

ESTRUTURA DE DEFESA COSTEIRA DESTACADA CONSTITUÍDA POR CONTENTORES GEOTÊXTEIS Detached Coastal Defense Structure Composed of Geotextile Sand Containers

JOSÉ CABRAL ⁽¹⁾, FRANCISCO TAVEIRA-PINTO ⁽²⁾ e MARIA DE LURDES LOPES ⁽³⁾

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia Civil, FEUP,
Rua do Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, cabral.jpm@gmail.com

⁽²⁾ Professor Catedrático, FEUP,
Rua do Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, fpinto@fe.up.pt

⁽³⁾ Professora Catedrática, FEUP,
Rua do Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, lcosta@fe.up.pt

Resumo

O objetivo deste trabalho de investigação consistiu na idealização de uma estrutura de defesa costeira realizada com contentores geotêxteis de areia capaz de resistir e manter-se funcional perante um clima de agitação marítima muito energético (como o existente na costa oeste portuguesa). A utilização de contentores geotêxteis de pequeno volume possui várias vantagens em relação à utilização de contentores geotêxteis de grande volume (Oumeraci e Recio, 2010). Contudo estes são muito mais leves e, como tal, menos estáveis perante estados de mar mais severos. Assim, decidiu-se agrupar vários contentores geotêxteis de pequeno volume dentro de uma rede fechada. Deste modo a solidarização do conjunto será assegurada pela rede conduzindo a um aumento muito significativo do peso próprio do sistema estrutural (constituído pela rede e pelos contentores nela contidos).

Neste trabalho, foram ensaiadas 3 configurações distintas para um quebramar destacado construído com 38 elementos cúbicos (cada um dos quais formado por 16 contentores geotêxteis de areia envolvidos por uma rede fechada) e com 3 caixotões cheios de brita. Em cada uma das 3 configurações, o quebramar destacado foi solicitado por estados de agitação irregular sucessivos descritos pelo espectro de Pierson-Moskowitz (uns a seguir aos outros, sem rearranjo da estrutura) e crescentes (altura de onda significativa e período modal sucessivamente crescentes), até se verificar o colapso da estrutura.

As principais conclusões retiradas destes ensaios foram as seguintes:

- Os elementos cúbicos são mais estáveis quando se encontram afastados uns dos outros;
- Para as condições testadas, os elementos cúbicos são estáveis, no mínimo, para alturas de onda aproximadamente iguais a 70% da altura dos elementos cúbicos;
- Os elementos cúbicos comportam-se como blocos coesos (a rede tem um excelente desempenho na confinção dos seus componentes).

Palavras-chave: Quebramar destacado, contentores geotêxteis, rede.

Abstract

The goal of this research was the idealization of a coastal defense structure made with sand geotextile containers capable of withstanding and remain functional before a very energetic wave climate (such as the one in the Portuguese west coast). The use of smaller volume geotextile containers has several advantages over the use of larger volume geotextile containers (Oumeraci and Recio, 2010). However, these are much lighter and therefore less stable against severe sea states. Thus, it was decided to enclosed several small volume geotextile containers within a closed net. Thereby, as the net ensures the stability of the structure, the self-weight of the structural system (the closed net and the containers contained therein) increases.

In this study, 3 different configurations of a breakwater built with 38 cubic elements (each one composed of 16 geotextile containers surrounded by a closed net) and 3 caissons filled with gravel were tested.

In each of the 3 configurations, the detached breakwater was lashed by sea states described by the Pierson-Moskowitz spectrum, one after the other, with significant wave heights successively larger, until the collapse of the detached breakwater occurred. Notice that no block was repositioned between successive sea states.

The main conclusions from these tests were:

- The cubic elements are more stable when they are apart from each other;
- For the conditions tested, the cubic elements are stable at least to wave heights approximately equal to 70% of the height of the cubic elements;
- The cubic elements behave as cohesive blocks (the net confines the geotextile containers).

Keywords: Detached breakwater, geotextile container, net.

1. Introdução

O objetivo desta investigação consiste na idealização de uma estrutura de defesa costeira realizada com contentores geotêxteis de areia capaz de resistir e manter-se funcional perante um clima de agitação marítima muito energético (como o existente na costa oeste portuguesa).

Entre outros fatores, a estabilidade da generalidade das estruturas de defesa costeira é tanto maior quanto mais pesados forem os elementos expostos à ondulação marítima que a constituem.

Existem várias vantagens na utilização de contentores geotêxteis de pequeno volume em relação aos contentores geotêxteis de grande volume (Oumeraci e Recio, 2010). Contudo estes são muito mais leves e, como tal, menos estáveis perante estados de mar mais severos. A situação ideal seria combinar as vantagens da utilização de contentores geotêxteis de pequeno volume sem abdicar da estabilidade associada a um elevado peso próprio. Assim, foi idealizado o conceito de enclausurar vários contentores geotêxteis de pequeno volume dentro de uma rede fechada. Deste modo a rede asseguraria a solidarização do conjunto e um aumento muito significativo do peso próprio do sistema estrutural (constituído pela rede e pelos contentores nela contidos). Os ensaios preliminares descritos ao longo deste artigo correspondem a ensaios exploratórios, na medida em que permitiram testar um novo conceito estrutural e, em simultâneo, forneceram um conjunto de fundamentos empíricos que contribuíram para a criação de estrutura de defesa costeira destacada (não descrita neste artigo) presentemente a ser alvo de investigação.

2. Modelo Testado

O modelo testado nos ensaios preliminares foi um quebramar destacado construído com 38 elementos cúbicos e com 3 caixotões cheios de brita.

Na Figura 1, apresentam-se três vistas do modelo do quebramar destacado construído.



Figura 1. Modelo do quebramar destacado construído (vista frontal, vista lateral e vista oblíqua, respetivamente em cima, em baixo à esquerda e em baixo à direita).

Os elementos cúbicos resultaram da sobreposição de 16 contentores geotêxteis de areia de pequeno volume, cruzados 2 a 2 (8 níveis), e envolvidos por rede. Cada elemento cúbico manufaturado possui 26 cm de lado e 19,8 kg de massa.

Cada um dos três caixotões utilizados na base do modelo procurou simular um conjunto de 12 elementos cúbicos. Nestes foram recriadas as características da superfície exterior dos elementos cúbicos que se pretendiam substituir, assim como o peso imerso efetivo do conjunto.

3. Instalação Experimental

Instalaram-se 7 sondas de nível (4 a barlamar do quebramar destacado e 3 a sotamar do mesmo). A Figura 2 apresenta uma vista geral durante a realização de um ensaio e a Figura 3 uma planta da instalação experimental.



Figura 2. Vista geral da instalação experimental durante a realização de um ensaio.

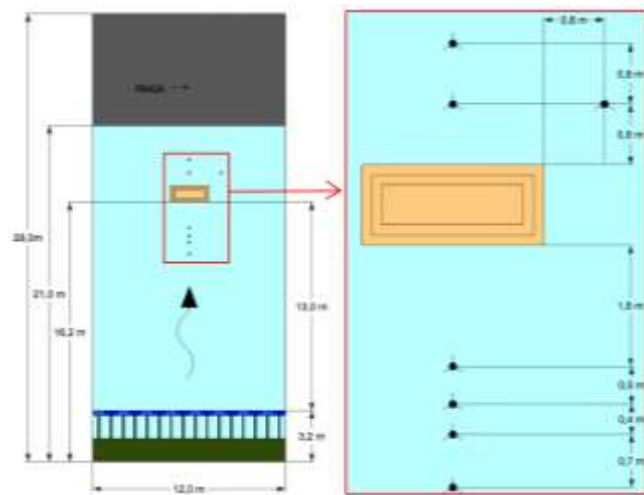


Figura 3. Planta da instalação experimental.

4. Condições de Agitação Marítima Consideradas nos Ensaios

Nos ensaios preliminares efetuados optou-se por utilizar agitação irregular descrita pelo espectro de agitação marítima de Pierson-Moskowitz, por quatro motivos:

- Trata-se de um estado de mar completamente desenvolvido, o que conduz a ondas com baixa declividade e consequente grande poder destrutivo;

- Trata-se de um espectro que apenas depende de um parâmetro: a velocidade do vento, o que simplifica a sua interpretação física e evita ambiguidades;
- A utilização de espectros de Pierson-Moskowitz em ensaios em modelo reduzido (sem escala definida à partida) permite a sua interpretação posterior a diferentes escalas, sem que se estejam a distorcer as características da agitação irregular;
- As ondas geradas no tanque de ondas por este espectro são fisicamente muito estáveis e não rebentam antes de alcançar a estrutura (não ocorre pré-rebentação, mesmo para as alturas de onda máximas geradas em cada estado de agitação).

Os ensaios realizados dividiram-se em quatro séries de ensaios. Em cada uma das quatro séries de ensaios, o quebramar destacado foi solicitado por estados de agitação marítima descritos pelo espectro de Pierson-Moskowitz, uns a seguir aos outros, com alturas de onda significativas sucessivamente maiores, até se verificar o colapso da estrutura. Note-se que entre as sucessivas solicitações não se reposicionou nenhum componente do modelo. Cada um destes estados de agitação irregular teve uma duração temporal igual a 7500 vezes o respetivo período modal, ao longo da qual se atinge um equilíbrio na evolução dos danos em quebramares de taludes (van der Meer, 1998).

5. Descrição dos Ensaios Realizados

5.1. Série 1

Na série 1 foi testada uma configuração em que os 38 elementos cúbicos se encontravam encostados uns aos outros e o nível de água rasante ao coroamento da estrutura, Figura 4.

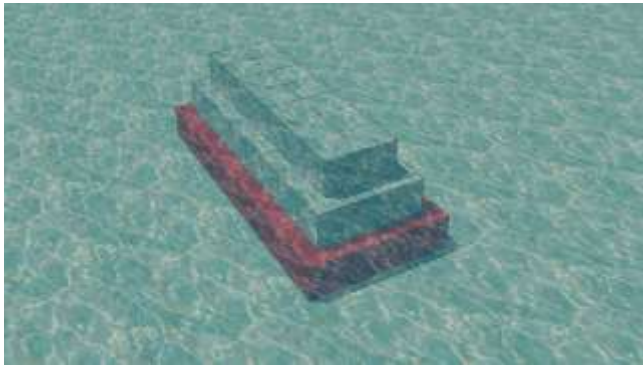


Figura 4. Esquema da configuração testada na série 1.

No Quadro 1 apresentam-se as principais características dos vários estados de agitação aplicados nos ensaios da série 1 (valores em modelo e medidos pelas sondas de nível).

Quadro 1. Principais características dos estados de agitação aplicados nos ensaios da série 1.

Ensaio	$\bar{H}_{1/10}$ (cm)	$\bar{H}_{1/3}$ (cm)	T_0 (s)	$\frac{\bar{H}_{1/3_{sotamar}}}{\bar{H}_{1/3_{barlamar}}}$	Duração
1.º	11,9	9,6	1,581	0,73	3h18m
2.º	14,8	11,9	1,768	0,71	3h41m
3.º	17,7	14,2	1,936	0,71	4h03m
4.º	20,1	16,2	2,092	0,75	4h22m

Na Figura 5, apresentam-se duas fotografias tiradas ao modelo no início e no fim dos ensaios da série 1.

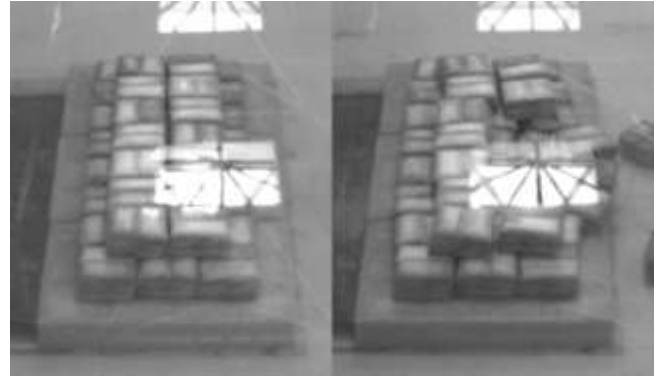


Figura 5. Modelo no início e no fim dos ensaios da série 1 (à esquerda e à direita respetivamente).

Durante os ensaios da série 1, notou-se que havia tendência para as ondas, ao rebentarem, mergulharem entre as duas filas de elementos cúbicos do coroamento da estrutura. Notou-se igualmente que os elementos cúbicos da fila do intradorso do coroamento tendiam a deslocar-se em bloco. A combinação destes efeitos provocou o colapso precoce da fila de elementos cúbicos do intradorso.

Na tentativa de minimizar estes efeitos, construiu-se uma segunda configuração para o quebramar destacado, em que os elementos cúbicos se encontravam ligeiramente afastados uns dos outros.

5.2. Série 2

Na série 2 foi testada uma configuração em que os 38 elementos cúbicos se encontravam afastados 36 mm uns aos outros (valor fixado de forma arbitrária) e o nível de água rasante ao coroamento da estrutura, Figura 6.

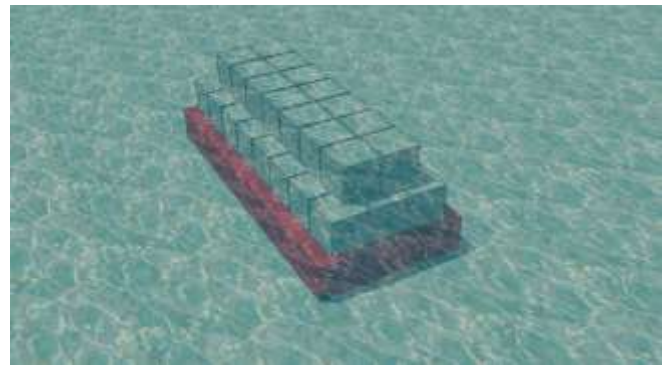


Figura 6. Esquema da configuração testada na série 2.

Com a introdução destes afastamentos pretendeu-se aumentar a permeabilidade da estrutura de defesa e anular as forças de atrito laterais entre elementos cúbicos adjacentes.

No Quadro 2 apresentam-se as principais características dos vários estados de agitação aplicados nos ensaios da série 2 (valores em modelo e medidos pelas sondas de nível).

Na Figura 7, apresentam-se duas fotografias tiradas ao modelo no início e no fim dos ensaios da série 2. Nesta configuração, o quebramar resistiu a ondulação mais energética, mas continuou-se a verificar o colapso precoce da fila de elementos cúbicos do intradorso.

Dado que se continuava a verificar o colapso precoce da fila de elementos cúbicos do intradorso, na terceira configuração testada eliminou-se a presença da mesma, construindo-se, assim, um quebramar mais simples, com um número de elementos cúbicos menor.

Quadro 2. Principais características dos estados de agitação aplicados nos ensaios da série 2.

Ensaio	$\bar{H}_{1/10}$ (cm)	$\bar{H}_{1/3}$ (cm)	T_0 (s)	$\frac{\bar{H}_{1/3_{\text{sotamar}}}}{\bar{H}_{1/3_{\text{barlamar}}}}$	Duração
1.º	14,3	11,5	1,768	0,81	3h41m
2.º	16,9	13,6	1,936	0,81	4h03m
3.º	19,6	15,7	2,092	0,80	4h22m
4.º	21,9	17,6	2,236	0,80	4h40m
5.º	24,1	19,4	2,372	0,79	4h57m

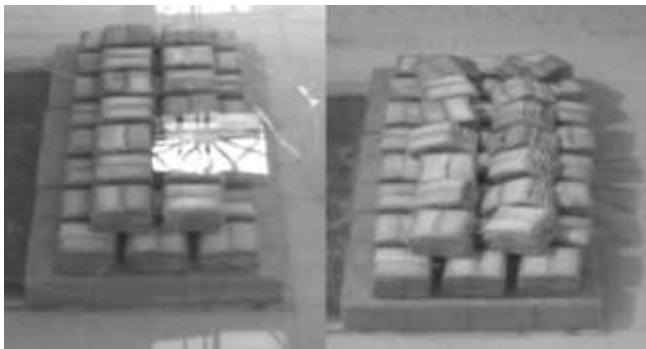


Figura 7. Modelo no início e no fim dos ensaios da série 2 (à esquerda e à direita respetivamente).

5.3. Série 3

Na série 3 foi testada uma configuração constituída por apenas 23 elementos cúbicos, afastados 36 mm uns dos outros (valor fixado de forma arbitrária). O nível de água encontrava-se rasante ao coroamento da estrutura, Figura 8.

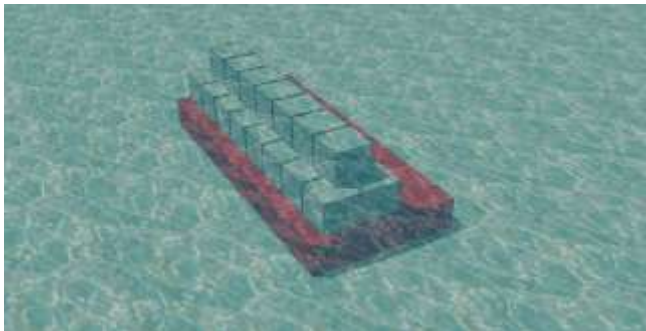


Figura 8. Esquema da configuração testada na série 3.

No Quadro 3 apresentam-se as principais características dos vários estados de agitação aplicados nos ensaios da série 3 (valores em modelo e medidos pelas sondas de nível).

Quadro 3. Principais características dos estados de agitação aplicados nos ensaios da série 3.

Ensaio	$\bar{H}_{1/10}$ (cm)	$\bar{H}_{1/3}$ (cm)	T_0 (s)	$\frac{\bar{H}_{1/3_{\text{sotamar}}}}{\bar{H}_{1/3_{\text{barlamar}}}}$	Duração
1.º	17,2	13,8	1,936	0,79	4h03m
2.º	19,1	15,3	2,092	0,81	4h22m
3.º	21,3	17,2	2,236	0,81	4h40m

Na Figura 9, apresentam-se duas fotografias tiradas ao modelo no início e no fim dos ensaios da série 3. Nesta configuração, o quebramar entrou em colapso devido ao deslocamento dos elementos cúbicos da camada inferior. No sentido de avaliar o efeito do nível de água, foi testada uma quarta configuração, idêntica a esta, mas em que a camada de coroamento se encontrava parcialmente emersa.

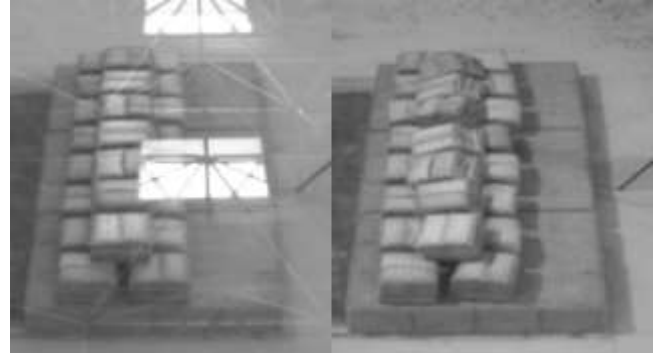


Figura 9. Modelo no início e no fim dos ensaios da série 3 (à esquerda e à direita respetivamente).

5.4. Série 4

Na série 4 foi testada uma configuração constituída por apenas 23 elementos cúbicos, afastados 36 mm uns dos outros (valor fixado de forma arbitrária). O nível de água encontrava-se mais baixo do que nas séries de ensaios anteriores (a metade superior da última camada de cubos encontrava-se emersa), (Figura 10).

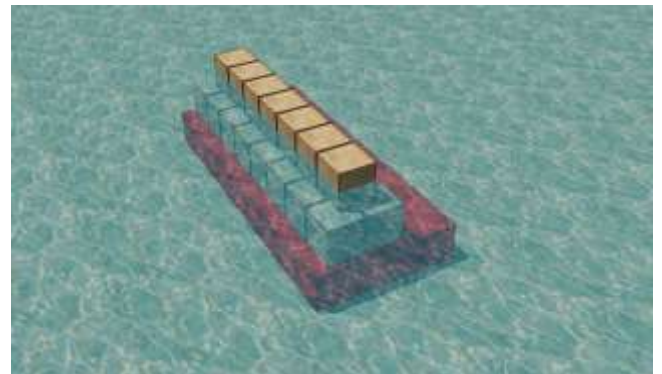


Figura 10. Esquema da configuração testada na série 4.

No Quadro 4, apresentam-se as principais características dos vários estados de agitação aplicados nos ensaios da série 4 (valores em modelo e medidos pelas sondas de nível).

Quadro 4. Principais características dos estados de agitação aplicados nos ensaios da série 4.

Ensaio	$\bar{H}_{1/10}$ (cm)	$\bar{H}_{1/3}$ (cm)	T_0 (s)	$\frac{\bar{H}_{1/3_{\text{sotamar}}}}{\bar{H}_{1/3_{\text{barlamar}}}}$	Duração
1.º	12,2	9,8	1,581	0,66	3h18m
2.º	15,2	12,3	1,768	0,65	3h41m
3.º	18,3	14,8	1,936	0,63	4h03m

Na Figura 11, apresentam-se duas fotografias tiradas ao modelo no início e no fim dos ensaios da série 4. Nesta configuração, tal como na terceira configuração, o quebramar entrou em colapso devido ao deslocamento dos elementos cúbicos da camada inferior.



Figura 11. Modelo no início e no fim dos ensaios da série 4 (à esquerda e à direita respetivamente).

6. Principais Resultados

Apresentam-se de seguida os principais resultados obtidos para cada série de testes, sendo que o coeficiente da transmissão K_t corresponde a:

$$K_t = \frac{\bar{H}_{1/3\text{transmitida}}}{\bar{H}_{1/3\text{incidente}}} \quad [1]$$

Série 1

- Coeficiente de transmissão global, $K_t = 73\%$;
- A estrutura mantém-se funcional para $\bar{H}_{1/10} = 20,1$ cm ($0,77 \times L_{\text{Elemento Cúbico}}$);
- Os elementos cúbicos tendem a mover-se em conjunto;
- A camada de coroamento no intradorso entra em colapso precocemente.

Série 2

- Coeficiente de transmissão global, $K_t = 80\%$;
- A estrutura mantém-se funcional para $\bar{H}_{1/10} = 24,1$ cm ($0,93 \times L_{\text{Elemento Cúbico}}$);
- Os elementos cúbicos tendem a mover-se em separado;
- A camada de coroamento no intradorso entra em colapso precocemente.

Série 3

- Coeficiente de transmissão global, $K_t = 81\%$;
- A estrutura mantém-se funcional para $\bar{H}_{1/10} = 21,3$ cm ($0,82 \times L_{\text{Elemento Cúbico}}$);
- Os elementos cúbicos tendem a mover-se em separado;
- A camada de coroamento afunda-se devido a movimentos da camada inferior.

Série 4

- Coeficiente de transmissão global, $K_t = 65\%$;
- A estrutura mantém-se funcional para $\bar{H}_{1/10} = 18,3$ cm ($0,70 \times L_{\text{Elemento Cúbico}}$);
- Os elementos cúbicos tendem a mover-se em separado;
- A camada de coroamento afunda-se devido a movimentos da camada inferior.

7. Principais Conclusões

As principais conclusões retiradas dos ensaios descritos neste artigo são as seguintes:

- Os elementos cúbicos são substancialmente mais estáveis quando se encontram afastados uns dos outros;
- O quebramar destacado é claramente mais eficaz a dissipar a energia incidente quando se encontra parcialmente emerso;
- Para as condições testadas, os elementos cúbicos são estáveis, no mínimo, para alturas de ondas aproximadamente iguais a 18,3 cm (70% da altura dos elementos cúbicos);
- Os elementos cúbicos comportaram-se como blocos coesos (a rede teve um excelente desempenho na confinção dos seus componentes).

Os ensaios descritos neste trabalho correspondem a ensaios exploratórios, na medida em que permitiram testar um novo conceito estrutural e, em simultâneo, forneceram um conjunto de fundamentos empíricos que contribuíram para a definição de uma estrutura de defesa costeira destacada (não descrita neste artigo) presentemente a ser alvo de investigação.

Agradecimentos

Agradece-se à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), pelo apoio financeiro no âmbito da bolsa individual de doutoramento SFRH/BD/76423/2011.

Referências

- Oumeraci e Recio (2010). Handbook of Coastal and Ocean Engineering - Chapter 21 Geotextile Sand Containers for Shore Protection, World Scientific, Singapura, p. 554, ISBN-13 978-981-281-929-1.
- van der Meer (1988), Rock Slopes and Gravel Beaches Under Wave Attack, Dissertação de Doutoramento, Delft University of Technology, Países Baixos.