

ESTUDO EXPERIMENTAL DAS EROSÕES LOCALIZADAS JUNTO A GEOSISTEMAS DE CONFINAMENTO DE AREIAS

Experimental Study on Scour Development Around Sand-Filled Geosystems

LUCIANA DAS NEVES ⁽¹⁾, MARIA DE LURDES-LOPES ⁽²⁾,
FERNANDO VELOSO-GOMES ⁽³⁾ e FRANCISCO TAVEIRA-PINTO ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Dr-Eng., FEUP
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, lpneves@fe.up.pt

⁽²⁾ Professora Catedrática, FEUP
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, lcosta@fe.up.pt

⁽³⁾ Professor Catedrático, FEUP
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, vgommes@fe.up.pt

⁽⁴⁾ Professor Catedrático, FEUP
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, fpinto@fe.up.pt

Resumo

O colapso de estruturas de proteção costeira devido a erosões localizadas é um problema de reconhecida importância (Wallis *et al.*, 2009). Dependendo da sua extensão, essas erosões podem levar a uma degradação generalizada do leito de fundação ou ao aparecimento de cavidades (CIRIA *et al.*, 2007). Num trabalho experimental realizado no laboratório de hidráulica da SHRHA-DEC-FEUP, com o objetivo de estudar a estabilidade de geossistemas sob a ação da agitação marítima, com ênfase nas erosões localizadas e no abaixamento do nível da praia, foram ensaiadas, em modelo físico de fundos móveis à escala 1:12, estruturas passivas e ativas de defesa costeira constituídas por geossistemas cheios com areia. Ao longo deste artigo, são apresentados e discutidos alguns dos resultados obtidos, dando destaque aos aspetos relacionados com a resposta do perfil transversal da praia à presença dos cinco modelos testados: três sistemas de controlo de erosão dunar (estruturas passivas de defesa), com duas configurações; um recife artificial submerso (estruturas ativas de defesa) com quatro configurações e um sistema de duna-praia não protegido que serviu como referência.

Palavras-chave: Geotêxteis, estruturas de defesa costeira, estabilidade, modelação física, abaixamento do nível da praia.

Abstract

The failure of structures due to scour is a recognized problem (Wallis *et al.*, 2009). Depending on the spatial extent, scour may lead to an overall degradation of the bed or to local scour holes (CIRIA *et al.*, 2007). In an experimental work conducted at the hydraulics laboratory of the SHRHA-DEC-FEUP, aiming at studying the stability of geosystems under wave loading with emphasis on scour and more widespread beach lowering, active and passive coastal defence structures made from sand-filled geosystems were tested in movable-bed model scaling 1:12.

Throughout the paper, some selected results are presented and discussed, focusing on aspects related to the response of the cross-shore beach-profile to the presence of the five models tested: three systems of dune erosion control structures (passive structures) with two configurations; an artificial submerged reef (active structure) with four configurations; and one non-protected beach and dune system as reference.

Keywords: Geotextiles, coastal defence structures, stability, physical modeling, beach lowering.

1. Introdução

A utilização de sistemas de confinamento de areias com geotêxteis em obras de defesa costeira tem um carácter accidental, estando a sua aplicação essencialmente associada a obras temporárias ou de emergência. Este facto explica-se pela ausência de métodos de dimensionamento adequados (Recio, 2007) e pela incerteza respeitante à durabilidade e ao comportamento a longo prazo dos materiais (Pilarczyk, 2000), especialmente em áreas mais expostas à agitação marítima com características de elevada energia, como é o caso português.

Em anos recentes foi realizada investigação laboratorial importante, designadamente no Leichtweiß Institute na Alemanha (Oumeraci e Recio, 2009; Recio, 2007; Oumeraci *et al.*, 2002) e no Deltares na Holanda (van Steeg e Vastenburt, 2010; e van Steeg e Breteler, 2008), que permitiu um melhor conhecimento sobre a estabilidade de geossistemas sob a ação da agitação marítima. No entanto, tanto quanto é possível conhecer, nenhum estudo abordou especificamente as questões do desenvolvimento de cavidades de erosão e do abaixamento generalizado da cota da praia junto de sistemas de confinamento de areias constituídos por geotêxteis.

O programa de investigação em que este artigo se enquadra, foca essas questões para analisar a eficiência de vários geossistemas de confinamento de areias na manutenção de uma praia e na proteção da costa. A análise das variações morfodinâmicas, por ação da agitação marítima, baseia-se em resultados obtidos num trabalho experimental realizado em modelo físico de fundos móveis que teve como protótipo as praias da Estela e da Leirosa localizadas na costa noroeste portuguesa, respetivamente, nos concelhos de Póvoa do Varzim e Figueira da Foz.

2. Instalação Experimental

Os ensaios foram realizados no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (SHRHA-DEC-FEUP), que tem 28 m de comprimento por 12 m de largura e está equipado com um sistema de geração multidirecional de 16 pás, mas foi seccionado num canal de ondas com 2,25 m de largura (equivalente à largura de 3 pás).

As condições hidrodinâmicas no modelo de fundos móveis geometricamente não-distorcido foram determinadas de acordo com as relações de semelhança de Froude. Ondas irregulares com diferentes alturas de onda significativas e períodos de pico (espectro de JONSWAP, $\gamma=3,3$) foram geradas numa profundidade constante e igual a 0,58 m (nível médio no protótipo).

A elevação da superfície livre foi registada entre o início do talude da praia e o sistema de geração por um conjunto de quatro sondas de níveis hidrodinâmicos com 600 mm. Um conjunto de sensores miniatura de pressão (9 mm de diâmetro) foi instalado ao longo da praia para estudar a propagação das ondas, no sistema de controlo de erosão para estudar as pressões induzidas pela agitação sobre o talude e a dissipação para o interior e no recife artificial submerso para estudar a propagação e dissipação de energia sobre a estrutura.

O perfil transversal da praia foi registado antes e depois de cada segmento de ondas utilizando um perfilador de fundos 2D modelo HR Wallingford, numa secção intermédia. A origem do sistema de coordenadas (x,y) foi considerada na intersecção do plano de água com a praia, sendo positivas no sentido da praia emersa. A medição do perfil na zona intermédia do canal de ondas permitiu limitar o efeito das fronteiras verticais. Foi colocada uma quadrícula de 10 cm nos vidros laterais do tanque que permitiu a observação visual das mudanças do perfil durante os ensaios e que serviu como referência na visualização das gravações em vídeo dos testes.

Foram registadas séries temporais de elevação da superfície livre e de pressões e perfis transversais de mais de 150 ensaios em modelo de fundos móveis, para diferentes modelos e diferentes condições de agitação.

Mais detalhes sobre a instalação experimental, nomeadamente sobre a escolha da escala do modelo e sobre os equipamentos de medição utilizados no estudo experimental, podem ser encontrados em das Neves (2011).

3. Condições de Teste

A agitação incidente foi escolhida a partir da análise estatística dos dados registados pela boia ondógrafo de Leixões entre 1981 e 2003, feita por Coelho (2005).

No Quadro I são apresentadas as diferentes condições de teste no modelo físico, designadamente a condição inicial, o balanço sedimentar, a denominação do estado de agitação e os dados de altura significativa e período de pico no protótipo e no modelo.

Em média, cada segmento de geração num teste com duração de 30 min, era constituído por cerca de 1200 ondas.

Conforme é possível verificar no Quadro I, havia duas condições iniciais para o perfil transversal da praia frontal, perfil plano com um talude de 3:20 e perfil modificado após um segmento de cerca de 1200 ondas (30 min de ensaio).

Quadro I. Condições de teste.

Condição Inicial	Balanço Sedimentar	Denominação	Protótipo		Modelo	
			H _s [m]	T _p [s]	H _s [m]	T _p [s]
Perfil de Praia Plano (talude 3:20)	Acreção	Sea-State 1	0,5	6	0,040	1,73
		Sea-State 2	0,5	8	0,040	2,31
		Sea-State 3	0,5	10	0,040	2,89
		Sea-State 4	1,0	6	0,080	1,73
		Sea-State 5	1,0	8	0,080	2,31
	Erosão	Sea-State 6	1,0	10	0,080	2,89
		Sea-State 7	2,0	8	0,167	2,31
		Sea-State 8	2,0	10	0,167	2,89
		Sea-State 9	2,0	12	0,167	3,46
		Sea-State 10	1,5	10	0,125	2,89
Perfil Transversal modificado pela agitação	Acreção seguida de Erosão	Sea-State 8	2,0	10	0,167	2,89
		Sea-State 3	0,5	10	0,040	2,89
Erosão Persistente	Erosão Persistente	Sea-State 10	1,5	10	0,125	2,89

No primeiro conjunto de ensaios, perfil de praia plano, as estruturas passivas e ativas de defesa costeira foram submetidas a condições hidrodinâmicas e morfodinâmicas similares com o objetivo de analisar a eficiência de cada sistema, tanto na proteção da linha de costa, quanto na manutenção da praia. As diferenças na resposta do perfil longitudinal da praia à presença da estrutura foram avaliadas em relação:

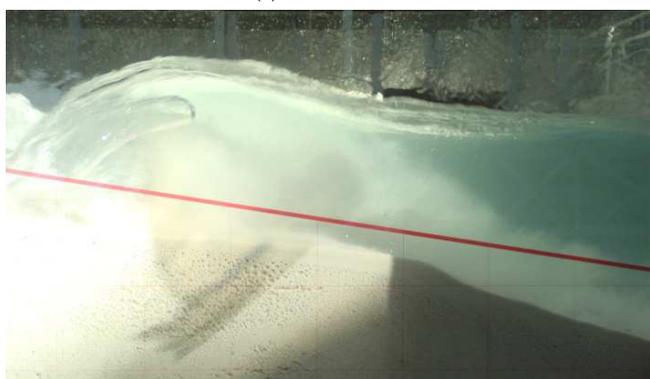
- à reflexão da agitação;
- às variações de pressão devidas à agitação;
- à evolução do perfil da praia.

Nos ensaios com um perfil transversal modificado pela agitação, o objetivo foi tentar saber de que forma o perfil de praia responde sob condições de erosão persistente e a resposta a períodos alternados de erosão e de acreção.

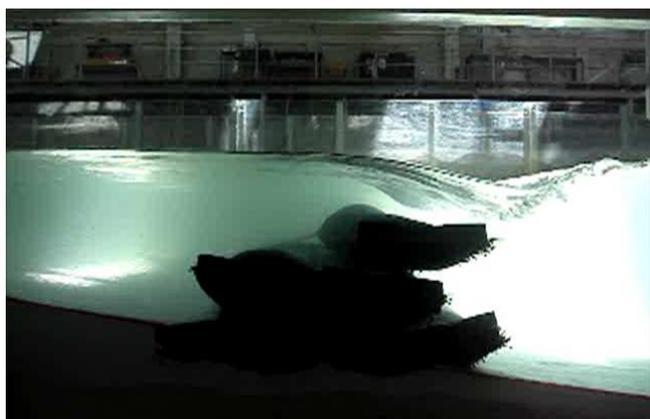
A Figura 1 apresenta aspectos durante a construção e a realização dos ensaios e a Figura 2 é uma representação esquemática dos cinco modelos ensaiados.



(a) Construção



(b) Rebentação no modelo



(c) Instabilidade

Figura 1. Aspectos durante a construção e a realização dos ensaios.

Foram testados três modelos de controlo de erosão dunar: um geossistema constituído por vários sacos de pequenas dimensões (quando cheio, no protótipo, 3,1 m x 1,6 m x 0,3 m, aproximadamente 1,5 m³) – Figura 2, Modelo B; areia envolvida em telas de geotêxtil – Figura 2, Modelo C; e tubos de geotêxtil (diâmetros teóricos de 1,6 e 5 m no protótipo) – Figura 2, Modelo D.

As duas variantes para cada modelo, configurações 1 e 2, diferiam entre si na posição da fundação da estrutura, a qual estava ao nível 0,00 m (ZH) para a configuração 1 e a +2,00 m (ZH) para a segunda configuração. Todos os modelos tinham a cota de coroamento à +7,00 m (ZH) e foram construídos com uma inclinação de talude de 1:1.

Foram ensaiadas quatro configurações de recife artificial submerso, Modelo E, com a mesma submergência (0,165 m) e distâncias à linha de costa diversas, por conseguinte, o número, dimensão e arranjo dos tubos era também diverso.

Foi ainda ensaiado um sistema de duna-praia não protegido, Modelo A, que serviu como caso de referência. A face exposta da duna tinha uma inclinação de 45° e a cota de coroamento igual a +7,00 m (ZH).

4. Resultados Experimentais

Os resultados das variações morfológicas do perfil de praia sob agitação irregular, obtidos a partir do trabalho experimental, foram avaliados individualmente em relação ao caso de referência (Modelo A) e em conjunto de acordo com a condição inicial do perfil, plano ou modificado e o balanço sedimentar.

Os objetivos gerais dessa avaliação foram:

- compreender o abaixamento da praia frontal às estruturas de defesa costeira construídas com sistemas de confinamento de areia incorporando geotêxteis;
- examinar os mecanismos que produzem erosões localizadas;
- examinar as características do perfil de equilíbrio e das formas de fundo.

Para cada série de testes foram ainda determinadas as variações volumétricas, incluindo:

- os volumes de erosão/acreção;
- o avanço/recoo da linha de costa;
- a formação/manutenção das formas de fundo.

As Figuras 3 e 4 mostram exemplos dos perfis de erosão devidos ao estado de agitação designado por “*sea-state 8*” (cf. Quadro I) para, respectivamente, os sistemas passivos de proteção e os sistemas ativos de proteção.

Para as estruturas passivas é possível verificar que a variação do perfil é semelhante: a linha de costa recuou até ao limite do alinhamento fixado pela estrutura e desenvolveu-se uma barra submersa.

Os volumes de erosão e acreção são semelhantes, indicando que a areia foi transportada da praia emersa para a praia submersa embora, em alguns casos, essa areia tenha sido transportada mais para *offshore* (por exemplo, nos casos em que a praia foi submetida a condições de erosão persistente).

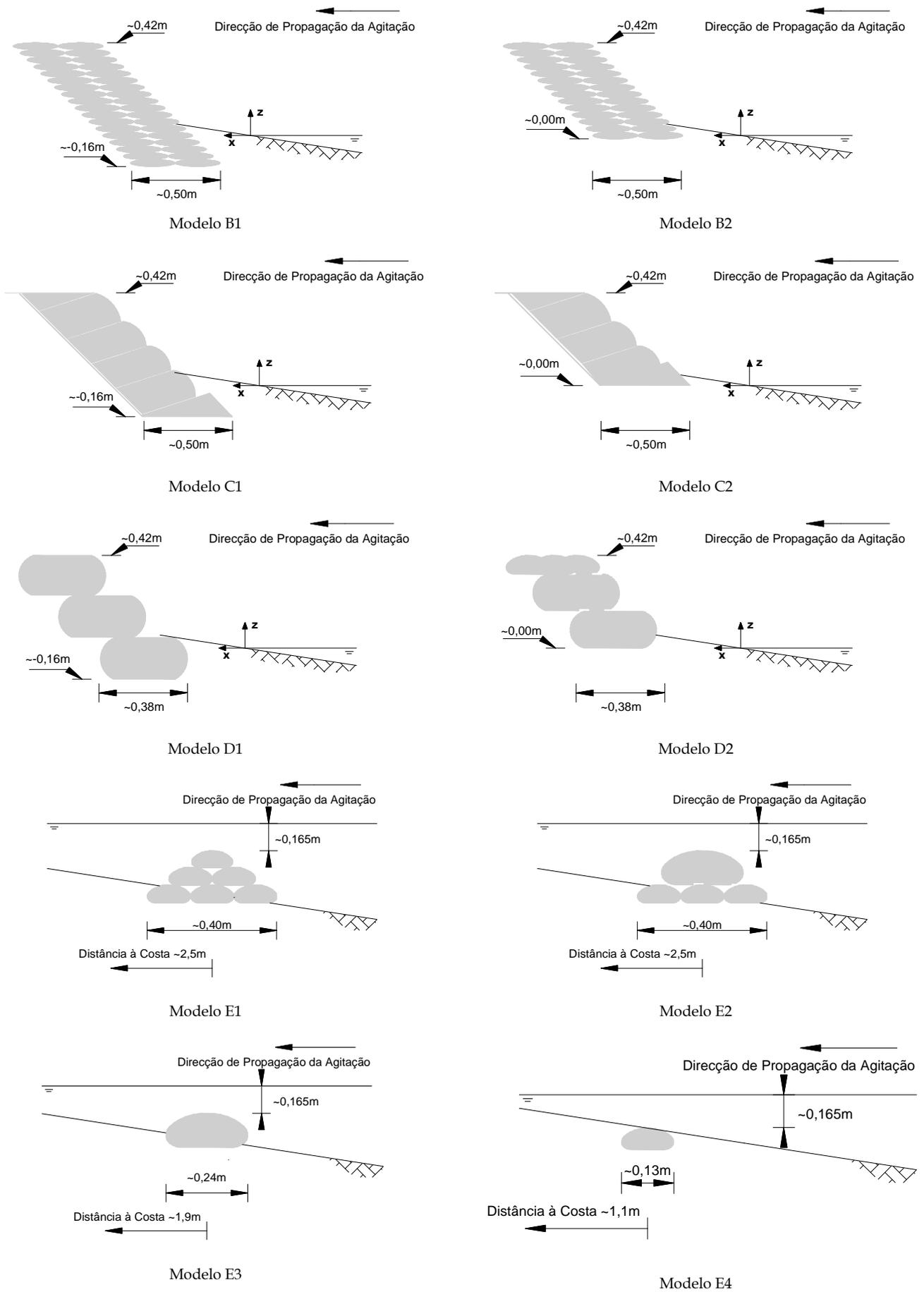


Figura 2. Representação esquemática dos modelos ensaiados.

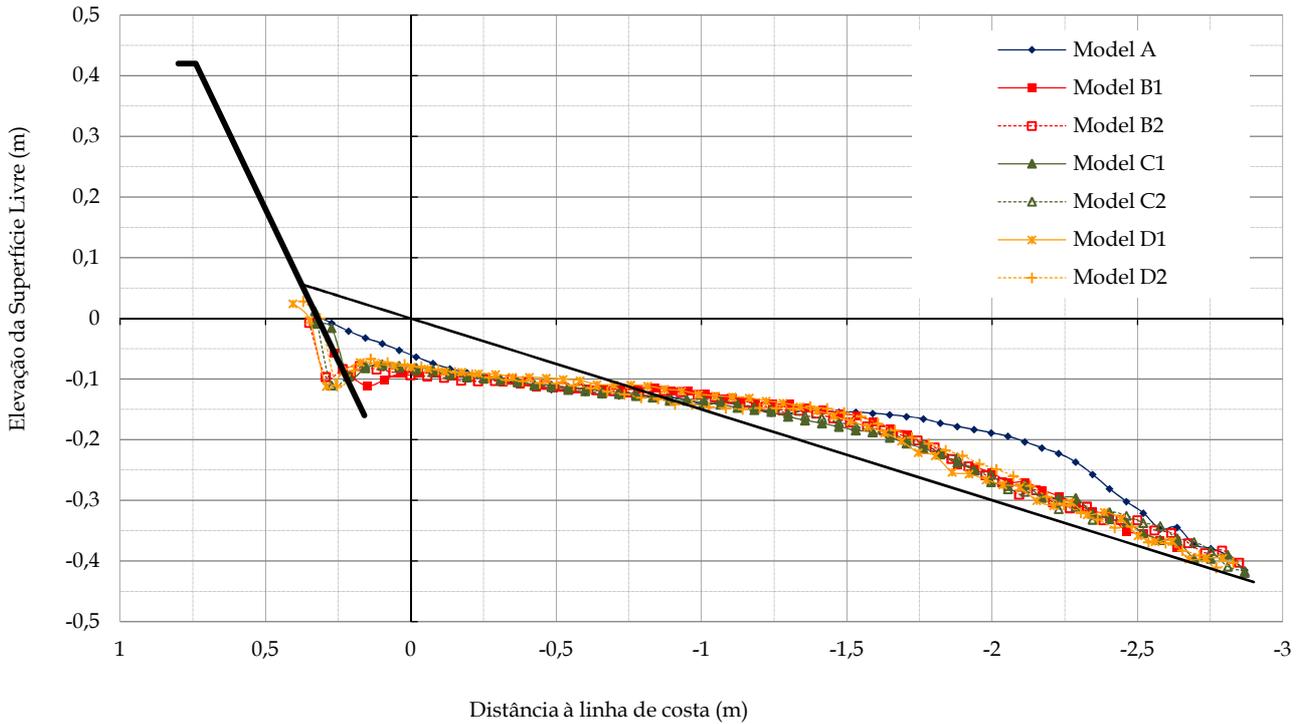


Figura 3. Comparação dos perfis inicial e finais para o *sea-state* 8 ($H_s=2,0m$, $T_p=10s$, no protótipo).

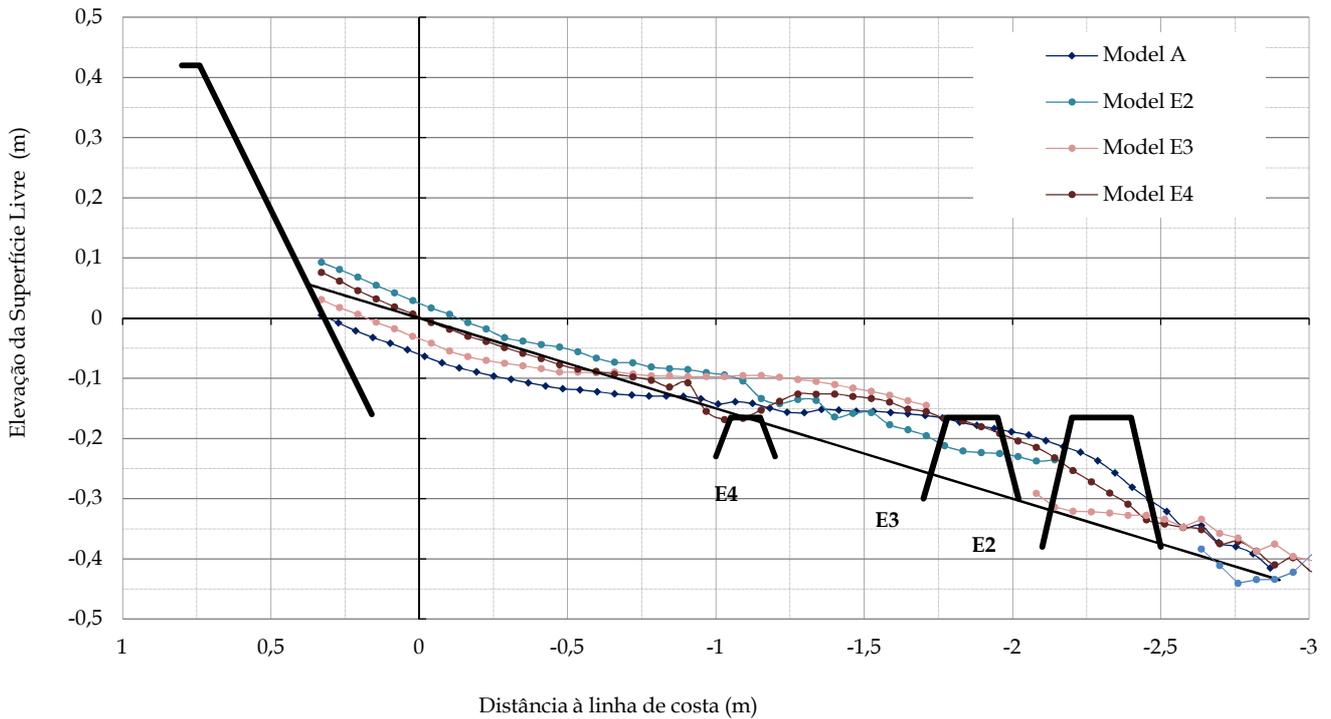


Figura 4. Comparação dos perfis inicial e finais para o *sea-state* 8 ($H_s=2,0m$, $T_p=10s$, no protótipo).

A acumulação de areia na barra submersa é, no caso do Modelo A e em comparação com os outros casos em análise, maior (especialmente para os testes com características mais energéticas), enquanto o recuo da linha de costa é muito menor. Essa variação morfológica embora esperada, uma vez que há uma alimentação com areias provenientes da erosão da duna, não deixa de ser interessante quando comparada com os restantes modelos pois é significativamente superior no Modelo A.

Este resultado corrobora uma aproximação sugerida por Dean (USACE, 2008), a qual refere que o volume retido pela estrutura é maior ou igual ao volume de erosão, se essa não fosse colocada.

A distância à linha de costa da barra submersa é semelhante para as diferentes configurações mas geralmente superior para as configurações com o pé de talude à cota +2,00 m (ZH), isto é, para as configurações designadas por 2.

Da análise da Figura 3 é ainda de concluir que houve um abaixamento generalizado dos níveis da praia em todos os modelos.

O exemplo da Figura 4 mostra que no modelo E2 e E4 as principais alterações morfológicas ocorrem na parte submersa da praia, enquanto na praia emersa o perfil final varia apenas ligeiramente em comparação com o perfil inicial. A figura mostra também que há um avanço moderado da linha de costa nos testes com o Modelo E2, praticamente nenhuma variação nos testes com o Modelo E4 e um recuo generalizado nos testes com o E3. Para todas as variantes do Modelo E existe uma deposição significativa a sotamar da estrutura.

Relativamente à evolução do perfil transversal de praia com os estados de agitação, das Neves (2011) conclui ainda que:

- a variação do perfil transversal nos ensaios sob condições de erosão persistente demonstrou que, para os sucessivos grupos de onda, há, numa primeira fase, a formação de uma barra submersa com abaixamento do nível da praia a qual, em fases posteriores, se vai estendendo em direção a *offshore*, começando a desenvolver-se um sistema de barra dupla que provoca uma migração sucessiva da barra submersa e um novo abaixamento do perfil da praia emersa;
- os testes com balanço sedimentar de acreção, tendo como morfologia antecedente um perfil dissipativo de erosão, demonstraram que a agitação nem sempre tem capacidade de transportar os sedimentos removidos de volta à praia emersa e que, além disso, os fluxos sedimentares de recuperação são muito mais lentos;
- no protótipo, a influência da morfologia antecedente e a resposta mais lenta pode ter como consequência a perda de sedimentos para o mar, nomeadamente por serem levados pela corrente de deriva litoral.

No que diz respeito às erosões localizadas junto aos sistemas de confinamento de areias, das Neves (2011) avaliou os resultados experimentais obtidos com os seguintes objetivos principais:

- examinar os mecanismos que produzem as cavidades de erosão;
- determinar a dependência entre o desenvolvimento de cavidades de erosão e os diferentes parâmetros adimensionais sugeridos na bibliografia (Sumer e Fredsøe, 2002).

Para os testes com condições de acreção seguido de erosão e de erosão persistente, a profundidade máxima de erosão foi avaliada também em termos da escala de tempo. Em todos os testes foi determinada a extensão das erosões.

A Figura 5 mostra a profundidade da cavidade de erosão, S_d , em função das características da agitação incidente, altura de onda significativa e comprimento de onda ao largo. Conforme é possível verificar da análise da Figura 5, a profundidade da cavidade de erosão é inferior à altura de onda significativa incidente, apoiando assim um princípio muito utilizado que refere que a máxima profundidade é menor ou igual a essa altura. É ainda possível verificar que a máxima profundidade foi aproximadamente de 80% e de 30% a altura de onda incidente, respetivamente para, os sistemas ativos e passivos de proteção costeira.

De entre as estruturas ativas, as maiores profundidades de erosão ocorreram no Modelo E4 previsivelmente devido à ocorrência de rebentação, Figura 6.

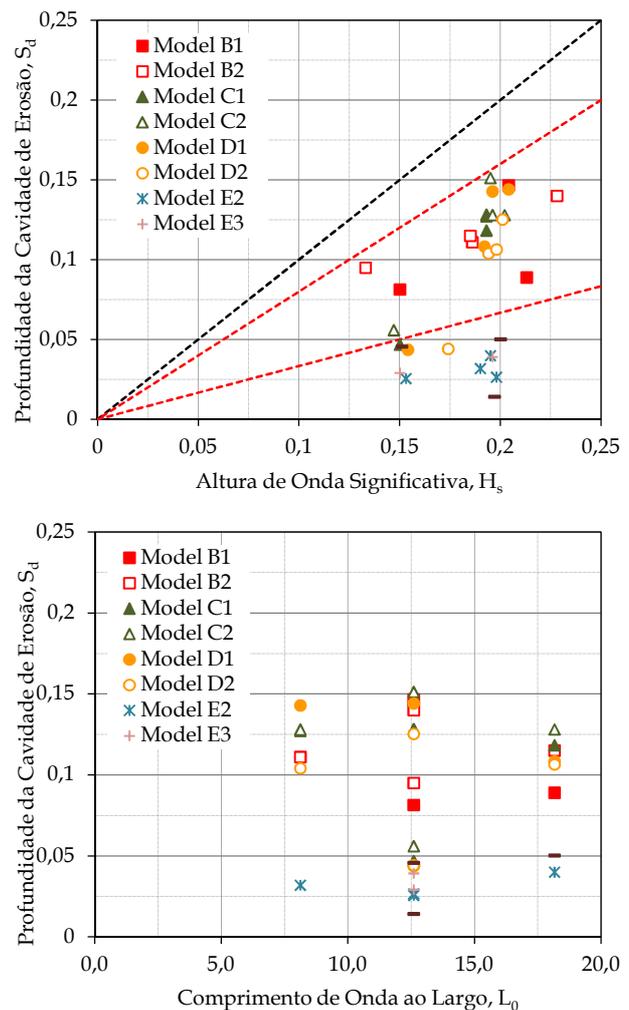


Figura 5. Profundidade da cavidade de erosão em função da altura de onda significativa (painel superior) e do comprimento de onda (painel inferior).

Globalmente os resultados indicaram que, para os estados de agitação mais energéticos e para as estruturas passivas (Modelos B, C e D), a profundidade relativa de erosão aumentou com a declividade da onda, mas diminuiu com o aumento da profundidade da água na estrutura (ou seja, no Modelo E); também indicam que para os Modelos B, C e D ela geralmente aumenta com o número de Irribarren.

A variação da profundidade relativa de erosão é, geralmente, de aumento com a diminuição do quociente entre a profundidade da água na estrutura e o comprimento de onda ao largo; enquanto diminui com o quociente entre a distância da estrutura à linha de costa e o comprimento de onda ao largo. Em relação à variação com o coeficiente de reflexão, os resultados experimentais indicam que, em geral, ela diminuiu com o aumento da reflexão para as estruturas passivas, sendo, nestes casos, maior para os estados de mar mais energéticos (ou seja, é menor para o estado de agitação 10 do que para os 7, 8 e 9, cf. Quadro I). Para as estruturas ativas, ela aumentou com esse parâmetro, sendo que diminuiu com o aumento da profundidade de água na estrutura (ou seja, a cavidade de erosão é maior para o Modelo E4).

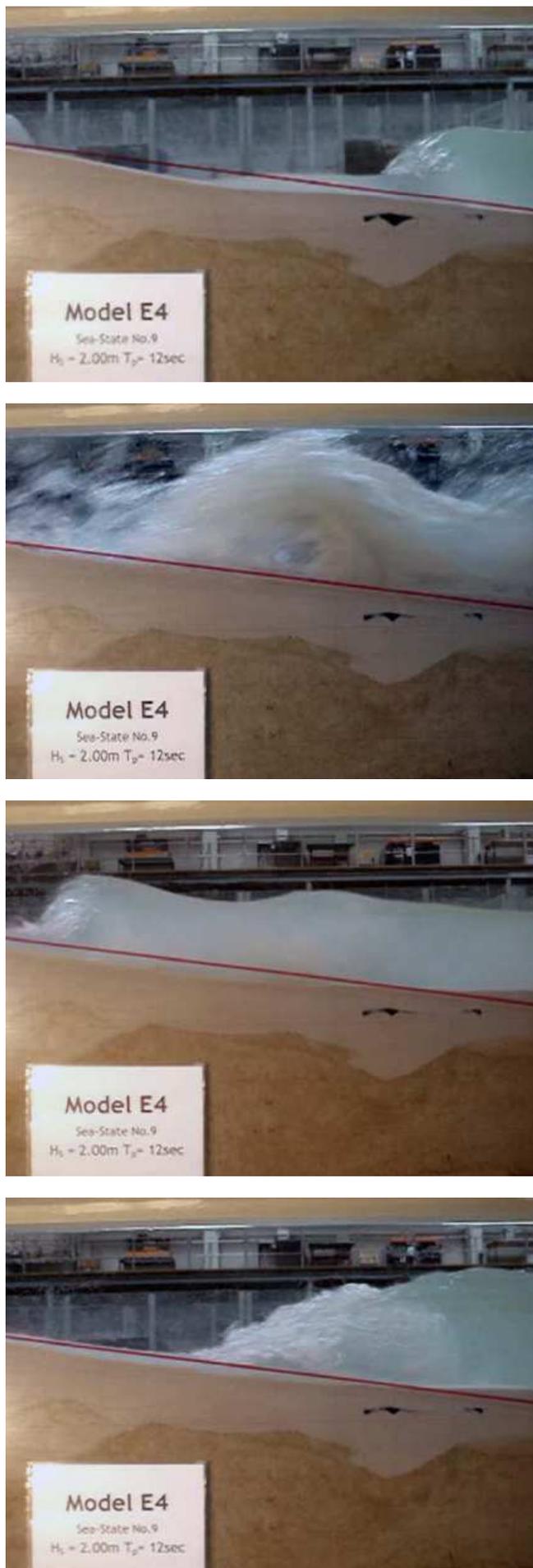


Figura 6. Comportamento do Modelo E4 durante os ensaios.

5. Conclusões

Para as mesmas condições de agitação foi observado um abaixamento do nível da praia frente aos sistemas passivos de defesa costeira (Figura 2, Modelos B, C e D), com recuo da linha de costa até ao alinhamento estabelecido e idêntica variação do perfil de praia. Este perfil respondeu à alteração das condições de agitação, de erosão para acreção, mas a recuperação ocorreu a um ritmo mais lento. Os resultados mostraram que a remoção de sedimentos da praia era controlada pela posição e elevação da barra submersa. As estruturas destacadas submersas (Figura 2, Modelo E) foram eficientes na proteção da linha de costa e na manutenção da praia. Essa eficiência resultou da diminuição dos movimentos transversais de sedimentos e também da sua retenção na praia superior.

Os resultados das medições em laboratório indicam ainda que a máxima profundidade de erosão localizada diminuiu com o aumento da profundidade da água na estrutura e aumentou com a rebentação perto do pé da estrutura. Os resultados sugerem que essa profundidade é dominada pela reflexão da agitação na estrutura e pelo refluxo no talude exposto, o qual pode ser influenciado pela cota da praia e da água durante o período de maior energia.

Agradecimentos

Esta investigação foi financiada pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através do programa POCI/FEDER (referência do projecto: POCI/ECM/60807/2004).

Luciana das Neves recebeu uma bolsa de doutoramento da Fundação para a Ciência e Tecnologia (referência da bolsa: SFRH/BD/22626/2005).

Referências

- CIRIA; CUR; e CETMEF. (2007). *The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering*, C863, London, 1268pp., ISBN 978-0-86017-683-1.
- Coelho, Carlos (2005). *Riscos de exposição de frentes urbanas para diferentes intervenções de defesa costeira*, Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 404pp.
- das Neves, L. (2011). *Experimental stability analysis of geotextile encapsulated-sand systems under wave-loading*, 289p, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, FEUP.
- Oumeraci, H.; e Recio, J. (2009). *Geotextile sand containers for shore protection*, Invited Chapter in *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. In Y.C. Kim (Ed.), *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, pp. 553-600, Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., ISBN 13-978-981-281-929-1.
- Oumeraci, H.; Hinz, M.; Bleck, M.; e Kübler, S. (2002). *Großmaßstäbliche Untersuchungen zur hydraulischen Stabilität geotextiler Sandcontainer unter Wellenbelastung*, Leichtweiß Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources, Research Report No. 878, unpublished (em Alemão).

- Pilarczyk, K. (2000). *Geosynthetics and geosystems in hydraulics and coastal engineering*, 913pp., Rotterdam: A.A. Balkema Publications, ISBN 90-5809-302-6.
- Recio, J. (2007). *Hydraulic stability of geotextile sand containers for coastal structures - effect of deformations and stability formulae*, Tese de Doutorado, Leichtweiß Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources, Alemanha.
- Sumer, B.M.; e FredsØe, J. (2002). *The mechanics of scour in the marine environment*, Advanced Series on Ocean Engineering - Volume 17, Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 536 pp., ISBN 981-02-4930-6.
- USACE. (2008). *Coastal Engineering Manual, Engineer Manual 1110-2-1100*, US Army Corps of Engineers, CHL-ERDC, WES, Vicksburg, MS.
- van Steeg, P.; e Breteler, K. (2008). *Large scale physical model tests on the stability of geocontainers*, DELTARES, Holanda.
- van Steeg, P.; e Vastenburg, E. (2010). *Large scale physical model tests on the stability of geotextile tubes*, DELTARES, Holanda.
- Wallis, M.; Whitehouse, R.; e Lyness, N. (2009). *Development of guidance for the management of the toe of coastal defence structures*, HRPP 413 HR Wallingford, 14pp.