

ESTUDO EXPERIMENTAL DAS EROSÕES LOCALIZADAS JUNTO DE SISTEMAS DE DEFESA COSTEIRA CONSTITUÍDOS POR GEOSSISTEMAS CHEIOS COM AREIA

Luciana das Neves⁽¹⁾, Maria de Lurdes Lopes⁽²⁾, Fernando Veloso-Gomes⁽³⁾
e Francisco Taveira-Pinto⁽⁴⁾

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil,
lpneves@fe.up.pt⁽¹⁾; lcosta@fe.up.pt⁽²⁾; vgomes@fe.up.pt⁽³⁾; fpinto@fe.up.pt⁽⁴⁾

Resumo

O colapso de estruturas de protecção 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 objectivo de estudar a estabilidade de geossistemas sob a acção 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 activas de defesa costeira constituídas por geossistemas cheios com areia.

Ao longo deste artigo, são apresentados e discutidos alguns dos resultados obtidos, dando destaque aos aspectos 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 activas de defesa) com quatro configurações; e um sistema de duna-praia não protegido que serviu como referência.

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 (ver, por exemplo, 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 (ver, por exemplo, Oumeraci e Recio, 2009; Recio, 2007; Oumeraci *et al.*, 2002) e no Deltares na Holanda (van Steeg e Vastenburger, 2010; e van Steeg e Breteler, 2008), que permitiu um melhor conhecimento sobre a estabilidade de geossistemas sob a acção 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 protecção da costa. A análise das variações morfodinâmicas, por acção 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, respectivamente, nos concelhos de Póvoa do Varzim e Figueira da Foz.

Foram testados cinco modelos, correspondendo a três sistemas de controlo de erosão dunar, com duas configurações, um recife artificial submerso com quatro configurações e um sistema de duna-praia não protegido que serviu como referência. Os modelos foram submetidos a um total de dez estados de agitação distintos.

2. Instalação Experimental

Os ensaios foram realizados numa partição do 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). Esse tanque de ondas tem 28m de comprimento por 12m de largura e está equipado com um sistema de geração multidireccional 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 0.58m (nível médio no protótipo). O modelo do sistema duna-praia estava localizado a 9.7m do sistema de geração.

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 600mm. Um conjunto de sensores miniatura de pressão (9mm 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 (Figura 1).



Figura 1. Sensores miniatura de pressão e construção do modelo.

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 (Figura 2). 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 10cm 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).



Figura 2. Perfilador de fundos 2D utilizado.

3. Condições de Teste

A agitação incidente foi escolhida a partir da análise estatística dos dados registados pela bóia ondógrafo de Leixões entre 1981 e 2003, feita por Coelho (2005). A partir deste estudo é possível saber que as alturas de onda significativas mais frequentes variam entre 0,5 e 2,5m (aproximadamente 72% dos casos) e que a altura máxima registada foi de 9m (não significando que não ocorreram ondas de altura superior). As ondas com altura significativa superior a 2,5m correspondem a aproximadamente 27% dos registos, dos quais não mais de 11% acima dos 5,5m. Apenas 1% dos registos correspondem a ondas inferiores a 0,5m. Os períodos de pico mais frequentes variam entre 7 e 11s, sendo 4 e 17s o mínimo e máximo períodos de pico observados, respectivamente. Para além desta análise estatística, foram considerados os critérios limite de rebentação e capacidade e desempenho do sistema de geração de ondas, na escolha da gama de alturas de onda e períodos de pico da agitação incidente. Conforme já referido, o modelo foi sujeito apenas a agitação irregular.

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.

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
		Sea-State 6	1,0	10	0,080	2,89
	Erosão	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	Sea-State 10	1,5	10	0,125	2,89

Em média, cada segmento de geração, num teste com duração de 30min, 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 (30min de ensaio). No primeiro conjunto de ensaios, perfil de praia plano, as estruturas passivas e activas de defesa costeira foram submetidas a condições hidrodinâmicas e morfodinâmicas similares com o objectivo de analisar a eficiência de cada sistema, tanto na protecção 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 (i) à reflexão da agitação, (ii) às variações de pressão devidas à agitação, e (iii) à evolução do perfil da praia. Nos ensaios com um perfil transversal modificado pela agitação, o objectivo foi tentar compreender a resposta do perfil de praia sob condições de erosão persistente e a resposta a períodos alternados de erosão e de acreção.

A Figura 3 representa esquematicamente os cinco modelos ensaiados.

Foram testados três modelos de controlo de erosão dunar: um geossistema constituído por vários sacos de pequenas dimensões (quando cheio, no protótipo, 3,1mx1,6mx0,3m, aproximadamente 1,5m³) – Figura 3, Modelo B; areia envolvida em telas de geotêxtil – Figura 3, Modelo C; e tubos de geotêxtil (diâmetros teóricos de 1,6 e 5m no protótipo) – Figura 3, 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 0,00m (ZH) para a configuração 1 e a +2,00m (ZH) para a segunda configuração. Todos os modelos tinham a cota de coroamento à +7,00m (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 (0,165m) 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 +7,00m (ZH).

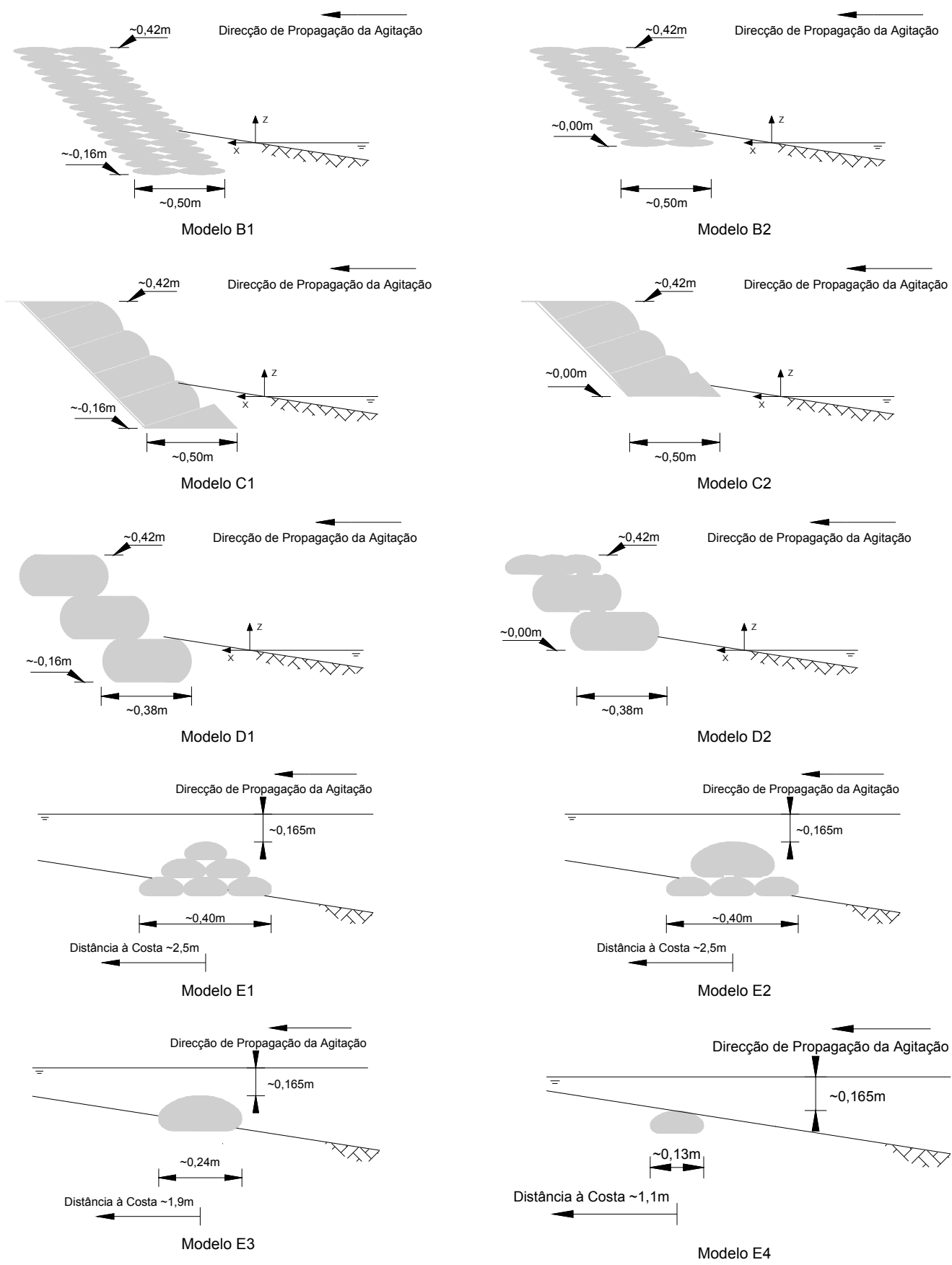


Figura 3. Representação esquemática dos modelos ensaiados.

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 e o balanço sedimentar. Os objetivos dessa avaliação foram (i) compreender o abaixamento da praia frontal às estruturas de defesa costeira construídas com sistemas de confinamento de areia incorporando geotêxteis, (ii) examinar os mecanismos que produzem erosões localizadas e (iii) examinar as características do perfil de equilíbrio e das formas de fundo. Para cada série de testes foram ainda determinadas as variações volumétricas, incluindo (i) os volumes de erosão/acreção, (ii) o avanço/recuo da linha de costa e (iii) a formação/manutenção das formas de fundo.

As Figuras 4 a 7 mostram exemplos dos perfis de erosão para os sistemas passivos de proteção e para o caso de referência, para os estados de agitação 7 a 10 (cf. Quadro I).

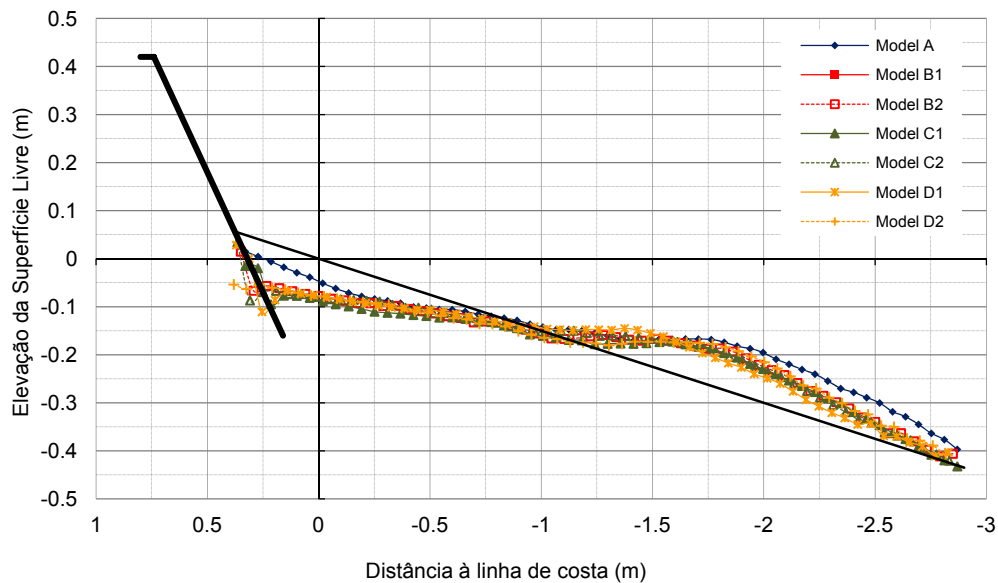


Figura 4. Comparação dos perfis inicial e finais para o sea-state 7 ($H_s=2,0\text{m}$, $T_p=8\text{s}$, no protótipo).

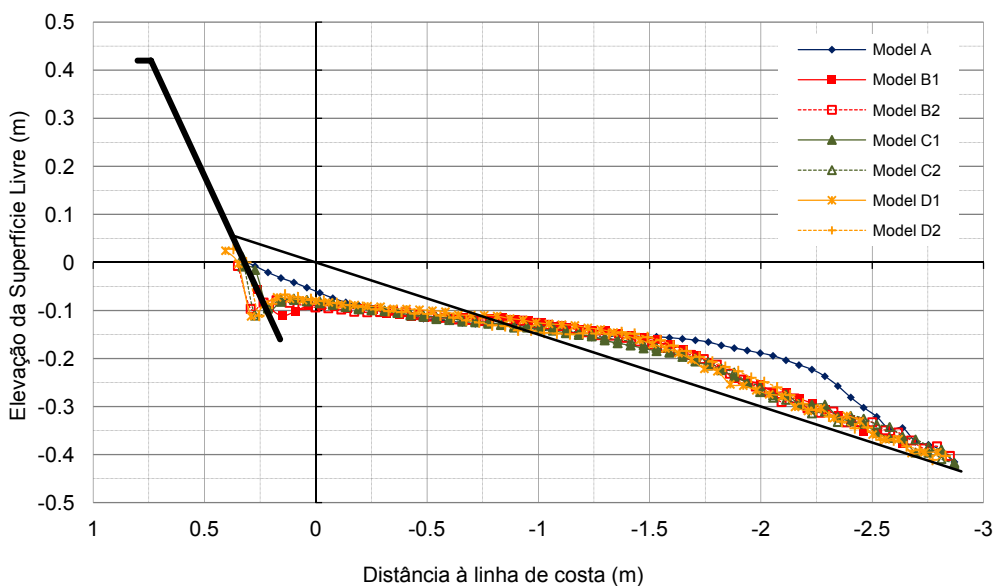


Figura 5. Comparação dos perfis inicial e finais para o sea-state 8 ($H_s=2,0\text{m}$, $T_p=10\text{s}$, no protótipo).

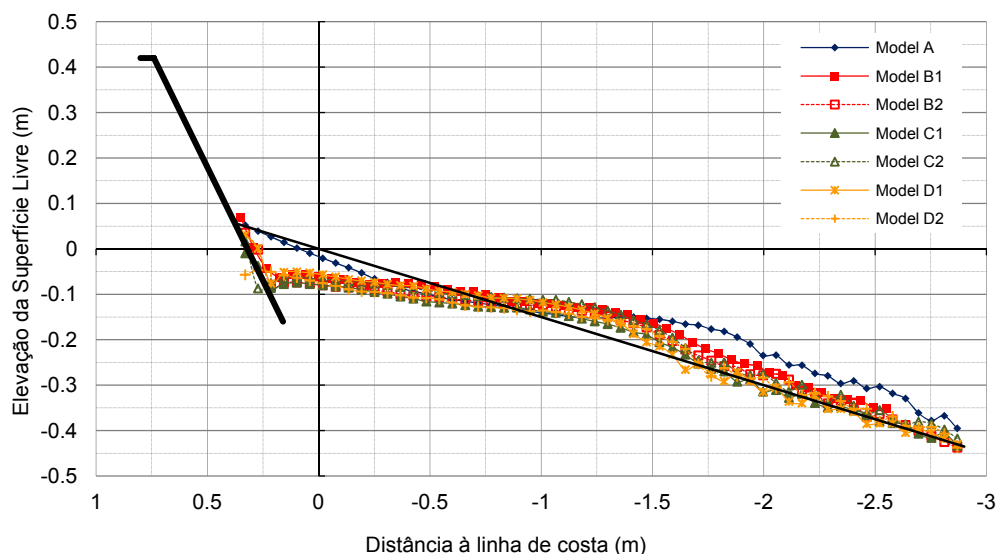


Figura 6. Comparação dos perfis inicial e finais para o sea-state 9 ($H_s=2,0\text{m}$, $T_p=12\text{s}$, no protótipo).

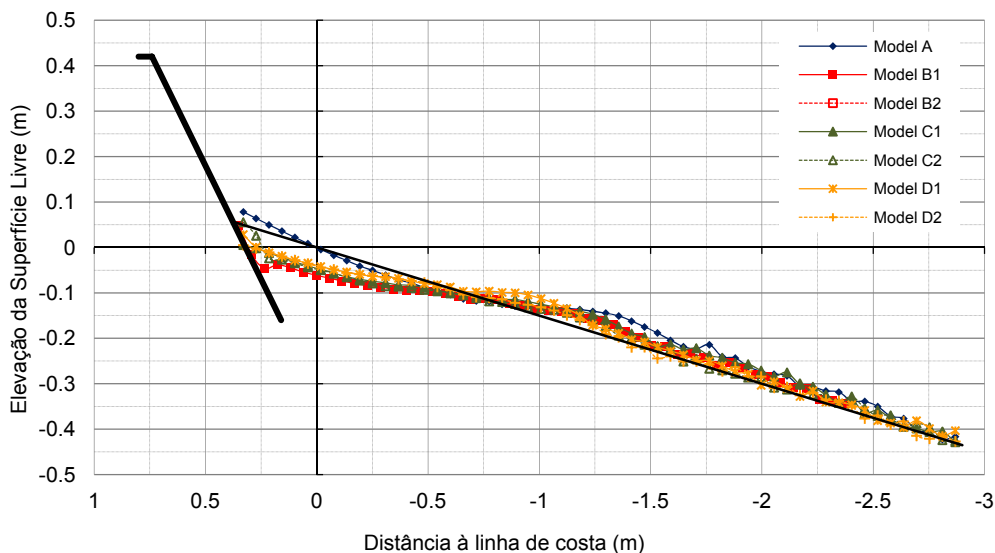


Figura 7. Comparação dos perfis inicial e finais para o sea-state 10 ($H_s=1,5\text{m}$, $T_p=10\text{s}$, no protótipo).

Da análise das figuras anteriores, é possível verificar que, no caso das estruturas passivas de proteção, a variação do perfil de praia é semelhante. A linha de costa recuou até ao limite do alinhamento fixado pela estrutura e desenvolveu-se uma barra submersa. O volume de erosão junto à linha de costa é semelhante ao volume acumulado na barra, 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).

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 +2,00m (ZH), isto é, para as configurações designadas por 2.

Da análise das Figuras 4 a 7 é ainda concluir que houve um abaixamento generalizado dos níveis da praia em todos os ensaios com modelos de sistemas passivos de protecção. A variação do perfil transversal nos ensaios sob condições de erosão persistente (mesmo para alturas de onda constantes) 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 direcção 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 as ondas acrecionárias nem sempre terão 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.

A Figura 8 mostra um exemplo, para o estado de mar 8 (cf. Quadro I), dos perfis de erosão para os sistemas activos de protecção e para o caso de referência.

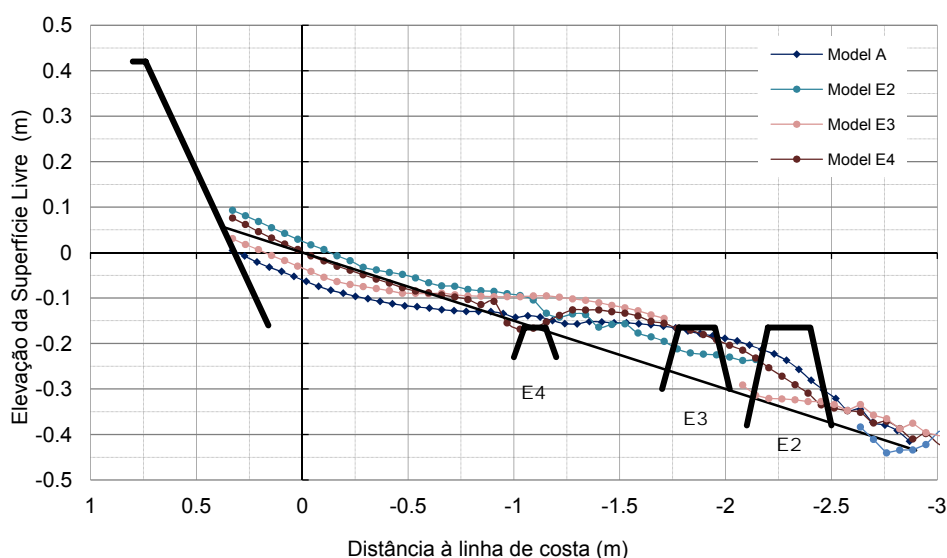


Figura 8. Comparação dos perfis inicial e finais para o sea-state 8 ($H_s=2,0m$, $T_p=10s$, no protótipo).

O exemplo da Figura 8 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.

As erosões localizadas junto aos sistemas de confinamento de areias foram avaliadas através de uma série de testes com os seguintes objectivos principais: (i) examinar os mecanismos que produzem as cavidades de erosão e (ii) 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 9 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.

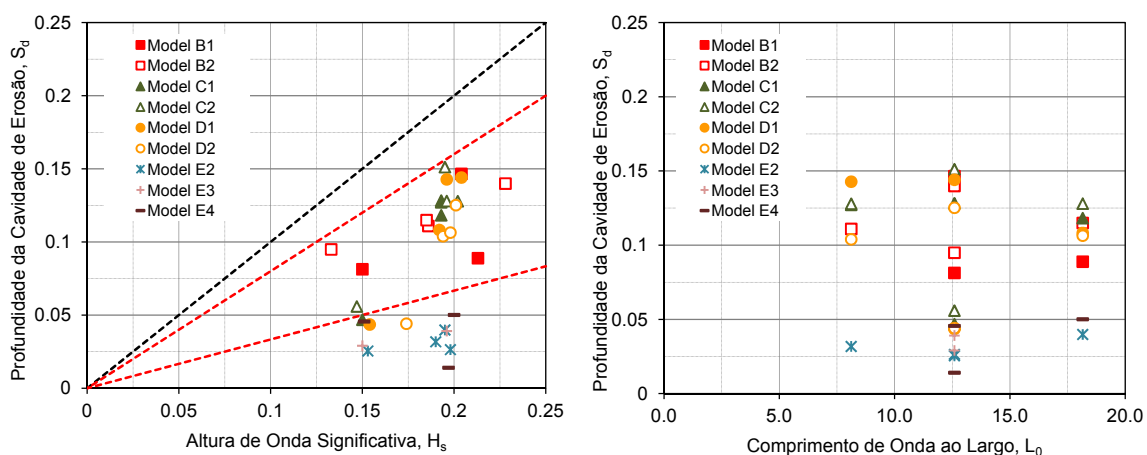


Figura 9. Profundidade da cavidade de erosão em função da altura de onda significativa (lado esquerdo) e do comprimento de onda (lado direito).

Conforme é possível verificar da análise da Figura 9, 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, respectivamente para, os sistemas activos e passivos de protecção costeira. De entre as estruturas activas, as maiores profundidades de erosão ocorreram no Modelo E4 previsivelmente devido à ocorrência de rebentação (Figura 10).



Figura 10. Comportamento do Modelo E4 durante os ensaios.

A Figura 11 apresenta os resultados obtidos para a profundidade relativa da cavidade em função dos seguintes parâmetros adimensionais: declividade (d/L_0), número de Irribarren (ξ), quociente entre a profundidade da água na estrutura e o comprimento de onda ao largo (h_w/L_0), quociente entre a distância da estrutura à linha de costa e o comprimento de onda ao largo (x/L_0), coeficiente de reflexão da onda (K_r) e penetração do jacto no fundo ($T\sqrt{gH_b}/h_w$).

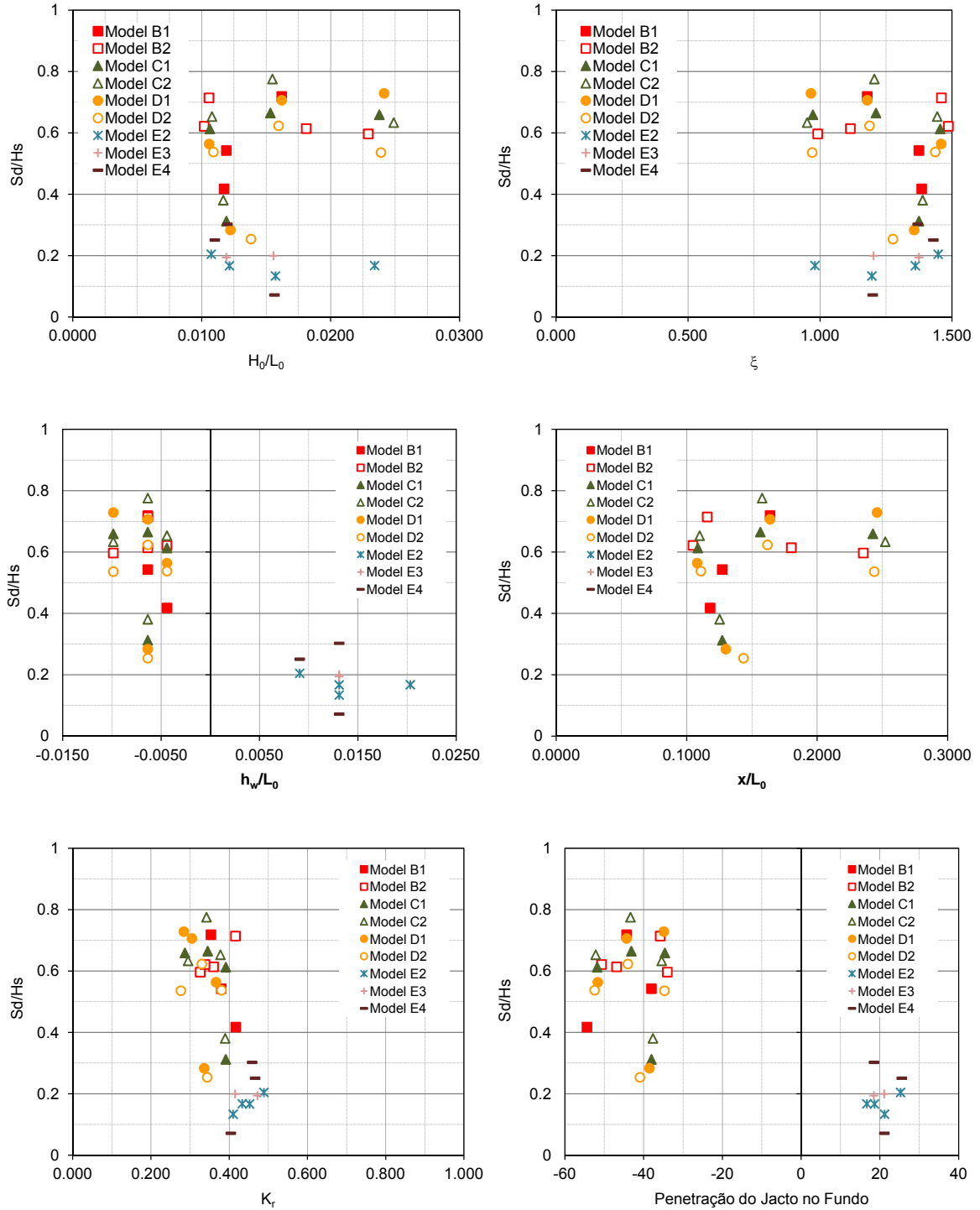


Figura 11. Profundidade relativa da cavidade de erosão em função de vários parâmetros adimensionais.

Apesar de alguma dispersão, os resultados indicam que, globalmente 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 activas, 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).

5. Conclusões

Para as mesmas condições de agitação foi observado um abaixamento do nível da praia frente aos sistemas passivos de defesa costeira (Figura 3, 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 3, Modelo E) foram eficientes na protecção 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).

Bibliografia

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.