

# MODELAÇÃO FÍSICA DO COMPORTAMENTO DE QUEBRAMARES DESTACADOS

## Physical Modelling of the Behaviour of Detached Breakwaters

RUI CHINA PEREIRA <sup>(1)</sup> e FRANCISCO TAVEIRA-PINTO <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Mestre em Engenharia Civil, FEUP  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, ec05177@fe.up.pt

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

### Resumo

A linha de costa portuguesa está frequentemente sujeita a níveis energéticos elevados, resultantes da acção do mar, pelo que a sua protecção assume, no presente e em alguns locais, carácter de urgência. Uma gestão eficiente da zona costeira deve ser assente num conhecimento profundo da realidade, em particular da interação agitação-estrutura, sendo por isso necessário estudar todas as soluções existentes, destacando os seus benefícios e procurando minimizar os efeitos negativos.

Com este trabalho pretendeu-se, através da utilização da modelação física, analisar o comportamento de diferentes configurações de estruturas destacadas paralelas à linha de costa face às condições da costa portuguesa e de que forma podem ser optimizadas, de modo a obter-se um menor número de efeitos negativos. Assim, foram analisadas três diferentes configurações de quebramares destacados com o objetivo de verificar a influência dessas alterações na evolução da linha de costa/praias adjacente. Os ensaios foram realizados considerando situações de agitação marítima mais frequentes para a zona costeira oeste de Portugal mas também situações extremas de tempestade. Os resultados foram analisados de forma comparativa entre as soluções definidas, de modo a tentar perceber quais as diferenças nos resultados obtidos, de umas em relação às outras, e em que medida essas se poderiam considerar benéficas, ou não, para a sua implementação em diferentes cenários reais. Neste artigo serão apresentados os resultados preliminares de duas configurações.

**Palavras-chave:** Quebramares destacados, erosão costeira, hidromorfologia.

### Abstract

The Portuguese coastline is frequently exposed to rough sea conditions, leading the vulnerable locations to dangerous situations that need urgent intervention. The management of these areas should be based on the information of the local natural conditions and in the scientific knowledge of the solutions proposed. Each different plan of action should be carefully reviewed and tested in order to evaluate their effects on the surrounding area and look for alternatives to minimize the negative aspects.

In order to compare the behavior for different configurations of a detached breakwater a set of experimental tests was performed at the Hydraulics Laboratory of the Hydraulics, Water Resources and Environment Division, of the Civil Engineering Department of Faculty of Engineering of University of Porto (LH-FEUP). The experimental study described in this paper is an attempt to bring about improvements in the understanding of the evolution of a sandy beach protected by a detached breakwater and exposed to conditions similar to those registered at the Portuguese coast. The model embraces three different layouts of the breakwater designed to protect a sandy beach, and each one was tested for different conditions characterized by an irregular sea state with significant wave heights ranging from 3.0 m to 5.0 m. The collected data was compared, trying to get a better perception of the positive and the negative effects of each modification to model layout.

**Keywords:** Detached breakwaters, coastal erosion, hydro-morphology.

## 1. Os Quebramares Destacados

### 1.1. Enquadramento geral

O conceito de quebramar tem sido, ao longo dos anos, adaptado aos problemas e necessidades das diferentes situações registadas um pouco por todo o mundo. Existe, hoje em dia, um vasto leque de opções relativamente às características destas estruturas que podem ser: destacadas ou ligadas a terra, alinhadas de forma paralela ou fazendo um ângulo com a linha de costa, etc.

A sua configuração depende assim dos problemas locais e dos objetivos a que a mesma se propõe dar resposta. Actualmente, qualquer intervenção a realizar na zona costeira tem de ter em perspectiva a protecção da linha de costa adjacente, mas também a regeneração do ecossistema local, o que obriga a um cuidado extra na definição das mesmas. Nesse sentido, uma das opções que se tem demonstrado mais favorável, é a utilização de quebramares destacados, devido às suas características e ao seu modo de funcionamento e interação com o meio envolvente.

Estas estruturas, em geral, conciliam de forma eficiente a proteção da zona costeira, favorecendo o aumento do perímetro balnear quando próximas de zonas arenosas, através do controle de correntes marítimas e sedimentares, para além da atenuação dos efeitos da agitação incidente, o que proporciona condições geralmente propícias ao repovoamento da área protegida pela fauna e flora locais.

É de salientar que o agravamento dos registos da erosão em algumas zonas costeiras, não deve ser de forma automática ligado à implantação numa zona próxima de uma estrutura de defesa costeira ou portuária, como é no caso de um quebramar destacado.

Para efetuar essa constatação é necessário analisar a situação de forma ponderada, tendo em conta que, apesar de alguns registos menos favoráveis decorrentes do recurso a esta solução, na sua maioria, os casos onde foram utilizados quebramares destacados na protecção das zonas costeiras, obtiveram-se resultados globais positivos.

### 1.2. Configuração em planta

O nível de utilização muito diversificado que os quebramares destacados atingiram actualmente obriga a que o seu layout final seja também diversificado, procurando adaptar-se aos objetivos propostos e condições locais, registadas de forma a responder da melhor forma a cada desafio.

Na origem da conceção das estruturas longitudinais destacadas, a sua orientação seria paralela à linha de costa, protegendo-a assim da acção directa da agitação incidente. No entanto a mitigação de alguns inconvenientes que surgem pontualmente, à medida que estas estruturas foram sendo introduzidas em zonas de características diferentes, obrigou a que o seu dimensionamento se fosse adaptando de modo a aumentar a eficiência das mesmas.

A configuração em planta de um quebramar destacado pode dar origem a uma interferência significativa ao nível do transporte sedimentar longitudinal, com consequências negativas na zona a sotamar (relativamente à corrente sedimentar) da estrutura.

Em relação à configuração tradicional destas estruturas, existem algumas reservas relativamente à interrupção da corrente sedimentar, originada pela formação de um tipo de acumulação na zona abrigada do quebramar.

Vários investigadores procuraram encontrar soluções para esta situação através da alteração da sua orientação, fazendo variar desde o ângulo em relação à linha de costa, à incorporação ao longo do seu perfil de uma ligeira curvatura que facilitasse a passagem de parte do transporte de sedimentos longitudinal, etc.

Através do recurso a ferramentas informáticas, é também possível confirmar as diferenças relativas à interferência dos quebramares destacados, em relação à corrente sedimentar longitudinal definida.

### 1.3. Materiais constituintes

Para além da disposição em planta e da definição da secção transversal do quebramar, os materiais constituintes das suas várias camadas, têm uma importância funcional e económica considerável.

A escolha dos mesmos deve atender a parâmetros de eficácia e durabilidade da opção tomada, mas mantendo sempre o controle dos custos envolvidos.

Os blocos de enrocamento continuam a ser os mais utilizados, sendo a sua natureza similar à morfologia da zona, de modo a tentar minimizar os impactos da estrutura.

Desta forma, procura-se facilitar a integração da mesma no ecossistema local, tentando melhorar a sua relação com a fauna e flora locais, o que, numa perspetiva da recuperação ambiental da área intervencionada se apresenta como uma vantagem.

### 1.4. Parâmetros funcionais

O sucesso de qualquer intervenção realizada sobre a orla costeira está sempre associado à relação que se estabelece entre as medidas adotadas e os parâmetros físicos locais.

Os quebramares destacados são mais um exemplo da importância desta relação, pelo que, de modo a que o seu funcionamento seja o pretendido, é fundamental que exista um conhecimento adequado de algumas características locais, nomeadamente, a batimetria, as características sedimentares, as características da agitação marítima, a direcção e intensidade dos ventos e a amplitude da maré.

A obtenção destes dados locais, permite ao projetista definir posteriormente, com segurança, aqueles que serão os elementos funcionais da estrutura, responsáveis pelo comportamento da mesma.

Desta forma devidamente sustentada, o layout final definido para a estrutura aproximar-se-á mais da solução indicada, tendo em vista os objetivos estabelecidos para a estrutura a ser construída.

As características funcionais do quebramar a considerar são: o comprimento da estrutura; a largura da abertura entre estruturas, no caso de um alinhamento de quebramares; a distância da linha de costa à estrutura; a largura do coroamento da estrutura; a altura da estrutura; a profundidade de água na zona de implantação da estrutura; o grau de submergência do quebramar, ou seja, a diferença entre a altura do quebramar e o nível de maré da preia-mar de águas vivas.

A definição do grau de submergência da estrutura constituiu também um elemento funcional bastante importante na definição do funcionamento do quebramar. Aspectos importantes como os coeficientes de transmissão da estrutura ou a sua resistência a possíveis galgamentos, são influenciados pelo parâmetro referido.

Geralmente a implantação de uma obra emersa é utilizada em situações de maior amplitude de maré e com registos de agitação muito energéticos, pois a sua capacidade de redução da energia a sotamar da estrutura é maior.

Por outro lado, em casos onde a amplitude de maré seja mínima ou nula, e as condições de agitação sejam menos energéticas, a opção por estruturas submersas é bem vista, pois provoca a redução energética pretendida, sem no entanto dar origem a problemas como a estagnação das águas ou situações semelhantes.

## 1.5. Comportamento da estrutura

### 1.5.1. Hidráulico

Os quebramares destacados têm por objetivo a redução da energia da agitação incidente sobre a linha de costa adjacente. Em muitos casos, associado a este objetivo está um segundo propósito, que tem a ver com a melhoria das condições balneares de toda a zona envolvente.

Estas estruturas funcionam como barreiras à normal propagação da onda em direção à costa, refletindo-a ou obrigando-a a contornar a(s) estrutura(s), o que se traduz numa redução da energia da agitação a sotamar da mesma, Figura 1.

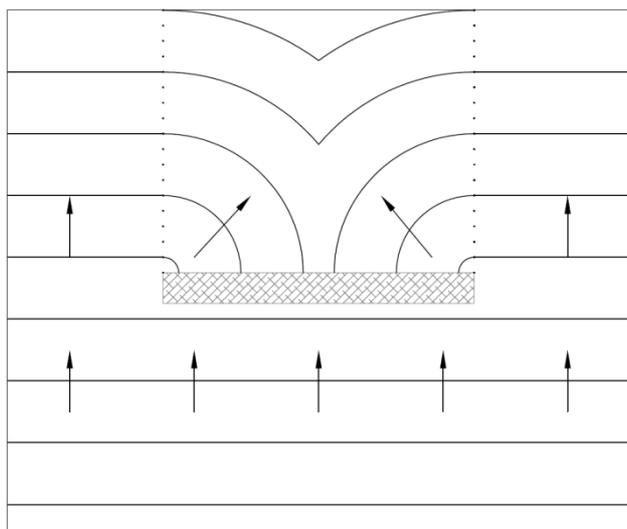


Figura 1. Esquema de difração provocada por um quebramar destacado.

No entanto, devido ao fenómeno da difração, não é possível conseguir uma eliminação total da agitação nesta área protegida, sendo a redução das alturas de onda aproximadamente proporcional às dimensões da estrutura.

Porém, a redução da energia associada às alturas de onda proporcionada, dá origem a uma transferência lateral de energia das zonas exteriores à estrutura (mais energéticas), para as áreas interiores da zona abrigada, de forma a compensar o seu menor potencial energético.

O fenómeno da difração dá origem à formação de duas correntes de recirculação, conforme indicado na Figura 2. A formação destas correntes pode ser contrariada pelo galgamento da estrutura.

Num quebramar submerso, por exemplo, através da passagem adicional de água por cima da mesma irá ocorrer uma corrente de compensação no sentido contrário ao das anteriormente descritas.

As alterações provocadas, principalmente ao nível das correntes marítimas da zona, podem, no entanto, criar problemas em zonas balneares devido à sua inconstância e tornar a área perigosa para os banhistas.

Essa possibilidade deve ser tomada em consideração no projeto do quebramar, de modo a ser precavida esta possível situação inconveniente.

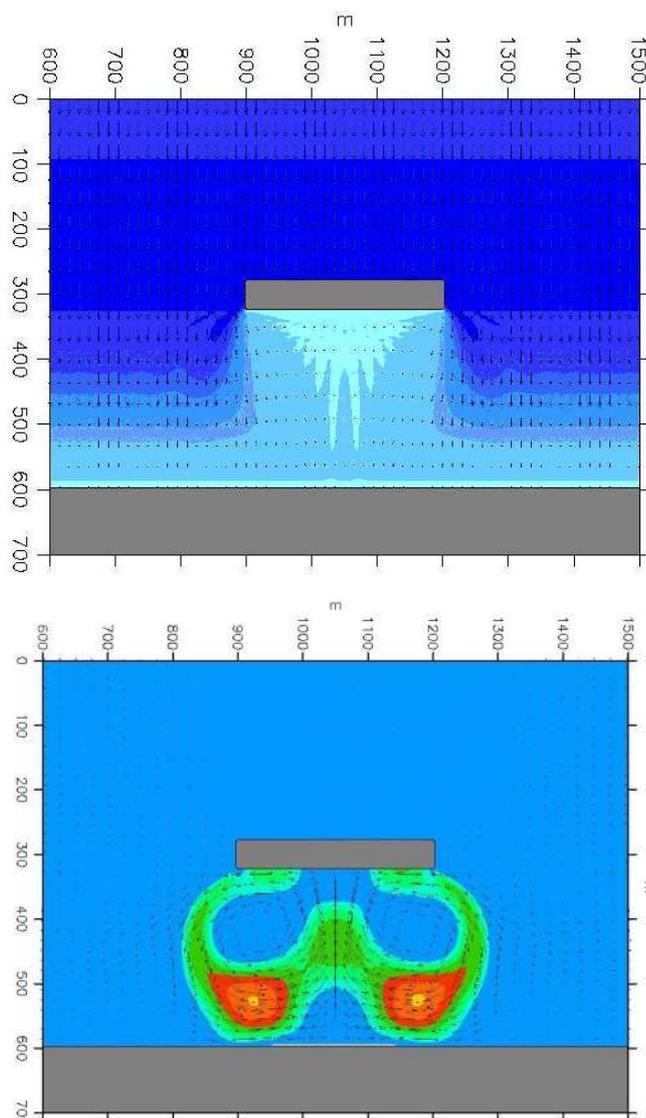


Figura 2. Redução das alturas de onda originadas pela estrutura destacada (azul escuro - superior a 2.0m e azul claro - inferior a 0.1m) e padrão de correntes gerado pela estrutura destacada quando a onda incidente é perpendicular ao seu alinhamento (amarelo - superior a 1.0 m/s e azul - inferior a 0.6m/s) (<http://www.coastalwiki.org/coastalwiki>).

### 1.5.2. Morfológico

Os quebramares destacados podem ser, como já foi referido, de grande interesse turístico para a economia local. Estes poderão melhorar em vários aspectos a zona balnear, quer seja no aumento da sua área ou na melhoria do grau de defesa contra a acção do mar.

Os quebramares destacados proporcionam uma redistribuição do padrão de transporte de sedimentos, de modo a criar a configuração de praia desejada (Taveira-Pinto, 2007).

As correntes de difração criadas nas extremidades do quebramar promovem o reajustamento dos sedimentos, propagando-se desde a estrutura até à linha de costa. Admitindo uma situação onde a agitação incidisse sobre a estrutura de forma ortogonal ao alinhamento da mesma, a distribuição do transporte sedimentar potencial e das áreas de erosão e acreção seriam simétricas, Figura 3.

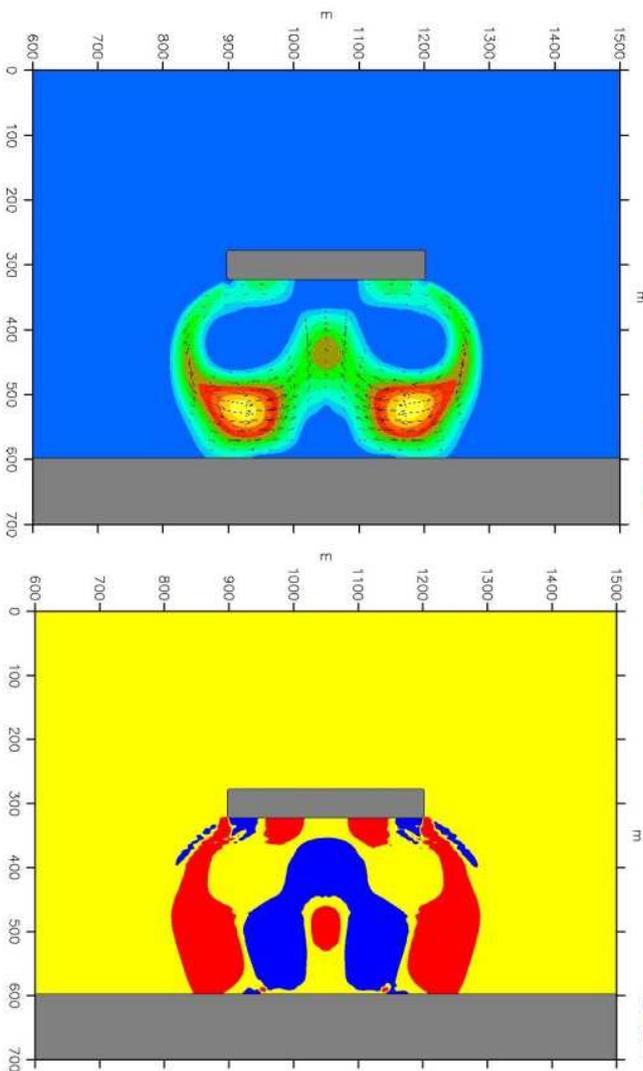


Figura 3. Capacidade de transporte sedimentar da zona a sotamar da estrutura (amarelo - superior a  $1500 \text{ m}^3/\text{ano}/\text{m}$  e azul - inferior a  $150 \text{ m}^3/\text{ano}/\text{m}$ ) e caracterização típica das áreas de erosão e acreção na zona protegida pela estrutura (azul - deposição, amarelo - estável e vermelho - erosão) (<http://www.coastalwiki.org/coastalwiki>).

Dependendo das condições locais e das características do quebramar, a deposição pode originar dois tipos de respostas morfológicas:

- **Saliência** - banco de areia com origem na linha de costa original, de onde parte um prolongamento do mesmo. Em situações muito específicas poderá ocorrer a denominada dupla saliência, através da formação de um novo banco de areia paralelo ao primeiro ou então na linha do primeiro mas com origem na estrutura, desenvolvendo-se em direcção à linha de costa.
- **Tômbolo** - saliência de sedimentos que se estende desde a linha de costa até à estrutura. Esta formação pode ser classificada de permanente, quando se mantém estável e garante uma ligação da linha de costa à estrutura permanente, ou temporária se apenas se registar ao longo de períodos de tempo limitados.

São vários os estudos a nível internacional que tentam compreender quais os principais fatores que influenciam a capacidade de retenção de sedimentos por parte deste tipo de obras de defesa costeira.

A maioria defende a existência de uma relação entre a distância da estrutura à linha de costa, a declividade da onda, a altura da cota de coroamento acima do nível médio da água do mar e o comprimento do quebramar com a sua maior ou menor propensão para a retenção de sedimentos.

Coates *et al.* (1995) e Taveira-Pinto (2007) procuraram relacionar a capacidade de retenção de sedimentos com o transporte longitudinal existente.

Os dados obtidos permitiram concluir que a eficiência do quebramar aumenta com a declividade da onda,  $H_s/L_m$ , com o aumento da cota do coroamento acima do nível médio da água ( $R_c = 1.5, 0.5, -0.5 \text{ m}$ ) e com o comprimento do quebramar (entre 60 e 120 m), e que se mantém constante para distâncias à linha de costa entre 90 a 120 m.

Herbich (2000), mencionando Toyoshima (1974), autor de diversos estudos sobre os inúmeros quebramares destacados existentes no Japão, conclui que é possível conseguir a formação de um tómbolo se a relação entre a distância à linha de costa e o comprimento da estrutura for superior a 0,74.

O mesmo autor entende ainda que existe uma influência significativa da relação entre o comprimento de onda incidente e o comprimento do quebramar, sendo que o quebramar deve ser duas a seis vezes mais extenso que a altura de onda incidente, estando a dimensão real compreendida entre os 61 e os 198 m.

O projeto Encora refere um estudo que relaciona a formação do tómbolo ou da saliência na zona a sotamar do quebramar através de parâmetros adimensionais: comprimento da estrutura ( $L_s$ ); distância à linha de costa ( $X$ ); largura da zona de rebentação, onde se verifica 80% do transporte sedimentar longitudinal ( $X_{80}$ ); distância à linha de costa adimensional ( $L_s^* = L_s/X$ ); largura da zona de rebentação adimensional ( $X^* = X/X_{80}$ ) e espraçamento.

Assim, afirma-se que, para se registar a formação de uma saliência, a distância adimensional ( $L_s^*$ ) deve ser menor que [0,6 a 0,7] enquanto para ser possível a formação de um tómbolo esse mesmo parâmetro deve ser maior que [0,9 a 1,0].

Para além dos valores de referência indicados, é ainda apresentada uma classificação para este tipo de estruturas consoante a distância à linha de costa e a sua influência sobre a direcção preferencial do transporte de sedimentos: externos - ( $X^* > 3,0$ ), costeiros - ( $0,5 < X^* < 2$ ) e praia - ( $X^* < 0,5$ ).

Pode resumidamente dizer -se que os quebramares externos são aqueles que são construídos ao largo, cuja função prioritária é dar abrigo a uma zona portuária.

Os impactes desta estrutura a nível morfológico, podem admitir-se como desprezáveis pois a sua colocação afasta-o do epicentro do transporte sedimentar longitudinal.

Por sua vez os quebramares costeiros são aqueles com maior influência no referido movimento dos sedimentos, pois a sua posição, mais próxima da linha de costa, dificulta a fluidez do referido transporte, capturando os sedimentos no tardoz das mesmas.

Por último, os quebramares de “praia” encontram-se muito próximos da linha de costa, ou seja, permitem que a barlamar dos mesmos se mantenham as correntes marítimas responsáveis pelas alterações morfológicas longitudinais, não interferindo assim de forma significativa neste processo.

A compreensão dos fenómenos registados com a implantação de uma estrutura deste tipo numa zona costeira é ainda, nos dias de hoje, um pouco limitada. Embora globalmente o seu comportamento seja já conhecido, existem muitas vezes fatores locais que alteram os resultados. Devido à complexidade dos fenómenos registados, a modelação física continua a demonstrar vantagens na definição e compreensão do comportamento deste tipo de intervenções. Ao longo dos anos vários investigadores levaram a cabo estudos experimentais, na tentativa de entender o comportamento das mesmas mediante condições específicas. A posterior realização das referidas obras permite muitas vezes efectuar, a posteriori, a comparação entre os resultados reais e os valores indicados pelos trabalhos desenvolvidos.

Um modelo experimental de um sistema de quebramares destacados, Chen e Kuo (1994), construído com uma escala geométrica de 1/40, com fundos móveis de diâmetro médio igual a 0,23 mm e densidade de 2,65, e uma praia de declive moderado (1/30), permitiu analisar os volumes acumulados ao longo de toda a área abrigada em relação à distância à linha de costa (X) e ao comprimento da estrutura (B), de forma a facilitar a compreensão dos resultados obtidos.

Os resultados indicaram que o volume de areia acumulada a sotamar da estrutura aumenta com o crescimento da relação entre a distância à linha de costa e o comprimento da estrutura (X/B), até que esta atinge um máximo de 1,4, após o qual, ocorre uma inversão na relação. A área de areia acima do nível de água a sotamar da estrutura assume uma relação idêntica à descrita anteriormente, tendo como limite máximo o mesmo valor da relação (X/B). O volume e a área de sedimentos acumulados no alinhamento da abertura entre quebramares, atingem o seu valor máximo quando a distância à linha de costa em relação ao comprimento do quebramar assume valores perto dos 0,9. A partir deste ponto a acumulação de sedimentos nesta região sofre uma queda abrupta podendo mesmo verificar-se alguma erosão quando esta relação assume valores maiores do que a unidade.

Quando aos valores totais, devido à rápida diminuição ou mesmo erosão verificadas nos volumes e áreas localizadas no alinhamento das aberturas na estrutura, atingem valores máximos quando  $X/B=0,9$ , decrescendo a partir do momento em que a relação é ultrapassada.

Assim, segundo os autores, pode afirmar-se que se:  $X/B < 0,5$ , não se registam grandes alterações na morfologia da zona;  $0,7 < X/B < 1,0$ , estão reunidas as condições para a formação do tómbolo;  $0,7 < X/B < 1,0$ , regista-se acumulação de sedimentos mas que são suficientes para a formação da saliência.

## 2. Instalação Experimental

### 2.1. Equipamento utilizado

O trabalho desenvolvido visava interpretar qual seria a resposta morfológica de um modelo de um quebramar destacado mediante duas solicitações distintas geralmente verificadas na zona costeira oeste de Portugal.

O trabalho experimental realizou-se no Laboratório de Hidráulica (LH) da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA) do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

O tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica ocupa uma área em planta de 28x12m<sup>2</sup> e uma altura de 1,20 m, permitindo a realização de modelos a duas ou três dimensões, Figura 4.

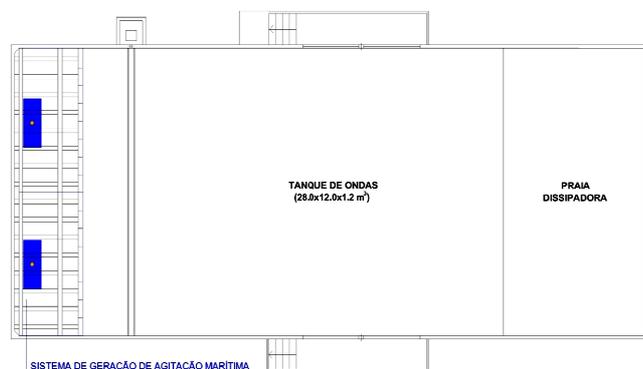


Figura 4. Tanque de ondas do Laboratório da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da FEUP.

Inserido no interior do tanque encontra-se o sistema de geração de ondas (modelo HR Wallingford), constituído por um conjunto de pás independentes, cujo movimento é controlado por dois motores, Figura 5.



Figura 5. Batedores do sistema gerador de ondas e pormenor da ponteira sensível ao toque do medidor de fundos.

As pás podem funcionar em uníssono ou com movimentos singulares entre elas, dependendo do estado de agitação pretendido pelo utilizador, controlado pelo software HR WaveMaker.

Este software permite a geração de diferentes tipos de agitação, desde ondas regulares, a definição de um espectro de agitação irregular, a geração de ondulação bidireccional, ou ainda, a atribuição de um ângulo em relação à perpendicular do alinhamento das pás.

Do lado oposto do tanque existe uma praia dissipadora, que visa minimizar os efeitos da reflexão da agitação através da dissipação da energia da agitação. Embora o hardware do sistema gerador possua uma opção onde é possível compensar esse efeito através do movimento das pás, de forma simples, a construção da praia com brita de tamanho muito variável contribui também nesse sentido, sendo que para estados de agitação menos energéticos nem é necessário recorrer à opção do sistema. A realização dos ensaios e a aquisição de dados relativos aos resultados obtidos, resultaram da utilização de alguns dos equipamentos disponíveis no LH.

Neste trabalho apenas foram considerados estados irregulares de agitação, onde os inputs necessários à definição do espectro eram apenas referentes à profundidade de água, à altura de onda significativa, período de pico e tipo de espectro pretendido. Uma vez assimilada esta informação, o sistema gera o plano de agitação pretendido. Como o objetivo principal do trabalho consistia na análise contínua da evolução morfológica dos fundos registada em 5 perfis previamente definidos, foi necessário recorrer a um sistema perfilador de fundos existente no LH (modelo HR Wallingford), Figura 5.

De forma resumida, o seu funcionamento corresponde ao registo do deslocamento vertical da haste e horizontal da caixa ao longo da viga de apoio. O deslocamento vertical é considerado como a distância do local onde a ponteira toca a areia da praia, até à posição inicial da mesma, ainda antes de se iniciar a leitura. A haste metálica que permite este deslocamento desloca-se através de um conjunto de roldanas acopladas à caixa onde se encontra o motor do aparelho.

Por sua vez, a coordenada horizontal do ponto é definida como o somatório dos deslocamentos horizontais que a caixa percorreu até ao ponto em questão. Toda a informação é transmitida através de um cabo que se encontra ligado desde o computador até à caixa do motor.

De entre as opções disponíveis, a ponteira de medição escolhida foi a sensível ao toque, após a realização de alguns testes preliminares, esta opção revelou-se como a mais indicada para a leitura de perfis neste género de modelos (Silva, 2010). O seu funcionamento, como já foi descrito, baseia-se na recolha de informação relativa a um conjunto de pontos discretos, que depois permite obter o perfil pretendido.

A tradução da informação transmitida pela ponteira e caixa para valores numéricos e vice-versa, é feita através de um interface que funciona em DOS, que se encontra instalado no PC e que para além de organizar a tabela de dados permite ao utilizador monitorizar o progresso da medição dos perfis quase em tempo real.

A informação relativa às coordenadas horizontal e vertical dos pontos é assim recolhida e organizada, sendo necessário definir inicialmente algumas características relativamente ao número de pontos a realizar por perfil, comprimento do mesmo e por consequência fica assim definida a distância entre pontos (ou o tamanho do espaçamento horizontal a dar pela caixa).

As características do funcionamento do sistema perfilador de fundos, (Silva, 2010) são: resolução horizontal - 1 mm; resolução vertical - 0,5 mm.

Atendendo às potencialidades do equipamento foram definidas as seguintes linhas orientadoras: extensão total - 3900 mm; número de pontos medidos - 70; distância média entre pontos - 55,7 mm; número de perfis medidos - 5; afastamento lateral entre perfis - 1000 mm.

## 2.2. Descrição do modelo

### 2.2.1. Enquadramento

O modelo tridimensional, Figura 6, foi construído para avaliar a influência da estrutura destacada aí implantada, na evolução dos perfis transversais da praia a sotamar, quando esta se encontra solicitada por condições físicas idênticas às encontradas na costa noroeste portuguesa.

A sua construção tentou conjugar as características pretendidas pelo modelo, com o espaço disponível em laboratório e os materiais disponíveis.

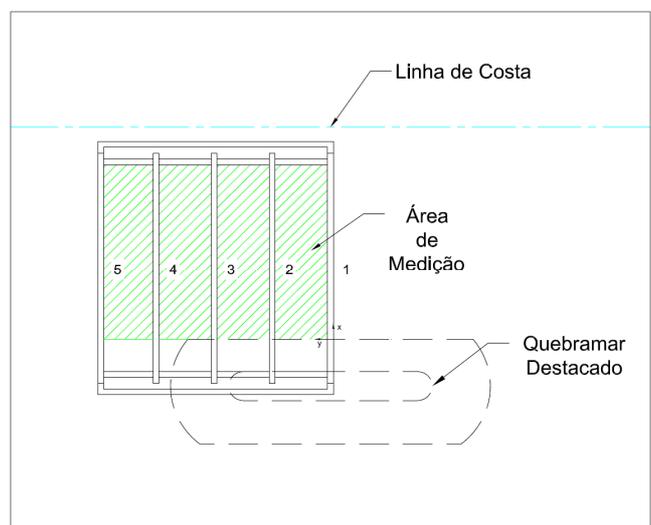


Figura 6. Planta do modelo e definição da área analisada.

Para além da questão geométrica, a necessidade de recorrer à utilização dos materiais existentes no LH, obrigou a que a escala geométrica fosse adaptada às características dos mesmos.

Uma vez que havia sido realizado recentemente um trabalho de características semelhantes, envolvendo a construção de uma estrutura à escala 1/37, adoptou-se para este trabalho a escala geométrica de 1/40.

Estava assim garantido que as areias e restantes materiais ainda presentes no laboratório poderiam ser usados neste modelo, representando ainda assim soluções equivalentes do protótipo.

Partindo deste dado e sabendo que o critério de semelhança escolhido era o de Froude, foi também adotada a fórmula de Hudson para o dimensionamento dos blocos de enrocamento do manto resistente da estrutura.

### 2.2.2. Descrição da estrutura

Foram analisadas várias configurações, sendo apenas apresentados os resultados relativos às configurações 1 e 2, Figura 7.

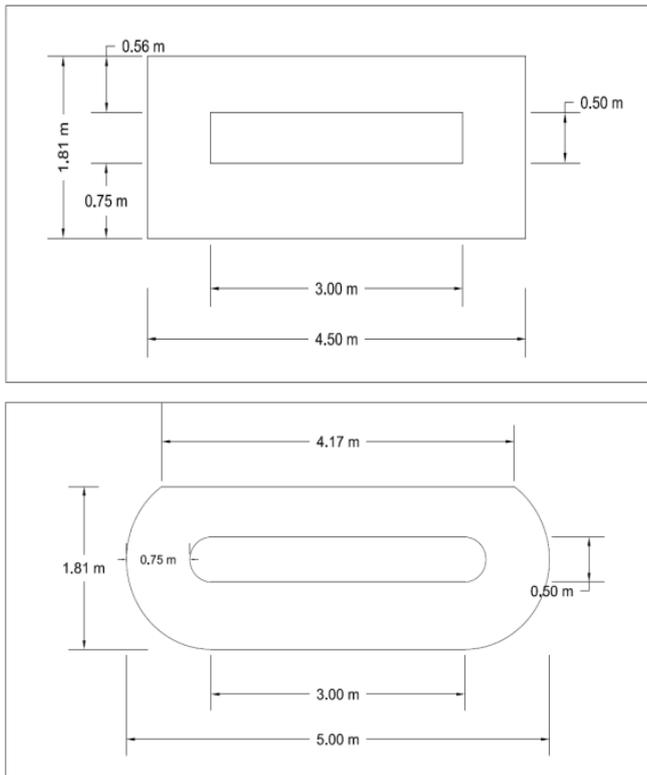


Figura 7. Configuração 1 e 2 consideradas.

A implantação da estrutura na área disponibilizada foi um dos pontos analisados com maior atenção, pois era necessário garantir que a mesma possibilitava um espaço lateral suficiente para que a agitação incidente se difratasse normalmente sem a influência das fronteiras físicas laterais do modelo (parede e divisórias), possibilitando assim um correto transporte sedimentar de barlamar para sotamar.

Neste sentido foi definido como critério que a distância lateral da estrutura até à parede ou divisória, deveria ser pelo menos igual ao comprimento de onda máximo a testar. Desta forma previne-se qualquer efeito de reflexão da agitação nas paredes, o que poderia acarretar resultados condicionados e assim influenciar qualquer análise que pudesse ser realizada.

A primeira configuração pretendia representar em planta uma estrutura mais rectilínea, onde a transição dos taludes laterais da estrutura seria efectuada através de um hipotético alinhamento recto, onde o declive do talude das extremidades era igual ao definido para o talude exposto.

A configuração pretendida seria então similar à assinalada na Figura 8, sendo que a definição do referido hipotético alinhamento não é fácil, na prática, de concretizar de forma perfeita.

Como segunda opção, foi idealizado um esquema para a extremidade da estrutura mais comum em projetos desta natureza.

Esta configuração procurava reproduzir uma forma cónica na zona da cabeça, mantendo a pente do talude exposto do quebramar. A solução obtida seria assim similar à apresentada na Figura 9.

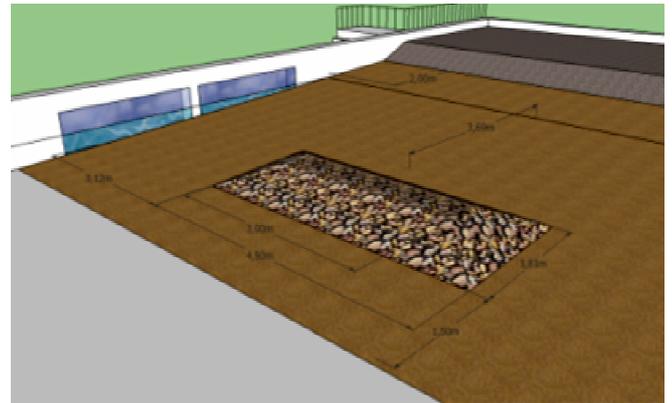


Figura 8. Modelo 3D da configuração 1 da estrutura.

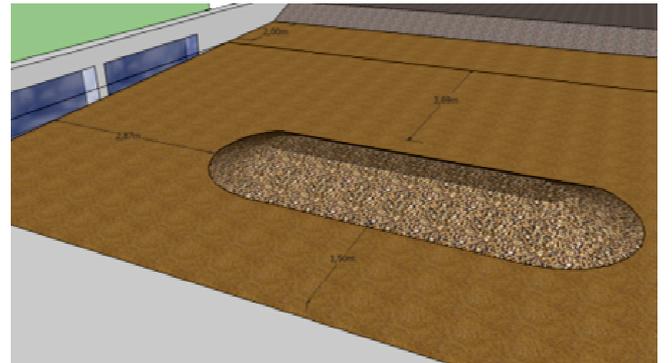


Figura 9. Modelo 3D da configuração 2 da estrutura.

O núcleo do quebramar foi preenchido com o recurso a sacos geotêxteis permeáveis e cheios com areia de várias dimensões existentes no laboratório. Esta opção facilitou, numa fase posterior, a fixação das camadas de brita, uma vez que o posicionamento dos sacos mais pequenos foi desde logo aproveitado para impor a pente pretendida para os taludes. Esta opção permitiu ainda reduzir o volume de enrocamento de pequena dimensão, sem que interferisse com os resultados finais a obter.

O revestimento do quebramar (manto resistente) foi materializado com alguns blocos de enrocamento de dimensões apropriadas e previamente seleccionados.

Esta brita de dimensões substancialmente maiores do que a colocada na região da 1ª subcamada, apresentava um peso que variava entre os 185 gf e os 247 gf, o que à escala representaria blocos de enrocamento cujo peso se situava no intervalo [110; 150] kN.

Quanto aos materiais constituintes da estrutura eles são os seguintes: núcleo - sacos de geotêxtil com areia de várias dimensões; 1ª Subcamada - brita de dimensões variáveis; manto resistente - brita previamente seleccionada de dimensões pré-definidas;  $W_{\text{manto}}=[185; 247](\text{gf})$ ;  $e_{(\Delta, \text{manto})}=[4,3; 4,7](\text{cm})$ , colocados de acordo com o perfil transversal apresentado na figura 10.

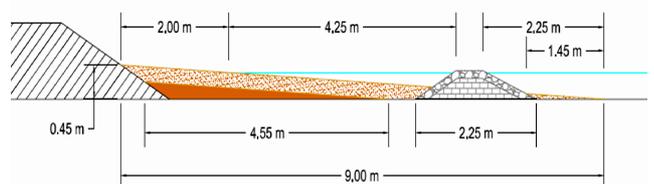


Figura 10. Perfil transversal da praia.

### 2.2.3. Caracterização sedimentar

A praia adjacente à estrutura destacada foi realizada recorrendo à areia existente no laboratório, com uma baridade de  $1037 \text{ kg/m}^3$  e com um diâmetro médio de  $0,273 \text{ mm}$ . A conformidade com a situação real da costa noroeste portuguesa estaria dependente da escala considerada de  $d_{50}$ , da lei de semelhança considerada, da não consideração da distorção e do modo de transporte a considerar (arrastamento ou suspensão).

Contudo, dado que o objetivo deste trabalho era efetuar uma análise comparativa essas questões não se colocam com tanta importância.

## 2.3. Procedimento experimental

### 2.3.1. Perfis analisados

Devido às condições de simetria do modelo e ao facto da agitação incidente ser completamente ortogonal à posição da estrutura, admitiu-se que as alterações morfológicas que se iriam registar seriam também elas simétricas.

Foi com base nesta condição, que se admitiu ser apenas necessário efectuar a medição dos perfis de um dos lados da praia, a partir do que se encontrava sobre o eixo de simetria, espaçados de  $1 \text{ m}$  e num total de  $5$  (figura 6).

De modo a tornar o perfil mais homogéneo, os valores obtidos foram filtrados através da técnica da média móvel onde a cada ponto foi atribuído o valor médio dos  $3$  pontos mais próximos (o anterior, o seguinte e o ponto em questão).

Desta forma é possível obter uma representação do perfil mais coerente com a realidade, minimizando a instabilidade de algumas zonas, sem perder muita qualidade na informação recolhida.

A análise individual de cada perfil não permite obter uma imagem genérica da superfície, pelo que a informação recolhida foi posteriormente trabalhada através de um outro software, o Surfer 9, que permite criar, a partir da informação dos  $5$  perfis conseguidos, uma superfície  $3D$  e ainda a construção de secções transversais  $2D$ , de forma a ser perceptível as zonas onde se registou erosão e as outras onde houve deposição de sedimentos.

### 2.3.2. Condições de agitação

As condições de agitação de teste definidas para este trabalho são representativas da costa oeste Portuguesa, ou seja: espectro de Jonswap;  $T_P=10 \text{ s}$  ( $1.58 \text{ s}$  no modelo);  $H_S=3.0 \text{ m}$  e  $5.0 \text{ m}$  ( $0.075 \text{ m}$  e  $0.125 \text{ m}$  no modelo), valores compatíveis com os limites de geração do sistema e com a profundidade de água utilizada. O período de pico e o comprimento de onda associado permitem a ocorrência de uma folga, lateralmente ao modelo, em relação ao valor considerado como limite de um comprimento de onda, como foi anteriormente referido.

### 2.3.3. Ensaios realizados

Foram realizados vários ensaios, cada um com uma duração aproximada de  $13/14 \text{ h}$ , decompostos em  $8 \text{ h}$  de ensaio efetivo e mais  $4/5 \text{ h}$  necessárias para a medição dos perfis.

Desta forma a duração correspondente no protótipo seria de aproximadamente  $50,6 \text{ h}$  ou seja, mais de dois dias de solicitação sobre a praia.

Este tempo é no entanto diminuto considerando a relação obtida por Chen e Kuo (1994), que o perfil de praia atinge o equilíbrio apenas quando o valor da relação entre a duração do mesmo e o período de pico do estado de agitação incidente se aproximar de  $60\,000$ , sendo que dividem o período antecedente em duas fases.

Até um valor da relação de  $20\,000$  regista-se um crescimento muito significativo dos volumes acumulados havendo uma acalmia nos registos de sedimentos acumulados a partir desse ponto, Quadro 1.

Quadro 1. Duração de ensaio necessária à estabilização do perfil de praia, Chen e Kuo (1994).

| $t/T$  | t (horas) |
|--------|-----------|
| 20 000 | 8,78      |
| 60 000 | 26,35     |

Uma vez que para se atingirem estes valores seria necessária a duração dos ensaios por muitas mais horas e o tempo disponível não o permitia, foi escolhida uma duração dos ensaios que permitisse o registo de uma resposta considerável do modelo.

Sendo objetivo do estudo a comparação da forma como as diferentes configurações da estrutura influenciavam a rapidez e tipologia de resposta morfológica da praia, não seria de todo imprescindível a obtenção de um estado de equilíbrio. Foi então atribuída a duração de  $8 \text{ horas}$  que se aproxima da primeira fase identificada pelos investigadores referidos como aquela de maiores e mais rápidas alterações nos perfis transversais da praia.

## 3. Análise de Resultados

A primeira análise aos dados obtidos foi efetuada comparando ensaios realizados com a mesma configuração da extremidade do quebramar, mas com registos de agitação caracterizados por alturas de onda significativas diferentes. Esta comparação pretende verificar o grau de influência que a altura de onda significativa incidente tem sobre a evolução morfológica da praia a sotamar da estrutura.

Os diferentes estados de agitação testados, traduzem-se nos resultados em variações das cotas registadas ao longo dos perfis, que podem ser relacionadas com os volumes de areia movimentados por cada situação. Desta forma, tentar-se-á encontrar respostas às seguintes questões: qual é a diferença de cotas máxima encontrada? E a mínima? Será a variação nas cotas registadas ao longo dos perfis decisivamente influenciada pela altura de onda significativa incidente sobre a praia? Até que ponto essa relação é relevante?

Devido ao tempo disponível, não foi possível realizar testes preliminares que permitissem a otimização de metodologias a adoptar ou a correção de imperfeições registadas.

Como os perfis eram conseguidos através de um registo discreto de pontos, foi considerado como prudente definir-se uma margem de incerteza que prevenisse eventuais erros de leitura da evolução dos perfis. Esta definição pretende corrigir eventuais problemas de leitura, que se prendem com a impossibilidade de garantir que os pontos obtidos representam o real declive da praia, pois a formação dos “riples” na areia pode afetar a leitura efetuada indiciando uma tendência que pode não estar correcta.

Admitindo uma margem de incerteza de valor igual à maior altura de entre os “riples” obtidos, pretende-se chamar a atenção para possíveis registos de perfis criados que mostrem algumas oscilações. A margem de incerteza definida para este caso foi de 20 mm, correspondentes à maior altura registada dos “riples”. Ambas as configurações do quebramar foram ensaiadas com dois estados de agitação, caracterizados por alturas de onda de 3 e 5 m, correspondentes aos testes nº 1 e 2 (primeira configuração), 3 e 4 (segunda configuração), respetivamente. Com base nas cotas registadas ao longo dos vários perfis, foram criados os gráficos das Figuras 11 a 15, onde é possível analisar o comportamento da área de controlo para os diversos ensaios.

Uma primeira análise aos testes realizados com a primeira configuração permite perceber que o 2º teste, solicitado por uma altura de onda maior, dá origem a uma área de deposição de sedimentos mais extensa.

A sua disposição, a sotamar da estrutura, é semelhante nos dois casos porém, verifica-se uma maior diferença no 2º ensaio.

A análise das áreas de acumulação de areias mostra que no mapa referente ao teste sob condições mais energéticas, se destaca um prolongamento lateral da principal área de acreção, atingindo os perfis 3 e 4.

A saliência criada resulta na mudança de alteração do comportamento das áreas centrais dos referidos perfis, que passam de uma situação de erosão, para zonas de acreção.

Estas diferenças são ainda mais claras na figura 13 onde é apresentada uma comparação entre as diferenças acumuladas ao longo do perfil 3 para os dois ensaios.

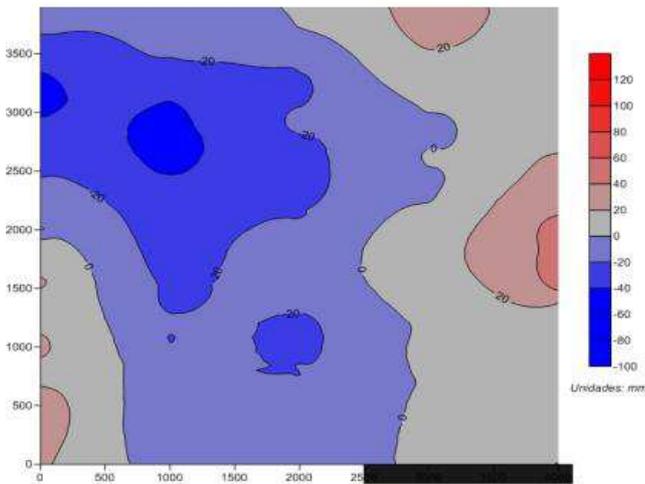


Figura 11. Diferenças de cotas registadas em relação à praia inicial, durante o 1º teste (E1\_HS3\_TP10).

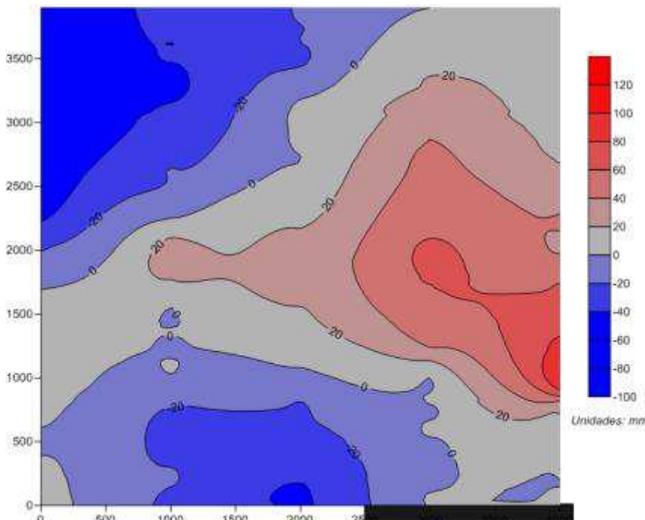


Figura 12. Diferenças de cotas registadas em relação à praia inicial, durante o 2º teste (E1\_HS5\_TP10).

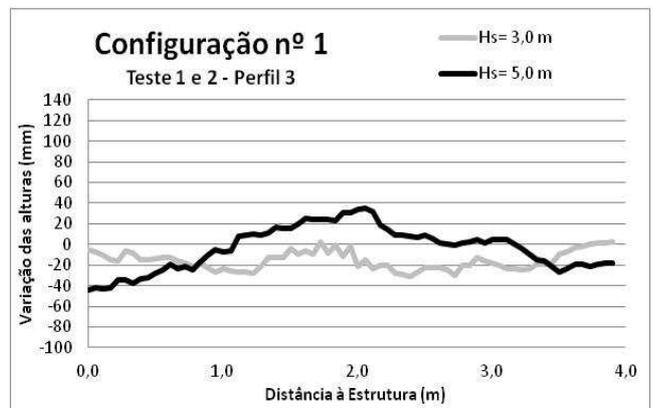


Figura 13. Comparação das diferenças de cota registadas no 1º e 2º ensaios no perfil 3.

Os mapas construídos a partir da informação recolhida nos ensaios referentes à segunda configuração da estrutura, voltam a mostrar uma tendência para a extensão lateral da zona de deposição de sedimentos no ensaio realizado sob condições mais energéticas.

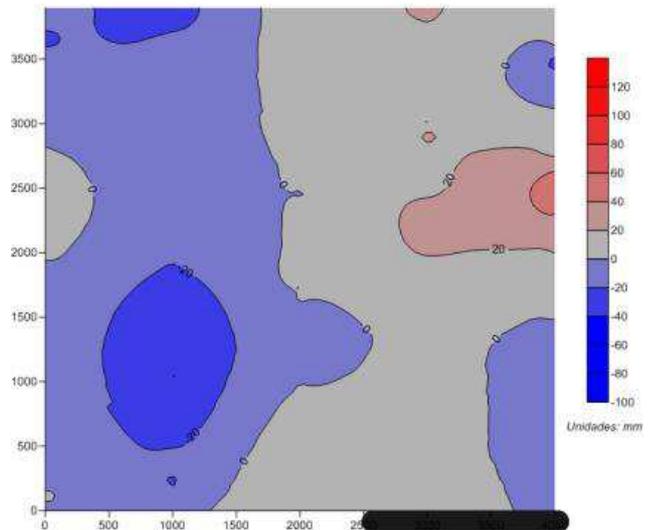


Figura 14. Diferenças de cotas registadas em relação à praia inicial, durante o 3º teste (E2\_HS3\_TP10).

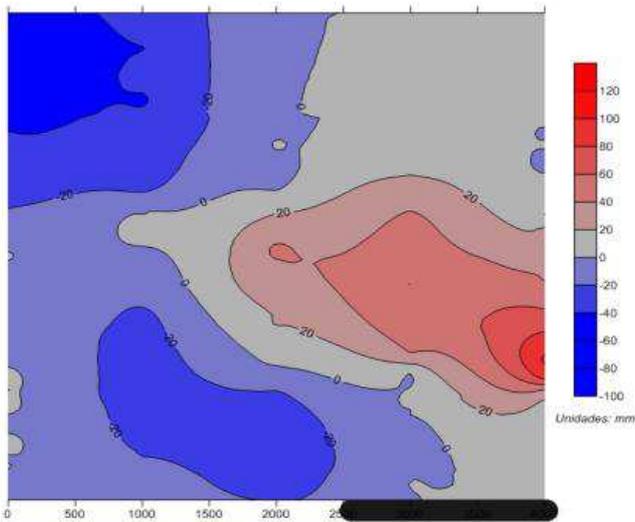


Figura 15. Diferenças de cotas registadas em relação à praia inicial, durante o 4º teste (E2\_HS5\_TP10).

A acumulação de areias que se verifica nalguns pontos da praia só pode ser alimentada pelo seu movimento a partir de outras áreas da praia, uma vez que não existe qualquer “input” de areias durante a realização dos ensaios. Esse movimento dos sedimentos provoca a erosão de algumas áreas da praia construída.

O fenómeno da erosão é assinalado nos mapas referentes aos testes em análise, numa zona lateral em relação à estrutura, compreendida entre os perfis 4 e 5.

A sua configuração não é igual nos dois casos sendo de assinalar relativamente ao 2º e 4º teste, o registo de variações negativas das cotas de valores consideráveis junto à extremidade da estrutura.

Este fenómeno não se regista de maneira tão intensa para os ensaios caracterizados por uma menor altura de onda significativa, devido à sua menor capacidade de transporte das areias aí posicionadas.

Uma análise atenta permite ainda confirmar que o valor das diferenças registadas na zona de maior erosão e de maior acumulação são, em módulo, idênticos, o que permite concluir que as areias arrastadas da zona de erosão são as mesmas que alimentam a área de acumulação.

A velocidade de resposta dos perfis de praia perante as diferentes solicitações pode também ser um importante indicador do seu comportamento.

A maior capacidade energética do estado de agitação dos 2º e 4º testes permite afirmar que a evolução dos perfis nestes casos será mais rápida. Para confirmar esta ideia pode-se recorrer à análise evolutiva no tempo do perfil 1.

Pela visualização da Figura 16 é notório que à medida que a duração do teste se prolonga, as alterações ao longo da linha do perfil se tornam menos expressivas, sendo que no último período de ensaio, este processo parece ter estagnado.

Em relação ao gráfico apresentado na figura 17, pode-se afirmar que a intensidade da evolução do perfil é mais acentuada que no caso anterior, apesar de se notar uma ligeira atenuação à medida que o tempo avança.

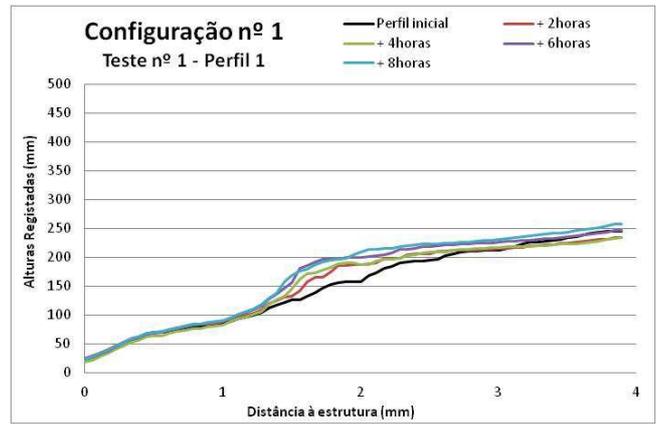


Figura 16. Evolução ao longo do tempo do perfil 1, para o 1º ensaio.

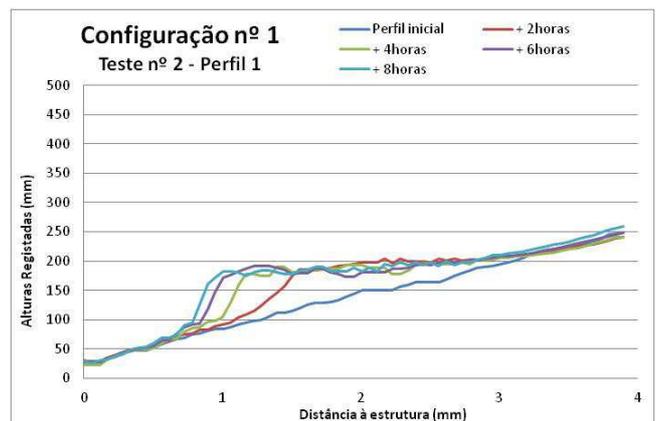


Figura 17. Evolução ao longo do tempo do perfil 1, para o 2º ensaio.

Ainda assim, mesmo durante as últimas duas horas de exposição à agitação, continua a registar-se a progressão, no sentido da estrutura, da saliência formada, facto que permite concluir que esta ainda se encontra em formação, não devendo este ser considerado o seu perfil de equilíbrio.

Conclui-se então que a resposta do perfil e, consequentemente, da superfície da praia construída, está de alguma forma relacionada com a capacidade energética do estado de agitação incidente sobre a praia, sendo esta tão intensa e prolongada no tempo quanto maior for a energia do mesmo.

Respondendo à questão inicial, pode-se afirmar que o primeiro ensaio atinge o estado de equilíbrio num menor período de tempo, ao passo que o 2º teste responde movimentando o mesmo volume de areias de forma mais rápida.

A segunda parte da análise dos resultados obtidos permite comparar ensaios sujeitos a condições de agitação semelhantes efetuados perante diferentes configurações do quebramar construído. A confrontação dos dados recolhidos tem como objetivo avaliar a influência que as alterações produzidas na forma da estrutura têm sobre a evolução morfológica da praia adjacente à mesma.

Os ensaios realizados sob condições de agitação menos energéticas apresentam naturalmente um registo de variações de menor expressão, mas permitem ainda assim encontrar das figuras 11 e 14, semelhanças e divergências entre ensaios que se admitem ser consequência das alterações efectuadas no quebramar.

Como se pode observar existe em ambos os casos uma tendência para o registo de fenómenos de erosão ao longo de um alinhamento junto às áreas de influência dos perfis 4 e 5, embora se verifique alguma alternância em termos de intensidade das variações assinaladas entre ensaios.

Junto à estrutura encontram-se algumas diferenças significativas. Ao longo do perfil nº 3, verifica-se que a 2ª configuração apresenta variações mais moderadas que as registadas no 1º ensaio e, na zona junto à área redefinida da estrutura, é de destacar a transformação na tendência de erosão que aí se registava indiciando uma maior estabilidade dos sedimentos nesta região, conferida pela alteração promovida. Esta análise é confirmada pela figura 18 onde é apresentada de forma isolada a variação das leituras obtidas ao longo do perfil 3.

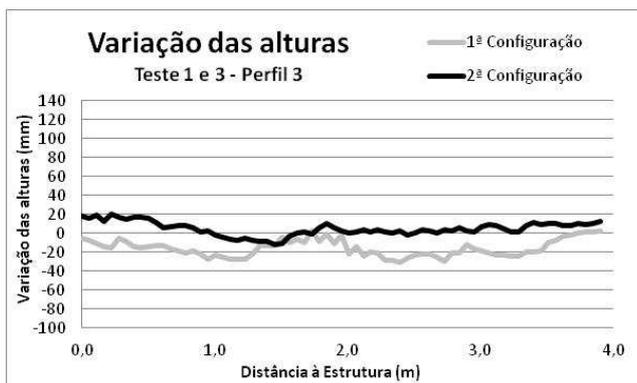


Figura 18. Comparação das diferenças de cota registadas no 1º e 3º ensaio no perfil 3.

A zona de acreção de areias na parte abrigada da praia também apresenta algumas diferenças entre ensaios, como indica a figura 19.

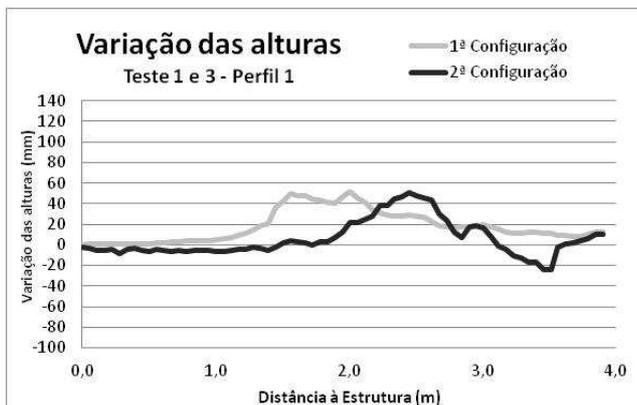


Figura 19. Comparação das diferenças de cota registadas no 1º e 3º ensaio no perfil 1.

Pode verificar-se que embora as diferenças de cotas registadas sejam idênticas, a sua posição ao longo do perfil de praia é diferente, afastando-se da estrutura em direcção à linha de costa no 3º ensaio relativamente ao 1º. Ainda ao longo do perfil nº 1, é possível identificar numa zona mais elevada do perfil, indícios de erosão no ensaio referente à configuração nº 2 que resultam da formação nesta área de correntes de retorno. Através da comparação dos resultados obtidos para os testes de menor intensidade energética seria de esperar um registo idêntico, ou ainda mais acentuado, nos ensaios mais intensos, uma vez que as restantes condições se mantêm constantes.

Isso não se verificou, pois nestes testes sob condições de agitação caracterizadas por uma altura de onda significativa de 5 m, estas galgavam facilmente a estrutura, minimizando diferenças provenientes da alteração promovida na forma da estrutura.

O gráfico da figura 20 demonstra que a posição da zona de deposição de areias ao longo do perfil 1 é, no caso dos 2º e 4º ensaios, semelhante, o mesmo acontecendo quanto ao valor da diferença registada.

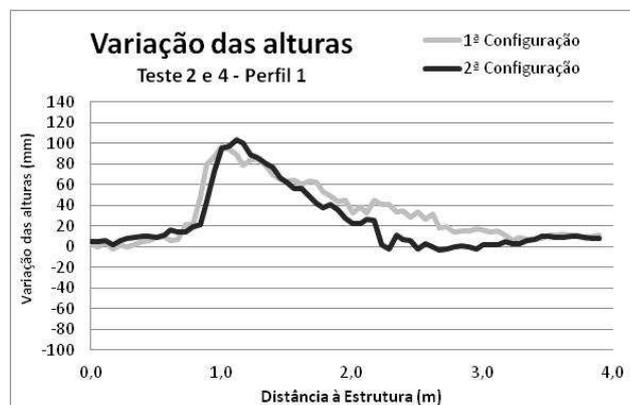


Figura 20. Comparação das diferenças de cota registadas no 2º e 4º ensaio no perfil.

No entanto, a mesma figura permite observar que a acreção de areias se prolonga em direcção à linha de costa no caso do 2º ensaio, não se verificando esta situação em relação ao ensaio realizado com a 2ª configuração do quebramar escolhida. Este facto fica mais uma vez a dever-se à geração de correntes de retorno com capacidade suficiente para arrastarem as areias em direcção à estrutura, podendo este facto constituir uma das justificações plausíveis para a ligeira diferença de altura da saliência junto à estrutura.

Quanto à protecção da extremidade do quebramar, não é evidente nestes ensaios a maior capacidade de protecção de uma solução em relação à outra pois os resultados obtidos são bastante semelhantes, como mostra a figura 21.

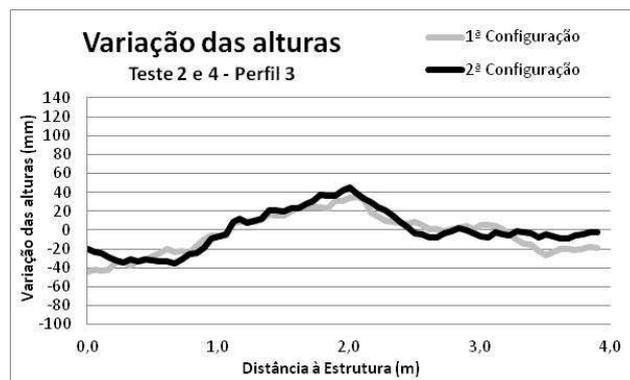


Figura 21. Comparação das diferenças de cota registadas no 2º e 4º ensaio no perfil 3.

Assim, é de assinalar a transformação na forma da área de erosão junto à extremidade do quebramar, consoante a configuração atribuída à estrutura registada nos ensaios de menor intensidade energética. A adaptação da onda à fisionomia cónica da 2ª configuração indícia que estas previnem ou reduzem o transporte de sedimentos pela onda nas suas imediações.

Os mapas de variações totais apresentados demonstram que a área de acreção evolui também de forma coerente com a configuração atribuída à estrutura. Esta alteração na forma e posição é devida a uma difração mais suave e prolongada da onda, que se verifica com as alterações promovidas na 2ª configuração testada, transportando os sedimentos para zonas mais afastadas da estrutura.

#### 4. Conclusões

O objetivo do trabalho apresentado era, de alguma forma, contribuir para a melhoria do conhecimento existente em relação ao comportamento morfológico das estruturas longitudinais destacadas, sob a acção de condições semelhantes às da costa oeste portuguesa.

O comportamento deste género de estruturas é naturalmente muito influenciado pelas condições e características do meio que as envolve, mas também pelas características físicas da própria estrutura.

Os resultados aqui apresentados referentes a duas das configurações testadas, demonstram que estruturas com uma configuração similar à 1ª, proporcionam na propagação da agitação uma mudança mais brusca, suscitando a ocorrência de erosões junto à zona da cabeça do quebramar. Este fenómeno indicia que estruturas deste género têm maior probabilidade em relação a outras de configuração mais próxima da 2ª, de vir a sofrer problemas de estabilidade nestas áreas, obrigando a intervenções de reparação, logo a maiores custos. Este facto ilustra portanto a importância da configuração da zona da extremidade.

As areias retiradas desta zona são, no entanto, depositadas na área localizada a sotamar da estrutura, sendo as diferenças de cotas registadas nos ensaios efetuados da mesma ordem de grandeza que as verificadas em vários testes. Assim, embora a movimentação das areias ocorra tal como pretendido, os custos de manutenção e reparação devidos às erosões localizadas registadas e uma provável maior instabilidade dos blocos, permitem indicar ser esta a opção menos adequada de entre as soluções testadas.

A distribuição espacial dos sedimentos a sotamar da estrutura apresenta variações que foram analisadas e quantificadas, nomeadamente as diferenças entre os testes realizados sob condições de agitação caracterizadas por alturas de onda significativas de diferentes alturas.

Assim, pode-se afirmar que as alterações produzidas tiveram um efeito considerável no modo como a onda contorna lateralmente a estrutura em direção à praia por difração, tornando o processo mais suave e prolongado, o que dá origem a uma deposição dos sedimentos mais afastada do quebramar.

Os resultados em relação ao estado de agitação mais energético não confirmaram no entanto esta leitura, pois as ondas podiam galgar a estrutura o que constituía um efeito mais agressivo na zona abrigada da estrutura, que destabilizava as correntes criadas. Esta nova condição fez com que o efeito registado anteriormente se diluísse, acabando por a zona de acreção principal a sotamar da estrutura, para estes testes, ser quase coincidente.

#### Referências

- Chen, Wen-juinn e Kuo, Ching-Ton (1994). *Study on de Sand Deposited Behind the Detached Breakwaters*, Coastal Dynamics '94, pp 938-949, AS Arcila, MJ Stive e NC Kraus, ASCE, New York, USA (ISBN: 0-7844-0043-1).
- Coates, T.T.; Dodd, N. (1995). *Response of gravel beaches in the presence of control structures* Proceedings of the Coastal Engineering Conference, v 2, p 1880-1894; ASCE, Japan Society of Civil Engineers, 1995. ISSN: 08938717.
- Herbich, J.B. (2000). Offshore (detached) breakwaters. In *Handbook of Coastal Engineering*, pp 5.2- 5.97, McGraw-Hill Handbooks, Texas, EUA.
- Silva, Raquel (2010). *Avaliação Experimental de Parâmetros Associados a Modelos de Evolução da Linha de Costa*, Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Taveira Pinto, F. (2007). *Análise da Concepção e Dimensionamento Hidráulico-Estrutural de Quebramares Destacados*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- <http://www.coastalwiki.org/coastalwiki> (Dezembro 2010).
- <http://www.encora.eu/coastalwiki> (Dezembro 2010).
- <http://www.euroasion.org> (Dezembro 2010).