



Revista de Gestão Costeira Integrada -
Journal of Integrated Coastal Zone
Management

E-ISSN: 1646-8872

rgci.editor@gmail.com

Associação Portuguesa dos Recursos
Hídricos

Ten Voorde, Mechteld; Neves, Maria da Graça; Antunes do Carmo, José Simão
Estudo Preliminar da Geometria de um Recife Artificial para Protecção Costeira e para a
Prática de Surf na Costa Oeste Portuguesa
Revista de Gestão Costeira Integrada - Journal of Integrated Coastal Zone Management,
vol. 8, núm. 1, 2008, pp. 65-79
Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos
Lisboa, Portugal

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=388340123006>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal

Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

Estudo Preliminar da Geometria de um Recife Artificial para Protecção Costeira e para a Prática de Surf na Costa Oeste Portuguesa*

Preliminary Study on the Geometry of an Artificial Reef for Coastal Protection and Surfing along the West Coast of Portugal

Mechteld Ten Voorde¹, Maria da Graça Neves², José Simão Antunes do Carmo³

RESUMO

Grande parte da costa atlântica Portuguesa encontra-se hoje em dia bastante fragilizada e a necessitar de urgentes medidas reparadoras que satisfaçam simultaneamente os requisitos essenciais de protecção, salvaguardem a atracção turística e promovam o desenvolvimento sustentável. Terão sido fundamentalmente os grandes volumes de areias extraídos dos sistemas fluviais e das zonas portuárias, nas últimas décadas, que conduziram ao défice sedimentar generalizado que hoje se manifesta ao longo de grande parte da costa Portuguesa. Terão igualmente contribuído para este balanço negativo muitas das obras de regularização fluvial, de que se destacam as grandes barragens construídas essencialmente a partir de meadas do século passado, bem como a implementação de estruturas portuárias e de outras obras com finalidades de protecção local. Para o estudo das medidas mais adequadas a implementar recorre-se, hoje em dia, com frequência, a simulações numéricas com base em modelos matemáticos mais ou menos complexos, sendo o conhecimento das características do escoamento associadas às correntes e ondas de superfície, e a sua dependência relativamente à batimetria e à geometria da costa, de capital importância no dimensionamento destas estruturas de protecção, sejam elas submersas ou elevadas, aderentes ou destacadas.

Neste artigo apresentam-se de forma sucinta os trabalhos em curso realizados no âmbito da definição da geometria de um recife artificial. Os resultados dos estudos em modelo numérico sobre o funcionamento do recife realizados até ao momento no que respeita quer à protecção costeira quer à melhoria das condições para a prática de surf permitiram tirar as seguintes conclusões preliminares no que se refere às características geométricas da estrutura: 1. A presença da plataforma

¹ Autor correspondente - mvoorde@lnec.pt - Universidade de Coimbra, IMAR, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal.

² LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. gneves@lnec.pt

³ Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, 3030-788 Coimbra, Portugal. jsacarmo@dec.uc.pt

* Submissão 8 Janeiro 2008; Avaliação e Decisão 20 Março 2008; Recepção da versão revista 24 Abril 2008; Aceitação - em 29 Abril 2008; Disponibilização on-line - 23 Maio 2008

sob o recife em forma de delta é vantajosa no que se refere à protecção costeira da zona adjacente à estrutura; 2. O ângulo do recife deve ser próximo de 45°.

Palavras-chave: Recifes artificiais, obras de protecção, ondas para surf, modelação numérica

ABSTRACT

A large part of the Portuguese Atlantic coast is at present very fragile, and urgent measures are needed to satisfy the essential requirements for its protection, preservation and promotion of the tourist attraction, and its sustainable development.

A deficit of sediments is clear all along the Portuguese coast, mainly due to the large volumes of sand extracted from river systems and port areas. Many of the works for regulating rivers, for example, the major dams built mainly since the middle of the last century, and the implementation of port structures and others constructed for local protection purposes, have contributed to this negative balance in sediment. Also natural factors, with increasing consequences, like the rising mean sea level and more frequent and intense storms, due to global warming, will contribute significantly for coastal erosion and consequent retreat of the coastal line. According to several studies, the rising of the mean sea level will reach values between 0.5 m and 1.5 m until the year 2100. Consequently, the natural protections will be destroyed and the erosive processes and modifications of the shoreline will be strongly increased by the action of intense waves and currents. These consequences are even more important when associated to an energetic sea, like the one acting on the occidental Portuguese coast.

The precarious dynamic equilibrium of the Portuguese coast is also fragile due to the fast grow of population. Large part of the existing problems in the coastal zone are, in any way, directly or indirectly connected with the progressive urban occupation of this zone. A strong degradation of the many existing natural protections is the consequence.

Another factor that has to be reconsidered is related to constructions of heavy engineering that are implemented in order to protect locally the littoral. The coastal zone of Portugal is nowadays in a strong artificial process with a growing number of fixed structures (groins, sea-walls, breakwaters, etc.) all along the littoral. Opposite to these conventional structures, a search for alternatives that take more into account the total environmental equilibrium in the Portuguese coastal zone should be undertaken.

Numerical simulations, based on more or less complex mathematical models, are often used nowadays to study the most appropriate measures to be implemented.

This paper presents the work in progress for the definition of the characteristics of an artificial reef for coastal protection and surfing, along a stretch of particular vulnerability of the Portuguese coastal zone. With this regard, theoretical considerations and numerical modeling are used. The computational model solves a non-linear equations system of the Boussinesq type. The main results obtained, so far, are presented and discussed. The results of studies on the functioning of the reef with regard to both the coastal protection and the improvement of surfing conditions allowed to draw the following preliminary conclusions regarding the geometric features of the structure: 1. The presence of a platform under the reef, in the form of delta, is advantageous regarding the protection of the coastal area behind the structure, 2. The angle of the reef should be around 45°.

Keywords: Artificial reefs, coastal protection, surf waves, numerical modelling

1. INTRODUÇÃO

A acção das ondas e das correntes nas zonas litorais dos oceanos é em geral muito intensa, dando origem a movimentos quasi-permanentes dos materiais de fundo aí depositados.

A variabilidade das características das ondas e das correntes traduz-se em significativas alterações na capacidade de transporte do escoamento, o que, em consequência, conduz a modificações mais ou menos irregulares dos fundos e da geometria da costa.

O precário equilíbrio dinâmico das zonas costeiras, sendo afectado pelas mudanças cíclicas dos regimes de onda e da corrente, é ainda fragilizado por perturbações ligadas à actividade humana local

(construções e regularizações costeiras) e longínqua (extracções de sedimentos e obras de regularização fluvial, privando as zonas marítimas das correspondentes contribuições sedimentares).

Nesta conformidade, o conhecimento das características do escoamento associado às ondas e às correntes, e a sua dependência relativamente à batimetria e à geometria da costa, são de primordial importância no dimensionamento de obras marítimas, na previsão das consequentes modificações introduzidas na agitação marítima e ainda no transporte e deposição de sedimentos (Carmo e Marques, 2003; Ten Voorde et al., 2007).

1.1 Processos morfodinâmicos

Até finais da década de 70 foi prática corrente o recurso a modelos matemáticos do tipo linear para simular o efeito da refração produzida pela variação da profundidade na direcção de propagação da crista da onda e o efeito da difracção produzido pelo gradiente da amplitude ao longo da crista. No entanto, e porque se baseiam na teoria linear, esses modelos não devem ser utilizados em condições de água pouco profunda, nomeadamente em regiões costeiras e estuarinas (Carmo, 2004).

Ainda neste período, a previsão da evolução de uma praia era estabelecida empiricamente, a partir da experiência de casos similares ou recorrendo a modelação física em laboratório. Os métodos empíricos baseados em observações objectivas e em comparações com casos similares têm o mérito de serem simples e representativos, mas não permitem fazer previsões quantitativas. Os modelos físicos em laboratório permitem fazer estudos em condições bem controladas, mas colocam vários problemas ao nível das leis de semelhança, para além de serem muito dispendiosos (Carmo e Marques, 2003; Carmo, 2004).

Com um conhecimento teórico mais profundo dos fenómenos envolvidos e uma utilização mais eficiente dos métodos numéricos a par com o grande avanço e divulgação dos computadores, em especial a partir do início da década de 80, tanto em rapidez de processamento como em armazenamento de grande volume de informação, tornou-se possível o recurso a modelos matemáticos mais complexos e, por conseguinte, menos limitativos.

O estudo dos processos morfodinâmicos que ocorrem em regiões costeiras e estuarinas recorrendo a métodos numéricos, para a resolução espacial das equações, baseados em diferenças finitas, em elementos finitos ou ainda em volumes de controlo finitos, é hoje em dia uma prática generalizada e com resultados satisfatórios.

Grande parte das Universidades e Institutos de investigação portugueses possuem já as ferramentas e os conhecimentos científicos indispensáveis para, em conjunto com as instituições responsáveis pelo planeamento e gestão das zonas costeiras, procederem a uma programação e hierarquização das actividades e intervenções necessárias, privilegiando fundamentalmente uma atitude preventiva como forma de antecipar a resolução dos problemas, por oposição à gestão casuística e por norma reactiva que tem caracterizado a generalidade das intervenções na zona costeira portuguesa.

1.2 Agentes desequilibradores da linha de costa

As configurações das zonas arenosas da linha de costa portuguesa são, em geral, caracterizadas por extensas praias contínuas de fundo móvel, essencialmente determinadas pela relação dinâmica entre: i) o padrão de agitação incidente, principal agente modelador e responsável pela capacidade de transporte dos sedimentos, e ii) as características e disponibilidades de areias existentes na zona e das que a ela afluem transportadas fundamentalmente por acção das correntes litorais.

Presentemente, verifica-se uma tendência generalizada e continuada de recuo da linha de costa portuguesa em quase toda a sua extensão. Esta tendência é fundamentalmente atribuída a três factores: i) à subida do nível médio das águas do mar; ii) ao enfraquecimento irreversível das principais fontes aluvionares exteriores às zonas costeiras, em consequência de regularizações fluviais, alterações no aproveitamento dos solos e extracções de areias para a construção, entre outras (Dias, 2003) e iii) a intervenção humana, alterando pontualmente o padrão de agitação local e/ou os trânsitos sedimentares. Também a frequência e características meteorológicas extremas que se têm vindo a observar e que, segundo vários estudos, tenderão a agravar-se no futuro, é um fenómeno preocupante, pois são já hoje bem conhecidas as consequências gravosas deste fenómeno em alguns troços da costa portuguesa (Carmo e Marques, 2003).

A subida do nível médio das águas do mar será porventura o factor que menos contribuirá para a erosão costeira no tempo presente (estima-se que não ultrapasse os cerca de 10% a 15% na costa ocidental portuguesa).

Não há consenso entre os investigadores que se dedicam a esta temática quanto ao estabelecimento de uma relação directa entre o aumento da temperatura e o incremento da emissão de gases com efeito de estufa. Com efeito, como referem vários autores, indicadores razoavelmente fiáveis demonstram a existência de variações naturais da mesma ordem de grandeza relacionadas, por exemplo, com variações na órbita da Terra ou com a actividade vulcânica. Menos incertezas existem, porém, sobre os efeitos de um aumento generalizado da temperatura que, segundo vários investigadores, apontam para valores na ordem de 1,5°C a 4,5°C até ao ano 2100 (ASCE Task Committee, 1992; Kattenberg et al., 1996, in Houghton, 1997; IPCC, 2007; Miranda et al., 2002).

Por efeito de expansão térmica, um aumento

global da temperatura conduz necessariamente a uma subida do nível médio das águas do mar. Estudos conduzidos por Gornitz et al. (1982) (in ASCE Task Committee, 1992), mostram que um aumento da temperatura de 0.4°C num século terá conduzido a uma subida do nível médio de cerca de 5cm. Os efeitos adicionais de degelo das calotes esféricas e as alterações nos padrões globais de circulação oceânica contribuirão para a elevação do nível médio que, segundo vários estudos, se situarão no intervalo de 0,5m a 1,5m até ao ano 2100.

Ainda num contexto de alterações climáticas globais, têm sido recentemente observadas no Atlântico mudanças dos regimes de ventos e tempestades que terão reflexos nos climas de ondas e correntes e, obviamente, consequências ao nível da erosão costeira.

Do ponto de vista hidráulico, são várias as consequências negativas que poderão resultar de uma tão drástica subida do nível médio das águas do mar. Com efeito, aumentarão as amplitudes das marés e os comprimentos de onda (devido ao aumento da celeridade) e aumentarão também os prismas de maré (massas de água que são movimentadas em cada ciclo) e as correntes em baías e estuários. Estas alterações conduzirão, por outro lado, a intrusões salinas, a contaminação de aquíferos e a importantes impactos biológicos sobre habitats costeiros.

Para além da destruição de protecções naturais devido à elevação do nível médio do mar, também os processos erosivos e as consequentes modificações da linha de costa serão fortemente incrementados pela acção de ondas e correntes mais intensas.

De entre as diversas acções de origem antropogénica responsáveis por situações de erosão na costa portuguesa, a que urge pôr termo ou mitigar os seus efeitos, duas existem que poderão e deverão ser implementadas a curto prazo; são elas, uma redução significativa dos montantes de areia extraídos no meio hídrico e a utilização dos volumes dragados por razões de navegação na alimentação de praias. Como referido em Gomes e Pinto (1997), outras acções deverão ser igualmente equacionadas, como sejam: i) proceder a operações de transposição artificial (by-pass) das areias de barlamar para sotamar (norte para sul) nas zonas portuárias onde existem extensos quebramares; ii) encontrar fontes alternativas de sedimentos para alimentação das praias recorrendo a depósitos submarinos, e iii) não autorizar a implantação de novos quebramares extensos para possíveis novos portos de pesca ou de recreio, os quais, a serem construídos, deverão ser inseridos nas

instalações portuárias existentes.

Ainda a nível local, a intervenção humana é com certeza o principal factor responsável pelas alterações na configuração da linha de costa e provavelmente também o principal responsável por parte do seu recuo generalizado e continuado em consequência do efeito cumulativo do conjunto dessas intervenções, isto devido à alteração do padrão de agitação local e à alteração temporária do trânsito sedimentar, que em geral se deverá traduzir em alguma perda de areias para maiores profundidades.

Segundo Ramos (1997), perante a tendência generalizada e continuada de recuo de grande parte da linha de costa portuguesa, uma atitude passiva, de “não intervenção”, conduzirá à diminuição ou desaparecimento de praias semi-encaixadas em costas de areia e rocha e a recuos de grande dimensão em costas arenosas extensas. Por conseguinte, importa reflectir sobre os tipos e formas de intervenção, de modo a não acelerar ainda mais o precário equilíbrio existente.

Sempre que possível, uma vez identificado um problema ou após a ocorrência de um acidente, dever-se-á ter uma atitude pró-natureza, isto é, intervir no sentido de auxiliar a natureza a procurar uma nova situação de equilíbrio. Por conseguinte, deverão excluir-se quaisquer formas de intervenção que contrariem a tendência natural para o estabelecimento de uma configuração dinamicamente estável. Uma atitude contrária conduzirá inevitavelmente, mais cedo ou mais tarde, a rupturas e prejuízos acrescidos com perdas de bens instalados a coberto de uma falsa sensação de segurança.

1.3 Objectivo

É neste contexto que surgem os recifes artificiais multifuncionais como alternativas viáveis a obras pesadas de engenharia. Estas construções têm vindo a ganhar cada vez mais adeptos, existindo hoje em dia alguns exemplos. O recife de Narrowneck, na Austrália, é um exemplo de sucesso (Jackson et al., 2005).

Os estudos que se apresentam neste artigo pretendem servir de base à implantação de possíveis recifes artificiais em trechos da região centro da costa portuguesa particularmente sensíveis. Assim, partindo de uma geometria simples do recife, um delta simétrico, resumem-se, neste trabalho, os estudos realizados até ao momento para a definição da geometria do recife, concretamente para a definição das suas dimensões em planta e em perfil.

Apresentam-se ainda propostas de trabalhos que deverão ser realizados para a determinação da geometria final do recife.

Os estudos de base realizados decorreram no âmbito de uma colaboração entre entidades públicas e privadas para a resolução de uma situação de grande fragilidade resultante da destruição de parte de um cordão dunar da costa Portuguesa, colocando em risco uma unidade industrial localizada na Leirosa, a sul da Figueira da Foz.

Este sistema dunar foi fortemente debilitado em consequência da implantação de um emissário submarino. Numa primeira fase, foi decidido reabilitar aquele cordão dunar através de enchimento com areia e replantação da zona intervencionada, utilizando para o efeito plantas adequadas (Reis e Freitas, 2002).

A ocorrência de um importante temporal, menos de um ano após conclusão das obras, provou ser insuficiente esta forma de estabilização, pelo que se entendeu estudar, numa segunda fase, a viabilidade de uma protecção frontal destacada que permitisse reduzir a acção dinâmica das ondas sobre a linha de costa, em particular sobre o campo dunar e ainda sobre a geometria e volumetria da praia (Carmo et al., 2005; Reis et al., 2005).

Contudo, atendendo à necessidade de uma intervenção urgente e aos custos de uma protecção “pesada” desta natureza, foi decidido procurar sensibilizar e envolver as comunidades locais e outras instituições públicas e privadas para submeter o estudo entretanto realizado a novas fontes de financiamento.

Como medida de recurso, foi na altura implementada uma solução com aplicação de

geotêxteis. No essencial, a metodologia adoptada consistiu no reforço da duna com geotêxteis através da construção de uma barreira de protecção com uma altura aproximada de 8m e um comprimento de 120m (Carmo et al., 2005; Reis et al., 2005), a qual foi em seguida coberta por uma camada de areia, prosseguindo os trabalhos com uma replantação adequada (Figura 1).

Os custos da solução implementada, incluindo a aquisição de material geotêxtil, a escavação e preparação da fundação a partir do nível médio do mar, a preparação e colocação das sucessivas camadas, o transporte e colocação da areia, a replantação, a rega, uma paliçada de protecção e uma escadaria de acesso, importaram em cerca de € 110 000.

Os dados recolhidos através dos procedimentos de monitorização subsequentes permitiram-nos manter algum optimismo em relação ao bom sucesso deste tipo de intervenção, o qual sendo, na altura, pioneiro em Portugal, constituiu um bom exemplo de reabilitação de sistemas dunares, a seguir noutras áreas de zonas costeiras com idênticas fragilidades (Reis et al., 2008).

Os estudos entretanto conduzidos no âmbito de um projecto de investigação permitiram evoluir para o reforço da protecção frontal do cordão dunar através da instalação de um quebra-mar destacado submerso. Considerando os custos envolvidos, foi decidido aproveitar a oportunidade para estudar a viabilidade de uma estrutura que garanta, por um lado, o reforço do sistema de protecção dunar instalado e que permita, por outro, a geração de ondas para a prática de surf (Ten Voorde et al., 2008).



Figura 1 - Processo construtivo da barreira de protecção e replantação da zona intervencionada (Antunes do Carmo, Janeiro 2006)

Figure 1 - Construction process of the protection barrier and replanting the dune system (Antunes do Carmo, January 2006).

Para a realização destes estudos foi necessário recorrer a levantamentos hidro-topográficos e a registos da ondulação obtidos em duas bóias direccionais ao longo de vários meses, complementando assim outros registos já existentes e igualmente utilizados. Foi ainda necessário proceder a uma caracterização dos regimes de ventos e de correntes na zona envolvente. Os custos envolvidos com a obtenção destes dados de campo importaram em cerca de € 25 000.

A construção de uma estrutura submersa utilizando material geotêxtil (recife artificial), como referido acima, deverá resultar mais simples, mais barata e mais funcional que as estruturas convencionais. Complementarmente, deverá ainda garantir os seguintes benefícios:

- Protecção costeira com reduzido impacto visual;
- Geração de ondas com características para a prática de surf;
- Importante enriquecimento ambiental da zona costeira;
- Criação de áreas com interessantes características para práticas de diversão e pesca;
- Benefícios económicos resultantes do aumento de fluxos turísticos.

Prevê-se que o montante necessário para a construção desta estrutura, incluindo a aquisição do material geotêxtil, a preparação dos contentores (tubos), o enchimento destes com areia, o seu transporte e colocação adequada no local, importe em cerca de € 500 000.

Neste momento, não existe ainda uma cultura de surf no local porque as condições não são as mais favoráveis para a prática deste desporto. No entanto, e dado que os surfistas se deslocam frequentemente para os locais onde existem boas condições para o surf, é de prever que se desloquem à Leirosa caso estas condições sejam criadas com a construção do recife.

1.4 Metodologia

Para estudar as características hidrodinâmicas do escoamento junto ao recife, quer em perfil quer em planta, foi utilizado o modelo numérico COULWAVE (Lynett e Liu, 2002a e b), baseado em equações do tipo Boussinesq.

Assim, no ponto 2 descrevem-se sumariamente as características físicas e potencialidades do modelo numérico utilizado. No ponto 3 apresenta-se a geometria de base do recife. Nos pontos 4 e 5 apresentam-se as características geométricas do recife

em perfil e em planta, respectivamente. No ponto 6 apresentam-se os estudos realizados para a definição da distância do recife à linha de costa. Finalmente, no ponto 7 resumem-se as principais conclusões e apresentam-se alguns dos trabalhos em curso.

2. PRINCÍPIOS FÍSICOS E CARACTERÍSTICAS DO MODELO NUMÉRICO ADOPTADO

Os modelos clássicos do tipo Boussinesq, de que é exemplo o modelo de Peregrine (1967), usam aproximações polinomiais quadráticas para a distribuição vertical da velocidade, o que limita as suas aplicações, nomeadamente porque: i) não descrevem com suficiente rigor os efeitos dispersivos em condições de águas intermédias, e ii) apenas propagam correctamente ondas de baixa amplitude relativa. Estas limitações são consistentes com a hipótese fundamental das equações de Boussinesq, a qual considera que os efeitos dispersivos são da mesma ordem de grandeza dos efeitos não-lineares, ou seja, que $O(\varepsilon) = O(\sigma^2)$, com $\varepsilon = a/h$ e $\sigma = h/l \ll 1$ (hipótese fundamental da água pouco profunda).

As propriedades dispersivas dos modelos convencionais de Boussinesq têm vindo a ser melhoradas, através da modificação dos termos dispersivos (Madsen e Sorensen, 1992) ou usando uma velocidade de referência a uma altura previamente especificada (Nwogu, 1993). Esta técnica permite obter um sistema de equações cuja relação de dispersão linear pode ser ajustada de modo a que as características dispersivas em águas intermédias resultem muito próximas das da teoria linear da onda. Liu (1994) e Wei et al. (1995) estenderam a aproximação de Nwogu para ondas fortemente não-lineares, desenvolvendo modelos que podem não só ser aplicados em condições de águas intermédias mas também simular a propagação de ondas com elevados efeitos de interacção não-linear, isto é, $\varepsilon = O(1)$. Em geral, estes modelos resolvem equações com propriedades de dispersão linear bastante rigorosas até $kh \approx 3$ (Nwogu, 1993).

Recorrendo a um polinómio de quarta ordem, Gobbi et al. (2000) desenvolveram um modelo com excelentes propriedades dispersivas até à ordem $kh \approx 6$. O comportamento não-linear foi fielmente conseguido até $kh \approx 3$. Naturalmente que esta melhoria de precisão do modelo em relação às aproximações anteriores foi acompanhada de um significativo esforço computacional.

A aproximação polinomial de quarta ordem

comporta resultados com derivadas espaciais de quinta ordem num sistema de equações muito complexo, requerendo um esquema numérico de resolução igualmente bastante complexo. Madsen e Schaffer (1998) e Agnon et al. (1999) desenvolveram um modelo de equações recorrendo a aproximações polinomiais de ordens ainda mais elevadas.

Todos estes desenvolvimentos têm por objectivo estender a aplicação de modelos de equações do tipo Boussinesq à propagação suficientemente rigorosa de ondas desde águas relativamente profundas até à zona de rebentação.

O modelo matemático resolvido pela estrutura computacional COULWAVE utiliza uma aproximação diferente para a obtenção de um sistema de equações de ordem superior. Em vez de recorrer a uma aproximação polinomial de ordem mais elevada para a distribuição vertical da velocidade, utiliza duas funções quadráticas com valores iguais numa interface que divide a coluna de água em duas camadas. Esta aproximação conduz a um sistema de equações sem as derivadas espaciais de ordem mais elevada resultantes do uso de funções polinomiais de ordem superior.

Neste programa computacional é adoptado um algoritmo de diferenças finitas para a resolução das equações, considerando uma ou duas camadas, sendo a estrutura numérica similar às apresentadas em Wei e Kirby (1995) e Wei et al. (1995). As diferenças entre o modelo aqui apresentado, para o sistema de uma única camada, e o apresentado em Wei et al. (1995) resultam da existência de termos adicionais, devidos à dependência temporal da profundidade, e do tratamento numérico de alguns termos dispersivos não-lineares.

As equações são resolvidas recorrendo a um esquema de previsão-correcção de ordem superior. No passo de previsão utiliza o modelo explícito de terceira ordem em tempo de Adams-Bashford e no passo de correcção recorre ao modelo implícito de quarta ordem em tempo de Adams-Moulton. O passo de correcção implícito utiliza um procedimento iterativo até satisfação de um critério de convergência previamente estabelecido.

Para simplificação das equações do esquema de previsão-correcção, as derivadas temporais da velocidade nas equações da quantidade de movimento são agrupadas na seguinte forma dimensional (Lynett e Liu, 2002a,b):

$$U = u + \frac{z_\alpha^2 - \zeta^2}{2} u_{xx} + (z_\alpha - \zeta)(hu)_{xx} - \zeta_x \left[\zeta u_x + (hu)_x \right] \quad (1)$$

$$V = v + \frac{z_\alpha^2 - \zeta^2}{2} v_{yy} + (z_\alpha - \zeta)(hv)_{yy} - \zeta_y \left[\zeta v_y + (hv)_y \right] \quad (2)$$

significando os índices x, y e t derivadas parciais, ζ a variação da superfície livre e z_α o nível $z = z_\alpha(x, y, t)$ a que é medida a velocidade u_α . Por questões de estabilidade e por serem requeridas menos iterações no processo de convergência, os termos não-lineares de origem dispersiva $\nabla \left[\zeta (\nabla \cdot (hu_\alpha)_t + h_t/\varepsilon) \right]$ e $\nabla \left[(\zeta^2/2) \nabla \cdot u_{at} \right]$ são reescritos na seguinte forma

$$\begin{aligned} \nabla \left[\zeta \left(\nabla \cdot (hu_\alpha)_t + \frac{h_t}{\varepsilon} \right) \right] &= \nabla \left[\zeta \left(\nabla \cdot (hu_\alpha) + \frac{h_t}{\varepsilon} \right) \right]_t - \nabla \left[\zeta_t \left(\nabla \cdot (hu_\alpha) + \frac{h_t}{\varepsilon} \right) \right] \\ \nabla \left(\frac{\zeta^2}{2} \nabla \cdot u_{at} \right) &= \nabla \left(\frac{\zeta^2}{2} \nabla \cdot u_\alpha \right)_t - \nabla (\zeta \zeta_t \nabla \cdot u_\alpha) \end{aligned}$$

em que u_α é o valor da velocidade $u_\alpha(x, y, z_\alpha(x, y, t), t)$ medida ao nível $z = z_\alpha(x, y, t)$, obtendo-se a componente horizontal da velocidade u expressa em termos da velocidade u_α por

$$u = u_\alpha - \sigma^2 \left\{ \frac{z^2 - z_\alpha^2}{2} \nabla (\nabla \cdot u_\alpha) + (z - z_\alpha) \nabla \left[\nabla \cdot (hu_\alpha) + \frac{h_t}{\varepsilon} \right] \right\} + O(\sigma^4)$$

em que $\sigma = h_0/l_0$ é um parâmetro adimensional, representando h_0 e l_0 escalas características dos comprimentos vertical e horizontal, respectivamente.

As equações da etapa de previsão escrevem-se

$$\zeta_{i,j}^{n+1} = \zeta_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{12} (23E_{i,j}^n - 16E_{i,j}^{n-1} + 5E_{i,j}^{n-2}) \quad (3)$$

$$U_{i,j}^{n+1} = U_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{12} (23F_{i,j}^n - 16F_{i,j}^{n-1} + 5F_{i,j}^{n-2}) + 2(F_1)_{i,j}^n - 3(F_1)_{i,j}^{n-1} + (F_1)_{i,j}^{n-2} \quad (4)$$

$$V_{i,j}^{n+1} = V_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{12} (23G_{i,j}^n - 16G_{i,j}^{n-1} + 5G_{i,j}^{n-2}) + 2(G_1)_{i,j}^n - 3(G_1)_{i,j}^{n-1} + (G_1)_{i,j}^{n-2} \quad (5)$$

em que

$$E = -h_t - [(\varsigma + h) u]_x - [(\varsigma + h) v]_y + \left\{ (\varsigma + h) \left[\left(\frac{1}{6}(\varsigma^2 - \varsigma h + h^2) - \frac{1}{2}z_\alpha^2 \right) S_x + \left(\frac{1}{2}(\varsigma - h) - z_\alpha \right) T_x \right] \right\}_x + \left\{ (\varsigma + h) \left[\left(\frac{1}{6}(\varsigma^2 - \varsigma h + h^2) - \frac{1}{2}z_\alpha^2 \right) S_y + \left(\frac{1}{2}(\varsigma - h) - z_\alpha \right) T_y \right] \right\}_y$$

$$F = -\frac{1}{2} \left[(u^2)_x + (v^2)_x \right] - g\varsigma_x - z_\alpha h_{xt} - z_{\alpha t} h_{xt} + (Eh_t + \varsigma h_{tt})_x - [E(\varsigma S + T)]_x - \left[\frac{1}{2}(z_\alpha^2 - \varsigma^2) (uS_x + vS_y) \right]_x - [(z_\alpha - \varsigma) (u T_x + v T_y)]_x - \frac{1}{2} [(T + \varsigma S)^2]_x$$

$$F_1 = \frac{\varsigma^2 - z_\alpha^2}{2} v_{xy} - (z_\alpha - \varsigma) (hv)_{xy} + \varsigma_x [\varsigma v_y + (hv)_y]$$

$$G = -\frac{1}{2} \left[(u^2)_y + (v^2)_y \right] - g\varsigma_y - z_\alpha h_{yt} - z_{\alpha t} h_{yt} + (Eh_t + \varsigma h_{tt})_y - [E(\varsigma S + T)]_y - \left[\frac{1}{2}(z_\alpha^2 - \varsigma^2) (uS_x + vS_y) \right]_y - [(z_\alpha - \varsigma) (u T_x + v T_y)]_y - \frac{1}{2} [(T + \varsigma S)^2]_y$$

$$G_1 = \frac{\varsigma^2 - z_\alpha^2}{2} u_{xy} - (z_\alpha - \varsigma) (hu)_{xy} + \varsigma_y [\varsigma u_x + (hu)_x]$$

e

$$S = u_x + v_y \quad T = h_t + (hu)_x + (hv)_y$$

Todas as derivadas espaciais de primeira ordem são calculadas com precisões de 4ª ordem ($\Delta x^4 = \Delta y^4$), as quais requerem cinco pontos para o seu cálculo. As segundas derivadas espaciais são aproximadas por esquemas centrados de três pontos, resultando, por conseguinte, precisões de 2ª ordem para estas derivadas.

As expressões implícitas de 4ª ordem da etapa de correcção para a superfície livre, ς , e velocidades horizontais, u e v , escrevem-se

$$\varsigma_{i,j}^{n+1} = \varsigma_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{24} (9E_{i,j}^{n+1} + 19E_{i,j}^n - 5E_{i,j}^{n-1} + E_{i,j}^{n-2}) \quad (6)$$

$$U_{i,j}^{n+1} = U_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{24} (9F_{i,j}^{n+1} + 19F_{i,j}^n - 5F_{i,j}^{n-1} + F_{i,j}^{n-2}) + (F_1)_{i,j}^{n+1} - (F_1)_{i,j}^n \quad (7)$$

$$V_{i,j}^{n+1} = V_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{24} (9G_{i,j}^{n+1} + 19G_{i,j}^n - 5G_{i,j}^{n-1} + G_{i,j}^{n-2}) + (G_1)_{i,j}^{n+1} - (G_1)_{i,j}^n \quad (8)$$

O sistema de equações é resolvido começando pela etapa de previsão, obtendo-se em seguida os valores das variáveis u e v via equações (1) e (2), respectivamente. Ambas as equações (1) e (2) resultam num sistema tridiagonal, após substituição das derivadas por diferenças finitas.

Uma vez previstos os valores das variáveis ς , u e v , o passo seguinte consiste em corrigir os valores previstos destas variáveis recorrendo às expressões (6) a (8), sendo os valores finais das componentes da velocidade, u e v , calculados recorrendo de novo às equações (1) e (2), respectivamente. Após cada etapa implícita de correcção são reavaliados os erros, de

modo a verificar se é ou não necessário continuar o processo iterativo de correcção. É utilizado um duplo critério de verificação do erro, o qual consiste em verificar um ou ambos os critérios seguintes de erro local máximo e/ou erro local médio

$$\max \left| \frac{w^{n+1} - w_*^{n+1}}{w^{n+1}} \right| < \frac{\varepsilon}{100} \text{ e/ou } \frac{\sum |w^{n+1} - w_*^{n+1}|}{\sum |w^{n+1}|} < \varepsilon$$

Nestas expressões, w representa qualquer das variáveis ζ , u e v , e w_* representa os valores anteriores destas variáveis no processo iterativo. O valor do erro ε é considerado igual a 10^{-6} .

O processo de rebentação da onda implementado no modelo COULWAVE é baseado num esquema descrito em Kennedy et al. (2000). Por se tratar de um modelo integrado na vertical, não é possível simular os efeitos tridimensionais que se desenvolvem fundamentalmente no plano vertical, em particular o processo de rebentação mergulhante. O esquema implementado considera termos adicionais de dissipação da energia de origem turbulenta, devida ao processo de rebentação, nas equações da quantidade de movimento, através de uma formulação paramétrica simples para a viscosidade turbulenta. Os termos adicionais de dissipação envolvem primeiras e segundas derivadas da velocidade, da profundidade e da viscosidade turbulenta, sendo o mecanismo de dissipação fundamentalmente função de um parâmetro de controlo e de variações temporais da

superfície livre. Apesar de conceptualmente simples e de fácil implementação, este esquema tem revelado uma razoável concordância entre resultados numéricos e experimentais para as diversas condições de agitação, tanto regular como irregular, em que o modelo tem sido aplicado.

3. GEOMETRIA DE BASE DO RECIFE

A escolha da geometria de um recife multifuncional, isto é, de uma estrutura que cumpra simultaneamente a função de proteger a costa e de melhorar as condições de surf nas proximidades da sua zona de implantação, está relacionada globalmente com o valor do ângulo de rebentação (peel angle). A determinação do valor do ângulo de rebentação é função das características da onda de projecto. Por exemplo, quanto maior for o valor da altura de onda menor será o valor do ângulo de rebentação, já que a onda rebenta antes e, conseqüentemente, refracta menos.

Outro aspecto determinante no dimensionamento do recife é a escolha do nível dos utilizadores: amadores, profissionais, etc. Neste estudo pretende-se que as condições de surf sejam as de surfistas amadores. Tal como se descreve em Ten Voorde et al. (2008), isto implica que o tipo de rebentação deve ser mergulhante (ou progressiva) e os valores do ângulo de rebentação devem ser superiores a 40° . Na Figura 2 apresentam-se, de forma esquemática, as geometrias de base do estudo.

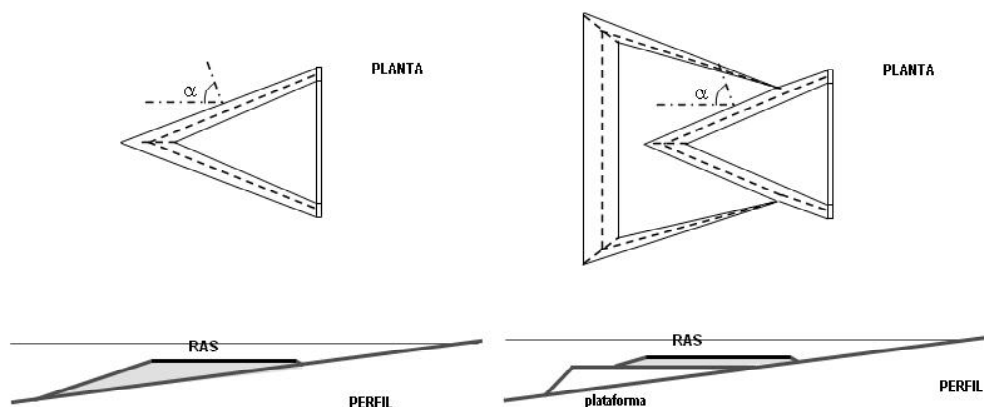


Figura 2 - Geometria de base do recife artificial utilizada no estudo.

Figure 2 – Basic geometry of the artificial reef used in the study.

4. DIMENSÕES EM PERFIL (2D)

As dimensões do recife a definir, no que se refere ao seu perfil, correspondem à profundidade da cota de coroamento da estrutura, s , e ao declive do talude, 1:b, Figura 3. Os declives quer da plataforma quer do tardo do recife devem ser os menores possíveis, de forma a minimizar o volume total de material que compõe o recife.

4.1. Declive do recife

Pretende-se construir uma estrutura tal que as ondas mais frequentes na costa oeste portuguesa rebentem sobre o recife com um tipo de rebentação mergulhante, como se referiu em 3. Assim, utilizando a teoria linear, fizeram-se alguns cálculos para verificar, com diferentes condições de agitação, qual o tipo de rebentação que se obteria para um determinado declive do recife.

Fizeram-se cálculos com declives, 1:b, variáveis entre 1:6 e 1:18 (Ten Voorde et al., 2008) e alturas de onda na rebentação entre 1,0 e 4,0m. O período manteve-se constante e igual a 10,0s, que corresponde a ondas de vaga de ocorrência frequente na costa oeste portuguesa. Com base neste estudo optou-se por um declive de 1:10, já que com este declive a onda de projecto no que respeita ao surf (de 2,0m) apresenta rebentação mergulhante sobre o recife.

4.2. Profundidade do recife

A cota de coroamento do recife é determinada por dois aspectos principais: deve ser suficientemente elevada para que a onda de projecto rebente sobre o recife e deve ser suficientemente profunda para não pôr em risco a segurança dos surfistas.

O primeiro aspecto está relacionado com a altura da onda de projecto e com a profundidade de rebentação. Assim, considerando que a altura de rebentação, H_b , igual a $1,3h$ (Ten Voorde et al., 2008), onde h é a profundidade, para $H_b = 2,0m$ obtém-se uma profundidade aproximada para o recife de 1,5m.

Embora os surfistas tenham os seus próprios critérios de segurança, este factor deve ser tido em conta ao definir a cota de coroamento do recife. Para piscinas de mergulho, as regulamentações da FINA (Corbett et al., 2005) sugerem uma profundidade de submersão de 1.8m. No entanto, os surfistas ao caírem das pranchas não o fazem perpendicularmente, como no mergulho. Assim, esta profundidade pode ser reduzida sem colocar os surfistas em sérios riscos de danos físicos. Com base nestas considerações e nos trabalhos de Corbett e Tomlinson (2002), conclui-se que a cota de coroamento deve ser tal que a altura de água sobre o recife deve ser superior à altura de onda de projecto em águas profundas. Assim, para uma altura de onda de projecto igual 1,5m em águas profundas teremos uma cota de coroamento do recife inferior a 1,5m.

É de referir que a onda de projecto é aqui definida para as condições de baixa-mar, já que este é o nível crítico de maré em termos de profundidade sobre o recife. No entanto, o efeito do nível da maré no valor do ângulo de rebentação, especialmente em locais com grandes desníveis de maré, como é o caso da costa oeste portuguesa, deve ser tido em conta no estudo da geometria do recife.

A profundidade da plataforma deve ser também definida. Para a altura do delta foi definido um valor mínimo de 2,5m (Ten Voorde et al., 2008), o que corresponde a uma profundidade da plataforma de 4,0m (2,5m de altura do delta e 1,5m de coroamento do recife).

Para estudar a influência do nível de maré nos valores dos parâmetros de surfabilidade, foram realizados cálculos em modelo numérico para diferentes níveis de maré (Ten Voorde et al., 2008). Assim, estudaram-se duas profundidades distintas, que correspondem a dois valores de s (ver Figura 3): 1,5m (baixa-mar) e 3,0m (nível médio). Na Tabela 1 apresentam-se os valores do ângulo de rebentação para estes dois níveis e para diferentes valores da altura de onda ao largo, H , e do período, T , e para uma

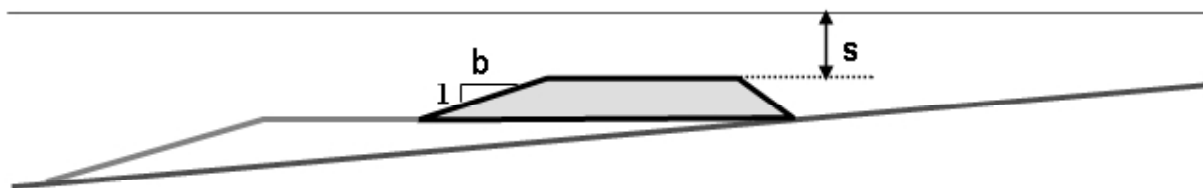


Figura 3 - Geometria em perfil do recife artificial utilizada no estudo.
Figure 3 - Geometry in profile of the artificial reef used in the study.

Tabela 1. Valores do ângulo de rebentação para níveis de maré (valores de s) de 1,5m (a) e 3,0m (b).
Table 1. Values of the peel angle for levels of submergence (s values) of 1,5m (a) and 3,0m (b).

a)	T\H	1.0m	2.0m	3.0m	4.0m	b)	T\H	1.0m	2.0m	3.0m	4.0m
	6s	*	35.7	44.6	-		6s	*	*	*	-
	10s	*	38.6	49.5	X		10s	*	*	*	46.5
	14s	-	41.8	X	X		14s	-	*	42.3	51.1

* = ondas propagam-se sobre o recife sem rebentar

X = ondas rebentam antes de atingir o recife

- = condições raras na costa oeste portuguesa

profundidade da plataforma da 4,0m (baixa-mar) e 5,5m (nível médio).

Como se pode verificar, para o valor mais elevado do nível de maré, a altura de onda para a qual as ondas rebentam sobre o recife é igual ou superior a 3,0m, o que as torna inacessíveis para amadores. Além disso, o ângulo de rebentação apresenta valores demasiado altos (superiores a 40°), o que se traduz em ondas não surfáveis nem por profissionais.

Assim, pode concluir-se que a escolha da cota de coroamento deve ter em conta não só as características das ondas no que se refere à prática de surf em baixa-mar, mas também nos demais níveis de maré, tendo-se em mente ainda o tipo de surfistas para os quais o recife é desenhado.

5. DIMENSÕES EM PLANTA

As dimensões a definir, no que se refere à configuração do recife em planta, correspondem ao ângulo do recife, α , e às dimensões e forma da plataforma, como apresentado na Figura 2.

5.1 Ângulo do recife

O ângulo inicialmente escolhido para a geometria de base, tal como referido em 3., foi de 66° e baseou-se em considerações de ordem teórica (Ten Voorde et al., 2008). No entanto, estas considerações não têm em conta o efeito da concentração de energia que ocorre devido à geometria do recife. Este ângulo também tem grande influência nas correntes que se geram a sotamar do recife e que influenciam a circulação de sedimentos, com impacto na protecção costeira.

Para determinar o ângulo do recife e estudar a sua influência no padrão de circulação fizeram-se simulações com o modelo COULWAVE (Lynett e Liu, 2002a), para um recife sem plataforma. Escolheram-se dois ângulos: $\alpha = 66^\circ$ e $\alpha = 45^\circ$. Consideraram-se diferentes condições de agitação (H e T) e diferentes valores da distância entre a cota de coroamento e a superfície (s). Na Figura 4 apresentam-se os resultados das velocidades para H = 1.5 m e T = 9,0s, no caso de $\alpha = 66^\circ$ e s = 1,5m, e para H = 1,5m e T = 10,0s, no caso de $\alpha = 45^\circ$ e s = 0,5m, respectivamente. O valor de s = 0,5m, embora se encontre abaixo do nível mínimo recomendado (ver ponto 4.2), foi escolhido por corresponder ao utilizado nos ensaios de Ranasinghe e Turner (2006), como se explicará no ponto 6. Embora as condições apresentadas não sejam as mesmas, é possível verificar que no caso de $\alpha = 66^\circ$ não se observam células convergentes no tardo da estrutura, o que ocorre para o caso de $\alpha = 45^\circ$.

Dado que é preferível, em termos de transporte de sedimentos, ter células convergentes no tardo da estrutura, já que estas poderão levar à ocorrência de sedimentação nessa zona, o ângulo de rebentação de 45° parece ser o mais adequado. No entanto, são necessários mais estudos para verificar a influência conjunta do valor do ângulo do recife e do nível de maré nos padrões de velocidades no tardo da estrutura.

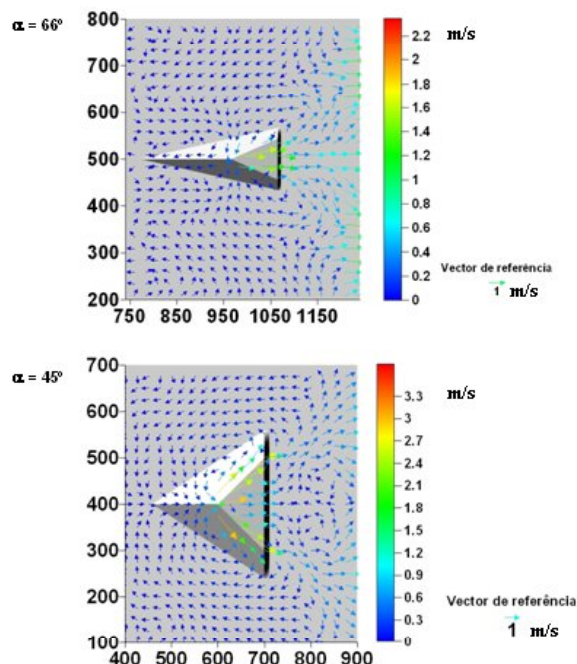


Figura 4 - Campos de velocidades obtidas com o modelo Coulwave para $\alpha = 66^\circ$ e $\alpha = 45^\circ$, considerando $H = 1,5\text{m}$ e $T = 10,0\text{s}$.

Figure 4 - Velocity field obtained by the Coulwave model for $\alpha = 66^\circ$ and $\alpha = 45^\circ$, considering $H = 1,5\text{m}$ and $T = 10,0\text{s}$.

5.2 Dimensões da plataforma

A existência da plataforma e a sua dimensão influenciam a agitação ao redor do recife. Para verificar em que medida isto ocorre, foram feitas simulações numéricas com o modelo COULWAVE (2DH), para uma onda de projecto de $H = 1,5\text{m}$ e $T = 9,0\text{s}$. O ângulo do recife foi mantido em 66° . Na Figura 5 apresentam-se os resultados obtidos, em termos de velocidades em todo o domínio.

Como se pode observar, a plataforma influencia fortemente as velocidades no tardo do recife, levando a que, para os casos estudados, se gerem células convergentes perto da costa. No caso sem plataforma o padrão de velocidades é diferente, com células divergentes nessa zona. No entanto, a presença da plataforma induz velocidades dirigidas para o largo no delta da estrutura, que são prejudiciais para a prática de surf. Dado que, no caso em estudo, o principal objectivo do recife é a protecção costeira, a opção da plataforma deverá ser a escolhida. Para confirmar esta decisão, é necessário verificar o comportamento observado para um maior número de condições de agitação e nível de maré.

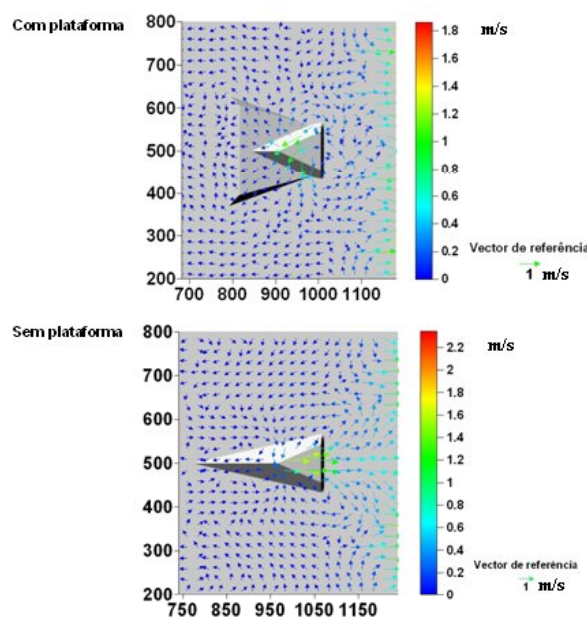


Figura 5 - Campos de velocidades obtidas com o modelo Coulwave para $\alpha = 66^\circ$, $H = 1,5\text{m}$ e $T = 10,0\text{s}$, com e sem plataforma.

Figure 5 - Velocity field obtained by the Coulwave model for $\alpha = 66^\circ$, $H = 1,5\text{m}$ and $T = 10,0\text{s}$, with and without platform.

6. DISTÂNCIA À LINHA DE COSTA

Um parâmetro que não está directamente relacionado com a geometria do recife, mas que é também determinante no que se refere à protecção costeira, é a distância do recife à linha de costa. Ranasinghe e Turner (2006) propuseram um modelo empírico que relaciona a resposta da costa com a distância do recife à linha de costa. De acordo com este modelo, a costa sofreria deposição caso $S_a/SZW > 1,5$ e erosão quando $S_a/SZW < 1,0$, onde S_a é a distância entre o vértice do coroamento da estrutura e a linha de costa e SZW é a largura da zona de rebentação.

Para analisar a influência de S_a no padrão de velocidades no tardo do recife, foram realizadas simulações com o modelo Coulwave (2DH) para uma onda de projecto com $H = 1,5\text{m}$ e $T = 10,0\text{s}$. O ângulo do recife foi mantido em 45° e o declive do recife é de 1:12, tal como nas simulações de Ranasinghe e Turner (2006). A distância entre a cota de coroamento e o nível de repouso é de $0,5\text{m}$. Na Figura 6 apresentam-se as características do caso de estudo, onde S é a distância entre o tardo da estrutura e a linha de costa. As condições testadas encontram-se descritas na Tabela 2.

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 7 em termos do campo de velocidades. Da análise da figura pode verificar-se que, o caso 1, que é similar ao de Ranasinghe e Turner (2006), apresenta o mesmo padrão obtido por este autor, com quatro células circulares. O padrão dos restantes casos é semelhante ao do caso 1, com as mesmas 4 células na retaguarda do recife.

Os resultados obtidos não permitem tirar conclusões sobre qual é a melhor dimensão característica da distância do recife à costa. Note-se que todas as simulações foram realizadas com um ângulo do recife de 45°; tal conduz a que a estrutura seja mais estreita nos casos 2 e 3 que no caso 1, o que pode influenciar os resultados. Assim, é necessário efectuar um maior número de cálculos a fim de poder obter resultados conclusivos.

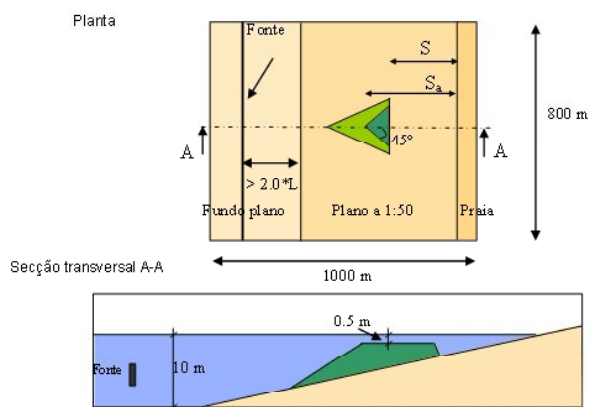


Figura 6 - Geometria do recife artificial utilizada nas simulações numéricas.

Figure 6 - Geometry of the artificial reef used in the numerical simulations.

Tabela 2. Condições dos testes realizados com o modelo Coulwave (2DH).

Table 2. Test conditions using the Coulwave model (2DH).

Teste	Sa (m)	S (m)	T (s)	H (m)	h (m)
1 (a)	250	200	10.0	1.5	10.0
2 (b)	300	200			
3 (c)	250	150			

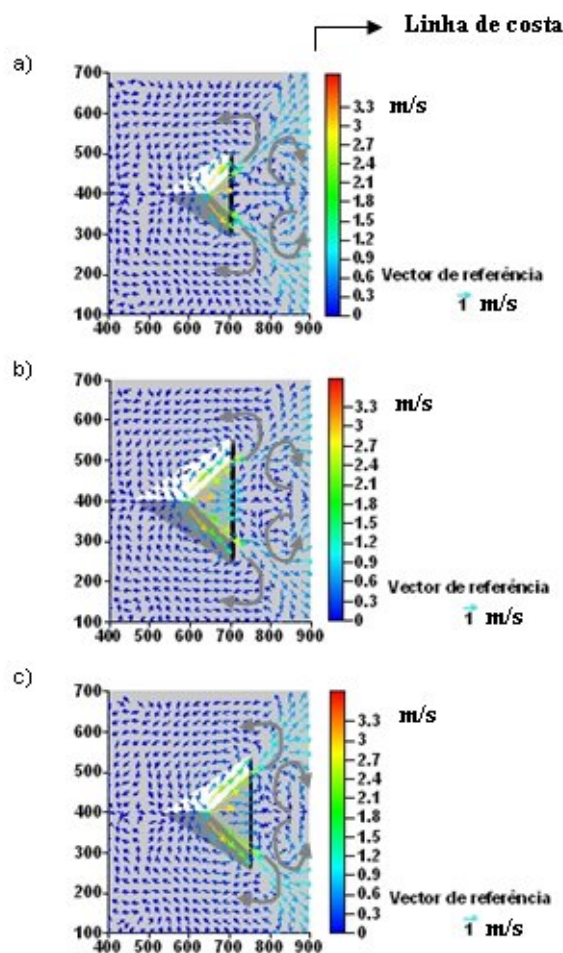


Figura 7 - Campos de correntes ao redor do recife para os casos dos testes 1(a), 2(b) e 3(c).

Figure 7 - Current fields around the reef for the test cases 1(a), 2(b) e 3(c).

7. TRABALHOS FUTUROS

Os resultados dos estudos em modelo numérico sobre o funcionamento do recife realizados até ao momento no que respeita quer à protecção costeira quer à melhoria das condições para a prática de surf permitiram tirar as seguintes conclusões preliminares no que se refere às características geométricas da estrutura:

- A presença da plataforma sob o recife em forma de delta é vantajosa no que se refere à protecção costeira da zona adjacente à estrutura;
- O ângulo do recife deve ser próximo de 45°.

Para confirmar os resultados obtidos, serão realizados ensaios em modelo numérico que permitam

aprofundar o conhecimento da influência do recife no transporte de sedimentos na zona da costa adjacente à estrutura e na melhoria das condições de surf da região. Serão analisados em maior detalhe a influência das seguintes características geométricas do recife:

- Presença da plataforma;
- Cota de coroamento da estrutura;
- Profundidade da plataforma;
- Ângulo do recife;
- Distância do recife à linha de costa.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projecto de investigação “Novos conceitos de protecção para a costa Portuguesa” (PTDC/ECM/66516/2006) financiado pela FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Portugal.

Os autores agradecem ao Instituto de Investigação Interdisciplinar da Universidade de Coimbra, Portugal, o financiamento da Bolsa de Doutoramento da Eng. Mechteld ten Voorde.

BIBLIOGRAFIA

Agnon, Y., Madsen, P.A. & Schaffer, H. (1999) - A new approach to high order Boussinesq models. *Journal of Fluid Mechanics*, 399:319-333.

ASCE Task Committee on Sea-Level Rise and Its Effects on Bays and Estuaries (1992) - Effects of sea-level rise on bays and estuaries. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(1):1-10.

Carmo, J.S.A. (2004) Modelação hidrodinâmica em condições de água pouco profunda. Aplicações. *Revista Recursos Hídricos*, Ed. APRH, 25(2):43-56.

Carmo, J.S.A. & Marques, J.C. (2003) - Proposta de princípios orientadores para o desenvolvimento sustentável da zona costeira Portuguesa. II Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Recife, Brasil.

Carmo, J.S.A., Reis, C.S. & Freitas, H. (2005) - Protecção dunar: Um caso de estudo na costa Portuguesa. III Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Maputo, Moçambique.

Corbett, B.B. and Tomlinson, R. (2002) - Noosa Main Beach Physical Modelling Griffith Centre for Coastal Management Research Report No. 17.

Corbett, B.B., Tomlinson, R.B., Jackson, L.A. (2005) - Reef breakwaters for coastal protection safety aspects and tolerances. *Proceedings of the 17th*

Australasian Coastal & Ocean Engineering Conference (Adelaide, Australia).

Dias, J.M.A. (2003) - Portugal e o Mar: Importância da Oceanografia para Portugal. e-book, in http://w3.ualg.pt/~jdias/JAD/e_b_PortMar.html.

Gobbi, M.F., Kirby, J.T. & Wei, G. (2000) - A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part II. Extension to $O(kh)^4$. *Journal of Fluid Mechanics*, 405:182-210.

Gomes, F.V. e Pinto, F.T. (1997) - A opção “protecção” para a costa oeste portuguesa. In: G. Soares de Carvalho, F. Veloso Gomes e F. Taveira Pinto eds., *Colectânea de Ideias sobre a Zona Costeira de Portugal*. Associação Eurocoast-Portugal, pp. 163-186.

Houghton, J. (1997) - *Global warming the complete briefing*. Cambridge University Press, 251 p.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) - *Climate Change 2007: Synthesis Report*. e-book in: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf, 52p.

Jackson, L.A., Tomlinson, R., Turner, I., Corbett, B., D'Agata, M., McGrath, J. (2005) - Narrowneck artificial reef; results of 4 yrs monitoring and modifications. *Proceedings of the 4th International Surfing Reef Symposium* (Manhattan Beach, California, USA). (www.coastalmanagement.com.au)

Kennedy, A.B., Chen, Q., Kirby, J.T. & Dalrymple, R.A. (2000) - Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runup. Part I: 1D. *Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering*, 126(1):39-47.

Liu, P.L.-F. (1994) - Model equations for wave propagation from deep to shallow water. In: P. L.-F. Liu (ed.), *Advances in Coastal Engineering*, 1:125-157.

Lynett, P. & Liu, P.L.-F. (2002a) - A Multi-Layer Approach to Water Wave Modeling *Journal of Fluid Mechanics*.

Lynett, P. & Liu, P.L.-F. (2002b) - Modeling Wave Generation, Evolution, and Interaction with Depth Integrated, Dispersive Wave Equations - COULWAVE Code Manual, Cornell University Long and Intermediate Wave Modeling Package.

Madsen, P.A. & Sorensen, O.R. (1992) - A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part II: A slowly varying bathymetry. *Coast. Engineering*, 18:183-204.

Madsen, P.A. & Schaffer, H. A. (1998) - Higher order Boussinesq-type equations for surface gravity waves - Derivation and analysis. *Royal Society of*

- London A 356:1-60.
- Nwogu, O. (1993) - Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 119(6):618-638.
- Peregrine, D. H. (1967) - Long waves on a beach. *Journal of Fluid Mechanics*, 27:815-827.
- Ramos, F.S. (1997) - Uma estratégia de intervenção na linha de costa. . In: G. Soares de Carvalho, F. Veloso Gomes e F. Taveira Pinto eds., *Coletânea de Ideias sobre a Zona Costeira de Portugal*. Associação Eurocoast-Portugal, 151-161.
- Ranasinghe, R. & Turner, I.L. (2006) - Shoreline response to multi-functional artificial surfing reefs: A numerical and physical modeling study. *Journal of Coastal Engineering* 53:589-611.
- Reis, C.S. & Freitas, H. (2002) - Rehabilitation of the Leirosa sand dunes, *Littoral 2002: The Changing Coast*. Eurocoast/EUCC (Porto, Portugal, 22-26 Setembro), III:381-384.
- Reis, C.S., Freitas, H. & Antunes do Carmo, J. (2005) - Leirosa sand dunes: A case study on coastal protection. *Proc. IMAM 2005*, in: Guedes Soares, Garbatov & Fonseca (eds), *Maritime Transportation and Exploitation of Ocean and Coastal Resources*
- Reis, C.S., Antunes do Carmo, J. & Freitas, H. (2008) - Learning with nature: A sand dune system case-study (Portugal). *Journal of Coastal Research* (no prelo).
- Miranda, P., Coelho, F.E.S., Tomé, A.R. & Valente, M.A. (2002) - , 20th Century Portuguese Climate and Climate Scenarios, 2005. In: F.D. Santos, K. Forbes & R. Moita (eds.), *Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts and Adaptation Measures SIAM_project*. E-book in: http://www.siam.fc.ul.pt/SIAM_Book/2_ClimateScenarios.pdf, 60 páginas
- Ten Voorde, M., Antunes do Carmo, J.S. & Neves, M.G., (2008) - Designing a Preliminary Multi-Functional Artificial Reef to Protect the Portuguese Coast, *Journal of Coastal Research* (no prelo).
- Ten Voorde, M., Didier, E., Neves, M.G., Anselmo, A., Aveiro, L., Gil, L. & Antunes do Carmo, J.S. (2007) - Modelação numérica de um recife artificial para a prática de surf: Comparação de resultados obtidos por três modelos matemáticos. *5as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Lisboa, Portugal, Outubro.
- Wei, G. & Kirby, J.T. (1995) - A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 120:251-261.
- Wei, G., Kirby, J.T., Grilli, G. & Subramanya, R. (1995) - A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part I. Highly nonlinear unsteady waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 294:71-92.