 \text{ (Oumeraci et al. 2003)}}{0,6}$$

O lo que es lo mismo:

$$H_b \leq 2,5m \text{ (Pilarczyk 1996 y Wouters 1998) } \acute{o} \text{ } 4m \text{ (Oumeraci et al. 2003)}$$

$$H_b \leq 3,3m \text{ (Pilarczyk 1996 y Wouters 1998) } \acute{o} \text{ } 5,3 \text{ m (Oumeraci et al. 2003)}$$

Luego para poder diseñar un revestimiento compuesto por sacos 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 de Pilarczyk (1996), Wouters (1998) y Oumeraci et al. (2003), habría que garantizar que la altura de ola en rotura fuese menor de 2,5m o 4m. En caso contrario no se aconseja su uso en esta zona.

Y para poder diseñar un revestimiento compuesto por sacos 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 formulaciones anteriores, habría que garantizar que la altura de ola en rotura fuese menor de 3,3m o 5,3m. En caso contrario no se aconseja su uso en esta zona.

Hay que tener en cuenta, en el caso de diseñar una estructura considerando la fórmula de Oumeraci et al. (2003), que se debe diferenciar la posición de los sacos dentro de la propia estructura, por lo que las consideraciones anteriores, solamente serían válidas para los sacos situados en el talud del revestimiento.

Para los sacos situados en la cresta o parte superior del revestimiento, el planteamiento sería:

Si el tipo de costa es poco protegida:

$$H_b \leq \frac{1,0 \text{ m (Oumeraci et al. 2003)}}{0,8}$$

Si el tipo de costa es medianamente protegida:

$$H_b \leq \frac{1,0 \text{ m (Oumeraci et al. 2003)}}{0,6}$$

O lo que es lo mismo:

$$H_b \leq 1,25 \text{ m (Oumeraci et al. 2003), para costa poco protegida}$$

$$H_b \leq 1,67 \text{ m (Oumeraci et al. 2003), para costa medianamente protegida}$$

Luego, para diseñar un revestimiento con sacos de geotextil, situados en la cresta o parte superior de la estructura, situados en la zona 5 del perfil longitudinal de una playa y perteneciente a un tipo de costa poco protegida, mediante la fórmula de Oumeraci et al. (2003), habría que garantizar que la altura de ola en rotura fuese menor de 1,25m para una costa poco protegida. O que la altura de ola en rotura fuese

menor de 1,67m para una costa medianamente protegida. No siendo aconsejable su uso en caso contrario.

- Tipo de costa protegida, muy protegida y cerrada

Si un revestimiento compuesto por sacos 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 dicha estructura será residual y por tanto dentro del rango de validez de la altura de ola donde pueden aplicarse las fórmulas de diseño de Pilarczyk (1996), Wouters (1998) y Oumeraci et al. (2003), para el cálculo de su diseño y estabilidad.

Otra forma de comprobarlo puede ser siguiendo el mismo razonamiento planteado anteriormente. Es decir; si un revestimiento compuesto por sacos 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:

$$H_{c \text{ geotextil}} = H_O \cdot C_{reductor \text{ perfil}} \cdot C_{reductor \text{ costa}}$$

- e) 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).

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

- f) 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.

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

- g) 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:

$$H_{c \text{ geotextil}} = H_b \cdot 0,4; \quad H_{c \text{ geotextil}} = H_b \cdot 0,2 \quad \text{y} \quad H_{c \text{ geotextil}} = H_b \cdot 0,1$$

- h) Luego la altura de ola en rotura que debe soportar un revestimiento 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:

$$H_b \leq \frac{2m \text{ (Pilrczyk 1996 y Wouters 1998) ó } 3,2 \text{ (Oumeraci et al. 2003)}}{0,4}$$

Si el tipo de costa es muy protegida:

$$H_b \leq \frac{2m \text{ (Pilrczyk 1996 y Wouters 1998) ó } 3,2 \text{ (Oumeraci et al. 2003)}}{0,2}$$

Si el tipo de costa es cerrada:

$$H_b \leq \frac{2m \text{ (Pilrczyk 1996 y Wouters 1998) ó } 3,2 \text{ (Oumeraci et al. 2003)}}{0,1}$$

O lo que es lo mismo:

Si el tipo de costa es protegida:

$$H_b \leq 5m \text{ (Pilarzyk 1996 y Wouters 1998) ó } 8m \text{ (Oumeraci et al. 2003)}$$

Si el tipo de costa es muy protegida:

$$H_b \leq 10 m \text{ (Pilarzyk 1996 y Wouters 1998) ó } 16 m \text{ (Oumeraci et al. 2003)}$$

Si el tipo de costa es cerrada:

$$H_b \leq 20 m \text{ (Pilarzyk 1996 y Wouters 1998) ó } 32 m \text{ (Oumeraci et al. 2003)}$$

Luego para diseñar un revestimiento compuesto por sacos 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 5m, según las fórmulas de Pilarczyk (1996) y Wouters (1998) ó menor de 8m, según la fórmula de Oumeraci et al. (2003), como se ha indicado anteriormente. En caso contrario no se aconseja su uso en esta zona.

Para poder diseñar un revestimiento compuesto por sacos 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 10m ó 16m, según la formulación indicada. Algo que suele suceder, debido a que en la zona de rotura de una playa que pertenece a un tipo de costa muy protegida es muy difícil alcanzar alturas de ola de 10m ó de 16m. En caso contrario no se aconseja su uso en esta zona.

Y para poder diseñar un revestimiento compuesto por sacos 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 20m ó 32m, según la formulación indicada. Algo que sucede debido a que en la zona de rotura de una playa que pertenece a un tipo de costa cerrada es muy difícil que incidan alturas de ola de 20m ó de 32m.

En el caso de diseñar una estructura considerando la fórmula de Oumeraci et al. (2003), se debe tener en cuenta la posición de los sacos dentro de la propia estructura, por lo que las consideraciones anteriores, solamente serían válidas para sacos situados en el talud del revestimiento.

Para sacos situados en la cresta o parte superior de la estructura, el razonamiento sería:

Si el tipo de costa es protegida:

$$H_b \leq \frac{1,0 \text{ m (Oumeraci et al. 2003)}}{0,4}$$

Si el tipo de costa es muy protegida:

$$H_b \leq \frac{1,0 \text{ m (Oumeraci et al. 2003)}}{0,2}$$

Si el tipo de costa es cerrada:

$$H_b \leq \frac{1,0 \text{ m (Oumeraci et al. 2003)}}{0,1}$$

O lo que es lo mismo:

$H_b \leq 2,5m$ (Oumeraci et al. 2003), para un tipo de costa protegida
 $H_b \leq 5 m$ (Oumeraci et al. 2003) , para un tipo de costa muy protegida
 $H_b \leq 10 m$ (Oumeraci et al. 2003), para un tipo de costa cerrada

Luego para el diseño de los sacos pertenecientes a la cresta o parte superior de un revestimiento, situado en la zona 5 del perfil longitudinal de una playa y perteneciente a un tipo de costa protegida, muy protegida ó cerrada, mediante la fórmula de Oumeraci et al. (2003), habría que garantizar que la altura de ola en rotura fuese menor de 2,5m, para una costa protegida. Que la altura de ola en rotura fuese menor de 5m, para un tipo de costa muy protegida. O que la altura de ola en rotura fuese menor de 10m, para una costa cerrada. Algo que sucede en estos tipos de costa, luego el diseño de los sacos de geotextil situados en la cresta o parte superior de un revestimiento se puede realizar con la fórmula de Oumeraci et al. (2003). Y en consecuencia el revestimiento se puede situar en la zona 5 del perfil longitudinal de una playa, que pertenece a un tipo de costa protegida, muy protegida y cerrada.

4) 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 revestimiento son las evolucionadas desde alta mar, H_o , hasta profundidades intermedias, H'_o , y por tanto no puede garantizarse que su valor esté dentro del rango de valores en los que son aplicables las fórmulas de diseño de los revestimientos formados por sacos de geotextil (1m, 2m y 3,2m). Y por tanto en general no se pueden diseñar obras de este tipo en esta zona del perfil y para este tipo de costa, no siendo aconsejable su uso en este caso.

- Tipo de costa poco protegida y medianamente protegida

Un revestimiento compuesto por sacos 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:

$$H_{c \text{ geotextil}} = H_O \cdot C_{\text{reductor perfil}} \cdot C_{\text{reductor costa}}$$

- 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_O).

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

- 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.

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

- c) Con lo que la altura de ola de cálculo, de una estructura de geotextil rellena de arena, situada en la zona 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 revestimiento 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:

$$H_b \leq \frac{2m \text{ (Pilarczyk 1996 y Wouters 1998) ó } 3,2 \text{ (Oumeraci et al. 2003)}}{0,8}$$

Si el tipo de costa es medianamente protegida:

$$H_b \leq \frac{2m \text{ (Pilarczyk 1996 y Wouters 1998) ó } 3,2 \text{ (Oumeraci et al. 2003)}}{0,6}$$

O lo que es lo mismo:

$$H_b \leq 2,5m \text{ (Pilarczyk 1996 y Wouters 1998) ó } 4m \text{ (Oumeraci et al. 2003)}$$

$$H_b \leq 3,3m \text{ (Pilarczyk 1996 y Wouters 1998) ó } 5,3m \text{ (Oumeraci et al. 2003)}$$

Luego si un revestimiento compuesto por sacos 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 revestimiento sería superior a los 2,5m ó 4m. En caso de que, según el clima marítimo de la zona, se observasen alturas de ola superiores, el diseño con las formulaciones anteriores no sería apropiado. No siendo aconsejable su uso en la zona 6 del perfil de una playa perteneciente a una costa poco protegida.

Si un revestimiento compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena se sitúa en la zona 6 del perfil longitudinal de una playa que pertenece a un tipo de costa medianamente protegida, habría que considerar el clima marítimo de la zona y ver si la altura de ola a la que se encontrara sometida la estructura, fuese inferior a los 3,3m ó 5,3m en casos de fuerte temporal, pudiendo ser aconsejable su uso. No siendo aconsejable en caso contrario.

- Tipo de costa protegida, muy protegida y cerrada

Si un revestimiento compuesto por sacos 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 será similar al de un oleaje de alta mar (H_o), con alturas de ola en condiciones normales inferiores a los 5m, 10m o 20m, considerando las fórmulas de Pilarczyk (1996) y Wouters (1998) e inferior a los 8m, 16m y 32m, considerando la fórmula de Oumeraci et al. (2002, 2003). Por lo que se podrá situar en este tipo de costa y en esa zona, salvo en los casos que no cumplierse las limitaciones anteriores.

A continuación se resume todo este análisis en la siguiente tabla, en la que se han considerado 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 revestimiento formado por sacos de geotextil rellenos de arena. Y en consecuencia los lugares adecuados y no adecuados para el uso de revestimientos compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena.

REVESTIMIENTO	TIPO DE COSTA					
ZONAPERFIL	Abierta H_o	Poco protegida (0,8 H_o)	Medianamente protegida (0,6 H_o)	Protegida (0,4 H_o)	Muy protegida (0,2 H_o)	Cerrada (0,1 H_o)
Zona 1, 2 y3 ($H_o \approx 0$)						
Zona 4 (H_r)						
Zona 5 (H_b)						
Zona 6 (H_o)						

Lugares adecuados Lugares no adecuados Lugares dudosos

Tabla 5.1: Posibles lugares para el uso de formulaciones relativas a la estabilidad de los revestimientos compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena

Los lugares no adecuados para el uso de las formulaciones relativas a la estabilidad de revestimientos compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena son las zonas 5 y 6 del perfil de la playa, correspondientes a la zona de rotura del oleaje y a la zona de oleaje desarrollado, para un tipo de costa abierta. Y la zona 5 del perfil de la playa o zona de rotura, para un tipo de costa protegida.

Los lugares dudosos para el uso de las formulaciones relativas a la estabilidad de revestimientos compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena son la zona 6 del perfil de una playa o de oleaje desarrollado, para un tipo de costa poco protegida y la zona 5 del perfil de una playa o de rotura del oleaje, para un tipo de costa medianamente protegida.

Y los lugares adecuados para el uso de las formulaciones relativas a la estabilidad de revestimientos compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena son el resto de zonas del perfil de la playa, para los demás tipos de costa, que se indican en la tabla 5.1.

Para un proyecto o anteproyecto, los coeficientes de reducción de oleaje en los distintos tipos de costa, se obtendrán mediante modelos de propagación del oleaje.

5.2.1.2. **Uso de las formulaciones para revestimientos con ejemplos reales**

En este apartado se va a verificar que el uso de las formulaciones indicadas en apartados anteriores es aconsejable para el diseño de estructuras tipo revestimiento formados por sacos de geotextil rellenos de arena y en consecuencia su ubicación, teniendo en cuenta diversas obras existentes, realizadas en la costa en diferentes países, que se han descrito en el capítulo anterior.

Las obras que se han considerado se ubican en las siguientes playas:

- RS1.- Playa de Jumeirah en Dubai (Emiratos Árabes Unidos)
- RS2.- Playa de Stockton en Nueva Gales del Sur (Australia)
- RS3.- Playa de la desembocadura del río Maroochy en Queensland (Australia)
- RS4.- Playa de Quelso en KwaZulu-Natal (Sudáfrica)
- RS5.- Playa de Amanzimtoti en KwaZulu-Natal (Sudáfrica)
- RS6.- North Beach en la Bahía de Jeffrey del Cabo Oriental (Sudáfrica)
- RS7.- Playa de Playa de Kelly en Port Alfred (Sudáfrica)

En cada una de estas obras se consideran las variables más significativas, relativas a las formulaciones de los revestimientos compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena y a su aplicación en la costa.

- Altura de ola en profundidades indefinidas
- Zona del perfil y tipo de costa
- Altura de ola en la obra
- Tipos de sacos de geotextil
- Comportamiento

a) **RS1.- Playa de Jumeirah en Dubai (Emiratos Árabes Unidos)**

- **Altura de ola en profundidades indefinidas:**

En el capítulo anterior se determinó la altura de ola máxima teórica en aguas profundas, mediante la fórmula de Iribarren: $H_s = 6,5 \text{ m}$.

- Zona del perfil y tipo de costa:

Como se observó anteriormente en la figura 4.38, el revestimiento de esta playa se sitúa en la zona 3 del perfil longitudinal y pertenece a un tipo de costa medianamente protegida.

- Altura de ola en la obra:

Por situarse la obra en la zona 3 del perfil longitudinal de una playa: $H_o \approx 0$

Por pertenecer a un tipo de costa medianamente protegida: $H'_o = 0,6 \cdot H_o \approx 0$

La altura de ola en el revestimiento será $H_d \approx 0 < 1\text{m}, 2\text{m y } 3,2\text{m}$

Luego cualquiera de las fórmulas indicadas anteriormente es válida para su diseño.

- Tipos de sacos de geotextil:

Sacos de 2t (1,5m x 1,10m x 0,40m) situados en el talud

Sacos de 5t (2,4m x 1,8m x 0,65m) situados en el pie

- Comportamiento:

Realizado en 2003, ha necesitado un mantenimiento mínimo y con un buen comportamiento frente a la acción de los temporales, integrándose muy bien con el entorno. En la actualidad ha sido sustituido por un pequeño muro de 0,50m y retirado para la construcción de un carril bici en su emplazamiento. Obra temporal.

Figura 5.1: Revestimiento - Playa de Jumeirah (Dubai) en la actualidad
(Fuente: www.googleearth.es; Foto: Volodya)

b) RS2.- Playa de Stockton en Nueva Gales del Sur (Australia)

- Altura de ola en profundidades indefinidas:

Análogamente, en el capítulo anterior se determinó la altura de ola máxima teórica en aguas profundas, mediante la fórmula de Iribarren: $H_s = 8 \text{ m}$

- Zona del perfil y tipo de costa:

Como se observó anteriormente en la figura 4.42, el revestimiento de esta playa se sitúa en la zona 3 del perfil longitudinal y pertenece a un tipo de costa poco protegida.

- Altura de ola en la obra:

Por situarse la obra en la zona 3 del perfil longitudinal de una playa: $H_o \approx 0$

Por pertenecer a un tipo de costa poco protegida: $H'_o = 0,8 \cdot H_o \approx 0$

La altura de ola en el revestimiento será $H_d \approx 0 < 1\text{m}, 2\text{m y } 3,2\text{m}$

Luego las fórmulas indicadas anteriormente son válidas para su diseño.

- Tipos de sacos de geotextil:

Sacos de 2t (1,5m x 1,2m x 0,45m) en el talud y en el pie del revestimiento.

- Comportamiento:

Realizado en 1996 como solución temporal, para proteger la edificación de la erosión y seleccionado por ser una estructura de rápida ejecución y fácilmente retirable. Con buen comportamiento durante al menos 13 años de servicio.

Figura 5.2: Revestimiento - Playa de Stockton (Australia) en 1999 y 2008
(Fuente: www.eurofabrics.com.au)

c) RS3.- Playa de Maroochydore en Queensland (Australia)

- Altura de ola en profundidades indefinidas:

Análogamente, en el capítulo anterior se determinó la altura de ola, máxima teórica, mediante la fórmula de Iribarren: $H_s = 1,37$ m.

- Zona del perfil y tipo de costa:

Como se observó anteriormente en la figura 4.42, el revestimiento de esta playa se sitúa en la zona 4 del perfil longitudinal y pertenece a un tipo de costa muy protegida.

- Altura de ola en la obra:

Considerando la altura de ola máxima teórica: $H_o \approx H_s = 1,37$ m.

Por pertenecer a un tipo de costa muy protegida: $H'_o = 0,2 \cdot H_o = 0,27$ m

La altura de ola en el revestimiento será $H_d \approx 0,27$ m < 1m, 2m ó 3,2m

Luego cualquiera de las fórmulas indicadas anteriormente es válida para su diseño.

- Tipos de sacos de geotextil:

Sacos de geotextil rellenos de arena de $0,75 \text{ m}^3$ en el talud y en el pie

- Comportamiento:

Aunque se produjeron algunos desperfectos durante las grandes mareas y los temporales de enero de 2002, en los que se llegaron a alcanzar alturas de ola de aproximadamente 3m. A pesar todo el revestimiento garantizó la seguridad de la zona.

Figura 5.3: Revestimiento - Playa de Maroochydore (Australia) en 1999 y 2002
(Fuente: www.eurofabrics.com.au)

d) RS4.- Playa de Kelso en KwaZulu-Natal (Sudáfrica)

- Altura de ola en profundidades indefinidas:

En el capítulo anterior se consideró como altura de ola máxima teórica en aguas profundas: $H_s = 5$ m.

- Zona del perfil y tipo de costa:

Como se ha observado anteriormente en la figura 4.48, el revestimiento de esta playa se sitúa en la zona 3 del perfil longitudinal y pertenece a un tipo de costa abierta.

- Altura de ola en la obra:

Por situarse la obra en la zona 3 del perfil longitudinal de una playa: $H_o \approx H_{residual} \approx 0$

Por pertenecer a un tipo de costa abierta: $H'_o = H_o = H_{residual} \approx 0$

La altura de ola en el revestimiento será $H_d \approx 0$ ó INSINIFICANTE

Cualquiera de las fórmulas indicadas anteriormente es válida para su diseño.

- Tipos de sacos de geotextil:

Sacos de geotextil rellenos de arena en el talud y en el pie de la estructura, de dimensiones:

$$2,3\text{m} \times 2,0\text{m} \times 0,6\text{m}$$

- Comportamiento:

El revestimiento resulta estable hasta la actualidad, sin apreciarse averías que impidan su funcionamiento. Obra permanente.

*Figura 5.4: Revestimiento - Playa de Kelso (KwaZulu-Natal) en la actualidad
(Fuente: www.Kaytech.co.za)*

e) RS5.- Playa de Amanzimtoti en KwaZulu-Natal (Sudáfrica)

- Altura de ola en profundidades indefinidas:

En el capítulo anterior se consideró como altura de ola máxima teórica en aguas profundas: $H_s = 5 \text{ m}$.

- Zona del perfil y tipo de costa:

Como se ha observado anteriormente en la figura 4.54, el revestimiento de esta playa se sitúa en la zona 3 del perfil longitudinal y pertenece a un tipo de costa poco protegida.

- Altura de ola en la obra:

Por situarse la obra en la zona 3 del perfil longitudinal de una playa: $H_o \approx H_{\text{residual}} \approx 0$

Por pertenecer a un tipo de costa poco protegida: $H'_o = 0,8 \cdot H_o \approx 0$

La altura de ola en el revestimiento será $H_d \approx 0$ ó INSINIFICANTE

Cualquiera de las fórmulas indicadas anteriormente es válida para su diseño.

- Tipos de sacos de geotextil:

Sacos de geotextil rellenos de arena en el talud y en el pie de la estructura, de dimensiones: $2,3 \times 2,0 \times 0,6 \text{ m}$.

- Comportamiento:

El revestimiento resulta estable y con un buen comportamiento frente a los temporales de la zona, quedando integrado con el entorno. Obra permanente.

Figura 5.5: Revestimiento - Playa de Amanzimtoti (KwaZulu-Natal) en la actualidad
(Fuente: www.googleearth.es; Foto: Pieterbotha)

f) RS6.- Playa de North Beachen la Bahía de Jeffrey (Sudáfrica)

- Altura de ola en profundidades indefinidas:

En el capítulo anterior se consideró como altura de ola máxima teórica en aguas profundas: $H_s = 5$ m.

- Zona del perfil y tipo de costa:

Como se ha observado anteriormente en la figura 4.58, el revestimiento de esta playa se sitúa en la zona 3 del perfil longitudinal y pertenece a un tipo de costa poco protegida.

- Altura de ola en la obra:

Por situarse la obra en la zona 3 del perfil longitudinal de una playa: $H_o \approx H_{\text{residual}} \approx 0$

Por pertenecer a un tipo de costa poco protegida: $H'_o = 0,8 \cdot H_o \approx 0$

La altura de ola en el revestimiento será $H_d \approx 0$ ó INSINIFICANTE

Cualquiera de las fórmulas indicadas anteriormente es válida para su diseño.

- Tipos de sacos de geotextil:

Sacos de geotextil rellenos de arena en el talud y en el pie de la estructura, de dimensiones:

2,3m x 2,0m x 0,6m

- Comportamiento:

Estable hasta el año 2011 integrándose en el entorno. Obra permanente.

Figura 5.6: Revestimiento - Playa de North Beach (Bahía de Jeffrey) en la actualidad
(Fuente: www.googleearth.es)

g) RS7.- Playa de Playa de Kelly en Port Alfred (Sudáfrica)

- Altura de ola en profundidades indefinidas:

En el capítulo anterior se consideró como altura de ola máxima teórica en aguas profundas: $H_s = 5 \text{ m}$.

- Zona del perfil y tipo de costa:

Como se ha observado anteriormente en la figura 4.58, el revestimiento de esta playa se sitúa en la zona 3 del perfil longitudinal y pertenece a un tipo de costa poco protegida.

- Altura de ola en la obra:

Por situarse la obra en la zona 3 del perfil de una playa: $H_o \approx H_{\text{residual}} \approx 0$

Por pertenecer a un tipo de costa poco protegida: $H'_o = 0,8 \cdot H_o \approx 0$

La altura de ola en el revestimiento será $H_d \approx 0$ ó INSINIFICANTE

Cualquiera de las fórmulas indicadas anteriormente es válida para su diseño.

- Tipos de sacos de geotextil:

Sacos de geotextil rellenos de arena en el talud y en el pie de la estructura, de dimensiones:

2,3m x 2,0m x 0,6m

- Comportamiento:

Estable e integrándose en el entorno. Obra permanente.

Figura 5.7: Revestimiento - Playa de Kelly (Port Alfred) en la actualidad
(Fuente: www.googleearth.es; Foto: Trevor Powis)

En la siguiente tabla se validan los diferentes lugares para la aplicación de las formulaciones relativas a la estabilidad de un revestimiento formado por sacos de geotextil rellenos de arena, situados en una zona del perfil de la playa y pertenecientes a un tipo de costa, situando la ubicación de las obras de los revestimientos consideradas anteriormente. A la vez, estas obras se han considerado permanentes, si funcionan en la actualidad y temporales, si por diversos motivos han sido retiradas. Por lo que en la tabla se identifican de la siguiente manera:

- **Obras permanentes**
- **Obras temporales**

REVESTIMIENTO	TIPO DE COSTA					
ZONA PERFIL	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 y 3 ($H_o \approx 0$)	RS4	RS2 RS5 RS6 RS7	RS1			
Zona 4 (H_r)					RS3	
Zona 5 (H_b)						
Zona 6 (H_o)						

Lugares adecuados
Lugares no adecuados
Lugares dudosos

Tabla 5.2: Validación de los lugares para el uso de formulaciones relativas a la estabilidad de los revestimientos compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena con ejemplos reales

Como se aprecia en la tabla 5.2, todas las obras consideradas anteriormente sobre los revestimientos compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena, se han ubicado en lugares adecuados para el uso de formulaciones relativas a la estabilidad de este tipo de estructuras. Por lo que se ha comprobado la validez de los lugares adecuados para el uso de dichas formulaciones y en consecuencia los lugares adecuados para su ubicación, con ejemplos de obras existentes en la realidad.

5.2.2. Zonas costeras aptas para la aplicación de las formulaciones de diseño de diques o espigones compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena

En el capítulo anterior se han indicado las limitaciones que tienen las diversas fórmulas de cálculo de las estructuras tipo diques o espigones compuestos por sacos o bolsas de geotextil respecto a la intensidad del oleaje a soportar.

Con el objetivo de analizar las zonas de la costa, en las que son aplicables las diferentes formulaciones existentes relativas a los diqueso espigones, compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena, se considera su ubicación en las distintas posiciones tanto a lo largo del perfil longitudinal de una playa, como en los diferentes tipos de costa definidos anteriormente.

Posteriormente se definen unas tablas en las que se indican a modo de resumen las zonas aptas en la costa para la aplicación de dicha formulación. Finalmente se validan las zonas aptas para la aplicación de las formulaciones mediante la verificación con diversos ejemplos de espigones realizados en la costa en diferentes países del mundo.

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.

5.2.2.1. Formulaciones para diques o espigones con sacos de geotextil

En la determinación de los lugares de la costa adecuados, para la ubicación de estructuras tipo diques o espigones, formados por sacos de geotextil rellenos de arena, se consideran las diferentes fórmulas de estabilidad y el rango de validez de la altura de ola significativa, definidas en el capítulo anterior.

- Mori (2009) y Mori et al. (2008):

$$\frac{H_s}{\Delta D} = \frac{2,8}{\sqrt{\xi_0}} \quad 0,18m \leq H_s \leq 3,25m$$

- Dassanayake y Oumeraci (2013):

$$Ns\sqrt{\xi_0} = A \left(\frac{R_C}{H} \cdot \frac{1}{\xi_0} \right)^2 + B \left(\frac{R_C}{H} \cdot \frac{1}{\xi_0} \right) + C \quad 1,65\text{m} \leq H_S \leq 7,92\text{m}$$

A continuación se realiza el análisis de los lugares en los que son aplicables las fórmulas de estabilidad para el diseño de un dique o un espigón, formado por sacos de geotextil rellenos de arena.

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

- Tipo de costa abierta

Si un dique o espigón compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena se sitúa en las zonas 1, 2 y 3 del perfil de una playa, correspondientes a la playa seca y a la zona inter mareal (foreshore) definidas anteriormente, perteneciente a un tipo de costa abierta, las fórmulas de los autores serán válidas para su diseño y cálculo de estabilidad, debido a que el oleaje en dichas zonas es de muy baja intensidad, con unos valores de la altura de ola inferiores a los límites establecidos.

- Restantes tipos de costa

Por ser los restantes tipos de costa, definidos como poco protegida, medianamente protegida, protegida, muy protegida y cerrada, más abrigadas que un tipo de costa abierta. Los oleajes que se presentan en estos tipos de costa serán de menor intensidad a los de una costa abierta. Luego las fórmulas de los autores indicados anteriormente serán válidas ya que los valores de la altura de ola a la que se encuentra sometida una obra son inferiores a las mayores limitaciones de la formulación.

6) Zona 4 del perfil longitudinal de una playa

- Tipo de costa abierta

Si un dique o espigón, formado por sacos de geotextil rellenos de arena, se sitúa en la zona 4 del perfil de una playa correspondiente al frente de playa y pertenece a

un tipo de costa abierta, el oleaje al que se encuentra sometida dicha estructura será de intensidad moderada, siendo la altura de ola del tipo residual, como se ha indicado en el capítulo 3. Por lo que su altura no alcanzará nunca valores de 3,25m y 7,92m. Y por tanto un dique o espigón, situado en dicha zona y para un tipo de costa abierta podría diseñarse con las fórmulas anteriores, siendo posible ubicación.

- Restantes tipos de costa

Por estar sometidos los restantes tipos de costa, a la acción de un oleaje de menor intensidad que los oleajes a los que se encuentra sometida un tipo de costa abierta, al ser más abrigadas. En esta zona se podrían diseñar los diques o espigones, formados con sacos de geotextil rellenos de arena, con las fórmulas correspondientes a los autores indicados anteriormente, ya que los valores de la altura de ola son inferiores a las mayores limitaciones. Siendo posible su uso en esa zona.

7) 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 del perfil longitudinal y perteneciente a un tipo de costa abierta, las alturas de ola a las que se encuentra sometido un dique o espigón, presentan una importante descarga de energía y por tanto las alturas de ola pueden ser superiores a los límites de 3,25m y 7,92m, que requieren las fórmulas de diseño; lo que implica en esta zona no se puede diseñar la obra con las formulaciones indicadas y, por tanto no es aconsejable la ubicación de diques o espigones, formados con sacos de geotextil.

- Tipo de costa poco protegida y medianamente protegida

Si un dique o espigón, compuesto por sacos 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:

$$H_{c \text{ geotextil}} = H_O \cdot C_{\text{reductor perfil}} \cdot C_{\text{reductor costa}}$$

- 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).

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

- b) Por situarse en una costa poco protegida y 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.

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

- 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 que debe soportar 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:

$$H_b \leq \frac{3,25m \text{ (Mori 2009 y Mori et al. 2008) ó } 7,92m \text{ (Dassanayake y Oumeraci 2013)}}{0,8}$$

Si el tipo de costa es medianamente protegida:

$$H_b \leq \frac{3,25m \text{ (Mori 2009 y Mori et al. 2008) ó } 7,92m \text{ (Dassanayake y Oumeraci 2013)}}{0,6}$$

O lo que es lo mismo:

$$H_b \leq 4m \text{ (Mori 2009 y Mori et al. 2008) ó } 9,9m \text{ (Dassanayake y Oumeraci 2013)}$$

$$H_b \leq 5,4m \text{ (Mori 2009 y Mori et al. 2008) ó } 13,2m \text{ (Dassanayake y Oumeraci 2013)}$$

Así para que se pueda localizar en la 5 del perfil longitudinal de una playa y en un tipo de costa poco protegida, un dique o un espigón, compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena, es necesario que la altura de ola en rotura sea inferior a 4m, según Mori (2009) y Mori et al. (2008) y según Dassanayake y Oumeraci (2013) es necesario que la altura de ola en rotura sea inferior a 9,9m. En caso contrario, no será aconsejable su ubicación en esta zona.

Si se tratase de una costa medianamente protegida, según Mori (2009) y Mori et al. (2008) la altura de ola en rotura debiera ser menor de 5,4m. Y según Dassanayake y Oumeraci (2013) es necesario que la altura de ola en rotura sea inferior a 13,2m. En caso contrario, no sería aconsejable su ubicación.

- Tipo de costa protegida, muy protegida y cerrada

Si un dique o espigón, compuesto por sacos 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 residual y por tanto estará sometido a una altura de ola que estará dentro del rango de validez de la altura de ola en el que se pueden aplicar las fórmulas de diseño de Mori (2009) y Mori et al. (2008) y Dassanayake y Oumeraci (2013).

8) Zona 6 del perfil longitudinal de una playa

- Tipo de costa abierta

En la zona de oleaje totalmente desarrollado del perfil longitudinal de una playa que pertenece a un tipo de costa abierta, las alturas de ola a las que se encuentra sometida una estructura tipo dique o espigón, son las evolucionadas desde alta mar, H_o , hasta profundidades intermedias, H'_o , y por tanto no puede garantizarse que su valor esté dentro del rango de valores en los que son aplicables las fórmulas de los autores indicados. Con lo que, en general no se pueden diseñar obras de este tipo en esta zona del perfil y para este tipo de costa, salvo que la altura de ola máxima en ese lugar sea inferior al límite establecido para cada fórmula.

- Tipo de costa poco protegida y medianamente protegida

Si un dique o espigón, compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena, se proyecta situar 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:

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

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

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

- 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.

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

- c) Con lo que la altura de ola de cálculo, de una estructura de geotextil rellena de arena, situada en la zona 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 o espigón situado en la zona 6 del perfil de una playa que pertenece a una costa poco protegida y medianamente protegida, vendrá dado por:

Si el tipo de costa es poco protegida:

$$H_b \leq \frac{3,25m \text{ (Mori 2009 y Mori et al. 2008) } \text{ ó } 7,92m \text{ (Dassanayake y Oumeraci 2013)}}{0,8}$$

Si el tipo de costa es medianamente protegida:

$$H_b \leq \frac{3,25m \text{ (Mori 2009 y Mori et al. 2008) } \text{ ó } 7,92m \text{ (Dassanayake y Oumeraci 2013)}}{0,6}$$

O lo que es lo mismo:

$$H_b \leq 4m \text{ (Mori 2009 y Mori et al. 2008) } \text{ ó } 9,9m \text{ (Dassanayake y Oumeraci 2013)}$$

$$H_b \leq 5,4m \text{ (Mori 2009 y Mori et al. 2008) } \text{ ó } 13,2m \text{ (Dassanayake y Oumeraci 2013)}$$

Para un dique o un espigón, compuesto de sacos de geotextil rellenos de arena situado en la zona 6 del perfil de una playa que pertenece a una costa tipo poco protegida habría que analizar más en detalle si la altura de ola a la que se encontraría sometida dicha estructura sería superior a los 4m, según Mori (2009) y Mori et al. (2008) ó superior a los 9,9m según Dassanayake y Oumeraci (2013). En caso de que el clima marítimo en la zona tuviese alturas de ola superiores, las formulaciones anteriores no valdrían y por tanto no se podría diseñar con ellas. No siendo aconsejable el uso en esta zona.

Sin embargo para una costa tipo medianamente protegida la altura de ola a la que se encontraría sometido un dique o espigón, formado por sacos de geotextil rellenos de arena será inferior a los 5,4m según Mori (2009) y Mori et al. (2008) ó 13,2m según Dassanayake y Oumeraci (2013), en casos de fuerte temporal, por lo que las fórmulas de los autores citados serán válidas y por tanto se podría situar en esa zona del perfil longitudinal de una playa perteneciente a ese tipo de costa.

- Tipo de costa protegida, muy protegida y cerrada

Si un dique o un espigón, compuesto por sacos 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 será similar al de un oleaje de alta mar (H_o), con alturas de ola en condiciones normales inferiores a los 8m, 16m o 32m, considerando las fórmulas de Mori (2009) o Mori et al. (2008) e inferior a los 19,8m, 39,6m y 79,2m; considerando la fórmula de Dassanayake y Oumeraci (2013). Por lo que se podrá dimensionar con ellas y situar en este tipo de costa y en esa zona del perfil de playa.

En la siguiente tabla se resume todo este análisis habiendo considerado los diferentes lugares tanto del perfil longitudinal de una playa como los distintos tipos de costa. Mostrando los lugares válidos para la ubicación de un dique o un espigón formado por sacos de geotextil rellenos de arena.

DIQUE Ó ESPIGÓN	TIPO DE COSTA					
ZONA PERFIL	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 y 3 ($H_o \approx 0$)						
Zona 4 (H_r)						
Zona 5 (H_b)						
Zona 6 (H_o)						

Lugares adecuados Lugares no adecuados Lugares dudosos

Tabla 5.3: Posibles lugares de ubicación de los diques o espigones compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena

5.2.2.2. Uso de las formulaciones para diques o espigones con ejemplos reales

En este apartado se va a verificar que el uso de las formulaciones indicadas en apartados anteriores es aconsejable para el diseño de estructuras compuestas por sacos de geotextil rellenos de arena, y en consecuencia se verifica la ubicación de este tipo de estructuras, teniendo en cuenta diferentes obras existentes en la costa. Los ejemplos considerados corresponden a estructuras tipo espigones con sacos de geotextil.

Las obras que se han considerado se ubican en las siguientes playas:

- ES1.- Playa de Maroochydhore, en Queensland (Australia)
- RS2.- Puerto de Clifton Spring, en Victoria (Australia)
- RS3.- Playa de Longebaan, en la Bahía de Saldanha (Sudáfrica)

En cada una de estas obras se consideran las variables más significativas, relativas a las formulaciones de los revestimientos compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena y a su aplicación en la costa.

- Altura de ola en profundidades indefinidas
- Zona del perfil y tipo de costa
- Altura de ola en la obra
- Tipos de sacos de geotextil
- Comportamiento

a) ES1.- Playa de Maroochydore, en Queensland (Australia)

- Altura de ola en profundidades indefinidas:

En el capítulo anterior se determinó la altura de ola máxima teórica en aguas profundas, mediante la fórmula de Iribarren: $H_s = 7,3 \text{ m}$

- Zona del perfil y tipo de costa:

Como se ha observado anteriormente en las figuras 4.64 y 4.66, el revestimiento de esta playa se sitúa en la zona 5 del perfil longitudinal y pertenece a un tipo de costa abierta.

- Altura de ola en la obra:

Por pertenecer su extremo final a la zona 5 del perfil de una playa: $H_o \approx H_b$

Por pertenecer a un tipo de costa abierta: $H'_o = H_o$

Considerando la altura de ola máxima teórica $H_s = 7,3 \text{ m}$ y suponiendo una altura de ola en rotura superior: $H_b = 8 \text{ m}$

La altura de ola en el espigón será $H_b = 8 \text{ m} > 1 \text{ ó } 2 \text{ m}$

Cualquiera de las fórmulas indicadas anteriormente no es válida para su diseño y por tanto no es aconsejable su uso en esa zona.

- Tipos de sacos de geotextil:

Sacos de geotextil no tejido rellenos de arena con un volumen de $2,5 \text{ m}^3$.

- Comportamiento:

La obra resulta estable aparentemente, sin embargo, la pérdida de material en el interior de los sacos y el desplazamiento de algunos de su posición inicial indica un mal comportamiento de la estructura, especialmente en las zonas más expuestas al oleaje.

Figura 5.8: Espigón - Playa de Maroochydore (Australia) en la actualidad
(Fuente: www.googleearth.es; Foto: Asley Hayes y Nicolás Burati)

b) ES2.- Puerto de Clifton Springs, en Victoria (Australia)

- Altura de ola en profundidades indefinidas:

En el capítulo anterior se determinó la altura de ola máxima teórica, mediante la fórmula de Iribarren: $H_s = 3,1 \text{ m}$.

- Zona del perfil y tipo de costa:

Como se ha observado anteriormente el morro del espigón pertenece a la zona 6 del perfil longitudinal de una playa y el tipo de costa al que pertenece es muy protegida.

- Altura de ola en la obra:

Por pertenecer su extremo a la zona 6 del perfil longitudinal de una playa: $H_o \approx H'_o$

Por pertenecer a un tipo de costa muy protegida: $H'_o = 0,2 \cdot H_o$

Considerando la altura de ola máxima teórica $H_s = 3,1 \text{ m}$

$$H'_o = 0,2 \cdot 3,1 = 0,62 \text{ m}$$

La altura de ola en el espigón será: $H'_o = 0,62 \text{ m} < 1,6 \text{ m}$

Cualquiera de las fórmulas indicadas anteriormente es válida para su diseño y por tanto su uso en esa zona es aconsejable.

- Tipos de sacos de geotextil:

Sacos de geotextil no tejido rellenos de arena con un volumen de $2,5 \text{ m}^3$.

- Comportamiento:

La obra resulta estable y con buen comportamiento hasta la actualidad.

Figura 5.9: Espigón– Puerto Clifton Springs (Victoria) en la actualidad
(Fuente: www.googleearth.es; Foto: Chris Francis)

c) ES3.- Playa de Langeeban, en la Bahía de Saldanha (Sudáfrica)

- Altura de ola en profundidades indefinidas:

En el capítulo anterior se determinó la altura de ola máxima teórica, mediante la fórmula de Iribarren: $H_s = 2,2 \text{ m}$.

- Zona del perfil y tipo de costa:

Como se ha observado en el capítulo anterior el morro de los espigones pertenece a la zona 6 del perfil longitudinal de una playa y el tipo de costa al que pertenece es protegida.

- Altura de ola en la obra:

Por ubicarse el morro en la zona 6 del perfil longitudinal de una playa: $H_o \approx H'_o$

Por pertenecer a un tipo de costa protegida: $H'_o = 0,4 \cdot H_o$

Considerando la altura de ola máxima teórica $H_s = 2,2 \text{ m}$

$$H'_o = 0,4 \cdot 2,2 = 0,88 \text{ m}$$

La altura de ola en el espigón será: $H'_o = 0,88 \text{ m} < 1,6 \text{ m}$

Cualquiera de las fórmulas indicadas anteriormente es válida para su diseño y por tanto su uso en esa zona es aconsejable.

- Tipos de sacos de geotextil:

Sacos de geotextil no tejido rellenos de arena con un volumen de $2,5 \text{ m}^3$.

- Comportamiento:

La obra resulta estable y con buen comportamiento tanto para proteger la playa de la erosión como para favorecer la acumulación de sedimento.

*Figura 5.10: Espigones– Playa Langeeban (Bahía de Saldanha) en la actualidad
(Fuente: www.googleearth.es; Foto: Dann Prinsloo y HGL1)*

En la siguiente tabla se validan los diferentes lugares para la aplicación de las formulaciones relativas a la estabilidad de un espigón formado por sacos de geotextil rellenos de arena, situados en una zona del perfil de la playa y pertenecientes a un tipo de costa, situando la ubicación de las obras de espigones consideradas anteriormente. A la vez, estas obras se han considerado permanentes, si funcionan en la actualidad y temporales, si por diversos motivos han sido retiradas. Por lo que en la tabla se identifican de la siguiente manera:

- **Obras permanentes**
- **Obras temporales**

Como se aprecia en la tabla 5.4, todas las obras consideradas anteriormente sobre espigones compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena, se han ubicado en lugares adecuados para el uso de formulaciones relativas a la estabilidad de este tipo de estructuras. Por lo que se ha comprobado la validez de los lugares adecuados para el uso de dichas formulaciones y en consecuencia los lugares adecuados para su ubicación, con ejemplos de obras existentes en la realidad.

ESPIGONES	TIPO DE COSTA					
ZONA PERFIL	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_r)						
Zona 5 (H_b)	ES1					
Zona 6 (H_o)				ES3	ES2	

Lugares adecuados Lugares no adecuados Lugares dudosos

Tabla 5.4: Validación de los lugares para el uso de formulaciones relativas a la estabilidad de los espigones compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena con ejemplos existentes

Los lugares no adecuados para el uso de las formulaciones relativas a la estabilidad de espigones compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena son las zonas 5 y 6 del perfil de la playa, correspondientes a la zona de rotura del oleaje y a la zona de oleaje desarrollado, para un tipo de costa abierta. Y la zona 5 del perfil de la playa o zona de rotura, para un tipo de costa protegida.

Los lugares dudosos para el uso de las formulaciones relativas a la estabilidad de espigones compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena son la zona 6 del perfil de una playa o de oleaje desarrollado, para un tipo de costa poco protegida y la zona 5 del perfil de una playa o de rotura del oleaje, para un tipo de costa medianamente protegida.

Y los lugares adecuados para el uso de las formulaciones relativas a la estabilidad de espigones compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena son el resto de zonas del perfil de la playa, para los demás tipos de costa, que se indican en la tabla 5.4.

Para un proyecto o anteproyecto, los coeficientes de reducción de oleaje en los distintos tipos de costa, se obtendrán mediante modelos de propagación del oleaje.

5.3. LUGARES ADECUADOS PARA EL USO DE ESTRUCTURAS COSTERAS DE TUBOS DE GEOTEXTIL

No todos los lugares de la costa resultan adecuados para el uso de determinadas estructuras compuestas por tubos de geotextil rellenos de arena. Por ello, siguiendo la zonificación de la costa realizada en el capítulo anterior, en este apartado se determinan las zonas de la costa donde se pueden utilizar las formulaciones relativas a la estabilidad de estas estructuras y en consecuencia donde se pueden ubicar.

5.3.1. Zonas costeras aptas para la aplicación de las formulaciones de diseño de revestimientos compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena

Una vez indicadas las limitaciones que tienen las diversas fórmulas de cálculo de las estructuras tipo revestimientos compuestos por tubos de geotextil respecto a la intensidad del oleaje a soportarse considera su ubicación en las distintas posiciones tanto a lo largo del perfil longitudinal de una playa, como en los diferentes tipos de costa definidos anteriormente, con el objetivo de analizarlas zonas de la costa, en las que son aplicables las diferentes formulaciones existentes relativas a los revestimientos compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena.

Posteriormente, se definen unas tablas en las que se indican, a modo de resumen, las zonas aptas en la costa para la aplicación de dicha formulación. Finalmente, se validan las zonas aptas para la aplicación de las formulaciones mediante la verificación con diversos ejemplos de obras realizadas en la costa, en diferentes países del mundo.

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.

Análogamente, se clasifican las formulaciones relativas a la estabilidad de las estructuras compuestas por tubos de geotextil en función del tipo de estructura a utilizar, en revestimientos y diques sumergidos.

5.3.1.1. **Formulaciones para revestimientos con tubos de geotextil**

En la actualidad no se han definido fórmulas para el diseño de la estabilidad de estructuras tipo revestimiento, compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena. Sin embargo, sí se han ejecutado diferentes obras en la costa.

Para determinar los lugares de la costa apropiados para la ubicación de estructuras tipo revestimiento, compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena, se consideran las fórmulas de estabilidad para el diseño de estructuras tipo diques sumergidos y sus limitaciones de altura de ola significativa, cuando este tipo de estructuras están sometidas a la acción del oleaje.

- Pilarczyk (2000):

$$\frac{H_S}{\Delta_t b} < 1 \qquad H_S \leq 1,5m$$

- CUR 217 (2006):

$$\frac{H_S}{\Delta_t D} < 1 \qquad H_S \leq 2m$$

- Van Steeg y Vastenburg (2010):

$$\frac{\chi \cdot H_S}{\Delta_t \sqrt{BD}(f \cos \alpha + \sin \alpha)} \leq 0,65 \qquad 1,2m \leq H_S \leq 8m$$

Sus variables han sido definidas en el capítulo anterior.

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 significativa, en las fórmulas indicadas. Al ser las mayores alturas de ola, las más desfavorables con respecto a la estabilidad de las estructuras compuestas por tubos de geotextil.

A continuación se realiza el análisis de los lugares en los que son aplicables las fórmulas de estabilidad en el diseño de un revestimiento formado por tubos de geotextil rellenos de arena y en consecuencia los lugares de la costa en los que se pueden ubicar.

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

- Tipo de costa abierta

Si un revestimiento compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena, se sitúa en las zonas 1, 2 ó 3 del perfil longitudinal de una playa, correspondiente a la playa seca y a la zona inter mareal (foreshore), definidas en el capítulo 3, 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 en caso de que el oleaje alcanzase dichas estructuras, sería de muy baja intensidad, no superando los límites establecidos 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 revestimiento 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 significativa 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 ó 3 del perfil longitudinal de una playa, se podrá diseñar con las fórmulas indicadas. 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.

2) Zona 4 del perfil longitudinal de una playa

- Tipo de costa abierta

Si un revestimiento 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, como se indicó en el capítulo 3, 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 revestimiento 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.

3) 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, salvo que los estudios de oleaje de la zona indicasen que $(H_{1/3})_{\text{máx}}$ está por debajo de estos límites. Y como consecuencia, no es aconsejable su uso en esta zona.

- Tipo de costa poco protegida y medianamente protegida

Si un revestimiento 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:

$$H_{c \text{ geotextil}} = H_O \cdot C_{reductor \text{ perfil}} \cdot C_{reductor \text{ costa}}$$

- 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).

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

- 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.

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

- c) Con lo que la altura de ola de cálculo, de una estructura de geotextil rellena de arena, situada en la zona 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 revestimiento 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:

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

Si el tipo de costa es medianamente protegida:

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

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 para poder diseñar un revestimiento 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. Hasta que un estudio de oleaje indicase que $(H_{1/3})_{\text{máx}}$ está por debajo de esos límites, no es aconsejable su uso en esta zona de la costa, ya que no existen formulaciones para su correcto diseño.

Y para poder diseñar un revestimiento 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 revestimiento 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 presumiblemente dentro del rango de validez de la altura de ola aunque, en todo caso, debe comprobarse con el clima de oleaje de la zona donde se va a ubicar la obra y si es así se pueden aplicar 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 revestimiento 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:

$$H_{c \text{ geotextil}} = H_O \cdot C_{\text{reductor perfil}} \cdot C_{\text{reductor costa}}$$

- e) 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).

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

- f) 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.

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

- g) 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:

$$H_{c \text{ geotextil}} = H_b \cdot 0,4; \quad H_{c \text{ geotextil}} = H_b \cdot 0,2 \text{ y } H_{c \text{ geotextil}} = H_b \cdot 0,1$$

- h) Luego la altura de ola en rotura que debe soportar un revestimiento 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:

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

Si el tipo de costa es muy protegida:

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

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 revestimiento 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 tendrá que ser 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 revestimiento 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 revestimiento 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.

4) 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 revestimiento compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena son las evolucionadas desde alta mar, H_o , hasta profundidades intermedias, H'_o , 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 Pilraczyk (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 revestimiento compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena, las alturas de ola a las que se encuentra sometido, son las evolucionadas desde alta mar, H_o , hasta profundidades intermedias, H'_o , habría que analizar mediante el clima marítimo de la zona si se puede garantizar que las alturas de ola en el revestimiento 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 revestimiento 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:

$$H_{c \text{ geotextil}} = H_o \cdot C_{\text{reductor perfil}} \cdot C_{\text{reductor costa}}$$

- e) 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_o).

$$H_o \cdot C_{reductor\ perfil} = H_b$$

- f) 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.

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

- g) 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:

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

- h) Luego la altura de ola que debe soportar un revestimiento 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:

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

Si el tipo de costa es medianamente protegida:

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

O lo que es lo mismo:

Para costa poco protegida:

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

Para costa medianamente protegida:

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

Luego si un revestimiento 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 revestimiento 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 revestimiento 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 medianamente protegida habría que analizar más en detalle si la altura de ola a la que se encontraría sometido dicho revestimiento 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 medianamente protegida.

- Tipo de costa protegida, muy protegida y cerrada

Si un revestimiento 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), aunque esta circunstancia debe comprobarse con los datos de clima marítimo de la zona. Por lo que se podrá situar en este tipo de costa y en esa zona.

A continuación se resume todo este análisis en la siguiente tabla, en la que se han considerado 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 revestimiento formado por tubos de geotextil rellenos de arena. Y en consecuencia los lugares adecuados y no adecuados para el uso de revestimientos compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena.

REVESTIMIENTO	TIPO DE COSTA					
ZONA PERFIL	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_r)						
Zona 5 (H_b)						
Zona 6 (H_o)						

Lugares adecuados Lugares no adecuados Lugares dudosos

Tabla 5.5: Posibles lugares adecuados para el uso de formulaciones relativas a la estabilidad de los revestimientos compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena

5.3.1.2. Uso de las formulaciones para revestimientos con ejemplos reales

En este apartado se va a verificar si el uso de las formulaciones indicadas en apartados anteriores es aconsejable para el diseño de estructuras tipo revestimientos formados por tubos de geotextil rellenos de arena y en consecuencia su ubicación, teniendo en cuenta diferentes obras existentes, realizadas en la costa en diferentes países y la metodología desarrollada anteriormente.

Las obras que se han considerado se ubican en las siguientes playas:

- RT1.- Playa de Wrihstvillage, en la Isla de Shell, Carolina del Norte (USA)
- RT2.- Playa de Sea Isle City, en NuevaYersey (USA)
- RT3.- Playa de Siasconset, en la Isla de Nantucket, Masachusetts (USA)
- RT4.- Playa de Shankarpur, Bengala Occidental (India)
- RT5.- Playa de Odisha, en Kendrapara (India)

En cada una de estas obras se consideran las variables más significativas, relativas a la fórmula de estabilidad de los revestimientos compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena y a su aplicación en la costa.

- Altura de ola en profundidades indefinidas
- Zona del perfil y tipo de costa
- Altura de ola en la obra
- Tipos de sacos de geotextil
- Comportamiento

a) RT1.- Playa de Wrihstvillage, en la Isla de Shell, Carolina del Norte (USA)

- Altura de ola en profundidades indefinidas:

Debido a la falta de datos de oleaje y la dificultad de obtener el fetch máximo teórico mediante la fórmula de Iribarren, al pertenecer a un tipo de costa abierta, se puede suponer que se alcanzan alturas de ola superiores a los cinco metros en aguas profundas: $H_s \geq 5 \text{ m}$.

Figura 5.11: Localización de la playa de Wrihstvillage (Fuente: www.googleearth.es)

- Zona del perfil y tipo de costa:

El revestimiento de esta playa se sitúa en la zona 1 del perfil longitudinal y pertenece a un tipo de costa abierta.

- Altura de ola en la obra:

Por situarse la obra en la zona 1 del perfil longitudinal de una playa: $H_o \approx 0$

Por pertenecer a un tipo de costa abierta: $H'_o = H_o = H_{residual} \approx 0$

La altura de ola en el revestimiento será $H_d \approx 0$ ó INSINIFICANTE

Por lo que las fórmulas de diseño son válidas para su diseño.

- Tipos de tubos de geotextil:

Tubos de geotextil rellenos de arena en el talud y separado unos 30m del pie de la edificación, de dimensiones:

Longitud: 20m y ancho de base: 5m

Figura 5.12: Revestimiento tubos de geotextil - Shell Island (Fuente: J.M. Welsh 2004)

- Comportamiento:

En la actualidad y desde marzo del año 2002 el revestimiento compuesto por tubos de geotextil ha quedado recubierto por material de arena, como se aprecia en la parte izquierda de la figura 5.12, por lo que se puede considerar un buen funcionamiento como una obra temporal, para realizar la reubicación de la isla.

Figura 5.13: Situación desde 2002 del revestimiento (Fuente: J.M. Welsh 2004)

b) RT2.- Playa de Sea Isle City en Nueva Jersey (USA)

- Altura de ola en profundidades indefinidas:

Debido a la falta de datos de oleaje y la dificultad de obtener el fetch máximo teórico mediante la fórmula de Iribarren, al pertenecer a un tipo de costa abierta, se puede suponer que se alcanzan alturas de ola superiores a los cinco metros en aguas profundas: $H_s \geq 5 \text{ m}$.

Figura 5.14: Localización de la playa de Sea Isle City (Fuente: www.googleearth.es)

- Zona del perfil y tipo de costa:

El revestimiento de esta playa se sitúa en la zona 4 del perfil longitudinal y pertenece a un tipo de costa abierta.

Figura 5.15: Revestimiento - Sea Isle City en 1998 (Fuente: www.ocean-coastal.com)

- Altura de ola en la obra:

Por situarse la obra en la zona 4 del perfil de una playa: $H_o \approx H_{\text{residual}} \ll H_b$

Por pertenecer a un tipo de costa abierta: $H'_o = H_o$

Luego, la altura de ola en el revestimiento será $H'_o = H_{\text{residual}} \ll H_b$.

Si la altura de ola en profundidades indefinidas es superior a 5m, la altura en rotura será superior a esta, luego; $H_b > 5\text{m}$ y por tanto $H'_o \ll 5\text{m}$.

Por lo que la altura de ola en el revestimiento no supera los valores límites de las fórmulas de diseño relativas a la estabilidad de esta estructura y en consecuencia son válidas para su diseño en un anteproyecto o estudio previo.

- Tipos de tubos de geotextil:

La obra presenta dos tramos de tubos de geotextil rellenos de arena de longitud, 1.220m y 275m respectivamente, de dimensiones:

Ancho: 3,5m y altura: 1,5m

- Comportamiento:

En la actualidad el revestimiento ha quedado recubierto por la vegetación de la zona, resultando estable e integrándose en el entorno como una obra permanente.

*Figura 5.16: Situación del revestimiento en 1999
(Fuente: U.S. Army Corps of Engineers 2001)*

c) RT3.- Playa de Siasconset, en la Isla de Nantucket, Massachusetts (USA)

- Altura de ola en profundidades indefinidas:

Debido a la falta de datos de oleaje y la dificultad de obtener el fetch máximo teórico mediante la fórmula de Iribarren, al pertenecer a un tipo de costa abierta, se puede suponer que se alcanzan alturas de ola superiores a los cinco metros en aguas profundas: $H_s \geq 5 \text{ m}$.

Figura 5.17: Localización de la playa de Siasconset (Fuente: www.googleearth.es)

- Zona del perfil y tipo de costa:

El revestimiento de esta playa se sitúa en la zona 1 del perfil longitudinal y pertenece a un tipo de costa abierta.

Figura 5.18: Revestimiento – Siasconset (Fuente: www.ocean-coastal.com)

- Altura de ola en la obra:

Por situarse la obra en la zona 1 del perfil longitudinal de una playa: $H_o \approx 0$

Por pertenecer a un tipo de costa abierta: $H'_o = H_o = H_{residual} \approx 0$

La altura de ola en el revestimiento será $H_d \approx 0$ ó INSINIFICANTE

Por lo que las fórmulas de diseño son válidas para su diseño.

- Tipos de tubos de geotextil:

Tubos de geotextil rellenos de arena de longitud 650m, de dimensiones:

Longitud: 5,5m y ancho: 2,5m

- Comportamiento:

En la actualidad el revestimiento ha quedado recubierto por arena de la playa, al pie del talud para mejorar la estabilidad del mismo. Por lo que la obra resulta estable y queda integrada en el entorno como una obra permanente, como se aprecia en a siguiente figura.

Figura 5.19: Situación del revestimiento en 2014 (Fuente: www.ocean-coastal.com)

d) RT4.- Playa de Shankarpul, Bengala Occidental (India)

- Altura de ola en profundidades indefinidas:

Por falta de datos de oleaje en la zona donde se ubica la playa, lo que ha obligado a determinar la altura de ola usando formulaciones teóricas aproximadas. Considerando la longitud del fetch máximo y utilizando la fórmula de Iribarren.

$$H = 1,2^4 \sqrt{F(Km)} = 1,2^4 \sqrt{1.800} = 7,8 \text{ m}$$

Figura 5.20: Localización de la playa de Shankarpul (Fuente: www.googleearth.es)

- Zona del perfil y tipo de costa:

El revestimiento de esta playa se sitúa en la zona 1 del perfil longitudinal y pertenece a un tipo de costa poco protegida.

Figura 5.21: Revestimiento de la playa de Shankarpul (Fuente: Kudale et al. 2013)

- Altura de ola en la obra:

Por situarse la obra en la zona 1 del perfil longitudinal de una playa: $H_o \approx 0$

Por pertenecer a un tipo de costa poco protegida: $H'_o = 0,8 \cdot H_o$

La altura de ola en el revestimiento será $H_d \approx 0$ ó INSINIFICANTE

Por lo que las fórmulas de diseño son válidas y por tanto se puede ubicar en esta zona del perfil de la playa perteneciente a este tipo de costa.

- Tipos de tubos de geotextil:

La longitud del revestimiento es de 900m, compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena, de dimensiones:

Diámetro: 3m y Longitud: 20m

- Comportamiento:

Como se aprecia en la siguiente figura la obra tiene un buen comportamiento frente a uno de los temporales de 2009. Los tubos fueron recubiertos por redes para mejorar el buen comportamiento estructural.

Figura 5.22: Comportamiento Revestimiento – Playa de Shankarpur
(Fuente: www.googleearth.es; Foto: Nilanjan)

e) RT5.- Playa de Hamala, en Mumbai (India)

- Altura de ola en profundidades indefinidas:

Debido a la falta de datos de oleaje y la dificultad de obtener el fetch máximo teórico mediante la fórmula de Iribarren, al pertenecer a un tipo de costa abierta, se puede suponer que se alcanzan alturas de ola superiores a los cinco metros en aguas profundas: $H_s \geq 5 \text{ m}$.

Figura 5.23: Localización de la playa de Hamala, en Mumbai
(Fuente: www.googleearth.es)

- Zona del perfil y tipo de costa:

El revestimiento de esta playa se sitúa en la zona 5 del perfil longitudinal y pertenece a un tipo de costa abierta.

Figura 5.24: Revestimiento – playa Hamala (Fuente: Kudale et al. 2013)

- Altura de ola en la obra:

Por situarse la obra en la zona 5 del perfil longitudinal de una playa: $H_o \approx H_b$

Por pertenecer a un tipo de costa abierta: $H'_o = H_o = H_b$

La altura de ola en el revestimiento será $H_d \approx H_b < 5\text{m}$

Solamente, si la altura de ola en la obra, durante la rotura del oleaje es inferior a los valores límites establecidos para esta zona del perfil y tipo de costa, se puede diseñar con las fórmulas de estabilidad y en consecuencia situar en esta playa.

- Tipos de tubos de geotextil:

La longitud del revestimiento es de 900m, compuesta por tubos de geotextil rellenos de arena, de dimensiones:

Diámetro: 1m y 3m

- Comportamiento:

Como se aprecia en la siguiente figura, la obra no presenta un buen comportamiento frente a la acción del oleaje, por superar los valores mínimos establecidos en las fórmulas de estabilidad, para su diseño.

Por lo que se ha comprobado que en esta zona del perfil de la playa y en este tipo de costa no se pueden diseñar y en consecuencia situar los revestimientos de tubos.

Figura 5.25: Revestimiento - playa Hamala el año 2011
(Fuente: www.googleearth.es; Foto: Tanvir Khan)

En la siguiente tabla se validan los diferentes lugares para la aplicación de las formulaciones relativas a la estabilidad de un revestimiento formado por tubos de geotextil rellenos de arena, situados en una zona del perfil de la playa y pertenecientes a un tipo de costa, situando la ubicación de las obras de los revestimientos consideradas anteriormente. A la vez, estas obras se han considerado permanentes, si funcionan en la actualidad y temporales, si por diversos motivos han sido retiradas. Por lo que en la tabla se identifican de la siguiente manera:

- **Obras permanentes**
- **Obras temporales**

REVESTIMIENTOS	TIPO DE COSTA					
ZONA PERFIL	Abierta H_o	Poco protegida (0,8 H_o)	Medianamente protegida (0,6 H_o)	Protegida (0,4 H_o)	Muy protegida (0,2 H_o)	Cerrada (0,1 H_o)
Zona 1, 2 y3 ($H_o \approx 0$)	RT1, RT2 RT3	RT4				
Zona 4 (H_r)						
Zona 5 (H_b)	RT5					
Zona 6 (H_o)						

Lugares adecuados Lugares no adecuados Lugares dudosos

Tabla 5.6: Validación de los lugares para el uso de formulaciones relativas a la estabilidad de los revestimientos compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena con ejemplos de obras existentes

Como se aprecia en la tabla 5.6, no todas las obras consideradas compuestas por revestimientos de tubos de geotextil rellenos de arena, se han ubicado en lugares adecuados para el uso de formulaciones relativas a la estabilidad de este tipo de estructuras. Por lo que se ha comprobado la validez de los lugares adecuados y no adecuados para el uso de dichas formulaciones y en consecuencia para su ubicación, con ejemplos de obras existentes en la realidad.

5.3.2. Zonas costeras aptas para la aplicación de las formulaciones de diseño de diques compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena

Una vez indicadas las limitaciones que tienen las diversas fórmulas de cálculo de las estructuras tipo diques compuestos por tubos de geotextil respecto a la intensidad del oleaje a soportar. Y con el objetivo de analizar las zonas de la costa, en las que son aplicables las diferentes formulaciones existentes relativas a los diques compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena, se considera su ubicación en las distintas posiciones tanto a lo largo del perfil longitudinal de una playa, como en los diferentes tipos de costa definidos anteriormente.

Posteriormente se definen unas tablas en las que se indican, a modo de resumen, las zonas aptas en la costa para la aplicación de dicha formulación. Finalmente se validan las zonas aptas para la aplicación de las formulaciones mediante la verificación con diferentes ejemplos de obras realizadas en la costa, en diferentes países del mundo.

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.

5.3.2.1. Formulaciones para diques con tubos de geotextil

Para determinar los lugares de la costa apropiados para la ubicación de estructuras tipo dique, compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena, se consideran las fórmulas de estabilidad para el diseño de estructuras tipo diques sumergidos y sus limitaciones de altura de ola significativa, cuando este tipo de estructuras están sometidas a la acción del oleaje.

- Pilarczyk (2000):

$$\frac{H_S}{\Delta_t b} < 1 \qquad H_S \leq 1,5m$$

- CUR 217 (2006):

$$\frac{H_S}{\Delta_t D} < 1 \qquad H_S \leq 2m$$

- Van Steeg y Vastenburg (2010):

$$\frac{\chi \cdot H_s}{\Delta_t \sqrt{BD} (f \cos \alpha + \sin \alpha)} \leq 0,65 \quad 1,2m \leq H_s \leq 8m$$

Las variables de estas fórmulas han sido definidas en el capítulo anterior.

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 significativa, en las fórmulas indicadas. Al ser las mayores alturas de ola, las más desfavorables con respecto a la estabilidad de las estructuras compuestas por tubos 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.

1) 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), definidas en el capítulo 3, 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 significativa 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. Por lo que se podrá situar en las zonas 1, 2 y 3 del perfil longitudinal de una playa perteneciente a los restantes tipos de una costa.

2) 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, como se indicó en el capítulo 3, por lo que no superará nunca el valor de 1,5m, 2m y 8m. Y por tanto esta estructura situada en dicha zona y en un tipo de costa abierta podría muy probablemente diseñarse con las fórmulas indicadas anteriormente, pudiéndose situar en la zona 4 del perfil de una costa abierta, como consecuencia, debiendo en todo caso comprobarse con el clima marítimo de la zona.

- 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, aunque debiera comprobarse para cada zona en particular.

3) 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, salvo que se compruebe que con el clima de oleaje de la zona la $(H_{1/3})_{\text{máx}}$ no supere estos valores.

- 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:

$$H_{c \text{ geotextil}} = H_o \cdot C_{\text{reductor perfil}} \cdot C_{\text{reductor costa}}$$

- 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).

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

- 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 0,8y 0,6 de su valor.

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

- 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:

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

Si el tipo de costa es medianamente protegida:

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

O lo que es lo mismo:

Para costa poco protegida:

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

Para costa medianamente protegida:

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

Luego 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 Vastenburger (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 pudo garantizar, por lo que no es aconsejable su uso en esta zona de la costa, salvo que el clima de oleaje de la zona facilite valores inferiores a los indicados.

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 Vastenburger (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; no obstante debe comprobarse para cada zona en particular.

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:

$$H_{c \text{ geotextil}} = H_b \cdot 0,4; \quad H_{c \text{ geotextil}} = H_b \cdot 0,2 \text{ y } H_{c \text{ geotextil}} = H_b \cdot 0,1$$

- 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; lo que habitualmente se cumpliría.

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.

4) 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 dique compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena son las evolucionadas desde alta mar, H_o , hasta profundidades intermedias, H'_o , 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 dique compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena, las alturas de ola a las que se encuentra sometido, son las evolucionadas desde alta mar, H_o , hasta profundidades intermedias, H'_o , 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:

$$H_{c \text{ geotextil}} = H_O \cdot C_{reductor \text{ perfil}} \cdot C_{reductor \text{ costa}}$$

- 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_O).

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

- a) 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.

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

- b) 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:

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

- c) 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:

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

Si el tipo de costa es medianamente protegida:

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

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 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.

DIQUES	TIPO DE COSTA					
ZONA PERFIL	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_r)						
Zona 5 (H_b)						
Zona 6 (H_o)						

Lugares adecuados Lugares no adecuados Lugares dudosos

Tabla 5.7: Posibles lugares adecuados para el uso de formulaciones relativas a la estabilidad de los diques compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena

5.3.2.2. Uso de las formulaciones para diques con ejemplos reales

En este apartado se va a verificar si el uso de las formulaciones indicadas en apartados anteriores es aconsejable para el diseño de estructuras tipo diques formados por tubos de geotextil rellenos de arena y en consecuencia su ubicación, teniendo en cuenta diversas obras existentes, realizadas en la costa en diferentes países.

Las obras que se han considerado se ubican en las siguientes playas:

- DT1.- Playa de Teluk Kalong, en Kemaman, Terengganu (Malasia)
- DT2.- Playa de Pantai Batu Buruck, 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)

a) DT1.- Playa de Teluk Kalong, en Kemaman, Terengganu (Malasia)

- Altura de ola en profundidades indefinidas:

Debido a la falta de datos de oleaje y la dificultad de obtener el fetch máximo teórico mediante la fórmula de Iribarren, al pertenecer a un tipo de costa abierta, se puede suponer que se alcanzan alturas de ola superiores a los cinco metros en aguas profundas: $H_s \geq 5 \text{ m}$.

- Zona del perfil y tipo de costa:

El dique sumergido de esta playa se sitúa en la zona 6 del perfil longitudinal y pertenece a un tipo de costa medianamente protegida.

- Altura de ola en la obra:

Por situarse la obra en la zona 6 del perfil de una playa: $H_o = H_s \geq 5 \text{ m}$.

Por pertenecer a un tipo de costa medianamente protegida: $H'_o = 0,6 \cdot H_o$

La altura de ola en el dique será: $H_d = 0,6 \cdot 5 \geq 3 \text{ m}$.

Considerando los límites de $H_d \geq 3 \text{ m} < 13,3 \text{ m}$ y $H_d = 3 \text{ m} > 2,5 \text{ m}$ y $3,3 \text{ m}$

Luego las fórmulas de Pilraczyk (2000) y CUR 217 (2006) no son válidas para su diseño y la fórmula de Van Steeg y Vastenburg (2010) podría utilizarse si $H_d < 13,3 \text{ m}$.

Figura 5.26: Localización playa Teluk Kalong, Kemaman
(Fuente: www.googleearth.es)

- Tipos de tubos de geotextil:

La longitud del dique sumergido es de 900m, compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena, separados unos 150m de la línea de costa y 1m de francobordo. Los tubos de geotextil tienen una altura de 2m.

- Comportamiento:

La obra ha tenido un buen comportamiento funcional, lo que ha provocado el incremento del ancho de la playa a la vez que la reducción de la magnitud del oleaje en las proximidades de la costa, debido a que el oleaje alcanza la playa no supera los 13,3m de altura.

Figura 5.27: Playa Teluk Kalong en 2009 (Fuente: Lee y Douglas 2011)

b) DT2.- Playa de Pantai Batu Buruck, Terengganu (Malasia)

- Altura de ola en profundidades indefinidas:

Debido a la falta de datos de oleaje y la dificultad de obtener el fetch máximo teórico mediante la fórmula de Iribarren, al pertenecer a un tipo de costa abierta, se puede suponer que se alcanzan alturas de ola superiores a los cinco metros en aguas profundas: $H_s \geq 5 \text{ m}$.

- Zona del perfil y tipo de costa:

El dique de esta playa se sitúa en la zona 6 del perfil longitudinal y pertenece a un tipo de costa poco protegida, como se aprecia en la siguiente figura.

Figura 5.28: Localización playa de Pantai Batu Buruck, Terengganu
(Fuente: www.googleearth.es)

- Altura de ola en la obra:

Por situarse la obra en la zona 6 del perfil de una playa: $H_o = H_s \geq 5m$.

Por pertenecer a un tipo de costa poco protegida: $H'_o = 0,8 \cdot H_o$

La altura de ola en el dique será $H_d = 0,8 \cdot 5m \geq 4m$

Considerando los límites de las fórmulas $H_d \geq 4m > 1,8m$ y $2,5m$ y $H_d \geq 4m < 10m$

Luego las fórmulas de Pilarczyk (2000) o de CUR 217 (2006) no son válidas para su diseño y sólo la fórmula Van Steeg y Vastenburger (2010) sería válida si $H_d < 10m$.

- Tipos de tubos de geotextil:

La longitud del dique sumergido es de 5km, compuesto por tubos de geotextil rellenos de arena, separados unos 100 - 150m de la línea de costa y 1m de francobordo. Los tubos de geotextil tienen una altura de 2m.

- Comportamiento:

Como se aprecia en las siguientes figuras, la no estabilidad del dique sumergido da lugar a la acumulación de sedimento en la playa (figura izquierda), al igual que a la pérdida del mismo (figura derecha). Por lo que se comprueba que en esta playa no es aconsejable el diseño y en consecuencia el uso de un dique sumergido compuesto por tubos de geotextil.

Figura 5.29: Playa de Pantai Batu Burucken 2009 (Fuente: Lee y Douglas 2011)

c) DT3.- Playas de Las Coloradas, Telchac y Progreso, en Yucatan (Méjico)

- Altura de ola en profundidades indefinidas:

Debido a la falta de datos de oleaje y la dificultad de obtener el fetch máximo teórico mediante la fórmula de Iribarren, al pertenecer a un tipo de costa abierta, se puede suponer que se alcanzan alturas de ola superiores a los cinco metros en aguas profundas: $H_s \geq 5 \text{ m}$.

Figura 5.30: Localización playa de Progreso (Fuente: www.googleearth.es)

- Zona del perfil y tipo de costa:

El dique de esta playa se sitúa en la zona 6 del perfil longitudinal y pertenece a un tipo de costa medianamente protegida.

- Altura de ola en la obra:

Por situarse la obra en la zona 6 del perfil de una playa: $H_o = H_s \geq 5\text{m}$.

Por pertenecer a un tipo de costa medianamente protegida: $H'_o = 0,6 \cdot H_o$

La altura de ola en el dique será $H_d = 0,6 \cdot 5\text{m} \geq 3\text{m}$

Considerando las limitaciones de: $H_d \geq 3\text{m} > 2,5\text{m}$ y $H_d < 3,3\text{m}$ y $13,3\text{m}$

Luego las fórmulas de CUR 2017 (2006) y Van Steeg y Vastenburg (2010) son válidas para su diseño y en consecuencia esta zona de la costa es aconsejable para el uso de diques con tubos de geotextil, si la altura de ola en la obra no supera los 3,3m o 13,3m.

- Tipos de tubos de geotextil:

Longitud del dique de unos 500m, con tubos de geotextil de dimensiones:

Altura: 0,9m y Ancho: 1,8m

- Comportamiento:

Como se aprecia en la parte derecha de la siguiente figura, mediante el seguimiento y la monitorización de la playa de Progreso, realizado entre los años 2011 y 2012, se detecta el buen comportamiento tanto estructural como funcional de la obra, lo cual se comprueba mediante la capacidad de la obra para disipar la energía procedente del oleaje y mediante el incremento del ancho de playa, como se visualiza en el comportamiento de la misma playa en la parte izquierda de la figura.

Figura 5.31: Seguimiento playa de Progreso (Fuente: González et al. 2012)

d) DT4.- Playa de Candolim, en Goa (India)

- Altura de ola en profundidades indefinidas:

Debido a la falta de datos de oleaje y la dificultad de obtener el fetch máximo teórico mediante la fórmula de Iribarren, al pertenecer a un tipo de costa abierta, se puede suponer que se alcanzan alturas de ola superiores a los cinco metros en aguas profundas: $H_s \geq 5 \text{ m}$.

- Zona del perfil y tipo de costa:

El dique no sumergido de esta playa se sitúa en la zona 6 del perfil longitudinal y pertenece a un tipo de costa abierta, como se aprecia en la siguiente figura.

Figura 5.32: Localización playa de Candolim (Fuente: www.googleearth.es)

- Altura de ola en la obra:

Por situarse la obra en la zona 6 del perfil longitudinal de una playa: $H_o = H_s \geq 5 \text{ m}$.

Por pertenecer a un tipo de costa abierta: $H'_o = H_o$

La altura de ola en el dique será $H_d \geq 5 \text{ m}$

Considerando los límites de las fórmulas: $H_d \geq 5 \text{ m} > 1 \text{ m}$ y 2 m y $H_d \geq 5 \text{ m} < 8 \text{ m}$

Luego las fórmulas de Pilarczyk (2000) y de CUR 217 (2006) no son válidas, mientras que la fórmula de Van Steeg y Vastenburb (2010) será válida para su diseño, si el valor de la altura de ola en la obra es inferior a 8m.

- Tipos de tubos de geotextil:

La longitud del dique es de unos 800m, separado 50m de la costa y sumergidos a -0,50m del nivel del mar, con tubos de geotextil de dimensiones:

Diámetro: 3m y Longitud: 20m

- Comportamiento:

Como se aprecia en la siguiente figura, durante los temporales que ha sufrido el dique la altura de ola ha superado los valores límites de las fórmulas de estabilidad considerados, por lo que el dique tuvo un mal comportamiento estructural y funcional. Dando lugar a la erosión en la playa y a la pérdida de material en el interior del dique.

Por lo que en esta zona del perfil de la playa y en este tipo de costa, no es aconsejable el diseño y en consecuencia el uso de un dique no sumergido compuesto por tubos de geotextil.

Figura 5.33: Comportamiento playa de Candolim (Fuente: Kudale et al. 2013)

e) DT5.- Playa de Young-Yin (Corea del Sur)

- Altura de ola en profundidades indefinidas:

Debido a la falta de datos de oleaje y la dificultad de obtener el fetch máximo teórico mediante la fórmula de Iribarren, al pertenecer a un tipo de costa abierta, se puede suponer que se alcanzan alturas de ola superiores a los cinco metros en aguas profundas: $H_s \geq 5 \text{ m}$.

- Zona del perfil y tipo de costa:

El dique de esta playa se sitúa en la zona 6 del perfil longitudinal y pertenece a un tipo de costa medianamente protegida, según se aprecia en la siguiente figura.

Figura 5.34: Localización playa de Young-Jin en Corea (Fuente: www.googleearth.es)

- Altura de ola en la obra:

Por situarse la obra en la zona 6 del perfil de una playa: $H_o = H_s \geq 5m$.

Por pertenecer a un tipo de costa medianamente protegida: $H'_o = 0,6 \cdot H_o$

La altura de ola en el dique será $H_d = 0,6 \cdot 5m \geq 3m$

Considerando los límites de: $H_d = 3m > 2,5m$ y $3,3m$ y $H_d = 3m < 13,3m$

Luego únicamente será válida la fórmula de Van Steeg y Vastenburg (2010) para el diseño de esta obra, si el valor de la altura de ola en ella no supera los 13,3m.

- Tipos de tubos de geotextil:

La longitud del dique es de unos 240m, separado 90 - 100m de la costa y sumergido a una profundidad de 3m desde su base hasta el nivel del mar, con tubos de geotextil de dimensiones:

Diámetro: 4,2m y Longitud: 50m

- Comportamiento:

Como se aprecia en el croquis de la siguiente figura, la obra compuesta por diques sumergidos de tubos de geotextil tuvo un buen comportamiento tanto estructural como funcional y lo cual se comprueba con el incremento del ancho de playa que se produjo en la playa, al igual que en la reducción de oleaje en las proximidades a la playa .

Figura 5.35: Comportamiento playa de Young-Jin (Fuente: Oh y Shin 2006)

En la siguiente tabla se validan los diferentes lugares para la aplicación de las formulaciones relativas a la estabilidad de un dique formado por tubos de geotextil rellenos de arena, situados en una zona del perfil de la playa y pertenecientes a un tipo de costa, validando la ubicación de los ejemplos existentes. A la vez, estas obras se han considerado permanentes, si funcionan en la actualidad y temporales, si por diversos motivos han sido retiradas. Considerándose en este caso, **permanentes**.

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

Lugares adecuados Lugares no adecuados Lugares dudosos

Tabla 5.8: Posibles lugares adecuados para el uso de formulaciones relativas a la estabilidad de los diques compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena

De la tabla anterior y de los ejemplos existentes relativos a los diques compuestos por tubos de geotextil rellenos de arena, se deduce:

- Los lugares no adecuados para el uso de las formulaciones relativas a la estabilidad de diques compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena son las zonas 5 y 6 del perfil de la playa, correspondientes a la zona de rotura del oleaje y a la zona de oleaje desarrollado, para un tipo de costa abierta. Y la zona 5 del perfil de la playa o zona de rotura, para un tipo de costa protegida.

En estos lugares la altura de ola que alcanza la obra supera los valores límite de las fórmulas de estabilidad de Pilarczyk (2000), CUR 2017 (2006) y Van Steeg y Vastenburg (2010), por lo que la obra no es estable. Como se aprecia en el ejemplo DT4 correspondiente a la playa de Candolim, en Goa (India).

- Los lugares dudosos para el uso de las formulaciones relativas a la estabilidad de diques compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena son la zona 6 del perfil de una playa o de oleaje desarrollado, para un tipo de costa poco protegida y medianamente protegida y la zona 5 del perfil de una playa o de rotura del oleaje, para un tipo de costa medianamente protegida.

En estos lugares la altura de ola que alcanza la obra puede superar los valores límite de las fórmulas de estabilidad de Pilarczyk (2000), CUR 2017 (2006) y Van Steeg y Vastenburg (2010), por lo que la obra puede no ser estable. Como se aprecia en los ejemplos DT1, DT2, DT3 y DT5 anteriormente descritos.

- Y los lugares adecuados para el uso de las formulaciones relativas a la estabilidad de diques compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena son el resto de zonas del perfil de la playa, para los demás tipos de costa, que se indican en la tabla 5.1.

Se debe tener en cuenta para un proyecto o anteproyecto, que los coeficientes de reducción de oleaje en los distintos tipos de costa, se obtendrán mediante modelos de propagación del oleaje.

5.4. ELEMENTOS DE MEJORA PARA EL USO DE ESTRUCTURAS COSTERAS DE ELEMENTOS DE GEOTEXTIL

Una vez definidas la zonas del perfil de una playa y el tipo de costa en los que es posible el uso de estructuras compuestas por elementos de geotextil rellenos de arena. Este apartado se dedica a indicar elementos para mejorar la estabilidad y como consecuencia el uso de las estructuras de la costa, compuestas por elementos de geotextil rellenos de arena.

Para ello se van a considerar dos tipos de estructuras compuestas por elementos de geotextil rellenos de arena. En primer lugar, las estructuras compuestas por sacos de geotextil rellenos de arena y en segundo lugar, las estructuras compuestas por tubos de geotextil rellenos de arena.

5.4.1. Elementos de mejora de estructuras compuestas por sacos de geotextil

Los elementos de mejora que algunos autores han propuesto como Harris y Sample (2009), para el uso de estructuras compuestas por sacos de geotextil rellenos de arena, son:

1. Sacos de geotextil rellenos de grava en la parte superior de la estructura
2. Sistema de anclaje de los sacos de geotextil mediante redes
3. Sistema de anclaje mediante correas alrededor de cada saco de geotextil y fijados a toda la estructura

5.4.1.1. Celdas con grava en la parte superior e inferior de la estructura

Para mejorar la estabilidad de las estructuras compuestas por sacos de geotextil rellenos de arena, se aconseja su diseño con elementos tipo celdas, rellenas con grava, que incrementan el peso en la parte superior e inferior de la estructura, y en consecuencia, aumenta la estabilidad global de toda la estructura. Como se ha aplicado en las playas de Yucatán.

Este tipo de elementos, dificulta el movimiento de los sacos más vulnerables al desplazamiento, situados en la parte superior de la estructura, cuando se somete a la acción del oleaje. Y por otro lado, impide el vuelco de la estructura, por desplazamiento de los sacos situados en el pie de la misma, debido a la socavación en el pie de la estructura, provocado por la erosión debido a la acción del oleaje.

Figura 5.36: Sacos de geotextil con grava en la parte superior de la estructura
(Fuente: www.geofabrics.com)

5.4.1.2. Sistema de anclaje de los sacos de geotextil mediante redes

Otro elemento de mejora de la estabilidad de las estructuras compuestas por sacos de geotextil rellenos de arena, consiste en el anclaje de los sacos mediante una red que no permita el desplazamiento individual de los mismos, cuando hayan sido sometidos a la acción de temporales, como se aplicado en las playas de Florida.

Figura 5.37: Sistema de anclaje de los sacos de geotextil mediante redes
(Fuente: www.geofabrics.com)

5.4.1.3. Sistema de anclaje mediante correas alrededor de cada saco de geotextil y fijados a toda la estructura

Este sistema de anclaje consiste en una correa alrededor de cada saco de geotextil, cruzando entre los sacos de geotextil, rodeando también completamente la sección transversal de toda la estructura. Y se denomina de bucle triple, cuando se utiliza alrededor de tres sacos.

Sin embargo, este sistema de anclaje con el tiempo y la acción de los temporales, puede dar lugar a un estado semi-líquido saturado de los sacos de geotextil rellenos de arena, lo que permite el movimiento de la arena en el interior de los sacos de geotextil, aflojando el anclaje de las correas y permitiendo el desplazamiento de los sacos de geotextil rellenos de arena.

Como se aprecia en la siguiente figura, en la parte izquierda, se observa el sistema de anclaje alrededor de cada saco de geotextil y fijados a toda la estructura, al terminar su ejecución. Y en la parte derecha, se observa el su desplazamiento debido a la acción de los temporales, en Port Pierce (Florida).

Figura 5.38: Sistema de correas alrededor de cada saco de geotextil tras su ejecución y tras la acción de temporales en Port Pierce, Florida. (Fuente: Harris y Sample 2009)

5.4.2. Elementos de mejora de estructuras compuestas por tubos de geotextil

Los elementos de mejora que algunos autores han propuesto (Harris y Sample 2009), para el uso de estructuras compuestas por tubos de geotextil rellenos de arena, son:

1. Sistema de anclaje de los tubos de geotextil mediante correas alrededor de toda la sección transversal de la estructura

2. Sistema de anclaje de los tubos mediante correas y tubos de PVC
3. Tubos de geotextil con sección transversal de multi-celdas

5.4.2.1. Sistema de anclaje de los tubos de geotextil mediante correas alrededor de toda la sección transversal de la estructura

Los sistemas de anclaje mediante correas se han desarrollado (Harris y Sample 2009) para ayudar a mantenerla integridad de la estructura compuesta por varios tubos de geotextil rellenos de arena. El objetivo de este anclaje es atar los elementos individuales juntos para aumentarla estabilidad de toda la estructura, y para evitar el desplazamiento individual de los tubos de geotextil rellenos de arena.

La forma de la sección de la estructura compuesta por tubos de geotextil rellenos de arena es una especie de pirámide, formada por una fila de tubos de geotextil rellenos de arena, en la parte superior apoyada sobre dos filas de tubos de geotextil rellenos de arena. El número de tubos de geotextil rellenos de arena aumenta exponencialmente, al aumentar la altura de la estructura (Harris 1988).

El primer sistema de correas desarrollado utilizaba una sola correa atada completamente alrededor de la sección transversal de los múltiples tubos de geotextil rellenos de arena. Este sistema de correas se utiliza normalmente cada 1,5m a lo largo de toda la longitud de la estructura. Debido a la capacidad de flexión a lo largo de su longitud, de los tubos de geotextil rellenos de arena, este sistema de correas proporciona sólo un pequeño aumento de la estabilidad a toda la estructura.

En la siguiente figura se muestra, en la parte izquierda, la ejecución de la estructura compuesta por tubos de geotextil rellenos de arena que se fijan mediante correas alrededor de toda la sección transversal de la estructura y, en la parte derecha, el comportamiento de la estructura tras ser sometida a la acción de los temporales.

El tipo de obra en el que se han utilizado estos elementos de mejora ha sido, en revestimientos formados por sacos de geotextil rellenos de arena, como se aprecia en las figuras adjuntas.

Figura 5.39: Sistema de anclaje mediante correas alrededor de toda la sección de la estructura en Port Pierce, Florida. (Fuente: Harris y Sample 2009)

5.4.2.2. Sistema de anclaje de los tubos mediante correas y tubos de PVC

Los últimos avances en los sistemas de anclaje de las correas utilizan un sistema de anclaje interno, con tubos de PVC colocados en el interior y a lo largo de la longitud superior de cada saco de geotextil. Las correas se colocan bajo los sacos de geotextil, y están ligados directamente a los tubos de PVC internos, en lugar de alrededor del exterior de los sacos de geotextil rellenos de arena. Los tubos de PVC dentro de cada saco están conectados por correas internas dentro de cada fila de toda la estructura, y sirve como una especie de "columna vertebral" flexible. El sistema de correas está unido a un tubo de anclaje cresta que está enterrado en tierra, similar a la anclas-muerto utilizados en los diques (Harris y Sample 2009).

Figura 5.40: Sistema de anclaje mediante correas y tubos de PVC durante su ejecución en Port Pierce, Florida. (Fuente: Harris y Sample, 2009)

Una ventaja única de este sistema de anclaje es que una vez completado, todas las correas quedan por debajo de los tubos de geotextil, evitando que sean dañados

por material de desecho con el empuje del agua o por vandalismo. Este sistema de anclaje requiere el uso de casos de geotextil rellenos de arena, especialmente diseñados, que se fabrican específicamente para emplear los tubos de PVC dentro de los sacos. Tanto los tubos de PVC y los sacos de geotextil están llenos de arena después de ser colocados en su posición. Este sistema de anclaje fue utilizado en la aplicación con múltiples filas de elementos de geotextil rellenos de arena (Harris y Sample 2009).

En la siguiente figura se muestra, en la parte izquierda, la ejecución de una estructura compuesta por 14 filas de tubos de geotextil en 1989, en la que se utiliza este tipo de anclaje y, en la parte derecha, cómo quedó la estructura tras la acción de los temporales, en 1996.

Figura 5.41: Sistema de anclaje en Vero Beach, Florida, durante su ejecución y tras la acción de los temporales (Fuente: Harris y Sample, 2009)

La figura 5.42 muestra la estructura inmediatamente antes y después de resistir con éxito la acción de los principales huracanes, Harris y Jeanne, en el otoño de 2004.

Figura 5.42: Comportamiento de la estructura, antes y después de la acción de los huracanes en 2004 (Fuente: Harris y Sample, 2009)

5.4.2.3. Tubos de geotextil con sección transversal de multi-celdas

La principal característica de los tubos de geotextil rellenos de arena, con sección transversal de tipo multi-celdas es su menor volumen en comparación con el volumen de los tubos de geotextil de una sola celda. Aunque ambos tipos tienen un tubo de menor dimensión en el pie de la estructura (Harris y Sample 2009).

Por otro lado, los tubos de geotextil rellenos de arena con sección transversal de una celda, tienen un porcentaje de volumen hacia el lado mar de al menos el 50%, lo que implica .que la pendiente hacia el mar del tubo de geotextil relleno de arena sea casi vertical, dando lugar a una reflexión del oleaje y a la socavación en el pie, facilitando el vuelco del tubo de geotextil hacia el lado mar. Sin embargo, los tubos multi-células tienen un porcentaje de volumen inferior hacia el lado mar, lo que implica una menor reflexión del oleaje, una disminución de la socavación en el pie del lado mar y por tanto una mayor dificultad de vuelco hacia el lado mar.

Figura 5.43: Comparación de la sección entre los tubos de geotextil multi-celda y los tubos de geotextil de una celda (Fuente: Harris y Sample, 2009)

Este diseño de múltiples celdas con almas verticales crea una estructura con la forma deseada cuando se rellena de arena, y también ofrece la protección contra fallo estructural total en el caso de que una de las celdas se rompa. La siguiente figura muestra una instalación de este tipo de estructura en el Cabo San Blas, ubicada en la península de la Florida.

Figura 5.44: Restauración de dunas mediante tubos multi-celda en el Cabo de San Blas, en Florida (Fuente: Harris y Sample, 2009)

Y en la siguiente figura se muestra el estado de la obra, un año después de su ejecución y tras el paso del huracán Ivan en el año 2004.

Figura 5.45: Comportamiento de la duna restaurada con tubos multi-celdas, antes y después del paso del huracán en 2004 (Fuente: Harris y Sample, 2009)

5.4.3. Elementos de mejora frente a la subida del nivel del mar debido al Cambio Climático

Según el análisis realizado en el estudio sobre el comportamiento reciente de diversas playas del norte peninsular (Peña y Antón, 2011; Peña et al. 2012), en el que se afirma que en el período entre 1996 y 2010 ha existido un huso de direcciones comprendido entre N45W y N15E con una intensidad de oleaje importante, con años especialmente duros entre 2006 y 2010, produciéndose temporales con períodos de retorno importantes en torno a 70 años. Y el quinto informe de evaluación del Cambio Climático (IPCC 2014), en el que se indica que las elevaciones del nivel del mar no

serán uniformes y que alrededor del 70% de las costas experimentarán un cambio de hasta un 20% del nivel medio del mar.

Figura 5.46: Temporales máximos registrados en la boya de Bilbao (REDCOS) (Fuente: Peña y Antón 2011)

De estos estudios, se deduce la existencia de oleajes importantes entre 2006 y 2010 (Antón et al. 2011) y las previsiones de los niveles de elevación del nivel del mar debido al Cambio Climático (IPCC 2014) para los próximos 50 y 100 años.

Figura 5.47: Variaciones del nivel medio global del mar (Fuente: IPCC 2014)

Dado la previsible subida del nivel del mar, se pueden considerar como soluciones alternativas las estructuras compuestas por elementos de geotextil rellenos de arena, como una solución de defensa frente las posibles inundaciones provocadas en la costa, debido a las elevaciones del nivel del mar motivadas por el Cambio Climático. Siendo utilizables tanto los sacos de geotextil rellenos de arena, como los tubos de geotextil rellenos de arena.

Un ejemplo de aplicación es el dique de 33,9 km de largo del Mar Saemangeum, en Corea, realizado por la empresa TenCate, que es más largo del mundo. Antes de su construcción el río Mangyeon y el río Dongjin, desembocaban directamente en el Mar Amarillo. Cuando se completó el dique, se formó un embalse de 400 km² en el que desembocan ambos ríos. Los principales objetivos de este dique implican la recuperación de terreno en el lago formado y servir como dique de protección contra inundaciones a largo plazo.

Figura 5.48: Dique de Saemangeum (Corea) (Fuente: www.tencate.com)

Como alternativa al diseño original, se utilizaron más de 26 km de tubos de geotextil para reemplazar las bermas de escollera en la construcción. Esta solución resultó más económica que el diseño de la berma de escollera original, redujo hasta en 7 meses el tiempo de ejecución de la obra y fue más respetuosa con el medio ambiente, obteniendo una menor huella de carbono, en comparación con la solución de la berma de escollera.

Finalmente otro posible ejemplo de aplicación consiste en la construcción de diques para reducir la acción de un tsunami en la costa de Japón, planteados en principio como solución tradicional o “dura”. Sin embargo se planteó como una solución blanda, mediante el empleo tubos de geotextil rellenos de arena.

Figura 5.49: Diques de protección frente a tsunamis en Japón
(Fuente: Vana Tsimopolou 2012)

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

ÍNDICE

6.1.	INTRODUCCIÓN.....	6.3
6.2.	CONCLUSIONES.....	6.3
6.2.1.	Conclusiones del análisis del estado del conocimiento.....	6.4
6.2.2.	Conclusiones de la presente tesis doctoral.....	6.6
6.2.3.	Conclusiones de los elementos de mejora para el uso de las estructuras compuestas por elementos de geotextil rellenos de arena	6.8
6.3.	LIMITACIONES OBTENIDAS DE LA INVESTIGACIÓN	6.9
6.3.1.	Limitaciones en las fórmulas de estabilidad para sacos de geotextil.....	6.9
6.3.2.	Limitaciones en las fórmulas de estabilidad para tubos de geotextil	6.10
6.4.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	6.10
6.4.1.	Futuras líneas de investigación de los elementos de geotextil rellenos de arena	6.11

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se sintetizan las conclusiones alcanzadas a la luz de todo lo expuesto en los apartados anteriores y se recogen algunas de las limitaciones presentes en la investigación realizada, relacionadas con el concepto investigado y con la metodología empleada.

Las conclusiones extraídas y las limitaciones halladas llevan al planteamiento de nuevas líneas de investigación que surgen como complemento, ramificación o profundización a lo expuesto en esta Tesis Doctoral.

6.2. CONCLUSIONES

Para una mayor concreción del tema, las conclusiones a las que he llegado en esta Tesis las he dividido en tres grandes apartados:

- 1) El primer apartado se refiere a las conclusiones a las que he llegado tras un concienzudo análisis crítico del estado del conocimiento reciente, en el capítulo 2, de los elementos de defensa de costas realizadas con piezas de geotextil rellenos de arena.
- 2) El segundo apartado se refiere al propio “alma” de esta Tesis Doctoral, esto es; a la idoneidad o no del uso de este tipo de piezas para la defensa de costas y la aptitud de las fórmulas actuales de diseño relativas a su estabilidad, con sus limitaciones dependiendo del tipo de costa y zona del perfil de playa en la que se ubiquen. Todo ello se desarrolla en los capítulos 3, 4 y 5.
- 3) El tercer apartado se dedica a diversos elementos de mejora que podrían introducirse en las obras, para incrementar su resistencia y durabilidad, obteniendo un mejor comportamiento y estructural de la obra.

6.2.1. Conclusiones del análisis crítico del estado del conocimiento reciente

Del análisis crítico del estado del conocimiento reciente de la investigación sobre los elementos de geotextil rellenos de arena abordado en el capítulo 2 se extraen las siguientes conclusiones:

1. Las tipologías de elementos de geotextil rellenos de arena hasta la fecha son principalmente tres, pudiendo ser clasificados en las siguientes: sacos o bolsas de geotextil rellenas de arena, tubos de geotextil rellenos de arena y contenedores de geotextil rellenos de arena.
2. En general, las tipologías estudiadas sólo son efectivas cuando se utilizan en estructuras compuestas por elementos de geotextil rellenos de arena, para atenuar la erosión en la costa y disminuir la fuerza del oleaje.
3. Las principales estructuras compuestas por elementos de geotextil rellenos de arena que se utilizan para reducir la erosión de la costa, son los revestimientos, los diques sumergidos o no sumergidos, los espigones y los arrecifes submarinos.
4. Los elementos de geotextil rellenos de arena ofrecen ventajas con relación a la simplicidad de colocación, la rentabilidad y el mínimo impacto con el medio ambiente.
5. Las mayores consideraciones de diseño de los elementos de geotextil rellenos de arena, están asociadas a su integridad durante la ejecución y la resistencia (al impacto, en las costuras, abrasión, durabilidad, etc.), la exactitud de su ubicación sobre el terreno (especialmente a grandes profundidades), y la estabilidad.
6. Durante su utilización se deben tener seguir las especificaciones de los fabricantes. Para su instalación se necesita personal experimentado al igual que para su supervisión. Por lo que es necesario previamente conocer las limitaciones del proceso de diseño su verificación mediante ensayos a escala real o reducida, con el fin de lograr un diseño óptimo.

7. Los modelos analíticos y/o experimentales para simular el comportamiento de los elementos de geotextil rellenos de arena se han desarrollado y calibrado con los resultados de los ensayos, para obtener un diseño óptimo. Sin embargo, estos modelos proporcionan únicamente resultados específicos.
8. La durabilidad y el comportamiento a largo plazo de los elementos de geotextil rellenos de arena, siguen siendo los puntos clave. La monitorización de las obras y la evaluación de sus datos, o los prototipos de laboratorio, pueden proporcionar información útil para su verificación y el perfeccionamiento de los criterios de diseño.
9. Cuando se produce un fallo en una estructura compuesta por tubos de geotextil rellenos de arena, es más costosa su reparación frente a una estructura compuesta por sacos de geotextil rellenos de arena, debido a la mayor dimensión de los tubos de geotextil rellenos de arena y la continuidad de los mismos en su interior.
10. Las estructuras compuestas por tubos de geotextil rellenos de arena, son más vulnerables al colapso que las estructuras compuestas por sacos de geotextil rellenos de arena. Debido a que si se produce un fallo en un tubo de una estructura su reparación y sustitución por otro tubo es más costoso que la reparación y sustitución por otro saco.
11. Aunque todavía existen muchas incertidumbres en los métodos de diseño existentes, los aspectos de diseño, los criterios de estabilidad y la experiencia existente son de gran ayuda para realizar diseños alternativos preliminares.
12. En los últimos años, ha habido un rápido desarrollo en el conocimiento y aplicación de los elementos de geotextil rellenos de arena, por lo que se recomienda seguir la literatura existente sobre este tema (revistas, congresos, etc.) para la actualización de conocimientos.
13. Hay que destacar el papel de las organizaciones nacionales e internacionales a la hora de identificar esta falta de información y poner en marcha una mayor cantidad de estudios, programas de investigación y ensayos de vigilancia.

6.2.2. Conclusiones de la presente Tesis Doctoral

La línea marcada a alcanzar en esta investigación fue la delimitación de las zonas de la costa donde es aceptable la utilización de piezas de geotextil, tipo sacos y tubos, para la realización de obras de defensa costeras, y las formulaciones más adecuadas para su cálculo y diseño.

Como paso previo, se ha analizado en primer lugar, el comportamiento físico y las características tanto de las piezas como de la estructura que constituyen, en segundo lugar sus usos más comunes y adecuados, en el capítulo 3.

Las formulaciones existentes para el diseño de piezas y estructuras han sido objeto de análisis y estudio crítico en el capítulo 4.

Finalmente, en el capítulo 5 se han analizado los lugares más adecuados, planta y perfil de la costa, para el uso de estructuras construidas con piezas (sacos o tubos) de geotextil rellenas de arena.

A continuación, se muestran las conclusiones a las que se ha llegado en esta investigación, tras los estudios y análisis indicados:

1. Revestimientos con sacos de geotextil rellenos de arena:

1.1. Las zonas de la costa adecuadas para su uso, son: a) las comprendidas entre la playa seca y la zona perteneciente al rango de marea, del perfil longitudinal de una playa; situadas en cualquier tipo de costa, bien sea abierta, poco protegida, medianamente protegida, protegida, muy protegida y cerrada, b) la zona de rotura del oleaje de una costa protegida, muy protegida y cerrada y c) la zona con oleaje no roto, situada en una costa medianamente protegida, protegida, muy protegida y cerrada.

1.2. Las zonas de la costa que previsiblemente no son adecuadas para su uso, son: a) la zona de rotura del oleaje del perfil longitudinal de una playa, situada en un tipo de costa medianamente protegida, y b) la zona de oleaje no roto, situada en una costa poco protegida.

- 1.3. Las zonas no adecuadas para su uso, son: a) la de rotura del oleaje, situada en un tipo de costa abierta y poco protegida, y b) la zona de oleaje no roto, situada en una costa abierta.
2. Diques con sacos de geotextil rellenos de arena:
  - 2.1. Las zonas de la costa adecuadas para su uso, son: a) las situadas entre la playa seca y la zona perteneciente al rango de marea, en a cualquier tipo de costa (abierta, poco protegida, medianamente protegida, protegida, muy protegida y cerrada), b) la zona de rotura del oleaje de una costa, muy protegida y cerrada y c) la zona de oleaje no roto de una costa protegida, muy protegida y cerrada.
  - 2.2. Las zonas de la costa posiblemente no adecuadas para su uso, son: a) la de rotura del oleaje de un tipo de costa medianamente protegida y costa protegida y b) la de oleaje sin romper, de un tipo de costa poco protegida y medianamente protegida.
  - 2.3. Las zonas no adecuadas para su uso, son: a) la de rotura del oleaje de un tipo de costa abierta y poco protegida y b) la zona de oleaje no roto de un tipo de costa abierta (coincidentes con las zonas no adecuadas para el uso de revestimientos compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena).
3. Revestimientos y diques con tubos de geotextil rellenos de arena:
  - 3.1. Las zonas de la costa adecuadas para su uso, son: a) las comprendidas entre la playa seca del perfil longitudinal de una playa y la zona que pertenece al rango de marea, de cualquier tipo de costa (abierta, poco protegida, medianamente protegida, protegida, muy protegida y cerrada) y b) la de rotura del oleaje en el perfil longitudinal de una playa, de una costa protegida, muy protegida y cerrada y c) la de oleaje desarrollado del perfil longitudinal de una playa, de una costa, protegida, muy protegida y cerrada.

3.2. Las zonas de la costa posiblemente no adecuadas para el uso de estructuras compuestas por tubos de geotextil rellenos de arena, son la zona de rotura del oleaje en el perfil longitudinal de una playa, situada en un tipo de costa medianamente protegida. Y la zona de oleaje desarrollado, del perfil longitudinal de una playa que, situada en un tipo de costa poco protegida y medianamente protegida.

3.3. Las zonas no adecuadas para el uso de estructuras compuestas por tubos de geotextil rellenos de arena, son la zona de rotura del oleaje en el perfil longitudinal de una playa, situadas en un tipo de costa abierta y poco protegida. Y la zona de oleaje desarrollado del perfil longitudinal de una playa, situada en un tipo de costa abierta. Coincidentes con las zonas no adecuadas para el uso de revestimientos y diques compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena.

6.2.3. Conclusiones de los elementos de mejora para el uso de las estructuras compuestas por elementos de geotextil rellenos de arena

Las principales conclusiones sobre los elementos de mejora utilizados en las estructuras compuestas por elementos de geotextil son:

1. Los elementos de geotextil rellenos de arena se pueden utilizar de forma satisfactoria, en la Ingeniería de Costas, para el control de la erosión. La mejora de los materiales geo-sintéticos, de los métodos de fabricación, y de los diseños de estos sistemas, ha incrementado el número de sus aplicaciones y la longevidad de estas estructuras. Estas mejoras incluyen propiedades de los materiales y de las costuras, nuevas y más eficientes, como: el uso de una capa protectora, el uso de contenedores multicelulares y la mejora del diseño. Permitiendo a su vez una pendiente de las estructuras, en el lado mar, más suave.
2. Las estructuras realizadas con elementos de geotextil rellenos de arena, requieren un menor tiempo de ejecución, que las estructuras realizadas con materiales convencionales, como la escollera, el hormigón y el acero. Siendo más aconsejables para las zonas de playa.

3. Los avances en los elementos de geotextil rellenos de arena, y la evolución de la tecnología de estos materiales seguirán aumentando, ampliando la vida útil, y las aplicaciones y las capacidades de estos elementos.
4. Dado la previsible subida del nivel del mar, se pueden considerar como soluciones alternativas a las tradicionales, las estructuras compuestas por elementos de geotextil rellenas de arena, como una solución de defensa frente las posibles inundaciones provocadas en la costa, debido a las elevaciones del nivel del mar motivadas por el Cambio Climático. Siendo utilizables tanto los sacos de geotextil rellenos de arena, como los tubos de geotextil rellenos de arena.

6.3. LIMITACIONES OBTENIDAS DE LA INVESTIGACIÓN

La idea de aplicar los elementos de geotextil rellenos de arena como estructuras para la defensa de la costa es relativamente novedosa y como toda idea novedosa puede presentar algunas limitaciones.

Estas limitaciones han obtenido de los resultados obtenidos en la determinación de los valores límite de la altura de ola significativa de las fórmulas de diseño de los dos tipos de elementos de geotextil rellenos de arena considerados, los sacos y los tubos.

6.3.1. Limitaciones en las fórmulas de estabilidad para sacos de geotextil

Las limitaciones de la altura de ola en las fórmulas de diseño de las estructuras compuestas por sacos de geotextil rellenos de arena, considerando únicamente los valores superiores con el objetivo de estar del lado de la seguridad, son:

1. Para las estructuras tipo revestimiento:

- 1.1. En las fórmulas de Pilarczyk (1996) y Wouters (1998), la altura de ola significativa debe ser inferior a 2m.

1.2. En las fórmulas de Oumeraci et al. (2002, 2003), dependiendo de la posición de los sacos. La altura de ola significativa debe ser inferior a 3,2m; si los sacos se sitúan en el talud del revestimiento. Y la altura de ola significativa debe ser inferior a 1m; si los sacos se sitúan en la cresta del revestimiento.

2. Para las estructuras tipo diques o espigones:

2.1. En la fórmula de Mori (2009) y Mori et al. (2008), la altura de ola significativa debe ser inferior a 3,25m.

2.2. En la fórmula de Dassanayake y Oumeraci (2013), la altura de ola significativa debe ser inferior a 7,92m.

6.3.2. Limitaciones en las fórmulas de estabilidad para tubos de geotextil

Las limitaciones de la altura de ola en las fórmulas de diseño de las estructuras compuestas por tubos de geotextil rellenos de arena, considerando únicamente los valores superiores con el objetivo de estar del lado de la seguridad, son:

1. Para estructuras tipo revestimiento y diques o espigones:

1.1. En la fórmula de Pilarczyk (2000), la altura de ola significativa debe ser inferior a 1,5m.

1.2. En la fórmula de CUR 217 (2006), la altura de ola significativa debe ser inferior a 2m.

1.3. En la fórmula de Van Steeg y Vastenburg (2010), la altura de ola significativa debe ser inferior a 8m.

6.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Algunas futuras líneas de investigación surgen de las conclusiones obtenidas en esta Tesis Doctoral y de las limitaciones halladas en las formulaciones de estabilidad de los elementos de geotextil rellenos de arena.

6.4.1. Futuras líneas de investigación de los elementos de geotextil rellenos de arena

Se resumen a continuación las futuras líneas de investigación extraídas para los usos de los sacos de geotextil rellenos de arena:

1. La investigación de nuevos lugares adecuados para el diseño y en consecuencia para su uso, debido a que la erosión en la costa podría cambiar el perfil de la playa y por tanto la clasificación de la zonas.
2. La investigación futura debe ir encaminada hacia estructuras alternativas, especialmente diques sumergidos, determinando con mayor profundidad la respuesta de la costa.
3. La investigación de nuevos métodos para mejorar el diseño funcional y estructural de las diferentes tipologías de estructuras con elementos de geotextil rellenos de arena, mediante la utilización de modelos físicos.
4. La búsqueda de nuevos modelos matemáticos más aptos para la defensa de la costa a la erosión mediante elementos de geotextil rellenos de arena.
5. Mayor experiencia práctica sobre los elementos de geotextil rellenos de arena y sometidos a diversas condiciones hidráulicas.
6. El desarrollo de métodos más fiables, innovadores y económicos de estructuras realizadas con elementos de geotextil rellenos de arena.
7. Desarrollo de nuevas fórmulas de estabilidad para los elementos de geotextil rellenos de arena y su aplicación como defensa de la costa.

Capítulo 7

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE

7.1.	INTRODUCCIÓN.....	7.3
7.2.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	7.3
7.2.1.	Libros e informes técnicos.....	7.3
7.2.2.	Ponencias	7.7
7.2.3.	Artículos	7.13
7.3.	PÁGINAS WEB CONSULTADAS.....	7.19

Capítulo 7

BIBLIOGRAFÍA

7.1. INTRODUCCIÓN

A continuación se expone la bibliografía que ha sido consultada para la realización de esta Tesis Doctoral. Para lo cual se han discernido las referencias bibliográficas de las páginas web consultadas.

La mayoría de las referencias bibliográficas y páginas web se han mencionado a lo largo del texto, ya sea por expresar ideas, conceptos ó fórmulas que se consideran necesarias para comprender el objeto y alcance de esta investigación, por exponer estudios e investigaciones previas que forman parte del estado actual de conocimientos, o por contener formulaciones que han sido aplicadas en la propia investigación.

Sin embargo, se han incluido también algunas referencias bibliográficas y páginas web que, sin haber sido citadas explícitamente en el texto, han sido consultadas para su realización y por tanto forman parte de los conocimientos generales de fondo que han posibilitado la redacción de esta Tesis Doctoral y se consideran de interés para aquellos que deseen profundizar en el estudio de las piezas o elementos de geotextil rellenos de arena.

7.2. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7.2.1. Libros e informes técnicos

- Almazán Gárate, J. L.; Laceta Muñoz, J. M.; Estepa Montero, M. (2009). “El Régimen Jurídico de los Espacios Marinos en Derecho Español e Internacional”. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.

- Almazán Gárate, J. L.; Palomino Monzón M. C.; Márquez Caba, H. A. (2009). "Sistemas de Información Geográfica en la Gestión Integral del Litoral". E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos.
- Almazán Gárate, J.L. (2002). Posicionamiento y Navegación de Precisión en 2D y 3D: Batimetrías de Alta Precisión". E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos.
- Almazán Gárate, J. L.; Palomino Monzón M. C.; Arrayás González, J. L. (2001). "Oscilaciones en Masas de Agua Confinadas: Resonancia en Puertos". E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos.
- Almazán Gárate, J. L.; Palomino Monzón M. C.; Paramio Cabrera, J. M.; Espinosa Goded, J. (2001). "Ingeniería Marítima: Sistemas de Fondeo y Anclaje". E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos.
- Almazán Gárate, J. L.; Palomino Monzón M. C.; García Montes, J. R. (2000). "Introducción al diseño de obras de defensa de formas costeras de depósito". E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos.
- Almazán Gárate, J. L.; Palomino Monzón M. C. (2000). "Introducción a la Ingeniería Portuaria: Sistema Portuario Español. Obras Exteriores". E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos.
- Almazán Gárate, J. L.; Palomino Monzón M. C. (2000). "Descripción, Medida y Análisis del Oleaje". E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos.
- Almazán Gárate, J. L.; Palomino Monzón M. C.; Hermosilla Villalba, F. (1999). "Estática de Fluidos". E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos.
- Bezuijen, A. y Vastenburg, E.W. (2013). "Geosystems: design rules and applications". CRC Press.

- Coastal Engineering Research Center (1984). "Shore Protection Manual. Volume II", Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers.
- Coastal Engineering Research Center (1995). "Design of Beach Fills". Department of the Army- U.S. Army Corps of Engineers (EM 1110-2-3301).
- CUR (1987). "Manual on artificial beach nourishment". Centre for Civil Engineering Research, Codes and Specifications (report 130).
- CUR (1989). "Guide to the assessment of the safety of dunes as a sea defence". Centre for Civil Engineering Research and Codes-Technical Advisor Committee on Water Defences (report 140).
- CUR (2004). "CUR214: Geotextiele zandelementen". Stichting CUR, Gouda.
- CUR (2006). "CUR217: Ontwerpen met geotextiele zandelementen". Stichting CUR, Gouda.
- Jackson, A. (2010). "Design and construction of low crested reef breakwaters using sand filled geotextile containers". Geosynthetics and modern materials in coastal protection and related applications. IAHR Workshop.
- Kriel, H.J. (2012). "Hydraulic stability of multi-layered sand-filled geotextile tube breakwaters under wave attack". Tesina de Master, Stellenbosch University.
- Liu, G.S. (1977). "Mortar Sausage Units for Coastal Defense". Tesis Doctoral, Univ. of Western Australia.
- Isla, F. I. y Lastra, C. (2006). "Manual de manejo costero para la provincia de Buenos Aires". Universidad Nacional del Mar de Plata.

- Magrama (2005). “Hacia gestión sostenible del litoral español”. Ministerio de Medio Ambiente.
- Mori, E. (2009). “Coastal structures made of geotextile elements filled with sand: field and experimental research”. Tesis Doctoral, Università degli Studi di Firenze, Florencia, Italia.
- Peña Olivas, J. M. (2007). “Guía técnica de estudios litorales. Manual de costas”. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (colección senior nº 39).
- Peña, J.M. y Antón, A.I. (2011). “Comportamiento reciente de diversas playas del norte”. Informe Técnico, 22-410-5-001 (CEDEX).
- Pilarczyk, K. W. (1994). “Novel systems in coastal engineering: geotextile systems and other methods, an overview”. Road and Hydraulic Engineering Division of the Rijkswaterstaat, P.O. Box 5004, 2600 GA Delft. The Netherlands.
- Pilarczyk, K. W. y Zeidler, R. B. (1996) “Offshore breakwaters and shore evolution control”, A. A. Balkema, Rotterdam.
- Pilarczyk, K. (1998). “Dikes and revetments, design, maintenance and safety assessment”. A. A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands.
- Pilarczyk, K. W. (2000). “Geosynthetics and geosystems in hydraulic and coastal engineering”, A. A. Balkema, Rotterdam.
- Recio, J. (2008). “Hydraulic stability of geotextil sand containers for coastal structures”. Tesis Doctoral, Faculty of Architecture, Civil Engineering and Environmental Sciences of the Technical University Carolo-Wilhelmina, Braunschweig.
- Tsimopoulou, V. (2012). “The great eastern Japan earthquake and tsunami. Facts and implications for blood risk management”. Vana Tsimopoulou.

- U.S. Army Corps of Engineers. (1984). "Low cost shore protection. A property owner's guide. University Press of the Pacific.
- U.S. Army Corps of Engineers (1991). "Sand Bypassing System Selection", U.S. Army Corps of Engineers (EM 1110-2-1616).
- U.S. Army Corps of Engineers (1995). "Design of Coastal Revetments, Seawalls, and Bulkheads", U.S. Army Corps of Engineers (EM 1110-2-1614).
- U.S. Army Corps of Engineers. (2004). "Low cost shore protection. A guide for engineers and contractors". University Press of the Pacific.
- U.S. Army Corps of Engineers (2006). "Coastal Engineering Manual, Part V (Chapter 3: Shore Protection Projects)", U.S. Army Corps of Engineers (EM 1110-2-1110).
- Zitscher, F.-F. (1971). "Kunststoffe fur den Wasserbau". Bauingenieur – Praxis, Heft 125.

7.2.2. Ponencias

- Almazán, J.L. (2009). "Los SIG en la gestión integrada del litoral". XXVII Semana de Estudios del MAR, Motril.
- Akter, A., Pender, G., Wright, G. y Crapper, M. (2010). "Modelling the hydrodynamic forces on geobag revetments using ces". 1st European Conference of IAHR, Edimburgo, Reino Unido, 4 al 10 de mayo 2010.
- Aminti, P., Mori, E., y Fantini, P. (2010) "Submerged barrier for coastal protection application built with tubes in geosynthetics of big diameter in Tuscany-Italy". 9th International Conference on Geosynthetics, 1235-1240.
- Bezuijen, A. y Pilarczyk, K.W. (2012). "Geosynthetics in hydraulic and coastal engineering: Filters, revetments and sand filled structures", European Geosynthetics Congress, Valencia-España, 65-80.

- Bogossian, F., Smith, R. T., Vertematti, J.C. y Yazbek, O. (1982). "Continuous retaining dikes by means of geotextiles". Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles, Industrial Fabric Association International (IFAI), Las Vegas. 1, 211-216.
- Blacka, M.J., Carley, J.T., Corbett, B.B. y Jackson, L. A. (2009). "Wave transmission over low crested geotextile breakwater structures". Australian Conference on Coasts and Ports, Wellington. Nueva Zelanda.
- Dassanayake, D.T. y Oumeraci, H. (2009). "Planned Research on the Hydraulic Stability of Geotextile Sand Containers". Proceedings of 7. FZK-Kolloquium "Potentiale für die Maritime Wirtschaft", Hannover, Germany, 45-49.
- Dassanayake, D. y Oumeraci, H. (2010). "Design and construction aspects of fully submerged geotextile sand container (GSC) structures: sinking behaviour and deformation of GSCs". International Workshop on Geosynthetics and Modern Materials in Coastal Protection and Related Applications, IIT Madras, India, 242-244.
- Dassanayake, D.; Oumeraci, H. y Streicher, M. (2011). "Sinking behaviour and deformation of geotextile sand containers during installation of scour protection for marine and offshore structures". Proceedings of 8. FZK-Kolloquium "Maritimer Wasserbau und Küsteningenieurwesen", Hannover, Germany, 33-38.
- Dassanayake, D. T. y Oumeraci, H. (2012). "Hydraulic stability of coastal structures made of geotextile sand containers: effect of engineering properties of GSCs". 33rd International Conference on Coastal Engineering. ICCE, Santander.
- Dassanayake, D.T. y Oumeraci, H. (2012). "Effect of fill ratio and type of geotextile on the hydraulic stability of Geotextile Sand Containers in coastal engineering". Eurogeo 5, 5th European Geosynthetics Congress, Valencia.
- Dassanayake, D.T., Oumeraci, H., Werth, K. y Heerten, G. (2013). "Setting up monitoring plans to assess the performance and the durability of exposed geotextile encapsulated sand elements in coastal engineering applications". Second

International Workshop on Geosynthetics and Modern Materials in Coastal Protection and Related Applications.

- Fowler, J., Stephens, T., Santiago, M. & De Bruin, P. (2002) Amwaj Islands constructed with Geotubes, Bahrain. In Denver, USA: CEDA Conference, pp. 1–14.
- Gómez, G. (2002). “La Gestión integral de la costa en Estados Unidos: aspectos positivos a considerar en el modelo español”. I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente, Madrid.
- González Leija, M. Eb, S., Álvarez, E., Solís, A. y Wabi, C. (2012). “Coastal Erosion Management at Yucatan, Mexico: Engineering Efforts and Experiences”. 33rd International Conference on Coastal Engineering. ICCE, Santander.
- Heibaum, M. Fourie, A., Girard, H., Karunaratne, G.P. et al. (2006). “Hydraulic Applications of Geosynthetics”, Proceedings of the 8th International Conference on Geosynthetics (8ICG), Yokohama, Japan, September 18-22, 2006.
- Heilman, D., J., Perry, M., C., Thomas, R., C. y Kraus, N., C. (2008). “Interaction of Shore-parallel geotextil tubes and beaches along the upper Texas coast”. USACE (ERDC/CHL CHETN-II-51).
- Herrier, J.-L., Mees, J., Salman, A., Seys, J., Van Nieuwenhuysse, H. y Dubbelaere, I. (2005). “EuroSION: Coastal erosion measures, knowledge and results acquired through 60 studies”. Proceeding Dunes and Estuaries, 421-431.
- Jackson, A., Corbett, B. y Restall, S. (2006). “Failure modes and stability modeling for design of sand filled geosynthetic structures”. 30th International Conference on Coastal Engineering. San Diego. California.
- Jackson, A. Mocke, G., Smit, F., Corbett, B. Restall, S. y Markham, D. (2008). “Alternative coastal protection and amenity provision using multi-function sand filled container structures”. Conference on Marine Problems and Specific Solutions.

- Jones, D.L., Davis, J.E., Curtis, W., R. y Pollock Ch. E. (2006). "Geotextile tube structures. Guidelines for Contract Specifications". USACE (ERDC/CHL CHENT-II-50).
- Kazimierowicz, K. (1994). "Simple analysis of deformation of sand-sausages". Proceedings of 5th International Conference on Geotextile, Geomembranes and Related Products. Singapore, 775-778.
- Lechuga, A, Antón, A.I., Peña, J.M., Díaz, G. (2012). "Behaviour of the beach in the north of Spain". 33rd International Conference on Coastal Engineering. ICCE, Santander.
- Liu, G.S. y Silvester, R. (1977). "Sand Sausages for Beach Defense Work". Proceedings of 6th Australasian Conference on Hydraulics and Fluid Mechanics, 340-343.
- 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. Subject B (b), Paper 6, 123-131.
- McClarty, A., Cross, J., James, G. M. y Gilbert, L. (2006) "Design and construction of coastal erosion protection groynes using geocontainers, Langebaan, South Africa". 8th International conference on geosynthetics, 2, 765-768.
- Mocke, G., Smit, F., Fernando, S. y Al Zahed, K. (2003). Coastal protection and amenity value of an artificial surf reef for Dubai. Proc. of the 3rd International Surfing Reef Symposium, p. 180-195. <www.asrltd.co.nz>.
- Mocke, G. Smit, F., Al Zahed, K., 2004. Evaluation of a novel multifunctional artificial reef for Dubai. Proc. International Conference on Coastal Engineering, p. 1971-1983 (www.asrltd.co.nz).

- Mori, E., Aminti, P., L. y D'Eliso, C. (2008). "Field experiment on a groin system built with sand bags". Abstract of International Conference on Coastal Engineering, Hamburg, 219.
- Oumeraci, H., Hinz, M. y Kortenhaus, A. (2003) "Sand-filled geotextile containers for shore protection". Proceedings Coastal Structures, Oregon.
- Oumeraci, H y Hinz, M. (2004). "Geotextile sand-filled container as innovative measures for shore protection". Technical paper, Proc. EuroGeo 2004, Vol 1, 175-180.
- Oumeraci, H. (2004). "Sustainable coastal flood defenses: Scientific and modeling challenges towards an integrated risk-based design concept". Keynote Lecture. Proceedings of the International Conference on Flood Risk Assessment, University of Bath, UK September 2004, 9-24.
- Oumeraci, H., Kortenhaus, A. y Werth K. (2007). "Hydraulic performance and armour stability of rubble mound breakwaters with core made of geotextile sand containers: Comparison with conventional breakwaters". Abstract Submitted to the Conference of Coastal Structures, Venice, Italy.
- Perrier, H. (1986). "Use of soil-filled synthetic pillows for erosion protection". Proceedings of 3rd International Conference on Geotextiles, Vienna, 4, 1115-1119.
- Pilarczyk, K. W. (1996). "Geotextile systems in coastal engineering – an overview". Proceedings of 25th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, 2114-2127.
- Porraz, M., Maza, J. A. y Muñoz, M. L., (1977). "Low cost structures using operational design systems". Proceedings Coastal Sediments Conference, ASCE, 672-685.
- Porraz, M., Maza, J.A. y Medina, R., (1979). "Mortar-filled containers, lab and ocean experiences". Proceedings Conference on Coastal Structures, ASCE, 270-289.

- Recio, J. y Oumeraci, H. (2006). "Processes affecting the stability of revetments made with geotextile sand containers". Proceedings of the International Conference of Coastal Engineering, ICCE 2006, San Diego, U. S., 356-374.
- Recio, J. y Oumeraci, H. (2005). "Effect of the deformation on the hydraulic stability of revetments made of geotextile sand containers". Proceedings of the International Symposium, "Tsunami Reconstruction with Geosynthetics", Bangkok, Thailand, 53-68.
- Recio, J. y Oumeraci, H. (2008). "Hydraulic stability of geotextile sand containers for coastal structures – effect of deformations and stability formulae". Proceedings of 31th International Conference on Coastal Engineering, 4, 3805-3817.
- Recio, J., Oumeraci, H. y Mocke, G. (2010). "Stability formula and numerical model for structures made with geotextile sand containers used for coastal stabilization", 2nd International Conference on Coastal Zone Engineering and Management (Arabian Coast 2010), Muscat, Oman.
- Steeg, P. van, Vastenbure, 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 filled geotextile containers". In: Proceedings COPEDEC VI, 2003 (Colombo, Sri Lanka).
- Wert, K., Recio, J. Oumeraci, H. y Heerten, G. (2008). "Hydraulic permeability of structures made of geotextiles and containers (GSC-Structures) - Laboratory test and results". Proceedings of 31th International Conference on Coastal Engineering, 4, 3793-3804.
- Wilke, M. y Hangen, H. (2011). "Geosynthetic tubes as construction element for coastal protection works – Fundamental design aspects; application possibilities and

practical experience". 5th International Short Conference on Applied Coastal Research.

- Wishaw, D., Gibbs, D. y Hornsey, W. (2011). "Durability of geosynthetic sand containers subject to extreme Australian weather conditions". Coasts and Ports: Diverse and Developing: Proceedings of the 20th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 13th Australasian Port and Harbour Conference, Engineers Australia, 2011: 803-808.
- Yee, T.W., Choi, J. C., Zengeringk, E. (2009). "Revisiting the geotextile tubes at Incheon Bridge Project Korea". Proceedings 9th ICE, London, 1217-1220.
- Yee, T.W., Lim, L.K., Ter Hansel, M., Choi, J.C. y Hwang, S.P. (2012). "Geotextile tubes as economical and environmental replacement of rockfill for construction of polder dike on Saemangeum, Corea". Proceedings of WEDA XXXIII Technical Conference and TAMU44 Dregings Senior.

7.2.3. Artículos

- Almazán, J.L. y Forada, C. (2011). "La gestión integrada sostenible del litoral en la actualidad". Revista de Ingeniería Civil, 163, 75-87.
- Almazán, J.L., Palomino, M. C. y Forada, C. (2011). "Perspectiva actual de la planificación y gestión integrada sostenible del litoral". Revista de Ingeniería y Territorio, 90, 86-109.
- Bezuijen, A., Adel, H. Groot, M. y Pilarczyk K. (2000). "Research on geocontainers and its application in practice". Coastal Engineering, 2331-2341.
- Bruun, P. (1962). "Sea level rise as a cause of shore erosion". Journal of the Waterways and Harbors. Division 88, 117-130.

- Cantré, S. y Saathopff, F. (2011). "Design method for geotextile tubes considering strain – Formulation and verification by laboratory tests using photogrammetry". *Geotextiles and Geomembranes*, 29, 201-210.
- 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.
- Dassanayake, D. T. y Oumeraci, H. (2012). "Important engineering properties of geotextile sand containers and their effect on the hydraulic stability of GSC structures". *Terra et Aqua*, 127, 3-11.
- Dassanayake, D. T. y Oumeraci, H. (2012). "Engineering properties of geotextile sand containers and their effect on hydraulic stability damage development of low-crested / submerged structures". *International Journal of Ocean and Climate Systems*, 3(3), 135-150.
- Elko, N.A. y Mann, D.W. (2007). "Implementation of geotextile T-groins in Pinellas County, Florida". *Shore Beach* 75 (2), 2–10.
- Greenwood, J. H., Schroeder, H. F. y Voskamp, W. (2012). "Durability of Geosynthetics". CUR Building and Infrastructure. Report 243. Stichting CURNET, Gouda, The Netherlands.
- González Ortiz, J. L. (1990). "Holanda y el agua". *Papeles de Oceanografía*, 16, 191-216.
- Harris, L.E. y Sample, J. W. (2009). "The evolution of multi-celled sand-filled geosynthetic systems for coastal protection and surfing enhancement". *Reef Journal*, 1(1), 1-15.
- Hornsey, W. P., Carley, J. T., Coghlan, I.R. y Cox, R.J. (2011). "Geotextile sand container shoreline protection systems: design and application". *Geotextiles and Geomembranes*, 29, 425-439.

- Hornsey, W. P. (2012). "Geotextiles in specialist marine applications: an Australia perspective over 32 years". <www.geofabrics.com.au>
- Jacson, A. y Hornsey, W. P. (2003). "An Artificial Reef to Protect Surfers Paradise Beach - Developing & Implementing the Science". Geotechnical Fabrics Report, 20 (4).
- Koerner, R. M. (2005). "Designing with geosynthetics". Fifth edition, Pearson Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Khalilzad, M. y Gabr, M. A. (2011). "External stability of geotubes subjected to wave loading". Georisk, Atlanta, ASCE.
- Kudale, M. D., Mahalingaiah, A. V. y Tayade, B. R. (2014). "Use of sand-filled geotextile tubes for sustainable coastal protection-case studies in Indian scenario. Indian Journal of Marine Sciences, 43(7).
- Lawson, C.R. (2008). "Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering". Geosynthetics International, 15(6), 384-427.
- Lee, E.C. y Douglas, R.S. (2012). "Geotextile tubes as submerged dykes for shoreline management in Malaysia". Geotextiles and Geomembranes, 30, 8-15.
- 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.
- 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.

- Neves, L. das, Lopes, M. L., Veloso-Gomes, F. y Taveira-Pinto, F. (2011). "Experimental Study on the effect of geotextile encapsulated-sand systems on a frontal beach". *Journal of Coastal Research*, SI, 64, 2027-2031.
- Ockels, R. (1991). "Innovative hydraulic engineering with geosynthetics". *Geosynthetics World*, Lintz, Austria, 2(4), 26-27.
- Oh, Y. I. y Shin, E. C. (2006). "Using submerged geotextil 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". *Leichweiss-Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources*, Report nº. 866, Braunschweig.
- Oumeraci, H. (2003). "Review and analysis of vertical breakwater failures - Lessons Learned". *Coastal Engineering, Special Issue on Vertical Breakwaters*, Amsterdam. The Netherlands: Elsevier Science Publishers B. V., vol. 22, 1, 3-29.
- PIANC (2011). "The application of geosynthetics in waterfront areas", PIANC, 13.
- Pilarczyk, K. (2008). "Alternatives for coastal protection", *Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, No. 23, 181-188.
- Porraz, M. y Medina, R. (1977). "Low cost, labor intensive coastal development appropriate technology". *Sea Technology*, Aug., 19-24.
- Porraz, M. y Medina, R. (1978). "Exchange of low-cost technology between developing countries". *ECOR General Assembly*, Washington DC.
- Plaut, R. H. y Klusman, C. R. (1999). "Two-dimensional analysis of stacked geosynthetic tubes on deformable foundations". *Thin-walled Structures*. Elsevier. 34(3), 179-194.
- Recio, J. y Yasuhara, K. (2005). "Stability of modified geotextile wrap-around revetments (GWR) for coastal protection". *Geosynthetics International*, 12(5).

- Recio, J. y Oumeraci, H. (2005). "Processes affecting the hydraulic stability of geotextile sand containers –Experimental studies-". Leichtweiss Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources. Research report 944, 78.
- Recio, J. y Oumeraci, H. (2007). "Geotextile sand containers for coastal structures, Geotextile sand containers for coastal structures – hydraulic stability formula and tests for drag, inertia and lift coefficients". Leichtweiss Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources. Research Report 936, 97.
- Recio, J. y Yasuhara, K. (2007). "Geosynthetic-wrap around revetments for shore protection". Geotextiles and Geomembranes. 25, 221-232.
- Recio, J. y Oumeraci, H. (2009). "Processes affecting the hydraulic stability of coastal revetments made of geotextile sand containers". Coastal Engineering, 56, 260-284.
- Restall, S. J., Jackson, L. A., Heerten, G, y Hornsey, W. P. (2002). "Case studies showing the growth and development of geotextile sand containers: an Australian perspective". Geotextiles and Geomembranes, 20, 321-342.
- Saathoff, F. (2003). "Geosynthetics in geotechnical and hydraulic engineering", Geotechnical Engineering Handbook, vol. 2: Procedures, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 507-597.
- Saathoff, F., Oumeraci H. y Restall, S. (2007). "Australian and German experiences on the use of geotextile containers". Geotextiles and Geomembranes, 25, 251-263.
- Silvester, R. (1986). "Use of grout-filled sausages in coastal structures". Journal Waterway Port Costal and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers, New York, 112 (1), 95-114.
- Smith, M. (2008). "Geotextil tubes in environmental applications". <www.globalsynthetics.com.au>.

- Sprage, C. J. (1993). "Dredged material filled fabric tubes", Project No. CJS-92-008, Construction Products Division, Nicolon Corporation.
- Suárez Bores, P. (1999). "La ingeniería de costas en España en el siglo XX. Innovaciones y desarrollo". Revista de Obras Públicas, 49,32-41.
- Van Steeg, P y Vastenburg, E.W. (2010). "Large scale physical model test on the stability of geotextile tubes", Deltares (nº 1200162-000).
- Van Zijl, P.M.N., Vlasblom, W.J., De Gijt, J.G., Broos, E.J. y De Boer, J. (2006). "Feasibility study of the continuous geotube®", Terra et Aqua, 102, 19-24.
- Weggel, J. R., Dortch, J. y Gaffney, D. (2011). "Analysis of fluid discharge from a hanging geotextil bag". Geotextiles and Geomembranes, 29, 65-73.
- Wouters, J. (1998). "Open taludbekleidingen; stabiliteit van geosystems (stability of geosystems)". Delft Hydraulics, no. H1939, Annex 7, Delft. The Netherlands.
- Yan, S. W. y Chu, J. (2010). "Construction of an offshore dike using slurry filled geotextile mats". Geotextiles and Geomembranes, 28, 422-433.
- Yasuhara, K. y Recio-Molina, J. (2007). "Geosynthetic-wrap around revetments for shore protection". Geotextiles and Geomembranes, 25, 221-232.
- Yasuhara, K., Komine, H., Murakami, S., Chen, G., Mitani, Y. y Duc, D.M. (2012). "Effects of climate change on geo-disasters in coastal zones and their adaptation". Geotextiles and Geomembranes, 30, 24-34.
- Zhu, L., Wang, J., Cheng, N. S., Ying, Q. y Zhang, D. (2004). "Settling distance and incipient motion of sandbags in open channel flows". Journal of Waterway, Port. Coastal and Ocean Engineering. ASCE.130, 98-103.

7.3. PÁGINAS WEB CONSULTADAS

- www.asrltd.co.nz
- www.coastalmanagement.com.au
- www.elcorock.com
- www.eurofabrics.com
- www.geofabrics.com.au
- www.geotec.biz
- www.geotubes.com
- www.googleearth.es
- www.globalsynthetics.com.au
- www.huesker.com.au
- www.kaytech.co.za
- www.maccferri-usa.au
- www.tencate.com.au

APÉNDICE A

COMUNICACIÓN CON ESPECIALISTAS

ÍNDICE

1.1.	Relación de especialistas contactados	A.3

APÉNDICE A

COMUNICACIÓN CON ESPECIALISTAS

1.1. RELACIÓN DE ESPECIALISTAS CONTACTADOS

En este apartado se realiza una breve descripción de las consultas realizadas a diferentes profesionales y especialistas, con los que ha tomado contacto durante la realización de esta Tesis Doctoral.

- **Prf. Dr. Ing. Hocine Oumeraci**

TU Braunschweig, Germany.

Desde 1993 es profesor de Hidromecánica e Ingeniería Costera, en la Universidad Técnica de Braunschweig. Ha sido Director de las Tesis Doctorales de Recio (2008) y Dassanayake (2013).

Me puse en contacto para recibir información sobre diferentes ensayos de estabilidad realizados con sacos de geotextil rellenos de arena.

- **Dr. Juan Recio**

Manager - Ports and Coastal Group, WorleyParsons

Realizó su Tesis Doctoral en 2008. “Hydraulic Stability of Geotextile Sand Containers for Coastal Structures - Effect of Deformations and Stability Formulae –”, en la Universidad de Braunschweig, Alemania, dirigida por el Prf. Dr. Oumeraci.

Me puse en contacto para obtener información sobre fórmulas de estabilidad hidráulica de sacos de geotextil rellenos de arena.

- **Dr. Darshana Dassanayake**

Coastal Engineer, Ports and Coastal Group, WorleyParsons

Realizó su Tesis Doctoral en 2013. “Experimental and Numerical Modelling of the Hydraulic Stability of Geotextile Sand Containers for Coastal Protection”, en la Universidad de Braunschweig, Alemania, dirigida por el Prf. Dr. Oumeraci.

Me puse en contacto para documentarme sobre la última fórmula de estabilidad obtenida para sacos de geotextil rellenos de arena.

- **Kristian W. Pilarczyk**

Hydropil Consultant.

Ha realizado numerosas publicaciones sobre estructuras compuestas por elementos de geotextil rellenos de arena y su comportamiento de la Ingeniería Hidráulica Marina.

Me puse en contacto para informarme sobre las diferentes estructuras realizadas con sacos y tubos de geotextil rellenos de arena.

- **C. R. Lawson**

TenCate Geosynthetics

Ha realizado numerosos trabajos sobre elementos de geotextil rellenos de arena y su comportamiento.

Me puse en contacto para obtener el permiso para utilizar dos figuras de uno de sus artículos.

- **Ing. Pedro Odriozola**

IKZ Cons. Ambiental, S.L.

Ha trabajado sobre la regeneración de playas, utilizando elementos de geotextil rellenos de arena, en numerosas playas.

Me puse en contacto para obtener más información técnica sobre diferentes obras realizadas con tubos de geotextil rellenos de arena.

- **Elena Gómez**

Departamento Técnico de Huesker.

Trabaja como asesora técnico de diferentes tipos de geosintéticos para su aplicación en aplicaciones hidráulicas.

Me puse en contacto para documentarme sobre diferentes obras realizadas con sacos de geotextil rellenos de arena.

APÉNDICE B

PUBLICACIONES GENERADAS DURANTE LA REALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

ÍNDICE

1.1.	ARTICULOS	B.3
1.2.	CONGRESOS.....	B.4

APÉNDICE B

ARTÍCULOS Y CONGRESOS

1.1. ARTICULOS

En este apartado se indican los diferentes artículos publicados sobre estructuras con elementos de geotextil rellenos de arena:

- Antón A., Almazán J.L., Lechuga A y Peña J.L. (2014) “Los geosistemas en la Ingeniería de Costas, ¿existe un diseño fiable en la actualidad?”. Revista de Ingeniería Civil, 176, 57-64.
- Antón A., Almazán, J.L, Lechuga A. y Peña J.M. (2015). “Geosystems as an alternative to coastal defence”. Journal of Advances in Natural Science, 3, 214-227.
- Antón A., Almazán J.L., Lechuga A. y Peña J.M. (2015). “Zonas de la costa apropiadas para el uso de diques compuestos por tubos de geotextil”. Revista de Ingeniería Civil, 178,11-23.
- Antón A., Almazán J.L., Lechuga A. y Peña J.M. “Appropriate locations for geotextile bag revetments: an analysis”. Journal of Coastal Research.

1.2. CONGRESOS

En este apartado se indican los congresos en los que ha realizado una ponencia sobre las estructuras con elementos de geotextil rellenos de arena y su contenido:

- Lechuga A., Antón A., Peña, J.M., Díaz, G. (2012). "Behaviour of the beach in the north of Spain". 33rd International Conference on Coastal Engineering. ICCE, Santander (España).
- Lechuga A., Peña J.M. y Antón, A. (2013). "Estado del arte de las obras de geotextil para la defensa de costas". XII Jornadas Españolas de Puertos y Costas, Murcia (España).
- Lechuga A., Peña, J.M. y Antón, A. (2013). "Métodos de diseño sobre la estabilidad de estructuras con sacos de geotextil para la defensa de la costa y su fiabilidad". XIII Jornadas Españolas de Puertos y Costas, Avilés (España).
- Peña, J.M. y Antón, A (2015). "¿Son una alternativa las obras con geotextiles en Ingeniería de Costas? 2º Congreso Nacional de Geosintéticos, Madrid (España).

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 barcas 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 barcas 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 encadenados. 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 ($1/5 l_c$) 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:

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

Teniendo en cuenta la deformación por el vuelco:

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

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_{SD} , K_{OL} , K_{OD} , K_{SR} 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 aplastamiento 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 cimientado 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 fórmula 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 Vastenburb (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 (ICEE 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).

Geosystems as an alternative to conventional coastal defense

A.I. Antón, J.L. Almazán, A. Lechuga, J.M. de la Peña

Centre for Harbours and Coastal Studies, CEDEX, Antonio López 81, Madrid, 28026, Spain

ana.i.anton@cedex.es

Research Group on Marine, Coastal and Port Environment and other Sensitive Areas, Universidad Politécnica de Madrid, Profesor Aranguren s/n, Madrid 28040, Spain

joseluis.almazan@upm.es

Centre for Harbours and Coastal Studies, CEDEX, Antonio López 81, Madrid, 28026, Spain

antonio.lechuga@cedex.es

Centre for Harbours and Coastal Studies, CEDEX, Antonio López 81, Madrid, 28026, Spain

jose.m.pena@cedex.es

ABSTRACT

In recent decades, the increase in population on the coast, growth of erosion in many coastal stretches and the sea level rise, due to climate change, have led governments to invest more in protecting the coast. Geosystems have been shown as an alternative to conventional coastal structures because of cost reduction, efficiency of construction and speed of implementation. However this alternative leads to increase knowledge in their behavior, design and durability by the lack of suitable materials to withstand large storms, high diversity of non-standard methods or techniques and ease of degradation by vandalism.

Indexing terms/Keywords

Gesystems, geotextile bags, geotextile tubes and geotextile containers.

Academic Discipline And Sub-Disciplines

Natural sciences and Earth sciences.

SUBJECT CLASSIFICATION

Coastal defense.

TYPE (METHOD/APPROACH)

Literary Analysis.

Council for Innovative Research

Peer Review Research Publishing System

Journal of Advances in Natural Sciences

Vol .3, No.1.

<http://www.cirjns.com>,

editorjinsonline@gmail.com

1. INTRODUCTION

Geotextile-encapsulated sand elements are three-dimensional systems manufactured from geotextile materials filled with sand. They form a sub-group part of a wider system of geosynthetic solutions for erosion control which are known as Geosystems. There are three different types of elements, namely geotextile bags, geotextile tubes and geotextile containers. These elements are used in coastal engineering structures such as groins and breakwaters as an alternative to rubble mound quarry stone e.g. as core material. The main purpose of this paper is to analyze geosystems as a reliable alternative for conventional defense.

2. LITERATURE REVIEW

Some of the main studies developed for different applications of the geosynthetic materials have been: Liu (1981) presented an equation to describe the equilibrium shape of the geotextile tubes. Kobayashi and Jacobs (1985) investigated experimentally the stability of sandbags placed on nonuniform shapes. Pilarczyk (1996) concluded that, for shoreline protection, groins comprised of sand-filled geosynthetic bags serve as very reasonable alternatives to other conventional structures. Gutman (1979) also addressed sand-filled bags being used for revetments. Leshchinsky et al. (1996) discussed the design and manufacturing of geosynthetic tubes based on shape and tension. Plaut and Klusman (1999) analyzed the stacking of tubes which implied large simplifications. And Pilarczyk (2000) presented a book about geosystems used for coastal and shoreline structures.

Oumeraci et al. (2003) carried out physical model investigations to establish a reliable stability formula for sand containers applied as dune protection under to storm waves. Recio-Molina and Yasuhara (2005) analyzed geometry of geotextile wrap-around revetments (GWR) using small-scale model test. Lawson (2008) reviewed the three main types of geosystems. Chu et al. (2011) presented a study about different applications of geotextile tubes. And Bezuijen and Pilarczyk (2012) described two applications of geotextiles in coastal defense.

3. GEOTEXTILE-ENCAPSULATED SAND ELEMENTS

There are three fundamental types of geotextile-encapsulated sand elements namely geotextile bags, geotextile tubes and geotextile containers, differentiated by geometrical shape and volume.

3.1 Geotextile bags

Geotextile bags are smaller volume containers filled with sand, placed on land either near water or below water. Are manufactured in a range of shapes, and they are installed in different arrangement that greatly improves their overall stability and performance of the structure. Nowadays, geotextile bags range in volume from 0.05m^3 to around 5m^3 , and may be pillow-shaped, box-shaped or mattress-shaped, depending on the required application.

Fig 1: General dimensions of box-shaped geotextile bags full and empty

3.2 Geotextile tubes

Geotextile tubes are tubular containers that are filled with sand in situ, on land or in water. Are placed and filled on site with the required geometrical form. Sand is filled by hydraulically pumping into the tube. Geotextile tubes range in size from 1 m to 10 m in diameter, and can have about 200 m in maximum length.

Fig 2: Shape and dimensions of geotextile tubes and geotextile containers

3.3 Geotextile containers

Geotextile containers are large-volume elements that are filled in barges above water, then are positioned and are dropped at deep water. The volumes of these containers more commonly range from 100 m³ to 700 m³, although containers as large as 1.000 m³ have been installed. To facilitate the installation of geotextile containers of this magnitude, must be utilized an efficient and practical installation system . Today, this has been accomplished by means of split-bottom barges.

4. COASTAL APPLICATIONS OF GEOTEXTILE-ENCAPSULATED SAND ELEMENTS

The main coastal applications are divided by revetments, seawalls, slope buttressing, scour prevention, groins, breakwaters and finally artificial reefs.

4.1 Revetments

Revetments are onshore structures to protect the natural sloping shoreline from erosion. They can be located relative to the shoreline: dry beach or in shallow water. In the first case it would have to be designed to withstand the pounding of the surf extreme periods with a relative incidence of the wave energy, while in the second case the structure must support the continued wave action in normal time. Geotextile bags and geotextile tubes are used for revetment structures. To prevent erosion of the foundation soil at a toe of the revetment, it is common practice to extend the bottom layer of geotextile bags.

Fig 3: Revetment with geotextile bags for erosion

4.2 Seawalls

Seawalls made of geotextile bags or geotextile tubes filled with sand have basically two differences between revetments structures made with the same elements, one of them is the slope of the structure, close to the vertical, and the other one is that must bear the earth pressure. Seawalls are stronger than revetments and must have two lines of geotextile bags joined, at least.

Their effects and behavior are similar to the wall of the conventional beaches. And both the top and the toe of the structure should be protected to avoid scour.

Fig 4: Seawall of geotextile bags filled with sand

4.3 Slope buttressing

As with geotextile containers, geotextile bags can be used to provide buttress support to an unstable slope in a hydraulic environment. Here, geotextile bags act as a mass-gravity structure, providing additional restraint to the toe of the unstable slope.

One advantage of geotextile bags is that can be installed at shallow water depths if is necessary, unlike geotextile containers, which have to be installed at relatively greater water depth (Lawson 2008).

Fig 5: Geotextile bags as slope buttressing

4.4 Scour prevention

Geotextile bags are used as expedient means of scour prevention to prevent undermining of nearby structures. This is the original application for these units. Geotextile bags can be easily installed using simple machinery. The bags conform to the shape of the scour hole, and thus provide good sealing qualities. An example of use is given by Heibaum (1999).

Interaction between waves and a vertical or nearly vertical wall on a beach tends to form a scour in the toe of the wall. The geotextile bags filled with sand can be used to avoid this scour.

The arrangement of the bags should be such that fill the volume would be formed if there were not available this additional work.

Fig 6: Geotextile bags to prevent scour

4.5 Groins

Groins are structures more or less perpendicular to the coastline. The aim of groins is to protect shore from erosion due to long shore currents and/or to trap sediments from the natural littoral transport, which leads to sand accretion between the groins.

Geotextile bags may be used as groins to prevent the shoreline movement of sediment. Here, the same conditions apply for geotextile bags as for geotextile tubes.

Fig 7: Geotextile bags as groin to erosion control

4.6 Breakwaters and artificial reefs

Breakwaters are structures constructed on coasts to shelter coastlines, harbor entrances and water intakes against waves and currents or as a control to avoid beach erosion.

Offshore breakwaters reduce the intensity of wave action in shore waters and thereby reduce coastal erosion. They are constructed some distance away from the coast or built with one end linked to the coast. A breakwater structure is designed to absorb the energy of the waves that hit it.

The objectives of artificial reefs can include:

- Protection against major storm events by intercepting wave energy.
- Widening of the beach and dunes to provide additional open space.
- And improving surfing conditions.

These objectives of artificial reefs can be achieved through the construction of an artificial reef, combined with sand nourishment works or other measures where appropriate. Artificial reefs may reduce natural reef usage, provide corridors for marine species to move between previously unconnected habitats and provide solid structures in areas that were previously sandy or soft bottomed.

5. FORMULAE OF STABILITY FOR GEOTEXTILE BAGS

The design of structures which are constructed using geotextile bags is complicated. Stability equations for the armor layer and for the entire structure, which are used for designs of structures built with rock or armor units, cannot simply be transferred to design of geotextile bags (PIANC 2011).

This section aims at giving a summary of the increased knowledge, especially that concerning the stability criteria for geotextile bags.

5.1 Formula of stability according to Pilarczyk (1996)

He concluded that the stability of geotextile bags filled with sand, with the width-length ratio not larger than 1 to 3 and properly filled (> 70%), can be computed in the similar way as riprap. And he recommended calculate the stability according to Pilarczyk's formula (Pilarczyk, 1990):

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

For $\xi > 3$, the values calculated for $\xi = 3$ can be used,

Where: H_s = significant wave height [m], $\Delta = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$ = relative density of the bags [-], D = average thickness of bags [m], c = stability coefficient defined at $\xi = 1$, ($c = 2.5$), $\cos \alpha$ = slope angle [-], (it can be neglected for slopes milder than 1 on 3), $\xi = \tan \alpha / (H_s / L_o)^{1/2}$ = surf-similarity parameter [-] and L_o = wave length [m]. The density of bags (ρ_s) can be assumed 2000 and 2300 kg/m³ resp. for sand and concrete (Δ resp. 1 and 1.3).

Fig 8: Variables of the stability formula of geotextile bags according to Pilarczyk (1996)

5.2 Formula of stability according to Wouters (1998)

A new stability formula, based on previous experimental data, was proposed by Wouters (1998). This formula was taken into account in different documents published, including Dassanayake (2013), and was referenced by the stability number, as a way to give continuity to calculate stability dikes. It was determined for revetments:

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

Where: N_s = stability number [-], H_s = incident significant wave height [m], ρ_E = density of geotextile bag [kg/m³], defined as: $\rho_E = (1-n) \cdot \rho_s + \rho_w \cdot n$, n = porosity of filling material [-], ρ_w = density of water [kg/m³], D_{50} = thickness of armor layer [m], C_w = empirical parameter derived from the stability number N_s [-], $\xi_0 = \tan \alpha / (H_s / L_o)^{1/2}$ = Iribarren number [-], α = slope angle of the structure (°), $L_o = g T^2 / (2\pi)$ = deep water wave length using T_p [m].

F_R = Resultant force F_D = Drag force F_L = Lift force

Fig 9: Parameters used in the stability formula of geotextile bags according to Wouters (1998)

5.3 S Formulae of stability according to Oumeraci et al. (2003)

These formulae are similar to before one, presented by Wouters (1998), using the number of stability. However two stability formulae were obtained based on data, in laboratory and in a large channel.

- The formula obtained for the slope elements was:

$$N_{s,slope} = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_E}{\rho_W} - 1\right) D} = \frac{2.75}{\sqrt{\xi_0}}$$

Where: D= characteristic diameter of geotextile sand container defined as $D = l \sin \alpha$, l= length of sand container [m] (container dimension in wave direction).

- The formula obtained for the crest elements was:

$$N_{s,crest} = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_E}{\rho_W} - 1\right) D} < 0.79 + 0.09 \frac{R_c}{H_s}$$

Where: R_c = freeboard [m].

5.4 Formulae of stability according to Recio and Oumeraci (2009)

They were based on considering two basic types of faults in a structure, like: overturning and sliding. Coefficients of the new formula were found by performing various trials on reduced model.

Calculation formulations of the structure are as follows bags, replacing the volume data and the projection areas, based on the length of the bag (l_c), the width of the bag ($\frac{1}{2} l_c$) and the height of the bag ($\frac{1}{5} l_c$).

- Without considering deformation (for sliding):

$$l_c \geq u^2 \frac{(0.5C_D + 2.5C_L\mu)}{\left(\mu\Delta g - C_M \frac{\partial U}{\partial t}\right)}$$

$$\Delta = \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1$$

- Considering deformation (for sliding):

$$l_{c \text{ (sliding)}} \geq u^2 \frac{(0.5 K_{SCD} C_D + 2.5 K_{OCL} C_L \mu)}{(\mu K_{SR} \Delta g - K_{SCM} C_M \frac{\partial U}{\partial t})}$$

- Considering deformation (for overturning):

$$l_{c \text{ (overturning)}} \geq u^2 \frac{(0.05 K_{OCD} C_D + 1.25 K_{OCL} C_L \mu)}{(0.5 K_{OR} \Delta g - 0.1 K_{OCM} C_M \frac{\partial U}{\partial t})}$$

Where: ρ_s = density of bag [kg/m³], ρ_w = density of water [kg/m³]. And C_D , C_L , C_M , K_{SCD} , K_{OCL} , K_{OCD} , K_{OR} and K_{OCM} are coefficient factors.

5.5 Formula of stability according to Dassanayake (2013)

New stability formula was developed based on recent and past experimental investigations and numerical simulations. This led to determine the following conclusions:

- Geotextile sand container 100% filled are more stable than geotextile sand container 80% filled.
- Development of the damage is important for a comprehensive quantification of the effect of the interface friction between the geotextile sand containers on the hydraulic stability.
- Hydraulic stability can be increased by changing the inclination angle of geotextile sand container in the construction process.

$$N_s \sqrt{\xi_0} = A \left(\frac{R_c}{H} \cdot \frac{1}{\xi_0} \right)^2 + B \left(\frac{R_c}{H} \cdot \frac{1}{\xi_0} \right) + C$$

Where:

$$N_s = \frac{H_s}{((\rho_{GSC}/\rho_w) - 1) l_c \sin \alpha}$$

$$\xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}}$$

A, B, C = empirical parameters depending on the type of geotextile material and the sand fill ratios [-], $H = H_m$ for regular wave tests or $H_{2\%}$ for irregular wave tests [m], H_m = incipient mean wave height from regular wave tests measured at intermediate water depth (at the beginning of the foreshore slope) [m], $H_{2\%}$ = mean of highest 2% of the incident waves in a time series (mean of the highest 20 incident waves from the wave reflection analysis of 1000 waves and for a Rayleigh distribution the values $H_{2\%} = 1.4 H_s$) [m], R_c = crest free board [m], L_0 = wave length at deep water, N_s = stability number [-], ρ_w = density of water [Kg/m³], ρ_{GSC} = density of GSCs [Kg/m³], l_c = length of GSC [m], α = slope angle of the structure [°], $L_0 = g \cdot T^2 / (2\pi)$ = deep water wave length calculated using the mean wave period [m].

Fig 10: Section structure tested by Dassanayake (2013)

6. FORMULAE OF STABILITY FOR GEOTEXTILE TUBES

Design methods have been published based on the results of many reduced scale tests. However, the failure mechanisms that lead to the instability of the tubes are complicated and have not yet led to a generic approved design method, (PIANC 2011).

All stability formulae used are for geotextile tubes placed perpendicular to the wave direction.

6.1 Formula of stability according to Pilarczyk (2000)

A theoretical derivation of the stability of a stacked geotextile tube with the crest at the SWL was done on the results obtained from a study undertaken on the stability of sand and mortar filled geotextile tubes and geotextile containers for Nicolon by DelftHydraulics (1994). It was concluded that the critical wave height was equal to the theoretical diameter of the tube. A reduction of the wave period, flattening of the tube and reducing the water level were found to have a positive effect on the stability.

- Overturning moment (per m length):

$$M_O = \frac{3}{4}(1+k)H\frac{1}{2}h_1^2\rho_w g$$

- Restoring moment (per m length):

$$M_R = A(\rho_s - \rho_w)g\frac{1}{2}b$$

Where: k = reflection coefficient ($k=0.45$), H_s = wave height [m], h_1 = height of tube [m], ρ_w = density of water [kg/m^3], g = acceleration by gravity [m/s^2], A = area of tube cross section [m^2], ρ_s = density of saturated sand [kg/m^3], b = tube width [m].

- To maintain static equilibrium:

$$H < \frac{4}{3}Ab\frac{\Delta_t}{h_1^2(1+k)}$$

Where: $\Delta_t = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w$, relative weight of tube [kg/m^3];

The above equation can be simplified for tubes placed parallel to the axis of a breakwater with their crest below or at SWL to produce the dimensionless stability relation:

$$\frac{H_s}{\Delta_t b} < 1$$

Filling percentage is not include in the formula, but from the height and width measurements of the geotextile tubes used in the physical modeling, which were used to determine the above stability formula it is calculated that the tubes were filled to approximately 90%.

6.2 Safety factors of stability on geotextile tubes according to Oh and Shin (2006)

It was based on two-dimensional limit equilibrium theory. To simplify the two-dimensional analysis, gravity weight of geotextile tube was calculated by equivalent rectangular shape in the effective height.

- Factor of safety against sliding, can be expressed by the following equation:

$$SF_{\text{sliding}} = \frac{F}{P_h} = \frac{P_v \times \tan \phi'}{P_w \times h_{GT}}$$

Where: P_h = horizontal force, F = vertical force, P_v = overburden pressure and gravity weight of geotextile tube, P_w = hydrodynamic pulsating load, h_{GT} = effective height, ϕ' = interface friction angle between geotextile and base sand.

- Factor of safety against overturning, about the toe of an equivalent rectangular shaped tube, can be expressed by the following equation:

$$SF_{\text{overturning}} = \frac{M_R}{M_O} = \frac{P_v \times \frac{B'}{2}}{P_w \times \frac{h_{GT}}{2}}$$

Where: B' =width of an equivalent rectangular shaped tube.

- Factor of safety against bearing capacity failure, can be determined by following equation:

$$SF_{\text{bearing capacity}} = \frac{Q_u}{Q_a} = \frac{cN_c + \left(\frac{1}{2}\right)\gamma_s B' N_\gamma}{\frac{P_w}{B'^{-2e'}}}$$

Where: c = cohesion of the base soil, N_c and N_γ = bearing capacity factors by the internal friction angle of saturated base soil, γ_s =submerged unit weight of base soil, $e' = (P_w h_{GT})/3F$ the eccentricity of the hydrodynamic pulsating load.

From the results of the two-dimensional stability analysis, the safety factor was decreased on increasing the filling ratio and significant wave height. The safety factor of bearing capacity varied linearly with filling ratio and significant wave height. However, safety factors of sliding and overturning exponentially decayed because of the relationship of equivalent width, effective height, and significant wave height.

Fig 11: Analysis scheme two-dimensional hydraulic stability

6.3 Formula of stability according to CUR 217 (2006)

CUR 217 (2006) recommends using a very similar formula for calculating the limiting significant wave height to that prescribed by Pilarczyk (2000). It is more cautious, however, as it replace the width with that of the height of the geotextile tube. This has a significant effect on the allowed wave height as the width of an average tube is nearly twice that of his height.

CUR 217 (2006) states that the tube that receives the heaviest loading is the tube at the crest of the structure. A formula for a limiting significant wave height for the stability of a geotextile tube on the crest of a breakwater is given.

$$\frac{H_s}{\Delta_t D_K} \leq 1$$

Where: H_s = significant wave height [m], D_K = height of geotextile tube (with tube perpendicular to wave direction), Δ_t = relative weight of tube or relative buoyant weight of tube.

Using the below formula gives an estimated H_s equal to the height of the tube ($\Delta_t \approx 1$). The wave height from the above formula is the wave height at which the geotextile tube is expected to start moving. Note that filling percentage is not specified or used in this formula.

6.4 S Formula of stability according to Van Steeg et al. (2011)

Before the study done by Van Steeg et al. (2011), the behavior of geotextile tubes under wave loading was uncertain as no large modeling of geotextile tubes had been done.

To test the stability of sand-filled geotextile tubes under wave attack, large-scale physical models were tested in the Delta Flume of Deltares, with an approximate scale of 1:2 to 1:4. All failure resulted from sliding. Sand migration in tubes filled to less than 70% decrease stability, but is minimal in tubes with high filled to less than 70% decrease stability, but is minimal in tubes with high filling percentages (Van Steeg et al. 2011).

As previous stability formulae are not clear on all the different possible input factors a new dimensionless stability relation was suggested that incorporates factors relative to hydraulic stability. The new derived stability relation for a single placed geotextile tube is:

$$\frac{\chi H_s}{\Delta_t \sqrt{BD}(f \cos \alpha + \sin \alpha)} \leq 0.65$$

Where: H_s = significant wave height at limit of stability, Δ_t = relative density of density tube, B = width of geotextile tube, D = height of geotextile structure, f = friction coefficient of the geotextile tube and supporting structure interface, α = slope of the supporting structure, χ = reduction factor for lost energy due to overtopping.

Placing two geotextile tubes behind each other did not increase the hydraulic stability. The reason for this was ascribed to the hydrostatic pressure caused by the water trapped between the two tubes and the hydrodynamic water pressures caused by the wave action, which caused the land-side tube to shift. It is recommended that the same formula be used as for a singly place geotextile tube.

7. ANALYSIS OF GEOTEXTILE ENCAPSULATED SAND ELEMENTS

Geo-systems, such as geotextile bags or geotextile tubes are elements that constitute a good alternative structures for coastal defense in relation to the type of material, its execution time and cost. However there are a number of disadvantages regarding the use of geotextile elements, which give rise to approach some questions like: are they suitable materials to withstand the weather and waves?, come from reliable calculation methods?, are they readily degradable?, and how is its visual impact? Many questions how are you could be grouped into: are they effective in all cases? Or is there any limitation on its use? To answer these questions we have relied on two contrasting examples and formulation stability calculation of previous sections.

7.1 Case study 1: Geotextile tubes on the beach Young-Jin (Korea)

Oh and Shin (2006) analyzed the behavior of geotextile tubes immersed as a solution to a problem of erosion on the beach Young-Jin, at the east coast of Korea, aggravating the problem when the waves reached a significant wave height of 4 m in winter.

Based on the results of analysis of stability and hydraulic test scale model, in which two lines of geotextile tubes were used. Was determined to be more stable and effective than other approaches proposed design. Subsequently, as a result of the execution of the work, the shoreline moved between 2.4 and 7.6 m to the sea by the accumulation of sediment with geotextile tubes.

Site plan of Young-Jin beach

Cross section

Fig 12: Site plan and crosssection of the beachYoung-Jin(Korea)

7.2 Case study 2: Geotextile tubes on the coast of Jumeirah (Dubai)

On the other hand, in the northern part of the coast of Jumeirah, in the emirate of Dubai, Weerakoon et al. (2003) used geotextile tubes as coastal defense solution. Recommendations based on experience were mainly that the placement of geotextile tubes offshore only be possible with a very calm surf and wave heights exceeding 40-50 cm made it difficult to keep the filling ports in position during filling operation.

A significant reduction of wave energy to enter the inshore area with small waves and under very low tide was observed. However, it turned out that the width of the pipe crown was insufficient compared to the wavelengths of the high waves.

Erosion was a significant problem for structures with geotextile tubes. There was a strong erosion on both sides of the geotextile tubes. Due to breakage of the wave and current-driven surf on the outside. Because of large tubes were more vulnerable to a complete breakdown due to the break anywhere along its length.

And in general, geotextile tubes were not visually attractive structures, since the remodeling of the tubes after changing the sand and deformations in the seabed tended to lose the aesthetic quality of the structure significantly and growth seaweed, so that the tubes did not improve their appearance.

Fig 13: Site plan and crosssection of Jumeirah Open beach(Dubai)

7.3 Comments on methods stability

Considering the stability methods listed above, by analyzing the following is performed:

- The formula stability Pilarczyk (1996) for geotextile bags directly exposed to waves is applicable to heights of less than 2m wave. This limitation is only possible in protected coastal areas with little agitation or residual swell.
- Pilarczyk (2000) considers the critical wave height equal to the theoretical diameter of the tube. Similarly this restriction with respect to the wave height limits its location in coastal areas.
- Stability formulas Oumeraci et al. (2003) derived from laboratory tests, so it should only be applied in the same condition in which the test is performed.
- And the stability formula Recio and Oumeraci (2009) can only be applied to one type of geotextile bag.

Therefore, stability methods are not applicable for all wave heights for all geotextile bags. Being limited its location on the coast protected areas.

8. CONCLUSIONS

Elements of sand filled geotextile can be considered more as a complement to coastal protection systems, which as an alternative.

Analytical and / or experimental models to simulate geosystems performance have been developed and calibrated with results of tests performed by different investigators. Providing only indicative results.

The degradation due to ultraviolet sunlight, abrasion by sand and rubble rupture by water or vandalism transmitted is commonly cited as the main concerns of material failures. Having a different opinion on whether the elements of geotextile require additional protection against UV degradation, vandalism and general wear. Observation and monitoring of projects have provided information regarding the suitability and life expectancy of the elements of geotextile for different coastal applications.

Furthermore, it was found that the procedures for placing geotextile elements require calm conditions, due to uncertainty about their behavior under the action of strong waves.

The durability of the material and the long-term behavior of geotextile elements remain the points of interest. The systematic monitoring of projects (including failure-cases) and data evaluation and laboratory prototype can provide useful information for verification and refinement of the design criteria.

Even today some doubts raised about the reliability of design methods in heavy storm conditions. So it will be necessary to improve design methods and increase their practical experience in various load conditions.

ACKNOWLEDGMENTS

The first author gratefully acknowledges to CEDEX and ETSICCP-UPM. It would not have been possible to carry out this work without the participation of the members from Centre for Harbours and Coastal Studies, CEDEX.

REFERENCES

- [1] Bezuijen, A. and Pilarczyk, K. W. 2012. Geosynthetics in hydraulic and coastal engineering: filters, revetments and sand filled structures. In Proceedings of EuroGeo 5, Valencia, 65-80.
- [2] Chu, J., Guo, W. and Yan, S. W. 2011. "Geosynthetics tubes and geosynthetic mats: analysis and applications". Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 42(1), ISSN 0046-5828.
- [3] CUR 2006. CUR217: Ontwerpen met geotextielezandelementen, Stichting CUR, Gouda.
- [4] Dassanayake, D.T. 2013. Experimental and numerical modelling of the hydraulic stability of geotextile sand containers for coastal protection. Doctoral Thesis. Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der echnischenUniversitätCarolo-Wilhelmina zuBraunschweig.
- [5] Gutman, L. 1979. Low-cost shoreline protection in Massachusetts, ASCE, Coastal Structures.
- [6] Heibaum, M. 1999. "Coastal scour stabilization using granular filter in geosynthetic nonwoven containers". Geotextiles and Geomembranes, 17, No. 5-6, 341-352.
- [7] Kobayashi, N. and Jacobs, B. 1985. "Stability of Armor Units on Composite Slopes." Journal Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng., 111(5), 880-894.
- [8] Klusman, J. 1998. Civil Engineering in the Oceans VI. Proceedings of the International Conference, October 20-22, 2004, Baltimore, Maryland.
- [9] Leshchinsky, D. and 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.
- [10] Liu, G. S. 1981. "Design criteria of sand sausages for beach defenses. XIX IAHR. Congress, New Delhi, India, 95-97.
- [11] Lawson, C. R. 2008. "Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering". Geosynthetic International, 15(6), 384-427.
- [12] Oh, Y. I. and Shin, E. C. 2006. "Using submerged geotextile tube structures in the protection of the E. Korean shore". Coastal Engineering, 53, 879-895.
- [13] Oumeraci, H., Hinz, M., Bleck, M. and Kortenhaus, A. (2003). "Sand-filled geotextile containers for shore protection", COPEDEC VI, Colombo, Sri Lanka.
- [14] PIANC, 2011. The application of geosynthetics in waterfront areas. PIANC, 113.
- [15] Pilarczyk, K. W., 1990. Coastal protection. A.A. Balkema Publisher, Rotterdam.
- [16] Pilarczyk, K. W., 1996. Geotextile systems in coastal engineering. An overview. In Proceedings of 25th Conference on Coastal Engineering, ASCE, 2114-2127.

- [17] Pilarczyk, K. W., 2000. Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering. A. A. Balkema, Rotterdam.
- [18] Plaut, R.H. and Klusman, C.R., 1999. Two-dimensional analysis of stacked geosynthetic tubes on deformable foundations. *Thin-Walled Structures* 34, 179–194.
- [19] Recio-Molina, J. and Yasuhara, K., 2005. "Stability of modified geotextile wrap-around revetments (GWR) for coastal protection". *Geosynthetics International*, 12(5).
- [20] Recio-Molina, J. and Oumeraci, H., 2009. "Processes affecting the hydraulic stability of coastal revetments made of geotextile sand containers". *Coastal Engineering*, 56, 260-284.
- [21] Steeg, P. Van; Vastenburg, E.; Bezuijen, A.; Zengerink, E., and 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.
- [22] Weerakoon, S.; Mocke, G. P.; Smit, F., and Al Zahed, K., 2003. "Cost effective coastal protection works using sand field geotextile containers. CODEPEC VI, Colombo, Sri Lanka.
- [23] Wouters, J., 1998. Open Taludbekledingen; stabiliteit van geosystems (Stability of geosystems). Delft Hydraulics, report H1930, Annex 7 (in Dutch).

Author' biography with Photo

Civil Engineering. ETS Ing. Caminos Canales y Puertos.
Centre for Harbours and Coastal Studies, CEDEX,
Antonio López 81, Madrid, 28026, Spain
ana.i.anton@cedex.es

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;

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 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, 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 lugares adecuados para el uso de 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 equilibrio 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 desarrollaron los tubos de geotextil de gran diámetro, con geotextil tejido y sin capa interior impermeable. Su principal ventaja era el diseño de 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 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 y han sido aplicadas 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 DT (en Europa, Oriente Medio y Asia) o perímetro teórico CT (en Norte y Sur de América) (figura 1a). 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 siguiente figura.

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 revestimientos, cuando se utiliza el material de relleno, para proporcionar estabilidad. Los tubos de geotextil se utilizan tanto para revestimientos sumergidos, como para revestimientos superficiales. En los revestimientos sumergidos, el tubo geotextil está recubierto por el suelo local. En los revestimientos superficiales, el tubo geotextil está expuesto durante toda su vida útil.

Los tubos geotextil, se utilizan para realizar diques rompeolas, y reducir la erosión de los procesos costeros. En este caso, el tubo geotextil lleno se encuentra a una cierta distancia de la costa y a 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.

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, 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. Posteriormente, la regeneración se realiza 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 mayor parte 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 debida a la acción del oleaje. Por lo que, en primer lugar será necesario conocer el clima marítimo de la zona en la que se ubica 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 ubica 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 la costa 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:

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

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.

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

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.

$$\frac{H_0}{g T^2} \frac{1}{s} \left(\frac{Z_a}{H_0} \right) < \frac{X_W}{g T^2} < \frac{H_0}{g T^2} \frac{1}{s} \left(\frac{Z_a}{H_0} + \frac{Z_s}{H_0} \right) \quad [3]$$

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 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.

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

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, $H_4 \approx H_{\text{residual}} \ll H_b$.

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 sollicitaciones 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. Sollicitaciones de una estructura según la zona del perfil de la playa

Zona	Oleaje	Sollicitaciones
1	Nulo	$H_1 \approx 0$
2	Nulo	$H_2 \approx \ll H_{\text{residual}} \approx 0$
3	Lámina de agua	$H_3 \approx < H_{\text{residual}} \approx 0$
4	Residual	$H_4 \approx H_{\text{residual}} \ll H_b$
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 sollicitaciones debidas al oleaje que debe soportar una estructura costera realizada con sacos de geotextil.

A su vez, las sollicitaciones 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_o . 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_o , 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 las zonas del perfil de la 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·H _o
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 DE LOS TUBOS

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: l_c [m]

D = Ancho de la capa de los sacos = $l_c \cdot \sin \alpha$ [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:

$$\frac{H_s}{\Delta_t b} = 1 \quad [8]$$

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:

$$\frac{H_s}{\Delta_t l} = 1 \quad [9]$$

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 $H_s = 1.5\text{m}$ (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.

$$H_s \leq 1.5\text{m}$$

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 ($\Delta \approx 1$).

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 :

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

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

$$H_s \leq 1.9\text{m}$$

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 modelos 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:

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

A modo de resumen, la siguiente tabla muestra las ecuaciones, sus autores y las limitaciones 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 rellenos de arena.

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

Author	Formulae	Limitations
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 rellenos 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.

Posteriormente se definen unas figuras 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 significativa.

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 significativa, 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), definidas en el capítulo 3, 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 significativa 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, como se indicó en el capítulo 3, 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 estará 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 pudo 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_o , hasta profundidades intermedias, $H'o$, 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_o , hasta profundidades intermedias, $H'o$, 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:

$$H_{c \text{ geotextil}} = H_o \cdot C_{\text{reductor perfil}} \cdot C_{\text{reductor costa}}$$

- 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_o).

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

- 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.

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

- c) Con lo que la altura de ola de cálculo, de una estructura de geotextil rellena de arena, situada en la zona 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 6m.

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

DIQUES		TIPO DE COSTA				
ZONAPERFIL	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_o)						
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.

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.

Appropriate Locations for Geotextile Bag Revetments: An Analysis

Ana I. Antón^{†*}, José M. De la Peña[†], José L. Almazán[‡], and Antonio Lechuga[†]

[†]Centre for Harbors and Coastal Studies
CEDEX
Madrid, 28026, Spain

[‡]Universidad Politécnica
Madrid, 28040, Spain

ABSTRACT

Antón, A.I.; De la Peña, J.M.; Almazán, J.L., and Lechuga, A., 0000. Appropriate locations for geotextile bag revetments: An analysis. *Journal of Coastal Research*, 00(0), 000-000. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

Social pressure exerted by urban development, the increase in erosion on many coastal stretches, and the rise in sea level due to climate change over the last few decades have led governments to increase investment in coastal protection. In turn, a reduction in costs and increases in ease of construction and rate of implementation have led to sand-filled geotextile elements, such as bags, tubes, and containers, becoming an alternative or supplement to traditional coastal defence materials, such as rubble mounds, concrete, and so on. Not all coastal zones are appropriate for sand-filled geotextile structures as coastal defences. This article analyses suitable zones for locating geotextile bag revetments to protect coasts from storm erosion and concludes that the least suitable zones are the surf zone (on an open coast and on a slightly protected coast) and deep water (on an open coast), except if a suitable reinforcement is carried out when the demand makes it necessary this build this kind of defence.

ADDITIONAL INDEX WORDS: *Coastal profile zones.*

INTRODUCTION

Sand-filled geotextile elements are three-dimensional components made with geotextile materials. There are basically three types of sand-filled geotextile elements: bags, tubes, and containers. These elements are used to build structures in coastal engineering, such as revetments or breakwaters, as an alternative to traditional materials, and as riverbank revetment stabilization, although the failure modes of such structures are not well understood. The purpose of this paper is to analyse coastal areas suitable for the location of revetments of sand-filled geotextile bag structures as coastal defences. Wave heights are defined according to coastal profile zones and types of coasts. Wave height limitations in geotextile bag revetment stability equations are calculated, and appropriate geotextile bag revetment locations are analysed. Finally, appropriate locations are validated with examples of structures built in different countries.

Recent work has improved knowledge of the performance of sand-filled geotextile bags. Pilarczyk (1996) defined several coastal defence systems using geotextile elements, whereas Wouters (1998) drew up a sand-filled geotextile bag revetment stability equation, and Oumeraci *et al.* (2003) performed reduced and large-scale physical tests to produce a submerged sand-filled geotextile bag breakwater and revetment stability equation. Mori (2009) and Mori, Aminti, and D'Eliso (2008) examined the application of the stability equation of Oumeraci *et al.* (2003) for submerged geotextile bag structures, whilst Dassanayake and Oumeraci (2013) devised a new equation.

DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-15-00155.1 received 20 August 2015; accepted in revision 29 October 2015; corrected proofs received XX Month XXXX; published pre-print online XX Month XXXX.

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

©Coastal Education and Research Foundation, Inc. 2015

METHODS

Apart from its design, the type of geotextile structure chosen will depend on the load stresses to which the structure is subjected. The main load must be the result of wave action. The marine climate of the zone where the structure is located must be previously known.

Locations of Geotextile Structures on the Coast

Waves incident on a structure may be considered from two complementary standpoints. The first refers to the location of the structure with respect to the profile of a beach and, therefore, how its energy develops along the beach. The second is the type of coast where the structure is located and, therefore, the intensity of the waves incident on it. The location of the structure must be studied with respect to the profile zone of the beach and type of coast.

Beach Profile

According to Weggel (1988), actions of waves incident on a structure along the profile of a beach vary in intensity. From this standpoint, he differentiates six zones in the profile of a beach, as Figure 1 shows. Each zone is represented by a specific equation.

These equations are derived from a dimensional analysis applied to the structure and beach systems. There are four basic non-independent variables making up each of these equations in each zone. They are length (L), time (T), mass (M), and force (F), related through Newton's second law, together with variables making up each of these equations in each zone. These are Z_a , the semitidal range for the tide level; Z_s , the rise in sea level in a storm for wave reach on the coast; R , the run-up, as the reference distance; D , the depth of water at the foot of the structure; X_w , the distance between the shoreline at half tide and the base of the structure; s , the slope of the beach; and

Figure 1. Detailed view of coastal profile zones: (1) dry beach, $H \approx 0$; (2, 3) foreshore, $H \approx 0$; (4) beach face, $H = H_{\text{residual}}$; (5) breaker zone, $H = H_{\text{breaker}}$; (6) deep water, $H = H_o$. Source: Weggel (1998)

for waves, H_o , high seas wave height, T , wave period, and H_i , local wave height.

On the other hand, the following dimensionless variables were defined to determine the effect of structures on coastal processes in their vicinity: H_o/gT^2 , the deep-water wave steepness parameter; R/H_o , the relative run up on the beach/revetment system; d/H_o , the relative water depth at the base of the structure; Z_a/H_o , the relative half-tide range; Z_s/H_o , the relative storm surge elevation; and X_w/gT^2 , the dimensionless distance of the mean tide shoreline from the revetment.

In zone 1, the structure is located outside the maximum reach of the maximum storm. This zone is described by the equation

$$\frac{X_w}{gT^2} > \frac{H_o}{gT^2} \frac{1}{s} \left(\frac{Z_a}{H_s} + \frac{Z_s}{H_o} + \frac{R}{H_o} \right) \quad (1)$$

The profile zone of a beach located outside the maximum reach of the maximum storm corresponds to a dry beach. This part of the beach is defined as the profile zone of a beach between its land limit and the commencement of the beach front. Waves that can reach this zone are usually negligible (wave heights $H_1 \approx 0$) and only happen in extraordinary events. Wave actions that may therefore be expected on a geotextile structure sited in this zone are practically negligible and, additionally, have long return periods. Wave height is not the most relevant action to be taken into account.

In zone 2, the structure is located above the maximum sea elevation and below the maximum run-up. This zone is described by the equation

$$\frac{H_o}{gT^2} \frac{1}{s} \left(\frac{Z_a}{H_s} + \frac{Z_s}{H_o} \right) < \frac{X_w}{gT^2} < \frac{H_o}{gT^2} \frac{1}{s} \left(\frac{Z_a}{H_s} + \frac{Z_s}{H_o} + \frac{R}{H_o} \right) \quad (2)$$

As indicated in a report by the U.S. Army Corps of Engineers Coastal Engineering Research Center (CEM, 1995), the profile zone of a beach located above the maximum sea elevation and below the maximum run-up corresponds to the foreshore, which is defined as the beach zone between the exterior part of the berm and the limit of wave descent at low tide. Waves in this profile zone are not directly incident. Only low-intensity wave heights are reached, originating from highly evolved residual waves, $H_2 \approx H_{\text{residual}} \approx 0$. Therefore, wave height may be considered practically negligible, with only a low-intensity

incident current of water. Consequently, the wave actions are nil. Only the current of water due to the run-up's final development should be taken into consideration. Therefore, it is not necessary to assess any considerations concerning geotextile bags with respect to applying the resistance equation due to waves, except for highly extraordinary events.

In zone 3, the structure is located above normal tides and below exceptional elevations. This zone is described by the equation

$$\frac{H_o}{gT^2} \frac{1}{s} \left(\frac{Z_a}{H_s} \right) < \frac{X_w}{gT^2} < \frac{H_o}{gT^2} \frac{1}{s} \left(\frac{Z_a}{H_s} + \frac{Z_s}{H_o} \right) \quad (3)$$

Similarly, the profile zone of a beach located above normal tides and below exceptional elevations corresponds to the previously defined foreshore zone. Waves can only be incident in zone 3 when exceptional tides or elevations occur (*i.e.* with long return periods). Even so, waves cannot be considered anything more than residual and are incident with a flow of water pushed by run-up of very low height, $H_3 \approx H_{\text{residual}} \approx 0$. So, wave height cannot be considered in a formal sense but rather as a medium-intensity current of rising and falling water.

In zone 4, the structure is located inside the tidal range with its base submerged during part of the tidal cycle. This zone is described by the equations

$$\frac{X_w}{gT^2} < \frac{H_o}{gT^2} \frac{1}{s} \left(\frac{Z_s}{H_o} \right) \quad (4)$$

and

$$\frac{d}{H_o} < \frac{Z_a}{H_o} \quad (5)$$

The beach profile zone located inside the tidal range corresponds to what is called the beach face (CEM, 1995). Waves that may appear on a geotextile structure located in this zone correspond to residual waves, with medium-intensity wave heights, an intermediate return period, and moderate crest lengths, $H_4 \approx H_{\text{residual}} < H_b$. Actions from waves that might be incident on a geotextile structure located in this zone are medium in intensity.

In zone 5, the structure is located in the sea at low tide with its base always submerged. This zone is described by the equation

$$\frac{d}{H_o} < \frac{Z_a}{H_o} \quad (6)$$

The profile zone of a beach located in the sea at low tide with its base always submerged corresponds to the breaker zone (CEM, 1995). A geotextile structure sited in this zone will be subjected to breaking wave action with wave heights of a certain intensity constantly breaking in the $H_5 \approx H_b$ strip. The breaking waves and impact on the structure must be taken into account for its design. Wave actions to which a geotextile structure located in this zone is subjected are therefore of a certain intensity.

In zone 6, the structure has foundations located at a depth at which waves never normally break. This zone is described by the equation

Table 1. Geotextile structure stresses according to the profile zone of the beach.

Zone	Waves	Stresses
1	Nil	$H_1 \cong 0$
2	Nil	$H_2 \cong \ll H_{\text{residual}} \cong 0$
3	Wave height	$H_3 \cong < H_{\text{residual}} \cong 0$
4	Residual	$H_4 \cong H_{\text{residual}} \ll H_b$
5	Breaking	$H_5 \cong H_b$
6	Developed	$H_6 \cong H_o$

$$\frac{H_o}{H_i} \frac{d}{H_o} - \frac{Z_a}{H_o} > 1.28 \tag{7}$$

Finally, the profile zone of a beach where waves never break corresponds to the swash zone (CEM, 1995). Wave action to which a geotextile structure is subjected in this zone of the beach profile is characterised as the result of developed waves, $H_6 = H_o$, with high-intensity wave heights and long return periods.

Table 1 shows the classification of load stresses to which a geotextile structure is subjected depending on the beach profile zone in which it is located.

Type of Coast

The morphological structure of the coast and location of a structure with respect to the type of coast are essential for finding the wave action stresses that a geotextile bag-built coastal structure must withstand. In turn, stresses to which this type of structure is subjected will be different depending on the type of coast on which it is located. As for any conventional coastal structure, waves have to be propagated from undefined depths to the point where the structure is located to determine the design wave height of a geotextile structure.

If the structure is at undefined depths, the design wave height will be $(H_{1/3})_{\text{maximum}}$, or H_o . If the structure is sited at intermediate depths, waves will have to be propagated from undefined depths to the point where the future structure will be located, and the wave height reached, H_i , will be determined according to the refraction phenomenon. If, in addition, the

Table 2. Wave-reducing coefficients according to the type of coast (Cr).

Type of Coast	Stresses: $Cr \times H_o$
Open	$H'_o = H_o$
Slightly protected	$H'_o = 0.8 \times H_o$
Medially protected	$H'_o = 0.6 \times H_o$
Protected	$H'_o = 0.4 \times H_o$
Heavily protected	$H'_o = 0.2 \times H_o$
Enclosed	$H'_o = 0.1 \times H_o$

point on the coast in question is protected from direct waves, propagation will have to occur for the design wave height affected by refraction and diffraction phenomena to be determined.

Depending on the degree of protection, the value of the height of a wave originating from undefined depths, H_o , will be amended. Thus we can class coasts as open, slightly protected, medially protected, protected, or heavily protected. To these types of coasts must be added coasts such as enclosed rivers, estuaries, or bays where exterior waves penetrate a short stretch and local waves are more important. This type of coast is classified as enclosed, as shown in Figure 2.

An open coast is defined as a coast where waves are directly incident and no interfering obstacle is present. This type of coast appears geographically at cliffs, open beaches, capes, and reefs where there are no wave-modifying obstacles. The only phenomenon of wave modification is refraction. On a slightly protected coast, directly incident waves originating from deep water are partially or locally reduced. This happens when there is some obstacle in the sea creating a zone that mitigates wave action in its shelter and, therefore, a zone with less energy. Even though the wave refraction phenomenon prevails, diffraction or some other wave energy-reducing element can be observed. This type of coast appears on open sheltered coasts in the proximity of some obstacle or with nearby shallows.

A medially protected coast is one where waves are reflected when they encounter obstacles in their propagation path and protection is partial. To the substantial refraction phenomenon is added diffraction, which increases in significance and intensity. This type of coast occurs in the partial shelter of islands, capes, and so on. On a protected coast, wave intensity is significantly reduced by the presence of an obstacle and reaches the coast only by diffracted waves. This type of coast geographically occurs in bays fronted by islands, peninsulas, and so. A heavily protected coast is only reached by highly diffracted waves, and wave heights are barely perceptible. This type of coast occurs with islands at the rear, inside bays and inlets in heavily protected sites, and so on. On an enclosed coast, waves penetrating from the outside sea are few, and local wind-formed waves prevail. This type of coast is associated with shallow coastal concavities and with adjacent, highly sedimentary active coasts. It occurs in lagoons, narrows, marshes, and fens.

When the purpose is to obtain a mere approximation or rough estimate to analyse whether a geotextile structure is suitable for a certain location, a method may be used to obtain a value with an overall approximation. The method consists of assigning an $H_o = (H_{1/3})_{\text{maximum}}$ wave-height-reducing coefficient for an open coast to other types of coast, as shown in Table 2. These coefficients were obtained from a generic

Figure 2. Potential schemes of coastal areas for placing geotextile bag structures. Examples include: (a) Open, where waves are directly impacting; (b) Slightly Protected, where intermittent waves are locally reduced; (c) Medially Protected, where waves are marginally reflected by obstacles; (d) Protected, where wave height intensity is significantly reduced; (e) Heavily Protected, where waves are highly diffracted.

Figure 3. Design curve relating variables $H/\Delta D$ (stability number) and ξ_0 (Iribarren number) considering stability test results of three authors (Jacobs and Kobayashi, Tekmarine, and Porraz *et al.* in Pilarczyk [2000])

study case, or predesign. For more specific studies, they should be calculated from wave propagation.

RESULTS

One of the key points in designing a geotextile bag structure is to know the range of validity of significant wave heights, which is determined by calculating bag equation stability limitations.

Although some authors clearly indicate the wave height validity range, others do not. This paper determines the range of validity for the significant wave height, H_s , in the stability equations in which it has not been defined.

Variables taken into consideration in these stability equations are H_s , the significant wave height (m); $\Delta = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w$, the relative density of bags; l_c , the maximum bag length (m); $D = l_c \sin \alpha$, the width of bag layer (m); α , the slope of structure (degrees); and $\xi = \tan \alpha / (H_s/L_0)^{1/2}$, the Iribarren number (unitless).

The width of the bag layer is partly dependent on the manner in which the geotextile bag elements are installed. The two most common installation geometries are a horizontal placement with approximately 50% overlap between adjacent geotextile bags and adjacent geotextile bags placed against each other on a slope. This paper considers the first installation; in the second installation geometry the width of a bag layer is the width of the geotextile bag element.

Pilarczyk's (1996) equation, which is valid for $\xi \leq 3$, is expressed as

$$\frac{H_s}{\Delta D} = 2.5 \cos \alpha \times \xi^{-1/2} \quad (8)$$

As the author points out, the significant wave height for designing a sand-filled geotextile bag structure should be less than 1.5 m without ever exceeding 2 m to guarantee stability.

Wouters' (1998) equation for revetments is expressed as

$$\frac{H_s}{\Delta D} = \frac{2.0}{\sqrt{\xi_0}} \quad (9)$$

The maximum value that the significant wave height can reach while guaranteeing the stability of a geotextile bag revetment is determined by calculating the values of the variables in Equation (9). The maximum relative density of the geotextile bags, Δ , is equal to 1, considering that it varies between 0.9 and 1; ξ_0 , the minimum Iribarren number, as Figure 3 shows, is 1. The most common values for the slope of a beach are 1:2 or 1:3, and because the slope of the structure is the same as the beach where it is located, a structure with a 1:3 slope (i.e., a structure with an 18.4° gradient) is taken into consideration for α , the maximum slope of the structure. The maximum bag layer width $D = l_c \sin \alpha$ (m) (Oumeraci *et al.*, 2003); the maximum bag length is obtained from Equation (10), in which the greatest admissible volume of geotextile bags taken into consideration was 5 m^3 .

$$V = \frac{l_c^3}{10} \quad (10)$$

Therefore, $l_c = \sqrt[3]{10 \times V} = \sqrt[3]{10 \times 5} = 3.68 \text{ m}$, and the maximum bag layer width is $D = 3.68 \sin 18.4^\circ = 1.16 \text{ m}$. Finally, the maximum significant wave height to which a revetment made of sand-filled geotextile bags may be subjected whilst guaranteeing the structure's stability is found by replacing the variables in Equation (9) and is 2.32 m.

The minimum value that the significant wave height may reach whilst guaranteeing the stability of a revetment made of sand-filled geotextile bags is determined by defining the following values of the variables in Equation (9): Δ , the minimum relative geotextile bag density, is 0.9; ξ_0 , the maximum Iribarren number, as shown in Figure 3, is 11; α , the minimum slope of the structure, is considered to be 18.4° ; D , the minimum width of the bag layer, is equal to $l_c \sin \alpha$ (Recio and Oumeraci, 2008). The least admissible volume is 0.05 m^3 (Lawson 2008); therefore, $l_c = \sqrt[3]{10 \times V} = \sqrt[3]{10 \times 0.05} = 0.79 \text{ m}$, with a minimum bag layer width $D = 0.79 \sin 18.4^\circ = 0.25 \text{ m}$.

Finally, by replacing the variables in Equation (9), it is found that the minimum value of the significant wave height that bags can withstand is 0.13 m. The limit values of the significant wave height to which a sand-filled geotextile bag-built revetment may be subjected, whilst guaranteeing its stability according to the Wouters (1998) equation, lie between 0.13 and 2.32 m.

Oumeraci *et al.* (2003) differentiated the location of bags in the structure itself into two types to define the stability equation. On the one hand, they considered bags located on the slope of a revetment and, on the other, bags located at the top of a revetment.

The equation of Oumeraci *et al.* (2003) for geotextile bags located on the slope of a revetment is expressed as:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = \frac{2.8}{\sqrt{\xi_0}} \quad (11)$$

The limit values of the significant wave height in the Oumeraci *et al.* (2002, 2003) equation that guarantee the stability of sand-filled geotextile bags placed on a revetment slope are determined by the same procedure described earlier. Therefore, these limit values according to the equation of Oumeraci *et al.* (2003) lie between 0.18 and 3.25 m.

Table 3. Empirical parameters of the Dassanayake and Oumeraci (2013) equation.

Empirical Parameters	A	B	C
Nonwoven geotextile bags, 80% filled	20	3.0	2.4
Nonwoven geotextile bags, 100% filled	30	0.5	3.6
Woven geotextile bags, 80% filled	20	0.6	1.3

The Oumeraci *et al.* (2003) equation for geotextile bags placed at the top of a revetment is expressed as

$$\frac{H_s}{\Delta D} < 0.79 + 0.09 \times \frac{R_C}{H_s} \quad (12)$$

Therefore, the significant wave height limits lie between 0 and 0.92 m.

The equation of Mori (2009) and Mori, Aminti, and D'Eliso (2008) for submerged structures of sand-filled geotextile bags, is formulated as shown in Equation (11), so the maximum value that the significant wave height can reach whilst guaranteeing the stability of submerged sand-filled geotextile bag structures is determined by the same procedure as described earlier, and the limit values will lie between 0.18 and 3.25 m.

It must be borne in mind that neither the structure's freeboard nor its height have been taken into account in applying this equation. These measurements are fundamental for finding the load stresses on such a structure. Additionally, the valid wave height range is assumed to be that impacting on the structure; therefore, the height, H_o , that overruns the structure and impacts the submerged structures should be determined by the wave theory for design projects.

The new stability equation developed by Dassanayake and Oumeraci (2013) for submerged structures is

$$Ns\sqrt{\xi_0} = A\left(\frac{R_C}{H} \times \frac{1}{\xi_0}\right)^2 + B\left(\frac{R_C}{H} \times \frac{1}{\xi_0}\right) + C \quad (13)$$

where A, B, and C are unitless parameters obtained by empirical tests.

Table 3 shows the values of A, B, and C for the three cases taken into consideration in the tests performed for determining the new stability equation.

The geometric proportions of the geotextile bags employed in the reduced-scale model, 10:5:1, are used to determine the significant wave height limitations of this new stability equation. Bearing in mind the maximum volume of 5 m³ of currently made geotextile bags and knowing the length of the geotextile bags in the reduced-scale model ($a_m = 0.14$ m), the volume of a full geotextile bag in the model is $V_m = a_m \times 0.5a_m \times 0.1a_m = 0.05a_m^3$, and the volume of a current geotextile bag is $V_r = 5$ m³. Considering $V_m = V_r \rightarrow 0.05a^3 = 5 \rightarrow a_r = 4.6$ m and the scale factor $\lambda = V_m/V_r = a_m/a_r = 0.14/4.6 = 0.03 \rightarrow$, then scale $E = 1/\lambda = 1/0.03 \rightarrow E = 33$.

Therefore, the significant wave height limit values for which a submerged sand-filled geotextile bag structure is stable will be as follows for the new stability equation developed by Dassanayake and Oumeraci (2013): $1.65 \leq H_s \leq 7.92$ for 80% filled nonwoven bags, $1.32 \leq H_s \leq 3.63$ for 100% filled nonwoven bags, and $2.31 \leq H_s \leq 5.28$ for 80% filled woven and nonwoven bags. The range of validity of significant wave heights to which a submerged sand-filled geotextile bag

structure can be subjected whilst guaranteeing its stability according to this new equation will be greatest for 80% filled nonwoven bags, or $1.65 \text{ m} \leq H_s \leq 7.92 \text{ m}$.

DISCUSSION

Not all places on the coast prove suitable for the use of certain sand-filled geotextile bag structures. Therefore, considering the previously performed coastal zoning both along the longitudinal profile of a beach and the different types of coast, those coastal zones where revetments with sand-filled geotextile bags can be located and, consequently, the zones where they may be used are discussed in this section. Since wave intensity occurring in zones 1, 2, and 3 of the longitudinal profile of a beach is practically nil under normal conditions, no distinction is made between these zones and they are dealt with as if they formed a single zone.

Equations for designing this type of structure and its limitations in significant wave height are taken into consideration in determining suitable coastal sites for locating geotextile bag revetments. The range of limitations in significant wave height, from 1 m to almost 8 m, is very wide, so it will be more advisable to use the formula of Dassanayake and Oumeraci (2013) than the formula of Pilarczyk (1996) for all the zones of the coastal profile. The latter can only be used when the significant wave height is less than 2 m.

Zones 1, 2, and 3 of the Longitudinal Profile of a Beach

To ensure greater safety in relation to structure stability, only the top values of the range of significant wave height validity in the equations will be taken into consideration, because the highest significant wave heights make structure stability precarious. In turn, the position of bags in the structure itself must be differentiated when the design is carried out using the Oumeraci *et al.* (2002, 2003) equation.

If a sand-filled geotextile bag revetment is located in zones 1, 2, or 3 of a beach profile corresponding to a dry beach and a foreshore, as defined earlier, and if this beach in turn belongs to an open type of coast, the structure may be designed with the equations defined, because wave heights do not exceed the limits obtained earlier of 2, 3.25, or 7.92 m. Consequently, the structure may be located in these open coast zones.

The remaining types of coasts designated as slightly protected, medially protected, protected, heavily protected, and enclosed are more sheltered than an open type of coast, so wave actions to which a sand-filled geotextile bag revetment located on these types of coast is subjected will be lower in intensity than wave actions to which the structure would be subjected on an open type of coast. Consequently, the significant wave height will be less, mostly meeting the limitations indicated. This structure, located on these types of coast and in zones 1, 2, or 3 of the longitudinal profile of a beach, may be designed with the above-indicated equations.

Zone 4 of the Longitudinal Profile of a Beach

If a sand-filled geotextile bag revetment is sited in zone 4 of a beach profile and belongs to an open coast type, waves to which it is subjected will be moderate in intensity, and the wave height will be the residual type, as indicated earlier. Wave heights will not then exceed the limits established, namely 2, 3.25, or 7.92 m. This structure located in the said zone may be

designed with the equations indicated earlier and may be sited in zone 4 of an open coast profile.

A structure located on the remaining types of coasts is subjected to wave action that is lower in intensity than the waves to which a structure sited on an open type of coast would be subjected because these are more sheltered coasts. When located on the remaining types of coasts, this structure could be designed with the equations indicated because the wave height values do not exceed the limitations required.

Zone 5 of the Longitudinal Profile of a Beach

In zone 5 of the longitudinal profile of a beach corresponding to the breaker zone and belonging to an open coast type, the wave heights to which a sand-filled geotextile bag revetment structure will be subjected show a heavy discharge of energy and, consequently, wave heights may exceed some of the limits. This means that such equations cannot be used for designing this type of structure. As a result, its use in this zone is not recommended.

If a sand-filled geotextile bag revetment is sited in zone 5 of the profile of a beach corresponding to the breaker zone belonging to a slightly protected and medially protected coast, the wave action to which this structure is subjected will be $H_{\text{cgeotextile}} = H_o \times C_{\text{profilereducer}} \times C_{\text{coastreducer}}$, and a wave height coinciding with the breaker wave height (H_b) should be considered. When it is located on slightly and medially protected coasts, wave action will decrease by approximately 20% and 40%, respectively. Wave heights of 0.8 and 0.6 of this value should be used ($C_{\text{coastreducer}} = 0.8$ and 0.6). The calculated wave heights for a sand-filled geotextile structure located in zone 5 of the beach profile belonging to slightly and medially protected coasts will therefore be $H_{\text{cgeotextile}} = H_b \times 0.8$ and $H_{\text{cgeotextile}} = H_b \times 0.6$, respectively.

The breaker wave height then would have to be guaranteed to be less than 2.5 or 4 m to allow the design of a sand-filled bag revetment located in zone 5 of the longitudinal profile of a beach belonging to the slightly protected type of coast using the Pilarczyk (1996), Wouters (1998), and Oumeraci *et al.* (2003) equations, and the breaker wave height would have to be guaranteed to be less than 9.9 m when using the Dassanayake and Oumeraci (2013) equation. Otherwise, its use in this zone is not recommended.

The wave breaker height would have to be guaranteed to be less than 3.3 or 5.3 m, as indicated, to be able to use the foregoing equations to design a sand-filled geotextile bag revetment located in zone 5 of the longitudinal profile of a beach belonging to a medially protected type of coast, and the breaker wave height would have to be guaranteed to be less than 13.2 m when using the Dassanayake and Oumeraci (2013) equation. Otherwise, its use in this zone is not recommended.

In the event of designing a structure using the Oumeraci *et al.* (2003) equation, account must be taken of the position of the bags in the structure itself. The foregoing considerations would only be valid for bags located on the revetment's slope.

To locate geotextile bags belonging to the crest or top of a revetment located in zone 5 of the longitudinal profile of a beach using the Oumeraci *et al.* (2003) equation, the breaker wave height would have to be guaranteed to be less than 1.25 m for a

slightly protected coast or less than 1.67 m for a medially protected coast. Otherwise, its use is not recommended.

If a sand-filled geotextile bag revetment is located in zone 5 of the profile of a beach belonging to a protected, heavily protected, or enclosed coast, the wave action to which the structure is subjected will be residual. It is therefore within the range of validity of wave heights in which the design equations of Pilarczyk (1996), Wouters (1998), and Oumeraci *et al.* (2003) may be applied for calculating its design and stability.

Zone 6 of the Longitudinal Profile of a Beach

In the fully developed wave zone of the longitudinal profile of a beach belonging to an open type of coast, the wave heights to which a revetment type of structure is subjected are those evolving from the high seas, H_o , to intermediate depths, H_o' ; therefore, the wave height value cannot be guaranteed to fall within the range of values in which design equations of geotextile bag revetments are applicable. Therefore, structures of this type cannot be designed in general in this zone of the profile and for this type of coast.

If a sand-filled geotextile bag revetment is planned to be located in zone 6 of the profile of a beach belonging to a slightly protected or medially protected coast, the wave action to which this structure would be subjected would be $H_{\text{cgeotextile}} = H_o \times C_{\text{profilereducer}} \times C_{\text{coastreducer}}$. Using the same procedure as for zone 5, a more detailed analysis would have to be performed for zone 6 to determine whether the wave height to which a sand-filled geotextile bag revetment would be subjected would be greater than 2.5, 4, or 9.9 m. Should the maritime climate in the zone give higher wave heights, it would not be advisable to design a sand-filled geotextile bag revetment located in zone 6 of the profile of a beach belonging to a slightly protected coast with the equations indicated.

For a medially protected coast, the height of the waves to which a sand-filled geotextile bag revetment would be subjected would be less than 3.3, 5.3, or 13.2 m in cases of heavy storms. The equations of the aforementioned authors would thus be valid, and it could be sited in that zone on that type of coast.

If a sand-filled geotextile bag revetment is sited in zone 6 of the profile of a beach belonging to a protected, heavily protected, or enclosed beach, the waves incident on the structure will be similar to high sea waves (H_o), with wave heights under normal conditions of less than 5, 10, or 20 m when taking Pilarczyk's (1996) and Wouters (1998) equations into account and less than 8, 16, and 32 m when taking the Oumeraci *et al.* (2003) and the Dassanayake and Oumeraci (2013) equations into consideration. It may therefore be sited on these types of coasts in zone 6.

In summary, Figure 4 shows different zones of the longitudinal beach profile (vertical) and different types of coasts (horizontal). Suitable, doubtful, and unsuitable locations are given for carrying out the design using equations relating to the stability of a sand-filled geotextile bag revetment and, therefore, for its location.

Having determined the significant wave height limit values in the equations of stability for geotextile bag revetments and their suitable locations, they are finally validated with the behaviour of seven examples built in different countries. The

REVETMENT PROFILE ZONE	TYPE OF COAST					
	Open	Slightly protected	Medially protected	Protected	Heavily protected	Enclosed
Zone 1, 2, 3	R4	R2 R5 R6 R7	R1			
Zone 4					R3	
Zone 5						
Zone 6						

Appropriate

Inappropriate

Doubtful

Figure 4. Summary of coastal sites for placing geotextile bag revetments by comparing the significant wave height of the site with the limits obtained from the equations relating to the stability of a sand-filled geotextile bag revetment. In the inappropriate sites, significant wave height is usually greater than those limits. Therefore, geotextile bag revetments cannot be designed. In doubtful sites, significant wave height could be greater than the known limits, so it would be necessary to investigate more. R1, R2, R3, R4, R5, R6, and R7 are seven examples of geotextile bag revetments discussed in the text.

revetments and their main properties considered are located on the following beaches (countries) and, as Figure 4 shows, all of these revetments are located in appropriate locations.

On Jumeirah Beach (Dubai, United Arab Emirates), the revetment named R1 is built with geotextile bags weighing 2 T on the slope of the revetment and with geotextile bags weighing 5 T at the toe. Located in zone 3 of the beach profile ($H_o \cong 0$) and on a medially protected coast ($H_d = H_o \times Cr = 0 \times 0.6 = 0$ m), where Cr is the wave-height-reducing coefficient, R1 is in a suitable zone and can be designed with all equations, including Pilarczyk's (1996), which is the most restrictive. On Stockton Beach (New South Wales, Australia) the revetment named R2 is built with geotextile bags weighing 2 T. It is located in zone 3 of the beach profile ($H_o \cong 0$) on a slightly protected coast ($H_d = H_o \times Cr = 0 \times 0.8 = 0$ m), so it is located in a suitable zone and can be designed with all of the equations. On the beach located at the mouth of the river Maroochy (Queensland, Australia), the revetment named R3 is built with geotextile bags weighing 2 T. Located in zone 4 of the beach profile ($H_o \cong H_{residual}$) on a heavily protected coast ($H_d = H_o \times Cr = H_{residual} \times 0.2$), R3 is located in a suitable zone and can be designed with all the equations. On Kelso Beach (KwaZulu-Natal, South Africa), the revetment named R4 is built with geotextile bags of $2.3 \times 2.0 \times 0.6$ m volume. Located in zone 4 of the beach profile ($H_o \cong 0$) on an open coast ($H_d = H_o \times Cr = 0 \times 1 = 0$ m), R4 is located in a suitable zone and can be designed with all the equations. On Amanzimtoti Beach (KwaZulu-Natal, South Africa), the revetment named R5 is built with geotextile bags of $2.3 \times 2.0 \times 0.6$ m volume. Located in zone 3 of the beach profile ($H_o \cong 0$) on a slightly protected coast ($H_d = H_o \times Cr = 0 \times 0.8 = 0$ m), R5 is in a suitable zone and can be designed with all equations. On North Beach (East Cape's Jeffrey Bay, South Africa), the revetment named R6 is built with geotextile bags of $2.3 \times 2.0 \times 0.6$ m volume. Located in zone 3 of the beach profile ($H_o \cong 0$) on a slightly protected

coast ($H_d = H_o \times Cr = 0 \times 0.8 = 0$ m), R6 is in a suitable zone and can be designed with all the equations. On Kelly Beach (Port Alfred, South Africa), the revetment named R7 is built with geotextile bags of $2.3 \times 2.0 \times 0.6$ m volume. Located in zone 3 of the beach profile ($H_o \cong 0$) on an open coast ($H_d = H_o \times Cr = 0 \times 1 = 0$ m), R7 lies in a suitable zone and can be designed with all the equations.

CONCLUSIONS

Structures built with geotextile components or elements arise from a need to build emergency structures to prevent the collapse of coastal buildings that are in danger from storm erosion. Their main characteristics are the quick rate at which they can be built, their low cost because of the use of materials from the zone, and low maintenance.

Not all places on the coast are suitable for the use of sand-filled geotextile bag revetment structures. The most appropriate zones for designing and, as a consequence, using sand-filled geotextile bag revetments are usually the dry beach and very shallow water zones that do not reach wave breaker depths except on heavily protected coasts. Inappropriate zones for designing and locating sand-filled geotextile bag revetments are profile zones 5 and 6 on open coasts and profile zone 5 on slightly protected coasts, except if a suitable reinforcement is carried out when the demand makes it necessary for this kind of defence. Doubtful zones for designing and locating sand-filled geotextile bag revetments are profile zone 5 on medially protected coasts and profile zone 6 on slightly protected coasts.

When designing a sand-filled geotextile bag revetment, the limitations of wave height in stability equations and appropriate areas of the coast should be taken into account because not all equations are suitable for designing these structures in all zones. The most restrictive is Equation (8) (Pilarczyk, 1996), because it can be used when the significant wave height is $H_s < 2$ m. However, Equation (13) (Dassanayake and Oumeraci, 2013) is less restrictive; it can be used when the significant wave height is $H_s < 7.92$ m and, therefore, in a greater number of locations on the coast.

ACKNOWLEDGMENTS

A.I. Antón is grateful for the participation of members of the Ports and Coasts Study Centre, CEDEX, Madrid (Spain), without whom it would not have been possible to write this paper.

LITERATURE CITED

Coastal Engineering Research Center, 1995. *Engineering and Design. Design of Beach Fills*. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers, EM 1110-2-3301, 112p.

Dassanayake, D.T. and Oumeraci, H., 2013. Hydraulic stability formulae and nomograms for coastal structures made of geotextile sand containers. *Proceedings of the 7th International Conference on Asian and Pacific Coasts* (Bali, Indonesia, Hasanuddin University), pp. 24–26.

Lawson, R., 2008. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. *Geosynthetics International*, 15(6), 384–427.

Mori, E., 2009. Coastal Structures Made of Geotextile Elements Filled with Sand: Field and Experimental Research. Florence, Italy: University of Florence, Ph.D. dissertation, 250p.

Mori, E.; Aminti, P.L., and D'Eliso, C., 2008. Field experiment on a groin system built with sand bags. In: Smith, J.M. (ed.),

- Proceedings of 31st International Conference on Coastal Engineering*. Singapore: World Scientific, pp. 219–231.
- Oumeraci, H.; Hinz, M.; Bleck, M., and Kortenhaus, A., 2003. Sand-filled geotextile containers for shore protection. *Proceedings of the 6th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries* (Colombo, Sri Lanka, COPEDEC), pp. 88–94.
- Pilarczyk, K.W., 1996. Geotextile systems in coastal engineering—An overview. *Proceedings of the 25th Conference on Coastal Engineering* (Orlando, Florida, ASCE), pp. 2114–2127.
- Pilarczyk, K.W., 2000. *Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering*. Rotterdam, The Netherlands: A.A. Balkema, 913p.
- Weggel, J., 1988. Seawalls: The need for research, dimensional considerations and suggested classification. In: Kraus, N.C. and Pilkey, O.H. (eds.), *Effects of Seawalls on the Beach*. Journal of Coastal Research, Special Issue No. 4, pp. 29–39.
- Wouters, J., 1998. Open Taludbekleding; stabiliteit van geosystems (Stability of Geosystems). *Delft Hydraulics Report No. H-1930*, Annex 7. [in Dutch]

BEHAVIOR OF THE BEACHES ON THE NORTH OF SPAIN IS GLOBAL WARMING INVOLVED?

Lechuga, Antonio¹; De la Peña, José Manuel¹; Antón, Ana Isabel¹; Díez, Galo Fernando²

This study is an analysis about morphological problems, due to anthropic or other causes. We carried out the behavior and evolution of ten beaches on the North Coast of Spain, in order to see if climate change was involved. To do this, it was necessary to consider data from Cantabrian sea buoys during fifteen years. Besides we made use of, maps, nautical charts and bathymetric records. We applied a kind of parameters to measure the energy including on each beach, so to be able to compare them.

Keywords: beach erosion, climate change

INTRODUCTION

Many beaches on the Northern Coast of Spain are undergoing erosion. For that, The Spanish Coast Directorate of the Environment Ministry asked to CEDEX to carry out a general study of Cantabrian Coast beaches in order to determine if the erosive situation of these last years must be due to own natural evolution, human activities or, in the other hand, there are extrinsic causes such as climate change, as it has been in other coasts (Allan and Komar, 2001).

Taking into account the erosive situation of many Northern Coast Spanish beaches, the main items to study are the following:

1. Beaches that are going to be analyzed must have, at least, the following characteristics: Historical data, as bathymetries and/or profiles; and with erosive problems.
2. Evolutionary study of each one of the beaches and analysis of its problems.
3. General marine climate of the Cantabrian Coast, with special consideration in determining if there are changes in it.
4. Study of the causes that have brought about the recent evolution of the problem at issue, and probable improvement of them.

DESCRIPTION OF THE STUDY ZONE AND CHOICE OF BEACHES

Description study zone

The study area extends from the estuary of the river Bidasoa in Guipúzcoa to cape Estaca de Bares between the cities of A Coruña and Lugo. Therefore covers the coast of Galicia, Asturias, Cantabria and the Basque Country.

Figure 1. Main study zone, north shore Spain.

¹ Department of Coast. Centre for Harbors and Coastal Studies. CEDEX, Antonio López. N° 81, 28026, Spain.

² Department of Sustainability of the Coast and the Sea. MAGRAMA.

Before going to give an overview of the physical environment that forms the coastal front, it is interesting to do an overview of its morphological structure.

Most of the north coast would be formed by a cliffy coast, with a percentage for total coast between 45% and 62%, however beach areas were in a percentage ranging from 11.3% in Asturias and 16.5% in Cantabria. In addition, there are a few beaches of certain length.

The north coast of Spain, except the final stretch west, has a nearly east-west alignment. It's structure is influenced by the proximity of the Cantabrian mountain range that reaches to the sea forming large cliffs and rocky headlands that enter into the sea. But this proximity also makes the river system is constituted by short rivers and flowing with erosive power and mighty with its mouth forming in many estuaries, whose have been created under spits and beaches, these being the most important and numerous of this front. This circumstance makes the backshore not too high or with slope, and sensitivity to agents than their own marine climate of estuaries.

Sediments therefore are primarily on the estuaries, being these physiographic units independent.

Continental shelf

The continental coastal shelf can be subdivided into three sections, well differentiated: inner shelf, middle and outer. The basic characteristics of each of these three parts of the continental shelf are:

- The inner shelf is the seabed next to the shoreline, and is where most developed coastal events and coastal dynamics. It extends generally up to 30 or 60 feet deep and condition especially phenomena of refraction and wave propagation.
- The middle shelf extending from the outer edge of the inner platform, 30-60 meters, to a depth not defined, extending as a platform reduced slope.
- The outer platform is between the outer edge of the platform average and the continental slope, which leads to short large depths. The onset of the continental slope is located generally between 100 and 200 feet deep, depending on the coastline involved.

Figure 2. Coastal continental profile in the northern coast.

Types of coastal forms: beaches

From the point of view sedimentary origin are two types of beaches in northern coast of Spain:

- Associated with cliffs: usually narrow disappearing at high tide as in Celorio, near Llanes. Access to them is often difficult, so it is common to find them unaltered.
- Associated with river mouths: can be longer, are commonly found in the urban coastal, and in many cases associated with port activity for both reasons are often strongly influenced by human activity.

These two types of beaches from sedimentary origin can subdivided into more types. Having been studied beaches in the northern coast and analyzing their morphological form, there are six types:

1. Formed by a river: it generates, at its mouth, a spit that tends to close the estuary. Appears in most river mouths forming estuaries. Inside the estuary are generated and maintained sandy beaches on its banks that formed in an initial state prior. Sometimes, when the estuary is too deep cannot be generated by the spit, but beaches are created in the margins of the river facing the waves that allowed into the open, a typical example is the Bilbao estuary, although today their coastal forms are very affected by human activity.
2. Formed by the mouth of a river in a bay: sometimes rivers, flow into bays or concavities of the coast. His sedimentary activity generates beaches that form the front concavity. In many times these rivers tend to lead in the extremes.
3. Formed by the confluence of a mouth with a bay on one side and an island between the two: they are rare cases, but there are beaches as emblematic as San Sebastián or Gijón. It happens when a river flows next to a bay and there is a small island, then sediment fills and forms an isthmus with the island. Also a spit can appear in a range of the mouth.
4. Formed by a bay near an estuary: when a bay is near the mouth of a river but is not inside and besides depths benefit the longitudinal transport of sediments. Then sediments are trapped by the concavity.
5. Formed by a bay next to an estuary: when a bay is very close to the mouth then sediments fill the concavity and it can appear a spit.
6. Formed by the cliffs: sediments come mostly from erosion the coast, itself sometimes tends to isthmus forms when there are islets or cliffs nearby.

Figure 3. Types of structures beaches in the Cantabrian.

Choice of beaches

To characterize the behavior of the beaches of northern Spain have been chosen from all nine locations, ten beaches. This choice is due to various technical criteria that can be summarized in the following points:

1. Beaches must have the main characteristics: historical data, as bathymetries and/or profiles; and with erosive problems.
2. Beaches should be representatives of the Cantabrian coast, so is chosen three beaches in the Basque coast, two beaches in the Cantabrian coast, two in the Asturian coast, and three on the Galician coast.
3. If possible, should represent the maximum types of coastal forms.

The beaches chosen for this study were the follows (Figure 4):

In the Basque coast:

- La Zurriola in San Sebastián (Guipúzcoa)
- Deba in Deba (Guipúzcoa)
- La Arena in Muskiz (Vizcaya)

In the Cantabrian coast:

- Laredo in Santander
- Oyambre in San Vicente de la Barquera

In the Asturian coast:

- San Lorenzo in Gijón
- Salinas in Castrillón

In the Galician coast:

- Rapadoira and San Cosme in Foz (Lugo)
- Arealonga in Vicedo (Lugo)

Figure 4. Beaches representatives chosen in the Cantabrian.

WAVE DATA SOURCE

Four type of wave data have been used of climatic source: Visual data; Offshore data buoy (REDEX), Coastal data buoy (REDCOS), and the calculated wave data in the points of network WANA (program WAM) of "Puertos del Estado".

Visual data from the National Climatic Data Center

Characterize wave climate Cantabrian general maritime front, giving the principal directions of wave. It's the largest data based along the time therefore more reliable than characterize best wave.

Observations are taken from different sources: ships on route, weather ships, or buoys observations. And the data are differentiated by the type of waves, Sea or Swell, providing for each observation: the height, period and direction of the wave and the geographical coordinates of the observation point.

Figure 5. Joint distribution visual wave height / direction, distinguishing between types of waves Sea (left) and Swell (right).

In the wave Sea, the most important sector is the fourth, with the main directions WNW and NNW and frequency of 7,9% and 7,6%. However in the wave Swell, the main direction is NW with frequency of 23,5%.

Offshore data buoy (REDEX)

The joint of buoys known as REDEX consists in buoys located in deep water and form the called “Red Exterior”. This network is formed by the old networks RAYO and EMOD, which was unified and extended.

These buoys are located far of shoreline, at depth usually over 130 meters, between 135 and 1200 meters. And provide directional wave data not affected by the coast being representative of large coastal areas. Besides provide oceanographic and meteorological parameters.

Data from this kind of buoys complement visual data. They are in some occasions more exactly but have a few numbers of years of data.

The buoys used in this study area are the buoy of Bilbao-Vizcaya, the Cape of Peñas buoy and Estaca de Bares buoy.

Coastal data buoy (REDCOS)

The joint of buoys known as REDCOS consists in buoys located near the cost and form the called “Red de Boyas Costeras”. This network is formed by the old network REMRO.

Their buoys are located near the shoreline, at depth less than 100 meters, and always next to harbors. The network consists on scalar buoys and have the advantage, that due to be the first network in Spanish coast the number of years of data is the most extensive. The wave data are conditioned by the effects of the coast, especially refractive.

They are used to characterize parameters of wave unrelated expressly and directly to the direction of wave. The buoys consider in this study area are Pasajes, Bilbao and Gijón (Figure 6).

Figure 6. Coastal data buoy (REDCOS) - Gijon.

Network WANA (program WAM) of “Puertos del Estado”

The data set WANA consists in time series of parameters of wind and waves from numerical modeling. They are therefore simulated data and not come from direct measures of nature. Network WANA comes from the prediction system which “Puertos del Estado” has develop in collaboration with the National Institute of Meteorology, today Agency National Weather. These wave data are obtained from the mathematical model WAM that begins from other variables such as wind and pressure. Obtaining data wave is made to certain points around the Spanish coast and period from data are available is from 1995. On the Cantabrian front there are 30 points since WANA point 1074075 to WANA point 1048076. To complement the general wave data in the Cantabrian front and center on the beach La Zurriola, the only data source that can provide us with a number of year maximum, are the point from forecast WANA. The wave data that have been considered are from the WANA point 1072074 near La Zurriola beach. A resume of this data is presented in table 1.

Table 1. Storms in WANA point 1072074 (Zurriola Beach)													
He max	>8	>7	>6	>5	>4	>3	3-2'5	2'5-2	2-1'5	1'5-1	TOTAL	Max Anual	Months with data
1996	0	0	2	1	2	4	1	0	0	0	10	6,9	12
1997	0	0	0	5	2	3	0	0	1	0	11	5,5	12
1998	1	0	1	2	2	2	1	1	2	0	12	9,0	12
1999	1	0	0	1	5	1	2	0	2	0	12	10,5	12
2000	1	0	2	2	3	0	3	0	1	0	12	9,2	12
2001	0	0	0	2	4	0	3	1	2	0	12	5,5	12
2002	0	0	1	2	3	3	0	2	1	0	12	6,2	12
2003	0	0	1	4	1	2	2	1	1	0	12	6,0	12
2004	0	0	0	2	3	3	2	1	1	0	12	5,4	12
2005	0	1	0	1	0	4	1	1	2	2	12	7,2	12
2006	0	1	0	0	4	3	0	2	2	0	12	7,2	12
2007	1	1	1	1	2	4	1	1	0	0	12	8,4	12
2008	0	1	3	0	3	2	2	1	0	0	12	7,0	12
2009	2	1	1	1	2	1	2	1	1	0	12	11,0	12
2010	1	0	2	2	2	1	2	1	0	0	11	8,0	12
2011	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	3	5,9	3

ANALYSIS OF BEHAVIOR OF THE NORTHERN BEACHES

After analyzing types of coastal forms and wave data source, the next step is to analyze the behavior of the beaches of northern coast, in Spain.

The study of the storms that have been happening in the beaches of the Cantabrian coast, and its evolutionary tendency, has been made both in intensity and number of important storms, which are considered bigger than 4m.

Storm intensity

To analyze the first aspect, storm intensity, we consider the parameter, “average annual energy value”, defined as:

$$\overline{E_{mra}} = \sum \sum (N_i \times H_i^2) / j$$

Where: H_i =Significant wave height

N_i =number of storms with maximum significant wave height H_i .

J =number of years

Considering the number of storms that have occurred in each beach, included in the maritime climate study of each beach, and calculating their average annual energy value, the results are resumed in the table 2.

Table 2: Average annual energy value	
Beach	(m ² /year)
La Zurriola	198,58
Deba	175,15
La Arena	146,82
Laredo	5,30
Oyambre	57,48
San Lorenzo	20,40
Salinas	269,25
Rapadoira	16,37
San Cosme	129,12
Arealonga	6,85

Another indicator of the intensity of the storms is the maximum wave height recorded and their return period (PR). In the following table are included this data, where is possible discover that in none of the cases have been achieved wave heights with return periods over 100 years, and in some cases storms can be consider with normal frequency, when the return period is lower than 15 years. Therefore, on this point, it seems that hasn't been exceptional temporary regarding their frequency of occurrence in time, although they have been hard and unaccustomed to suffer them.

Table 3: Return Period for Storm Maximum (1996-2010)										
Beach	Zurriola	Deba	Arena	Laredo	Oyambre	S. Lorenzo	Salinas	Rapadoira	S. Cosme	Arealonga
(H _{1/10}) _{max} (m)	11,9	12	12	4,4	9,1	6,4	11,7	4,9	8,8	5,3
Year	2009	2009	2009	2007	2009	2008	2009	1997	2010	1997
R.P. (years)	70	70	50	40	20-25	Normal	25	15	Normal	¿?

Looking at the group of beaches, its average annual energy value and the evolutionary tendency it has been studied in the period between 1996 and 2010, and shows that the sector between N14° E and N45° W is the most energy, although, in most cases, there is a tendency to increase in the energy sector, is only in the beach of La Arena where it is more pronounced, softening in the sectors on both sides.

From the normal direction of the beach N14° E to east, beaches have experienced a decreasing tendency or remained. The energy value that will represent the value of the energy incident on them an average year, is fewer than in the last sector.

Figure 7. Address range's northern beaches, its energy characteristics and tendency.

The results of the evolution energy value from the mean in two beaches, La Zurriola and Laredo, are in the following figures. Where is represented the regression line to show the evolutionary tendency of wave energy impacted on the beach.

Figure 8. Evolution of the wave energy on La Zurriola beach.

La Zurriola beach has a tendency in the period 1996-2010 to increase the wave energy incident on the beach. There is a swing around half of the period, increasing in the last year about 50% and decreasing in the first year about -30%. So there are small variations in the intensity.

Figure 9. Evolution of the wave energy on Laredo beach.

Laredo beach is particularly protected from the main directions of waves, so the intensity and energy of the storms incident on the beach is less than the other beaches. The tendency of the energy incident on the beach in the period 1996 – 2010 is decreasing. Although the oscillations about half a year are bigger: reaching values of 140% and -70% above and below the average year, approximately.

Storm number in the coastal buoys

As the period in which it has been studied the waves and storms produced in northern coastal peninsular has been short, 1996 – 2010, and the results obtained from its analysis, both the incident wave energy annual on beaches chosen, as in the significant storm number ($H_{1/3} > 4\text{m}$), don't show clear tendencies or behaviors, is preferred, before giving any valuation, analyze data provide scalar buoys Bilbao and Gijón (REDCOS), located near the coast and with longer period. In Bilbao buoy from 1976 – 2010 and in Gijón buoy from 1981 – 2010.

Taking data from these two buoys, applying the same methodology of analysis than in each beach, and taking into account some important factors:

- Buoys are scalars and therefore reflect data can come from all directions without distinction.
- In certain years there are fewer records months.

The first of the considerations causes the average energy value, is bigger than calculated for each beach. Thus obtained values are:

$$(\overline{E_{mra}})_{BILBAO} = 248,9\text{m}^2 / \text{año}$$

$$(\overline{E_{mra}})_{GIJÓN} = 245,40\text{m}^2 / \text{año}$$

The second could be modified giving a weighting in the years that have less records, but it may fall into a greater mistake than we have to consider partially register, therefore was preferred as a first approximation, leave as shown.

Figure 10. Evolution of wave energy buoy in Bilbao (REDCOS).

The variation, from the mean, of the energy value in Bilbao buoy (REDCOS) indicates that for the period between 1975 and 2010, there is a decreasing tendency. This tendency is due to the years 1978, 1979 and 1982 were “very hard” giving very high energy values, also taking into account that for the years 1980 and 1981, have only half time registered, with somewhat higher energy values average, could say that the period “very hard” extends to five years 1978 – 1982. In addition the number of strong storms, ($H_{1/3} > 4\text{m}$), were very high: 11, 16 and 17 in the years 1978, 1979 and 1982, respectively.

However considering Gijón buoy, with data between 1981 and 2010, the results are very different. With practically the same average annual energy value of Bilbao buoy, the tendency is not the same, having a soft increase. The dispersions are also higher in this buoy. The number of strong storm, are between 5 and 9, although there are punctual cases outside.

The energy values recorded in some years in the Bilbao buoy in 1978 of 468 m^2 , didn't reached in either scalar buoys, approaching in Gijón buoy in 2007 with $431,75\text{ m}^2$.

Figure 11. Evolution of wave energy buoy in Gijón (REDCOS).

CONCLUSIONS

The analysis of the evolution of storms results, seems to rid there are not enough data to be able to indicate a trend clear in the evolution of the maritime climate. Likewise it is not changing or increasing the number of storms or its intensity in the Cantabrian coast.

The number of years that have data does not include possible cycles or alternations in the climate; example of this is the difference in trends in data from the buoys of Bilbao (REDCOS) with the largest number of years, and the Gijon (REDCOS) with fewer years.

In the period from 1996 to 2010 has existed in a covered zone of addresses between N45W and N15E an intensity of important waves, with particularly "hard" years between 2006 to 2010, producing storms with return periods around 70 years.

As a result is not easy to wake meaningful conclusions with respect to climate changes. Nothing can be readily generalized.

ACKNOWLEDGES

This study was funded by Directorate General for the sustainability of the Coast and the Sea of the Spanish Government.

REFERENCES

- Alonso, A., F. Lorenzo y J.L. Pagés. 2000. *Dinámica litoral y erosión en la ría de El Barquero: factores antrópicos y procesos naturales*; *Geogaceta*, 28, 7-10.
- Allan, J.C., and Komar, P.D. 2001. *Wave climate change and coastal erosion in the US Pacific Northwest; Proceedings of 4th International Symposium on Ocean Waves Measurement and Analysis (WAVES 2001)*
- Birkemeier, W.A. 1985. *Field Data on Seaward Limit of Profile Change Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers*, vol. 111, nº 3, 598-602.
- C.U.R. 1987. *Manual on Artificial Beach Nourishment*. Center for Civil Engineering Research, Codes and Specifications, report 130.
- Grupo e Ingeniería Oceanográfica y de Costas. *Atlas de Inundación del Litoral Español*; Universidad de Cantabria y Ministerio de Medio Ambiente.
- Lechuga Álvaro, A. 1993. *Evaluación de la situación actual desde el punto de vista sedimentario de la ría de Foz y playa de San Cosme de Barreiros*. CEDEX (technical report for D.G.S.C.M).
- Peña, J.M. and Antón, A. I. 2011. *Comportamiento reciente de diversas playas del norte*. Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (technical report for D.G.S.C.M).

ESTADO DEL ARTE DE OBRAS BLANDAS PARA LA DEFENSA DE COSTAS

A. Lechuga¹, J.M. de la Peña¹ y A.I. Antón¹

1. Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX-Ministerio de Fomento, c/ Antonio López, 81, 28026 Madrid. Antonio.Lechuga@cedex.es, Jose.M.Pena@cedex.es, Ana.I.Anton@cedex.es.

INTRODUCCIÓN

Los diversos autores que han ido analizando y tratando el estudio de la obra blanda, destacan en las introducciones de sus trabajos la importancia que éstas cobran en la actualidad. Todas ellas se podrían agrupar en tres puntos:

- 1- Obra alternativa a las clásicas, también llamadas duras, realizadas primordialmente como estructuras de hormigón o de escollera. Pero, también, sirven de complemento en la construcción de éstas: Usándose en alguna de sus fases constructivas, como pueden ser núcleos de diques; Como prototipo para conocer la eficacia de la obra que se pretende realizar (o como obra auxiliar).
- 2- Obra que se realiza en un corto espacio de tiempo, inmediatez y rapidez, que la hace ideal como obra de emergencia. Nótese que éste es el uso que se ha dado en la historia a obras con sacos terreros, consideradas como blandas, y a las que se recurre hoy en día en determinadas acontecimientos como inundaciones.
- 3- Los costes de las obras blandas por lo general son muchísimo más bajos que las obras de defensa de costa tradicionales, obra dura. A ello se une la simplicidad de su construcción. En ocasiones se confunden éstas con obras de bajo coste; si bien, las primeras tienen una componente ambiental diferente a las de bajo coste, que únicamente se le exige que cumpla con el nombre que se le ha puesto.

Contra estas tres ventajas, evidentes, se podría argumentar una serie de inconvenientes, muy fuertes, que han sido determinantes para que hasta épocas recientes no se usaran salvo en casos muy esporádicos. Entre ellos los más importantes son:

- I. Materiales inadecuados para resistir las inclemencias del tiempo y los embates del mar.
- II. Alta diversidad de métodos y técnicas no normalizadas, y por tanto inexistencia de métodos de cálculo adecuados y fiables.
- III. Fácilmente degradables por la acción humana; con especial relevancia al vandalismo.
- IV. Percepción subjetiva de falta de resistencia y poco vistosa con un impacto visual importante.

En las últimas décadas, la presión urbana sobre la costa, el incremento de erosión en muchos tramos costeros, el temor a una invasión marina, inundación de terrenos urbanos, y la subida del nivel del mar debido al cambio climático, han llevado a los gobiernos a invertir más y más en protección de la costa con perspectivas futuras de mayores necesidades. En este horizonte, la reducción de costes, la facilidad de construcción y velocidad de realización, las obras blandas se han mostrado como una alternativa muy seria a las obras duras u obras clásicas, tradicionalmente realizadas a lo largo de las costas. Pero esta alternativa de uso conlleva un mayor conocimiento en el comportamiento de éstas, su diseño y durabilidad.

De todas las obras blandas existentes en la actualidad, solamente la alimentación de playas se encuentra perfectamente calculada para su diseño y comportamiento en el tiempo. Esta circunstancia ha hecho que buen número de expertos e instituciones de investigación y desarrollo de países hayan optado por su estudio, con el fin último de encontrar herramientas de cálculo, diseño y comportamiento fiables para este tipo de obras.

ESTADO DEL ARTE DE LAS OBRAS BLANDAS PARA LA DEFENSA DE COSTAS

La indefinición o exactitud de lo que se entiende por obra blanda hace que sea muy complejo presentar el estado del arte de ésta a lo largo del tiempo. Por ello, se ha preferido acotar los trabajos en aquellos relativos a lo que se entendería por obras blandas alternativas, y con esta palabra se entiende excluida una de las obras blandas más importantes y más usadas en las costas españolas: La alimentación de playas mediante el vertido de sedimento, especialmente arenas (Hanson et al 2002). Se ha excluido porque, a lo largo de los años de la reducida historia de costas, se ha desarrollado una metodología de cálculo lo suficientemente precisa y conocida que no requiere de mayores comentarios; especialmente en un trabajo como éste que lo que pretende es sacar a la luz estas nuevas técnicas de defensa blanda de costas que no se han usado ni desarrollado como la ha hecho aquella. Solamente, en todos los trabajos que se exponen a continuación, se ha insertado uno referente a la alimentación artificial de playas, que pone de manifiesto la real importancia que tiene, ha tenido y tendrá en el mantenimiento de la costa como herramienta de importancia en la ingeniería de costas. El mismo caso sucede a la regeneración dunar, por lo que solamente se presentan algunos trabajos como representación de este tipo de obra blanda en la costa.

También debe puntualizarse que, en ocasiones, se confunde obra blanda con obra de bajo coste, que con ser ésta una premisa importante para considerarla como obra blanda, no tiene por qué coincidir siempre. Esa frontera entre ambas, en ocasiones es muy sutil y, hasta, subjetiva. Algunas de las tipologías se encuentran perfectamente estudiadas y calculadas; apareciendo en manuales específicos y libros de costas.

Figura 1: Geometría y esfuerzos del tubo de geotextil (Leshchinsky y Leshchinsky 1996)

REFERENCIAS

- Leshchinsky, D. 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.
- Hanson, H., Brampton, A., Capobianco, M., Dette, H.H., Hamm, L., Lastrup, C., Lechuga, A. y Spanhoff, R. (2002). "Beach nourishment projects, practices, and objectives – a European overview". Coastal Engineering, 47, 81-111.

MÉTODOS DE DISEÑO SOBRE LA ESTABILIDAD DE ESTRUCTURAS CON SACOS DE GEOTEXTIL

Ana Antón Camacho¹; José Manuel De la Peña Olivas¹; Antonio Lechuga Alvaro¹; José Luis Almazán Gárate²

1. Centro de Estudios de Puertos y Costas. C/Antonio López, nº 81, 28026 Madrid. (ana.i.anton@cedex.es; jose.m.pena@cedex.es; antonio.lechuga@cedex.es)
2. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. C/Profesor Aranguren, s/n, 28040 Madrid. (joselius.almazan@upm.es)

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, tipo sacos, tubos o contenedores, se muestren, como una alternativa a los sistemas de defensa tradicionales: escollera, hormigón, etc., o como un complemento a ellos. Pero no todas las zonas de la costa son apropiadas para el uso de los elementos de geotextil rellenos de arena, en estructuras como defensa de la costa. En este artículo se analizan las zonas apropiadas para la ubicación de las estructuras tipo revestimiento compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena, utilizados para proteger la costa de la erosión marina producida durante los temporales.

INTRODUCTION

Los elementos de geotextil rellenos de arena son piezas tridimensionales, fabricadas utilizando materiales de geotextil, que posteriormente se rellenan con arena. Fundamentalmente existen tres tipos de elementos de geotextil rellenos de arena: sacos, tubos y contenedores. Estos elementos se utilizan para formar estructuras en la Ingeniería de Costas, como por ejemplo, espigones o diques, como alternativa a materiales tradicionales. El objetivo de este trabajo, consiste en analizar las zonas de la costa apropiadas para la ubicación de estructuras tipo revestimientos, compuestas por sacos de geotextil rellenos de arena, como defensa de la costa. Para ello se definen las posibles alturas de ola en las zonas del perfil de la costa y en los tipos de costa. Se determinan las limitaciones de la altura de ola de las fórmulas de estabilidad, para sacos de geotextil. Y se detectan las zonas costeras apropiadas para la ubicación de estas estructuras compuestas por sacos de geotextil rellenos de arena. Finalmente se comprueban estas zonas mediante diferentes obras realizadas en diferentes países.

MÉTODO

La elección del tipo de estructura de geotextil, así como su cálculo o diseño, vendrá condicionado por las solicitaciones a la que estará sometida dicha estructura. Siendo una de ellas debida a la acción del oleaje. Por lo que, en primer lugar será necesario conocer el clima marítimo de la zona en la que se ubica la estructura.

Ubicación de la estructura con sacos de geotextil respecto al perfil de una playa

Siguiendo diferentes trabajos anteriores (Weggel 1988) las acciones debidas al oleaje que inciden sobre una estructura a lo largo del perfil de una playa, van variando de intensidad. Weggel (1988) 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.

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, para 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 y para el oleaje: H_0 = altura de ola en alta mar; T = periodo del oleaje; H_i = 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:

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

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. Y 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.

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

$$\frac{H_0}{g T^2} \frac{1}{s} \left(\frac{Z_a}{H_0} + \frac{Z_s}{H_0} \right) < \frac{X_w}{g T^2} < \frac{H_0}{g T^2} \frac{1}{s} \left(\frac{Z_a}{H_0} + \frac{Z_s}{H_0} + \frac{R}{H_0} \right) \quad (2)$$

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). Y 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.

Figura 1: Clasificación de las zonas del perfil de la costa

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

$$\frac{H_0}{g T^2} \frac{1}{s} \left(\frac{Z_a}{H_0} \right) < \frac{X_w}{g T^2} < \frac{H_0}{g T^2} \frac{1}{s} \left(\frac{Z_a}{H_0} + \frac{Z_s}{H_0} \right) \quad (3)$$

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 períodos 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 un sentido formal, sino más bien una corriente de subida y bajada de agua de mediana intensidad.

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 (beachface) (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, $H_4 \approx H_{\text{residual}} \ll H_b$. 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 (breaker zone). 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 sometido una estructura de geotextil en esta zona del perfil de playa, se caracteriza por ser un oleaje desarrollado, $H_6=H_0$ con alturas de ola de gran intensidad y período de retorno elevado.

Ubicación de la obra 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 $(H_{1/3})_{\text{max}}$ 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. Clasificándose este tipo de costa como costa cerrada. La definición que podría hacerse de cada una de ellas sería:

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.

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.

Figura 2: Clasificación de las zonas del perfil de la costa

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.

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.

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.

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.

RESULTADOS

Uno de los puntos clave para el diseño de estructuras compuestas por sacos 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: l_c [m]; D = Ancho de la capa de los sacos = $l_c \cdot \sin \alpha$ [m]; α = Pendiente de la estructura [°]; ξ = Número de Iribarren = $\frac{\tan \alpha}{(H_s/L_0)^{1/2}}$ [-]

La expresión de la fórmula de Pilarczyk (1996), válida para $\xi \leq 3$, es la siguiente:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = 2,5 \cdot \cos \alpha \cdot \xi^{-1/2} \quad (8)$$

Según indicó el propio autor, la altura de ola significativa, para el diseño de una estructura compuesta por sacos de geotextil rellenos de arena, debe ser inferior a 1,5m. Sin sobrepasar nunca los 2m, para garantizar su estabilidad.

La expresión de la fórmula de Wouters (1998) para revestimientos, es la siguiente:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = \frac{2,0}{\sqrt{\xi_0}} \quad (9)$$

El valor máximo que puede alcanzar la altura de ola significativa, que garantiza la estabilidad de un revestimiento compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena, se obtiene determinando los valores máximos de las variables del numerados en la expresión anterior y los valores mínimos del denominador.

Según Pilarczyk (2000), la densidad relativa de los sacos de geotextil rellenos de arena varía entre 0,9 y 1. Para determinar el valor máximo de la altura de ola significativa, se considera el mayor valor posible de la densidad relativa igual a 1.

En la siguiente figura se aprecia la gráfica que relaciona el cociente $H_s/\Delta D$, con el Número de Iribarren ξ_0 . Esta gráfica se ha obtenido de los diferentes ensayos de estabilidad realizados con sacos de geotextil por diferentes autores, Jacobs & Kobayaski (1983), Tekmarine (1982) y Porraz et al (1979). A partir de ella y teniendo en cuenta que para obtener el valor máximo de la altura de ola el valor del Número de Iribarren ha de ser el menor posible, se considera el mínimo valor del Número de Iribarren que se aprecia en la gráfica igual a 1.

Siendo los valores más comunes correspondientes a los taludes de una playa de 1:2 ó 1:3 y por ser la pendiente de la estructura igual a la pendiente de la playa en la que se sitúa, se considera una estructura de talud 1:3 o lo que es lo mismo una estructura con pendiente de valor 18,4°.

La longitud máxima de los sacos se obtiene de la expresión de Recio y Oumeraci (2008), en la que se ha considerado el mayor volumen admisible de los sacos de geotextil, de 5m³.

$$V = \frac{l_c^3}{10} \quad (10)$$

Por lo que: $l_c = \sqrt[3]{10 \cdot V} = \sqrt[3]{10 \cdot 5} = 3,68$ m. Siendo el ancho máximo de la capa de los sacos: $D = 3,68 \cdot \sin 18,4^\circ = 1,16$ m. Con lo que el valor máximo de la altura de ola significativa, a la que se puede someter a un revestimiento compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena, que garantiza la estabilidad de la estructura será:

$$H_s = \frac{2,0 \cdot \Delta D}{\sqrt{\xi_0}} = \frac{2,0 \cdot 1 \cdot 1,16}{1} = 2,32 \text{ m} \quad (11)$$

Figura 3: Gráfica de estabilidad obtenida de diferentes ensayos realizados (Pilarczyk 2000)

Y análogamente se determina el valor mínimo que puede alcanzar la altura de ola significativa, que garantiza la estabilidad de un revestimiento compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena. Por lo tanto, los valores límites de la altura de ola significativa a la que puede someterse un revestimiento compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena, que garantiza su estabilidad según la fórmula de Wouters (1998), son: $0,13 \text{ m} \leq H_s \leq 2,32 \text{ m}$.

Por lo que en la siguiente tabla se indican las limitaciones de la altura de ola para las diferentes formulaciones existentes.

Autor	Fórmula	Limitaciones
Pilarczyk (1996) <u>Revestimientos</u>	$\frac{H_s}{\Delta D} = 2,5 \cdot \cos \alpha \cdot \xi^{-1/2}$	$H_s \leq 2,0 \text{ m}$
Wouters (1998) <u>Revestimientos</u>	$\frac{H_s}{\Delta D} = \frac{2,0}{\sqrt{\xi_0}}$	$0,1 \text{ m} \leq H_s \leq 2,0 \text{ m}$
Oumeraci et al. (2002, 2003) <u>Talud del revestimientos</u>	$\frac{H_s}{\Delta D} = \frac{2,8}{\sqrt{\xi_0}}$	$0,18 \text{ m} \leq H_s \leq 3,25 \text{ m}$
<u>Cresta del revestimiento</u>	$\frac{H_s}{\Delta D} < 0,79 + 0,09 \frac{R_c}{H_s}$	$0 \text{ m} \leq H_s \leq 1,0 \text{ m}$
H_s = Altura de ola significativa [m] Δ = Densidad relativa de los sacos = $(\rho_s - \rho_w) / \rho_w$ [-] D = Ancho de la capa de los sacos = $l_c \cdot \text{sen} \alpha$ [m] l_c = Longitud del saco [m] α = Pendiente de la estructura [°] R_c = Francobordo [m] ξ_0 = Número de Iribarren = $\frac{\tan \alpha}{(H_s / L_0)^{1/2}}$ [-]		

Tabla 1: Límites de la altura de ola significativa para revestimientos de sacos de geotextil

DISCUSIÓN

No todos los lugares de la costa resultan adecuados para el uso de determinadas estructuras compuestas por sacos de geotextil rellenos de arena.

Si un revestimiento compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena, se sitúa en las zonas 1, 2, 3 ó 4 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 los límites establecidos de 1m, 2m ó 3,2m. Y como consecuencia podrá situarse en estas zonas de una costa abierta. A su vez, 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 revestimiento formado con sacos de geotextil rellenos de arena situado en estos tipos de costa, serán de menor intensidad a los oleajes a los que se encontraría sometida esta estructura situada en un tipo de costa abierta. Y en consecuencia, los valores de la altura de ola significativa serán inferiores, satisfaciendo mayormente las limitaciones indicadas. Por lo que esta estructura, situada en estos tipos de costa y en las zonas 1, 2 ó 3 del perfil longitudinal de una playa, se podrá diseñar con las fórmulas indicadas.

En las zonas 5 y 6 del perfil longitudinal de una playa, correspondientes a la zona de rotura y de oleaje totalmente desarrollado, y perteneciente a un tipo de costa abierta, las alturas de ola a las que se encuentra sometida una estructura tipo revestimiento compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena, presentan una importante descarga de energía y en consecuencia las alturas de ola pueden alcanzar valores superiores a las limitaciones de 1m, 2m ó 3,2 m, que requieren las fórmulas de cálculo; 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 estas zonas.

Si un revestimiento compuesto por sacos 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: $H_{c \text{ geotextil}} = H_0 \cdot C_{\text{reductor perfil}} \cdot C_{\text{reductor costa}}$. 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). 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. 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: $H_{c \text{ geotextil}} = H_b \cdot 0,8$ y $H_{c \text{ geotextil}} = H_b \cdot 0,6$.

Luego la altura de ola en rotura que debe soportar un revestimiento 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:

$$H_b \leq \frac{2m \text{ (Pilarzyk 1996 y Wouters 1998) } \text{ ó } 3,2m \text{ (Oumeraci et al.2003)}}{0,8} \quad (12)$$

Si el tipo de costa es medianamente protegida:

$$H_b \leq \frac{2m \text{ (Pilarzyk 1996 y Wouters 1998) } \text{ ó } 3,2m \text{ (Oumeraci et al.2003)}}{0,6} \quad (13)$$

Así para poder diseñar un revestimiento compuesto por sacos 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 de Pilarzyk (1996), Wouters (1998) y Oumeraci et al. (2003), habría que garantizar que la altura de ola en rotura fuese menor de 2,5 o 4m, según lo indicado. En caso contrario no se aconseja su uso en esta zona.

Y para poder diseñar un revestimiento compuesto por sacos 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 formulaciones anteriores, habría que garantizar que la altura

de ola en rotura fuese menor de 3,3 o 5,3m, según lo indicado. En caso contrario no se aconseja su uso en esta zona. Y si un revestimiento compuesto por sacos 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 residual y por tanto dentro del rango de validez de la altura de ola donde pueden aplicarse las fórmulas de diseño de Pilarczyk (1996), Wouters (1998) y Oumeraci et al. (2003), para el cálculo de su diseño y estabilidad.

Para un revestimiento compuesto de sacos de geotextil rellenos de arena situado en la zona 6 del perfil de una playa que pertenece a una costa tipo poco protegida habría que analizar más en detalle si la altura de ola a la que se encontraría sometido dicho revestimiento sería superior a los 2,5m ó 4m. En caso de que el clima marítimo en la zona diese alturas de ola superiores, el uso de las formulaciones anteriores no sería correcto. No siendo aconsejable el diseño de revestimientos compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena, situados en la zona 6 del perfil de una playa perteneciente a una costa poco protegida con las formulaciones indicadas. Sin embargo para una costa medianamente protegida, la altura de ola a la que se encontraría sometido un revestimiento de sacos de geotextil rellenos de arena sería inferior a los 3,3m ó 5,3m en casos de fuerte temporal, por lo que las fórmulas de los autores citados serán válidas y por tanto se podría situar en esa zona y para ese tipo de costa.

Finalmente, si un revestimiento compuesto por sacos 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 será similar al de un oleaje de alta mar (Ho), con alturas de ola en condiciones normales inferiores a los 5m, 10m o 20m, considerando las fórmulas de Pilarczyk (1996) y Wouters (1998) e inferior a los 8m, 16m y 32m, considerando la fórmula de Oumeraci et al. (2002, 2003). Por lo que se podrá situar en este tipo de costa y en esa zona.

CONCLUSIONES

Las zonas menos apropiadas para el diseño y como consecuencia para el uso de revestimientos compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena suelen ser las zonas de rotura y de oleaje desarrollado en un tipo de costa abierta.

Y las zonas dudosas para el diseño y como consecuencia para el uso de revestimientos compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena suelen ser las zonas de rotura y de oleaje desarrollado en un tipo de costa medianamente protegida y poco protegida, dependiendo del clima marítimo.

REFERENCIAS

- [1]. Dassanayake, D.T. 2013. Experimental and numerical modelling of the hydraulic stability of geotextile sand containers for coastal protection. Doctoral Thesis. FakultätArchitektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der echnischenUniversitätCarolo-Wilhelmina zu Braunschweig.
- [2]. Mori, E., Aminti, P., L. y D'Eliso, C. (2008). Field experiment on a groin system built with sand bags. Abstract of International Conference on Coastal Engineering, Hamburg, 219.
- [3]. Mori, E. 2009. Coastal structures made of geotextile elements filled with sand: field and experimental research. Tesis doctoral. Università degli Studi di Firenze, Florencia, Italia.
- [4]. Oumeraci, H., Hinz, M., Bleck, M. y Kortenhaus, A. 2003. Sand-filled geotextile containers for shore protection. COPEDEC VI, Colombo, Sri Lanka.
- [5]. Peña, J.M. 2010. Estado del arte de obras lineales de protección de costa en entornos urbanos. CEDEX.
- [6]. PIANC, 2011. The application of geosynthetics in waterfront areas. PIANC, 113.
- [7]. Pilarczyk, K. W., 1996. Geotextile systems in coastal engineering. An overview. In Proceedings of 25th Conference on Coastal Engineering, ASCE, 2114-2127.
- [8]. USACE, 1995. Coastal Engineering Manual. U.S. Army Corps of Engineers.
- [9]. Weggel, J. 1988. Seawalls: the need for research, dimensional considerations and suggested classification. Journal of Coastal Research, 4, 29-39.
- [10]. Wouters, J. 1998. Open Taludbekleding; Stabiliteit van Geosystems. Deftt Hydraulics, Report H1930.

¿SON UNA ALTERNATIVA LAS OBRAS CON GEOTEXTILES EN INGENIERÍA DE COSTAS?

José Manuel de la Peña Olivas y Ana Antón Camacho

Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX-Ministerio de Fomento

(jose.m.pena@cedex.es y ana.i.anton@cedex.es)

INTRODUCTION

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, tipo sacos, tubos o contenedores, se muestren, como una alternativa a los sistemas de defensa tradicionales: escollera, hormigón, etc., o como un complemento a ellos. Pero no todas las zonas de la costa son apropiadas para el uso de los elementos de geotextil rellenos de arena, en estructuras como defensa de la costa. En este artículo se analizan las zonas apropiadas para la ubicación de las estructuras tipo revestimiento compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena, utilizados para proteger la costa de la erosión marina producida durante los temporales. Los elementos de geotextil rellenos de arena son piezas tridimensionales, fabricadas utilizando materiales de geotextil, que posteriormente se rellenan con arena. Fundamentalmente existen tres tipos de elementos de geotextil rellenos de arena: sacos, tubos y contenedores. Estos elementos se utilizan para formar estructuras en la Ingeniería de Costas, como por ejemplo, espigones o diques, como alternativa a materiales tradicionales.

Los geotextiles se encuentran dentro de las obras blandas. Se entiende por obra blanda, aquella que cumple los siguientes requisitos: Respetuoso con el medio ambiente, con la máxima integración en el paisaje; Los materiales utilizados son “blandos”, esto es; sin rigidez ni pesados; Debe ser de reducido coste; Fácilmente realizables; Reversibles con facilidad; Ejecutables con una cierta rapidez; Flexibles.

TIPOS DE OBRAS BLANDAS

El grupo de obras que pueden incluirse dentro del apéndice de “blandas” podría agruparse en cinco bloques, a saber:

1. Realizadas con geotextiles

Están compuestas por piezas de geotextil rellenas de arena. Los principales tipos de piezas de geotextil son: bolsas (entre 0,05 y 5 m³ pieza), tubos (sección de 1 a 6 m de diámetro), contenedores (entre 100 y 700 m³) y cortinas (no tienen relleno de arenas, en 2 dimensiones).

2. Realizadas con bloques o módulos prefabricados

Los bloques o módulos para que se puedan considerar como obras

blandas deben cumplir los requisitos indicados anteriormente. La mayoría de los bloques o módulos obedecen a patentes y éstas son las que determina su diseño, resistencia y efectividad.

3. Realizadas exclusivamente con arena o sedimento

Este tipo de obras es el que más comúnmente se realiza, pudiéndose considerar, básicamente, seis tipos, a saber: Regeneración o alimentación de playas; Regeneración de dunas; Tránsito de arenas u otro sedimento ("by pass"); Revertido o retrotránsito (tránsito hacia un lado u otro); Reperfilado; Cambio de sedimento o reclasificación de éste.

4. Realizadas con madera u otros materiales

Se incluyen todas aquellas obras que pueden considerarse blandas que incluyen el uso de otro tipo diferente de material, especialmente la madera, entre los que se pueden hallar: Pilotes hidráulicos para formar espigones y barreras eólicas; Cajones de madera o plástico rellenos de sacos de arena, piedras...; Tablestacas de madera, piedra...

5. Otras técnicas

Dentro de este grupo de obras blandas se ha incluido todas aquellas técnicas que no entran dentro de los grupos anteriores. En alguno de los casos son técnicas patentadas. El ejemplo más claro de ellos es el sistema llamado BMS, basado en la construcción de tuberías drenantes a lo largo de la playa, que reducen el nivel freático. El agua absorbida por los drenes va a parar a un pozo que capta el agua y la envía a un tubo colector que lo transporta a una estación de bombeo que vuelve a descargar el agua al mar.

USOS DE LAS OBRAS REALIZADAS CON GEOTEXTILES

El uso que se le puede dar a las realizadas con piezas de geotextil rellenas de arena para la de protección de costas se puede considerar bajo tres aspectos diferentes:

1. Como obra auxiliar de otra obra
  - a. Núcleo de estructuras (diques, espigones...)
  - b. Núcleo de dunas regeneradas
  - c. Protección contra la socavación de pie de estructuras
  - d. Protección contra la socavación de dunas
2. Como obra momentánea o limitada en el tiempo
  - a. Obra auxiliar durante la construcción de otras obras
  - b. Obra de urgencia en eventos extremos
  - c. Obra para estudiar el comportamiento de una actuación futura
  - d. Obra de bajo coste a la espera de disponer de mayores presupuestos
3. Como obra permanente; su elección puede obedecer a:
  - a. Ser más barata
  - b. Ser más integradora con el medio
  - c. Más rápida de ejecución
  - d. Más flexible
  - e. Mejor alternativa

USOS SEGÚN TIPO DE PIEZA DE GEOTEXTIL PARA PROTECCIÓN COSTERA				
TIPO/USO	Bolsas	Tubos	Contenedores	Cortinas
Espigón	X	X		
Revestimiento	X	X		X
Protección de ladera	X	X		X
Protección de pie de estructura	X			
Dique arrecife		X		
Dique exento		X	X	
Núcleo de dique o espigón		X	X	X

Tabla 1: Usos dados a las estructuras de piezas de geotextil para la defensa de costas

Y basándose en esta clasificación, a continuación se irá mostrando los avances que la ingeniería de costas ha ido realizando para el diseño de estructuras de defensa de costas realizadas con cada uno de estos módulos.

Figura 1: Diferentes usos de obras realizadas con piezas de geotextil rellenas de arena

ESTABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS COMPUESTAS POR SACOS DE GEOTEXTIL

A continuación se muestran las fórmulas de estabilidad para las estructuras compuestas por sacos de geotextil rellenos de arena.

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: l_c [m]; D = Ancho de la capa de los sacos = $l_c \cdot \sin \alpha$ [m]; α = Pendiente de estructura [°]; ξ = Número de Iribarren = $\frac{\tan \alpha}{(H_s / L_0)^{1/2}}$ [-]

Diferentes autores como Pilarczyk (1996), Wouters (1998), Oumeraci (2002), Recio y Oumeraci (2010) y Dassanayake y Oumeraci (2012) han estudiado la estabilidad de estructuras compuestas por sacos de geotextil rellenas de arena y definido diferentes fórmulas, como se muestran en la siguiente tabla.

Autor	Fórmula
Pilarczyk (1996) <u>Revestimientos</u>	$\frac{H_S}{\Delta D} = 2,5 \cdot \cos \alpha \cdot \xi^{-1/2}$
Wouters (1998) <u>Revestimientos</u>	$\frac{H_S}{\Delta D} = \frac{2,0}{\sqrt{\xi_0}}$
Oumeraci et al. (2002, 2003) <u>Talud del revestimientos</u> <u>Cresta del revestimiento</u>	$\frac{H_S}{\Delta D} = \frac{2,8}{\sqrt{\xi_0}}$ $\frac{H_S}{\Delta D} < 0,79 + 0,09 \frac{R_C}{H_S}$
Mori (2008) y Mori et al. (2008) <u>Estructura sumergida</u>	$\frac{H_S}{\Delta D} = \frac{2,8}{\sqrt{\xi_0}}$
Dassanayake y Oumeraci (2013) <u>Estructura sumergida</u>	$N_S \sqrt{\xi_0} = A \left(\frac{R_C}{H} \cdot \frac{1}{\xi_0} \right)^2 + B \left(\frac{R_C}{H} \cdot \frac{1}{\xi_0} \right) + C$

Tabla 2: Fórmulas de estabilidad para estructuras compuestas por sacos de geotextil

Figura 2: Tipos de inestabilidad interna de los sacos de geotextil rellenos de arena

ESTABILIDAD DE LOS TUBOS DE GEOTEXTIL RELLENOS DE ARENA

Análogamente se muestran las fórmulas de estabilidad para las estructuras compuestas por tubos de geotextil rellenos de arena.

Diferentes autores como Pilarczyk (2000), CUR 217 (CUR 2006) o Van Steeg y Vastenburg (2010) estudiaron la estabilidad de estructuras compuestas por tubos de geotextil rellenos de arena y han definido diferentes fórmulas, como se muestran en la siguiente tabla.

Autor	Fórmula
Pilarczyk (2000) <i>Dique sumergido</i>	$\frac{H_s}{\Delta_t b} < 1$
CUR 217 (2006) <i>Dique sumergido</i>	$\frac{H_s}{\Delta_t D} < 1$
Van Steeg y Vastenburg (2010) <i>Dique sumergido</i>	$\frac{\chi \cdot H_s}{\Delta_t \sqrt{BD}(f \cos \alpha + \sin \alpha)} \leq 0,65$

Tabla 3: Fórmulas de estabilidad para estructuras compuestas por tubos de geotextil

Figura 3: Tipos de movimientos de un tubo en sección por falta de estabilidad

LUGARES ADECUADOS PARA EL USO ESTRUCTURAS

Para analizar los lugares adecuados para ubicar estructuras compuestas por piezas o elementos de geotextil rellenos de arena se deben tener en cuenta las solicitaciones a las que estarán sometidas. Por tanto, el primer paso a dar es conocer los condicionantes climáticos marítimos a los que estará sometida la estructura, o lo que es lo mismo el oleaje.

Estos condicionantes pueden considerarse desde dos aspectos complementarios. Por un lado, los tipos de costa con respecto a la intensidad del oleaje que incide en ella y por otro lado, la ubicación que tiene la obra respecto al perfil, y por tanto, al desarrollo de la energía del oleaje en él.

Con relación a los tipos de costa, se ha realizado la siguiente clasificación: costa abierta, en la que el oleaje incide directamente; costa poco protegida, en la que el oleaje está localmente reducido; medianamente protegida, en la que el oleaje está parcialmente reducido; muy protegida, donde el oleaje está muy difractado; costa cerrada, donde prácticamente no hay oleaje.

Figura 4: Tipos de costa según su protección frente al oleaje

Tipo de costa	Coefficientes
Abierta	$H'_0 \approx 1 \cdot H_0$
Poco protegida	$H'_0 \approx 0,8 \cdot H_0$
Medianamente protegida	$H'_0 \approx 0,6 \cdot H_0$
Protegida	$H'_0 \approx 0,4 \cdot H_0$
Muy protegida	$H'_0 \approx 0,2 \cdot H_0$
Cerrada	$H'_0 \approx 0,1 \cdot H_0$

Tabla 4: Coeficientes de reducción del oleaje para cada tipo de costa

Estos coeficientes serán válidos para un estudio o anteproyecto. Sin embargo, para un proyecto se deben obtener mediante modelos de propagación de oleaje.

Con relación a los posibles lugares en los que se puede ubicar a lo largo

del perfil de una playa se han distinguido las siguientes zonas: zonas 1, 2 y 3, en la que el oleaje es prácticamente nulo o casi nulo; zona 4, en la que el oleaje es más bien residual, zona 5, en la que el oleaje suele ser el de rotura; zona 6, en la que el oleaje coincide con el de aguas profundas.

Figura 5: Oleaje en función del perfil longitudinal de una playa

A continuación se indican las solicitaciones debidas al oleaje a las que estará sometido un revestimiento cuando se sitúa en las diferentes zonas del perfil longitudinal de una playa.

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

Tabla 5: Solicitaciones a lo largo del perfil longitudinal de una playa

LIMITACIONES DE LA ALTURA DE OLA EN LAS FORMULAS DE ESTABILIDAD DE SACOS DE GEOTEXTIL

Algunos autores indican en sus estudios las limitaciones de las fórmulas de estabilidad, sin embargo, otros no lo hacen. Para determinar las limitaciones de las fórmulas de estabilidad de estructuras tipo revestimiento compuesto por sacos de geotextil rellenos de arena se van a determinar los valores máximos y

mínimos de las variables de las fórmulas de estabilidad.

Por ejemplo, para la fórmula de Wouters (1998):

$$\frac{H_s}{\Delta D} = \frac{2,0}{\sqrt{\xi_0}}$$

Las variables de la expresión anterior, son:

- H_s : Altura de ola significativa [m]
- Δ : Densidad relativa de los sacos de geotextil [-]
- D : Ancho de la capa de sacos de geotextil, [m]
- α : Pendiente de la estructura [°]
- ξ_0 : Número de Iribarren, [-]

Los valores máximo y mínimo de las variables son:

- La densidad relativa de los sacos de geotextil (Δ) varía entre 0,9 y 1.
- Los valores del número de Iribarren varían entre 1 y 11, como se aprecia en gráfica de la curva de estabilidad obtenida de los ensayos realizados por Jacobs y Kobayashi (1983), Tekmarine (1982) y Porraz et al. (1979)

Figura 6: Resumen de los ensayos de estabilidad para revestimientos con sacos de geotextil

- D : Ancho de la capa de sacos de geotextil $D = l_c \cdot \sin \alpha$
- α : Pendiente estructura ó playa - 1:2 $\rightarrow \alpha = 18,4^\circ$
- l_c : Longitud del saco de geotextil $l_c = \sqrt[3]{V}$
- V : Volumen del saco de geotextil que varía entre 0,05m³ y 5m³ (Recio y Oumeraci, 2008)

Sustituyendo en la fórmula de estabilidad de Wouters (1998), se obtiene:

$$0,10\text{m} \leq H_s \leq 2,0\text{m}$$

Y realizando el mismo procedimiento para cada una de las fórmulas de estabilidad de los diferentes autores, se obtienen sus limitaciones.

Autor	Fórmula	Limitaciones
Pilarczyk (1996) <u>Revestimientos</u>	$\frac{H_s}{\Delta D} = 2,5 \cdot \cos \alpha \cdot \xi^{-1/2}$	$H_s \leq 2,0\text{m}$
Wouters (1998) <u>Revestimientos</u>	$\frac{H_s}{\Delta D} = \frac{2,0}{\sqrt{\xi_0}}$	$0,1\text{m} \leq H_s \leq 2,0\text{m}$
Oumeraci et al. (2002, 2003) <u>Talud del revestimientos</u> <u>Cresta del revestimiento</u>	$\frac{H_s}{\Delta D} = \frac{2,8}{\sqrt{\xi_0}}$ $\frac{H_s}{\Delta D} < 0,79 + 0,09 \frac{R_c}{H_s}$	$0,18\text{m} \leq H_s \leq 3,25\text{m}$ $0 \text{ m} \leq H_s \leq 1,0\text{m}$
Mori (2008) y Mori et al. (2008) <u>Estructura sumergida</u>	$\frac{H_s}{\Delta D} = \frac{2,8}{\sqrt{\xi_0}}$	$0,18\text{m} \leq H_s \leq 3,25\text{m}$
Dassanayake y Oumeraci (2013) <u>Estructura sumergida</u>	$N_s \sqrt{\xi_0} = A \left(\frac{R_c}{H} \cdot \frac{1}{\xi_0} \right)^2 + B \left(\frac{R_c}{H} \cdot \frac{1}{\xi_0} \right) + C$	$1,65\text{m} \leq H_s \leq 7,92\text{m}$
H_s = Altura de ola significativa [m] Δ = Densidad relativa de los sacos = $(\rho_s - \rho_w) / \rho_w$ [-] D = Ancho de la capa de los sacos = $l_c \cdot \sin \alpha$ [m] l_c = Longitud del saco [m] α = Pendiente de la estructura [°] R_c = Francobordo [m] ξ_0 = Número de Iribarren = $\frac{\tan \alpha}{(H_s / L_0)^{1/2}}$ [-]		

Tabla 6: Limitaciones de las fórmulas de estabilidad para estructuras de sacos de geotextil

LIMITACIONES DE LA ALTURA DE OLA EN LAS FORMULAS DE ESTABILIDAD DE TUBOS DE GEOTEXTIL

Los autores en sus estudios no indicaron los límites de las fórmulas de estabilidad para estructuras compuestas por tubos de geotextil rellenos de arena.

El procedimiento para su determinación en dichas fórmulas es análogo al descrito anteriormente, para las fórmulas de estabilidad de estructuras compuestas por sacos de geotextil rellenos de arena, basado en determinar los valores máximos y mínimos de sus variables. La tabla 7 muestra los resultados.

Autor	Fórmula	Limitaciones
Pilarczyk (2000) <i>Dique sumergido</i>	$\frac{H_s}{\Delta_t b} < 1$	$H_s \leq 1,5 \text{ m}$
CUR 217 (2006) <i>Dique sumergido</i>	$\frac{H_s}{\Delta_t D} < 1$	$H_s \leq 2 \text{ m}$
Van Steeg y Vastenburg (2010) <i>Dique sumergido</i>	$\frac{\chi \cdot H_s}{\Delta_t \sqrt{BD}(f \cos \alpha + \sin \alpha)} \leq 0,65$	$1,2 \text{ m} \leq H_s \leq 8 \text{ m}$
H_s = Altura de ola significativa [m] Δ_t = Densidad relativa de los tubos = $(\rho_s - \rho_w)/\rho_w$ [-] D = Diámetro efectivo de los tubos = $I_c \cdot \sin \alpha$ [m] b = Ancho de los tubos [m] α = Pendiente de la estructura [°] χ = Factor de reducción por la pérdida de energía debido al rebase [-] f = Coeficiente de rozamiento de los tubos de geotextil [-]		

Tabla 7: Limitaciones de las fórmulas de estabilidad para estructuras de tubos de geotextil

EJEMPLO DE VALIDACIÓN: REVESTIMIENTOS DE SACOS DE GEOTEXTIL

A continuación se expone, a modo de ejemplo metodológico, el resumen del proceso para conocer cuáles son los lugares más adecuados.

Como comprobación se han considerado los revestimientos situados en:

- RS1.- Playa de Jumeirah en Dubai (Emiratos Árabes Unidos)
- RS2.- Playa de Stockton en Nueva Gales del Sur (Australia)
- RS3.- Playa de la desembocadura del río Maroochy en Queensland (Australia)
- RS4.- Playa de Quelso en KwaZulu-Natal (Sudáfrica)
- RS5.- Playa de Amanzimtoti en KwaZulu-Natal (Sudáfrica)
- RS6.- North Beach en la Bahía de Jeffrey del Cabo Oriental (Sudáfrica)
- RS7.- Playa de Playa de Kelly en Port Alfred (Sudáfrica)

Y en cada una de ellas las variables más significativas.

- Altura de ola en profundidades indefinidas
- Zona del perfil y tipo de costa
- Altura de ola en la obra
- Tipos de sacos de geotextil
- Comportamiento

REVESTIMIENTO	TIPO DE COSTA					
ZONA PERFIL	Abierta H_o	Poco protegida ($0,8 H_o$)	Medianamente protegida ($0,6 H_o$)	Protegida ($0,4 H_o$)	Muy protegida ($0,2 H_o$)	Cerrada ($0,1 H_o$)
Zona 1, 2 y 3 ($H_o \approx 0$)	RS4	RS2, RS5, RS6 y RS7	<u>RS1</u>			
Zona 4 (H_t)					<u>RS3</u>	
Zona 5 (H_b)						
Zona 6 (H_o)						
	Adecuados	No adecuados	Dudosos			

Figura 7: Tabla de verificación de los lugares adecuados para el uso de revestimientos con sacos rellenos de arena

CONCLUSIONES

Las obras blandas son cada vez más una alternativa a las obras de defensa de costas convencionales que deben considerarse como obras auxiliares y complementarias a las obras convencionales.

Existe un gran inconveniente en el estado de desarrollo de teorías que faciliten el diseño de este tipo de obras. Sus costes y velocidad de realización son una de las ventajas importantes. Por lo que es necesario el desarrollo de nuevas teorías de diseño. Al igual que motivar a los investigadores en la mejora de su diseño y comportamiento a largo plazo.

No todos los lugares de la costa resultan adecuados para su diseño y uso:

- Zonas de rotura y de oleaje desarrollado en un tipo de costa abierta no son válidas
- Zonas de rotura y de oleaje desarrollado en los tipos de costa medianamente protegida y poco protegida, dependerá del clima marítimo para su validez
- Demás zonas del perfil longitudinal y del tipo de costa, resultan válidas

Las zonas más apropiadas para el diseño y como consecuencia para el uso de revestimientos compuestos por sacos de geotextil rellenos de arena suelen ser la zona de playa seca y de aguas muy someras, sin llegar a profundidades de rotura de ola, salvo para un tipo de costa muy protegida.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la ayuda prestada de Antonio Lechuga Álvaro y del resto de los técnicos del área de Costas del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX por su colaboración y apoyo.

REFERENCIAS

- [1]. Dassanayake, D.T. 2013. Experimental and numerical modelling of the hydraulic stability of geotextile sand containers for coastal protection. Doctoral

- Thesis. Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.
- [2]. Mori, E., Aminti, P., L. y D'Eliso, C. (2008). Field experiment on a groin system built with sand bags. Abstract of International Conference on Coastal Engineering, Hamburg, 219.
  - [3]. Mori, E. 2009. Coastal structures made of geotextile elements filled with sand: field and experimental research. Tesis doctoral. Università degli Studi di Firenze, Florencia, Italia.
  - [4]. Oumeraci, H., Hinz, M., Bleck, M. y Kortenhaus, A. 2003. Sand-filled geotextile containers for shore protection. COPEDEC VI, Colombo, Sri Lanka.
  - [5]. Peña, J.M. 2010. Estado del arte de obras lineales de protección de costa en entornos urbanos. CEDEX.
  - [6]. PIANC, 2011. The application of geosynthetics in waterfront areas. PIANC, 113.
  - [7]. Pilarczyk, K. W., 1996. Geotextile systems in coastal engineering. An overview. In Proceedings of 25th Conference on Coastal Engineering, ASCE, 2114-2127.
  - [8]. USACE, 1995. Coastal Engineering Manual. U.S. Army Corps of Engineers.
  - [9]. Weggel, J. 1988. Seawalls: the need for research, dimensional considerations and suggested classification. Journal of Coastal Research, 4, 29-39.
  - [10]. Wouters, J. 1998. Open Taludbekleding; Stabiliteit van Geosystems. Delft Hydraulics, Report H1930.