

QUEBRAMARES DESTACADOS: ANÁLISES COMPARATIVAS DE EFICIÊNCIAS DE PROTEÇÃO NA PRAIA DA VAGUEIRA

DETACHED BREAKWATERS: COMPARATIVE ANALYSES OF PROTECTION EFFICIENCIES AT VAGUEIRA BEACH

Sara C. Simões

Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil

Carla A. Pereira

Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil

Carlos D.B. Coelho

Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil /// CESAM – Centro de Estudos do Ambiente e do Mar

José S. Antunes do Carmo

Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil /// IMAR-CMA Marine and Environmental Research Centre

RESUMO: A região litoral de Portugal tem sido alvo de grande procura tanto para habitação como para turismo e lazer. Sendo a proximidade às praias e ao mar um fator determinante nessa procura, esta zona desenvolveu-se mais do que o interior. Fundamentalmente em consequência desse desenvolvimento e dos défices sedimentares que se têm vindo a acentuar, a zona costeira encontra-se hoje em dia bastante fragilizada. Para minimizar o efeito erosivo, mantendo condições de atratividade e sustentabilidade, o recurso a quebramares destacados submersos, ou recifes artificiais multifuncionais, parece ser uma opção viável.

De modo a avaliar a viabilidade destas estruturas, recorre-se a um modelo numérico com vastas aplicações e resultados conhecidos - o GENESIS. Este modelo permite analisar o comportamento de um quebramar ou associações de quebramares destacados, considerando ondas com diferentes alturas, períodos e direções, sequências de ondas, incluindo os efeitos de refração e difração. A análise do comportamento de diferentes cenários foi realizada através da avaliação da evolução da linha de costa e das respetivas taxas de variação (erosão e acreção) da posição da linha de costa.

O modelo foi testado no litoral português, mais concretamente na praia da Vagueira, em Aveiro. Esta é uma zona que se encontra bastante fragilizada, podendo ser alvo de recuperação da linha de costa com a implementação de estruturas de proteção deste tipo.

Palavras-chave: Genesis, quebramares destacados, recifes artificiais multifuncionais, proteção costeira.

ABSTRACT: The coastal region of Portugal has been in great demand for both permanent living and for tourism and recreation. Being the vicinity to beaches and sea a decisive factor in that quest, this area has developed more than the countryside.

Primarily as a result of this development and the sedimentary deficits that have been increasing, the Portuguese coastal zone is nowadays quite fragile. To minimize the erosive effect, keeping conditions of attractiveness and sustainability, the use of submerged detached breakwaters, or multifunctional artificial reefs, seems to be a viable option.

In order to assess the viability of these structures, a numerical model with broad applications and widely known results is used - the GENESIS. This model allows to analyze the behavior of a breakwater or associations of detached breakwaters, waves of different heights, periods and directions, wave sequences, refractions and diffraction effects and the shoreline evolution.

The model was tested on the Portuguese coast, specifically in the Vagueira beach at Aveiro. This is a quite fragile zone that can be targeted by recovery of the shoreline with implementation of such protection structures.

Keywords: Genesis, detached breakwaters, multifunctional artificial reefs, costal protection.

1. INTRODUÇÃO

As fragilidades da zona costeira devem-se essencialmente a causas antrópicas, como intervenções de regularização fluvial, construções de barragens, extrações de inertes e alterações no aproveitamento do solo. Estes fatores são os principais responsáveis pela redução da quantidade de sedimentos em trânsito ao longo da costa. Outras causas do recuo da linha de costa devem-se a alterações pontuais dos padrões de agitação local e a movimentações sedimentares. A contínua destruição de dunas e da sua vegetação pelo pisoteio e pela construção de habitações e parques de estacionamento improvisados impedem que haja acumulação de areias, contribuindo fortemente para a instabilidade das defesas naturais. Atualmente, já existe uma preocupação para repor sedimentos nas praias, quer seja por alimentação artificial das mesmas quer seja pela construção de obras de proteção, de que são exemplos algumas construções de quebramares destacados ao longo da costa.

Os quebramares podem assumir várias formas e podem ser permanentemente submersos (recifes), permanentemente expostos ou visíveis entre marés. Podem ser estruturas do tipo aderente (enraizados e/ou encostados à costa), do tipo destacado (construídos a certa distância da costa), ou podem ter uma das extremidades ancorada em terra (adquirindo normalmente forma encurvada ou em L). Em todos os casos, a profundidade da estrutura, o seu tamanho e a sua posição relativamente à linha de costa determinam o nível de proteção fornecida (Antunes do Carmo *et al.*, 2011).

O presente artigo tem como principal objetivo analisar quais os tipos de estruturas que melhor se adaptam para efeitos de proteção e manutenção da praia da Vagueira. A escolha deste local teve em conta a grande fragilidade da zona, encontrando-se a mesma classificada como "muito vulnerável" em termos de problemas de erosão (Veloso Gomes *et al.*, 2004).

Dados de 1973 mostram que a Vagueira ainda tinha uma duna bem desenvolvida, que protegia toda a frente urbana. No entanto, com o passar do tempo, essa duna desapareceu e surgiu a necessidade de construir uma obra de defesa aderente. Esta obra, bem como o esporão da Vagueira, têm limitado a evolução desta zona do litoral impedindo que o mar avance sobre a zona urbana (Coelho, 2005).

Apesar da praia em frente à obra de defesa aderente já se encontrar muito próxima do seu equilíbrio estático, o estudo foi desenvolvido nesta zona com o objetivo de aumentar a área da praia e, consequentemente, melhorar as suas características balneares, contribuindo igualmente para proteção da envolvente urbana. Neste sentido, testaram-se estruturas submersas, entre as quais se incluem os recifes artificiais multifuncionais, com diferentes configurações.

1.1. Recifes artificiais instalados

Por todo o Mundo, determinados tipos de recifes artificiais, em geral instalados em águas intermédias a profundas, são vistos como uma ferramenta de gestão para sustentar a pesca costeira e para preservar a vida marinha. Em Portugal, os mesmos tipos de recifes artificiais são mais utilizados na zona do Algarve, no sentido de aproveitar o potencial produtivo das correntes marinhas superficiais, por serem ricas em nutrientes, e por ser uma zona propícia a acidentes naturais costeiros. Esta zona portuguesa conta com cerca de 43 km² de recifes artificiais, sendo uma dos maiores da Europa (Whitmarsh *et al.*, 2008).

Mais recentemente têm sido propostos recifes artificiais multifuncionais (MFAR - *Multifunctional artificial reefs*) tipicamente instalados em condições de águas pouco profundas, com objetivos de proteção costeira, em particular de praias e dunas, e geração de ondas para a prática de *surf*. Neste âmbito, surgem como exemplos, o recife artificial em Cable Station (próximo de Perth), construído em 1999, e o recife artificial na praia de Narrowneck (Gold Coast), construído em 2000, ambos situados na Austrália.

Em 2001 foi construído na Califórnia (Estados Unidos) um recife artificial na praia de Dockweiler, que acabou por ser removido em 2008 por não ter cumprido os objetivos pretendidos. Na costa sul de Inglaterra, zona de Boscombe, teve início em 2008 a construção de um recife com objetivo de aumentar o número de visitantes, de modo a alargar a temporada turística e promover o crescimento económico; contudo, nos dois anos seguintes à construção do recife, este sofreu danos significativos, o que inviabilizou os efeitos de proteção, nomeadamente em termos de acumulação de sedimentos (Antunes do Carmo, 2013).

Na Nova Zelândia, em Maunganu Beach, foi construído em 2008 um recife multifuncional com o recurso a sacos de material geotêxtil preenchidos com areia com

O texto deste artigo foi submetido para revisão e possível publicação em setembro de 2013, tendo sido aceite pela Comissão de Editores Científicos Associados em outubro de 2013. Este artigo é parte integrante da *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 34, Nº 2, 25-40, novembro de 2013.
© APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh34n2-3

o objetivo principal de melhorar as condições locais para a prática de *surf*. Na Índia, em 2010, foi construído o recife multifuncional de Kovalam, que se mostrou um caso de grande sucesso ao evitar a erosão costeira local e onde se geraram ondas consideradas ótimas para a prática de *surf* (Simioni e Esteves, 2010).

Em Portugal ainda não existem recifes multifuncionais (MFAR), embora se assista ao aparecimento de diversos estudos para a sua implementação em algumas zonas da costa atlântica, particularmente em locais que carecem de medidas urgentes de proteção e que se julga poderem vir a ser beneficiados com boas condições para a prática de *surf*. São disso exemplos a zona costeira de São Pedro do Estoril (Mendonça *et al.*, 2010), a zona da Leirosa, a sul da Figueira da Foz (Voorde *et al.*, 2009; Antunes do Carmo *et al.*, 2011; Mendonça *et al.*, 2012) e a praia da Vagueira (Simões, 2013; Di Bona *et al.*, 2013).

1.2. Recifes artificiais multifuncionais

Os recifes artificiais multifuncionais (MFAR) são um caso particular de recifes artificiais e representam um conceito inovador para a proteção costeira, ou seja, além de terem esta função, ainda permitem a criação de condições favoráveis para a prática de *surf*, favorecem outras práticas desportivas, como o mergulho e pesca, e aumentam o valor ambiental da área onde estão localizados. Os MFAR fornecem uma perfeita comodidade visual e podem oferecer benefícios turísticos e económicos à região onde se encontram (Antunes do Carmo *et al.*, 2011).

A construção de um MFAR pode desempenhar um papel importante em diferentes aspetos de proteção costeira, nomeadamente:

- prevenção da erosão costeira;
- aumento, em combinação ou não com alimentação artificial de areia, da estabilidade das praias.

Estes tipos de proteção costeira são possíveis porque um MFAR pode (Antunes do Carmo *et al.*, 2011):

- reduzir a carga da onda na costa por meio de uma série de processos de transformação da onda que ocorrem sobre a estrutura (reflexão, refração e dissipação de energia);
- criar células de circulação de correntes atrás do recife, que podem causar assoreamento no litoral;
- ser usado para regular a ação das ondas, criando boas ondas *surfáveis*, por efeitos de refração e difração.

2. METODOLOGIA

A componente de modelação numérica do presente estudo será efetuada recorrendo ao *software* CEDAS, *Coastal Engineering Design & Analysis System*. Este *package* apresenta uma série de módulos de *design* que permitem analisar os diversos processos que ocorrem na zona costeira (Hanson, 1987).

De entre os modelos disponíveis, foi utilizada a aplicação NEMOS, *Nearshore Evolution Modeling System*, incluída no módulo *Beach*. Esta aplicação é útil para simular a evolução da linha de costa com a informação relativa à batimetria e à cartografia da zona de estudo, bem como às condições de agitação (Hanson e Kraus, 1991).

A ferramenta GRID GENERATOR da aplicação NEMOS permite importar informação do terreno a modelar, sob a forma de coordenadas, e transformar essa mesma informação em grelhas regulares a utilizar posteriormente no modelo de propagação de ondas (STWAVE) e no modelo de simulação da evolução da linha de costa (GENESIS) (Hanson e Kraus, 1991).

O modelo da aplicação NEMOS responsável pela simulação da propagação do clima de agitação de condições ao largo (*offshore*) para a proximidade da costa (*nearshore*) é o STWAVE, *Steady-State Spectral Wave Model* (Hanson e Kraus, 1991).

2.1. STWAVE

O STWAVE, *Steady-State Spectral Wave Model*, é um modelo de diferenças finitas, formulado numa grelha de células quadradas. A grelha do STWAVE funciona sobre um sistema de coordenadas locais e é orientada para a costa, sendo a sua origem fixada na fronteira ao largo.

O objetivo dos modelos que simulam a propagação das ondas desde condições ao largo até condições junto à costa, consiste na descrição quantitativa das mudanças que ocorrem nos parâmetros da onda para as duas condições, (altura, frequência, direção e espectro de energia das ondas).

O ficheiro contendo a informação relativa ao espectro direcional de cada tipo de onda é lido na fronteira oceânica do domínio de modelação. As características da onda são processadas, através de formulações correspondentes aos fenómenos de propagação de ondas, desde o largo até à profundidade de fecho. A informação relativa às características de cada tipo de onda na profundidade de fecho é, no final da simulação, recolhida em ficheiros que são utilizadas posteriormente no GENESIS como um dos ficheiros de entrada (Hanson e Kraus, 1991).

A profundidade de fecho, h_c , é a profundidade a partir da qual o perfil da praia não sofre modificações

significativas. Até à profundidade de fecho, o perfil da praia sofre modificações sazonais, ou devido a temporais, verificando-se grandes transferências transversais de sedimentos, isto é, entre a praia emersa e a praia submersa.

2.2. GENESIS

O GENESIS, *GENeralized model for Simulating Shoreline change*, simula as alterações da linha de costa de uma determinada região, sendo capaz de determinar os avanços e recuos da mesma.

O GENESIS permite a simulação da alteração da linha de costa durante um longo período, de meses a anos, causada principalmente pela ação das ondas. A escala física do comprimento horizontal do modelo varia entre cerca de um e dez quilómetros. O modelo pode ser usado para simular as alterações no litoral com uma grande variedade de configurações de praia e de estruturas na costa (transversais, longitudinais, emersas ou submersas), especificadas pelo utilizador (Hanson, 1987).

O GENESIS pode ser considerado como sendo dois modelos num só (modelo bifásico), pois um propaga as ondas desde a zona de rebentação até à linha de costa, e o outro é responsável pelo cálculo do transporte longitudinal de sedimentos e pelas alterações da linha de costa através de avaliações de balanços de massa (Hanson e Kraus, 1991).

A rebentação das ondas incidentes com um dado ângulo provoca um transporte longitudinal ao longo da linha de estudo e os gradientes entre os volumes que entram e saem num determinado trecho fazem avançar ou regredir a correspondente linha de costa. Segundo Hanson (1989), no GENESIS, o volume de sedimentos transportado é calculado pela seguinte expressão:

$$Q_l = H_{bs}^2 C_{gb} \left(a_1 \sin 2\alpha_b - a_2 \cos \alpha_b \frac{\partial H_{bs}}{\partial x} \right) \quad (1)$$

onde os parâmetros adimensionais a_1 e a_2 são dados por:

$$a_1 = \frac{K_1}{16 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1-p) (1.416)^{2.5}} \quad (2)$$

$$a_2 = \frac{K_2}{8 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1-p) \tan \beta (1.416)^{2.5}} \quad (3)$$

em que H_{bs} é a altura da onda significativa na zona de rebentação [m]; C_{gb} é a celeridade na zona de rebentação [m/s]; α_b é o ângulo entre a crista da onda na rebentação e a linha de costa [°]; $\tan \beta$ é o declive do fundo [m]; K_1 e K_2 são coeficientes empíricos de calibração do modelo [-].

A constante de valor 1.416, presente nos coeficientes a_1 e a_2 , serve para converter os parâmetros K_1 e K_2 , de modo a que estes deixem de estar ligados a valores de H_{rms} (raiz quadrada da altura média) e passem a ser referidos em relação à altura de onda significativa.

O primeiro termo da equação (1), $\left[H_{bs}^2 C_{gb} (a_1 \sin 2\alpha_b) \right]$ é conhecido como fórmula de CERC (U.S. Corp of Engineers, 2006) e trata o transporte litoral produzido pela rebentação das ondas incidentes, enquanto o segundo termo $\left[H_{bs}^2 C_{gb} \left(a_2 \cos \alpha_b \frac{\partial H_{bs}}{\partial x} \right) \right]$ está relacionado com a altura de onda na rebentação e com o gradiente de transporte litoral $\left[\frac{\partial H_{bs}}{\partial x} \right]$.

2.3. Capacidades e limitações do modelo

O modelo GENESIS foi concebido para prever a tendência do posicionamento da linha de costa a longo prazo, partindo de uma posição inicial. Como resumo das principais características do modelo, são seguidamente enumeradas as suas capacidades e limitações (Hanson e Kraus, 1991).

Capacidades:

- Vasta e arbitrária combinação entre construções de proteção e abrigo marítimas, como esporões, quebramares, quebramares destacados, muros e revestimentos longitudinais aderentes, e alimentações de praia;
- Capacidade de criação de estruturas compostas, por exemplo em forma de T ou Y;
- Previsão de difração em estruturas marítimas;
- Simulações com escalas geográficas e temporais de dimensões consideráveis;
- Introdução arbitrária de alturas, períodos e direções de ondas;
- Introdução de múltiplos comboios de séries de ondas, de origens independentes;
- Transmissão de ondas através de quebramares destacados.

Limitações:

- O transporte longitudinal é o único responsável pela movimentação da linha de costa, não estando previstas situações onde o transporte perpendicular possa ser dominante, tais como situações de tempestade;

- O perfil de fundo não se altera com o tempo e move-se paralelamente a si próprio;
- Para lá da profundidade de fecho, h_c , assume-se que o perfil não sofre alterações e deixa de se movimentar;
- Ao mesmo tempo que a parte imersa do perfil se movimenta perpendicularmente a si próprio, a parte emersa acompanha esse movimento, ou seja, a altura da berma d_b acompanha a altura h_c , profundidade de fecho (Figura 1);
- O transporte longitudinal é provocado única e exclusivamente por ondas, e correntes induzidas pelas ondas e varia consoante o ângulo de incidência das mesmas. O facto do modelo apenas considerar correntes geradas por ondas e não ter em conta outro tipo de correntes, tais como ondas de maré ou induzidas por ventos locais, faz com que este seja muitas vezes insuficiente para uma simulação precisa;
- O modelo presume a existência de uma forte tendência na evolução da linha de costa, onde o transporte longitudinal é a principal causa dessa tendência. Caso não exista essa tendência na evolução da linha de costa, o modelo não deve ser aplicado.

2.4. Dados experimentais

Os dados batimétricos utilizados para a definição da área a modelar foram recolhidos da carta de série de pescas do Instituto Hidrográfico, nº 24202 (Aveiro-Peniche), editada em Outubro de 2000, à escala de 1:150000 e utilizando o sistema de coordenadas Datum Europeu de 1950. Complementando os dados batimétricos, foram ainda utilizados os dados cartográficos da carta militar Série M888, nº 195, à escala de 1:25000, do Instituto Geográfico do Exército, representada segundo a projeção de Gauss, elipsóide internacional, Datum de Lisboa. A conjugação da informação batimétrica e cartográfica permitiu definir o domínio espacial de modelação para o modelo a utilizar.

A grelha para o modelo GENESIS foi definida de sul para norte, permitindo analisar 5600 m de linha de costa. Esta distância foi definida tendo em conta as obras existentes na zona em estudo. A grelha de pontos utilizada na modelação tem uma malha quadrada com 10 m de lado.

Para determinar a profundidade de fecho, h_c , existem várias expressões, sendo a proposta por Hallermeier (1978) uma das mais utilizadas:

$$h_c = 2.28H_s - 68.5 \left(\frac{H_s^2}{gT_{H_s}^2} \right) \quad (4)$$

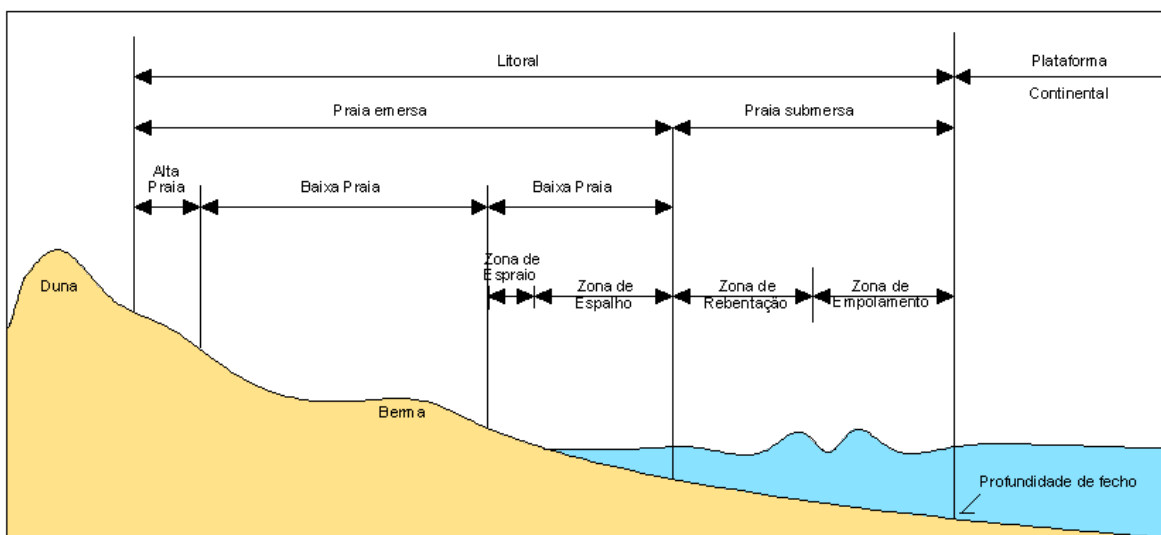


Figura 1 – Esquema representativo da cota de berma, d_b , e da profundidade de fecho, h_c . Imagem adaptada de <http://www.aprh.pt/rgci/glossario/praias.html> (consultado em outubro de 2013).

em que H_s é a altura da onda significativa que é excedida 12 horas por ano [m]; T_{H_s} é o período associado à altura da onda significativa [s] e g é a aceleração da gravidade [m/s²].

Outra expressão desenvolvida para estimar a profundidade de fecho foi proposta por Birkemeier, em 1985. Este autor modificou a equação de Hallermeier com base num estudo realizado em Duck, North Carolina, e chegou à seguinte expressão (5) para a profundidade de fecho (Nicholls *et al.*, 1998):

$$h_c = 1.75H_s - 57.9 \left(\frac{H_s^2}{gT_{H_s}^2} \right) \quad (5)$$

A equação de Birkemeier produz valores para a profundidade de fecho inferiores aos obtidos pela equação de Hallermeier, devido ao facto de serem mais baixos os coeficientes que afetam a altura da onda e a declividade da onda.

No modelo GENESIS, a profundidade de fecho é definida de uma forma muito simples, pela equação (6):

$$h_c = 2H_{mas} \quad (6)$$

em que H_{mas} é a altura da onda significativa máxima anual do local em estudo (Hanson, 1989).

Considerando os valores registados entre maio de 2012 e maio de 2013 pela boia ondógrafo de Leixões, disponibilizados pelo Instituto Hidrográfico, considerou-se para a altura máxima significativa e para o período dessa mesma onda, respetivamente, 8 m e 15 s. Tendo por base estas características da onda, na Tabela 1 encontram-se os valores calculados para a profundidade de fecho segundo os autores referidos acima.

Tabela 1 – Valores obtidos para a profundidade de fecho (m).

Hallermeier	Birkemeier	GENESIS
16.3	12.3	16.0

Estes resultados vão ao encontro dos valores obtidos por Coelho (2005), em que, para uma onda com aproximadamente 8.1 m de altura máxima significativa,

chegou a valores de h_c iguais a 16.0 m pela fórmula de Hallermeier e a 12.1 m pela fórmula de Birkemeier.

2.5. Calibração do modelo

Para proceder à simulação da evolução da linha costa há parâmetros que têm de ser previamente calibrados e analisados para o caso em estudo.

O clima de agitação testado (Tabela 2) teve por base resultados obtidos por Coelho e Veloso-Gomes (2003), após análise dos registos na boia de Leixões entre 1981 e 2001.

Tabela 2 – Clima de agitação testado – percentagem de ocorrência em função das alturas de onda e direção de proveniência consideradas (valores adaptados de Coelho e Veloso-Gomes, 2003).

Altura e período de onda	Direção da onda			
	NNW	NW	WNW	Σ
$H_s=0.5$ m; $T_{H_s}=7.6$ s	5	12	10	27
$H_s=1.5$ m; $T_{H_s}=8.8$ s	8	22	16	46
$H_s=2.5$ m; $T_{H_s}=10.0$ s	5	13	9	27
Σ	18	47	35	100

Após a obtenção das características das ondas na profundidade de fecho, através do STWAVE, procedeu-se à calibração do GENESIS.

O GENESIS utiliza três coeficientes de calibração:

- k_1 e k_2 – relacionam o transporte de sedimentos com a deposição dos mesmos;
- K_T – relaciona a altura da onda antes e após o quebramar destacado.

Complementarmente, o modelo requer o conhecimento das taxas de recuo nas fronteiras do domínio espacial estabelecido, ou seja, a norte e a sul da zona de estudo. As taxas de recuo da linha de costa para o trecho em estudo foram consideradas diferentes, a norte e a sul da zona de estudo, sendo que a norte se considerou uma taxa de recuo de 6.6 m/ano e a sul se considerou uma taxa de recuo de 10 m/ano para conseguir resultados médios na extensão a sul do esporão da Vagueira de 6.7 m/ano (Pereira e Coelho, 2011).

No GENESIS, na definição do perfil ativo, considerou-se a profundidade de fecho e a altura da berma

propostas por Sena (2010) e adotadas por Pereira (2012), correspondendo respetivamente a 12 m e a 4 m. O valor da profundidade de fecho vai ao encontro do calculado pela expressão de Birkemeier (expressão 5). A dimensão média dos sedimentos foi considerada igual a 0.5 m (SNIRL0) e os valores de k_1 e k_2 foram os mais adequados ao local de estudo de modo a respeitar as taxas de recuo a norte e a sul da zona de estudo. Os valores de K_T tiveram em consideração a posição dos quebramares destacados, ou seja, sendo emersos o coeficiente toma o valor de 0 e se forem submersos toma o valor de 0.25. Este último foi admitido como o máximo razoável em função dos resultados obtidos. A metodologia de calibração utilizada no presente trabalho baseou-se na tentativa de obtenção de taxas de recuo, o mais próximas possível das referidas para a área de estudo. O modelo considerou-se calibrado após a realização de vários testes e os valores mais adequados dos parâmetros foram adotados nas simulações e são apresentados na Tabela 3 (Simões, 2013).

As obras de defesa costeira presentes no trecho em estudo foram incorporadas no modelo, após considerações relacionadas com a posição e permeabilidade, permitindo estabelecer os resultados de calibração mais adequados. O esporão da Costa Nova tem aproximadamente 150 m de comprimento e a sua permeabilidade foi considerada igual a 0.7 para ajustar os valores de sedimentos em transporte longitudinal à realidade do local. O esporão da Vagueira tem aproximadamente 130 m de comprimento e a sua permeabilidade foi considerada igual a 1, assumindo-se que atualmente este esporão não retém sedimentos a barlar. A obra de defesa da frente urbana tem uma extensão aproximada de 650 m.

Uma vez concluída a calibração do modelo testou-se a introdução de estruturas marítimas, ou seja, de quebramares destacados. Os testes foram realizados para três profundidades distintas, para diferentes distâncias ao esporão da Vagueira e para diferentes configurações (retilíneo e em "V") e dimensões da estrutura. Neste estudo optou-se por testar um único quebramar destacado em cada teste, pois Simões (2013) concluiu que uma combinação de duas ou três estruturas era uma opção pouco eficaz, já que a estrutura colocada mais a norte da frente urbana provocava a acumulação da maioria dos sedimentos em transporte e limitava a função das estruturas colocadas mais a sul.

A Figura 2 representa o trecho costeiro em estudo. Nesta figura estão representadas as estruturas de proteção existentes no local bem como o aspeto da linha de costa.

Tabela 3 – Quadro-resumo dos valores adotados na calibração do modelo GENESIS.

Parâmetros de Calibração	Valores
k_1	0.02
k_2	0.01
K_T	0; 0.25
Profundidade de fecho	12 m
Cota de berma	4 m
Taxa de recuo a norte	6.6 m/ano
Taxa de recuo a sul	10 m/ano
Dimensão média dos sedimentos	0.5 mm

3. APLICAÇÕES E RESULTADOS

O esquema da Figura 3 representa o tipo de estrutura simulada em cada teste. Testaram-se dois tipos de estruturas: quebramares retilíneos e quebramares em forma de "V"; estas estruturas foram testadas para três profundidades (5 m, 6.5 m e 8 m) fazendo variar em cada uma a distância entre o esporão da Vagueira e o quebramar destacado e ainda a extensão do mesmo.

Cada teste foi realizado para $K_T = 0$ e para $K_T = 0.25$, ou seja, para quebramares emersos e para quebramares submersos, embora com reduzido grau de submersão.

Nas Tabelas 4, 5 e 6, além das características de cada teste, é possível analisar os resultados obtidos para as taxas de recuo/avanço em cada um dos segmentos identificados na Figura 3. Os valores com sinal negativo (-) dizem respeito a situações de erosão; os valores sem sinal, ou seja, valores positivos (+) dizem respeito a situações de acumulação de sedimentos.

Os resultados de cada teste em termos de taxas de recuo/avanço da linha de costa (Tabelas 4, 5 e 6) para cada segmento definido são, respetivamente:

- Média da diferença das posições das linhas de costa final e inicial numa extensão de 480 m a sul do esporão da Vagueira;
- Média da diferença das posições das linhas de costa final e inicial numa extensão de 650 m (obra de defesa aderente);
- Média da diferença das posições das linhas de costa final e inicial numa extensão de 480 m a norte da obra de defesa urbana.

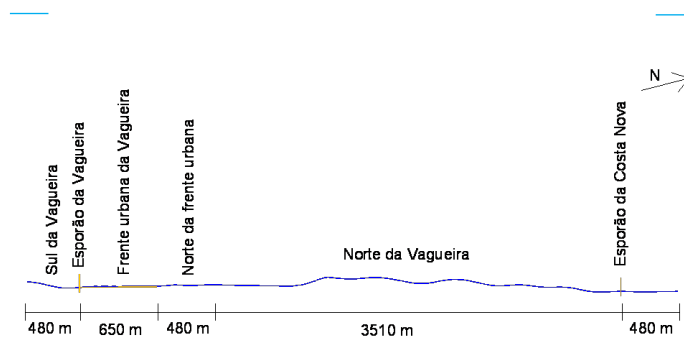


Figura 2 – Trecho costeiro em estudo. Situação inicial para todos os testes.

Tabela 4 – Resultados das taxas de recuo/avanço da linha de costa (m/ano) para quebramares a uma profundidade de 5 m.

Características	Taxas de recuo/avanço (m/ano) para $K_T=0$						Taxas de recuo/avanço (m/ano) para $K_T=0.25$																	
	Quebramar retilíneo			Quebramar em V			Quebramar retilíneo			Quebramar em V														
Distância ao esporão: 120m	Teste 15						Teste 16						Teste 15 K_T						Teste 16 K_T					
Extensão do quebramar: 120 m																								
Profundidade: 5 m	-10.64	3.78	0.68	-8.56	2.40	0.69	-10.52	3.78	0.69	-7.88	1.52	0.27												
Distância ao esporão: 120m	Teste 12						Teste 11						Teste 12 K_T						Teste 11 K_T					
Extensão do quebramar: 240 m																								
Profundidade: 5 m	-15.38	7.48	0.58	-13.72	6.18	0.59	-14.99	7.19	0.58	-13.55	6.05	0.60												
Distância ao esporão: 240m	Teste 17						Teste 18						Teste 17 K_T						Teste 18 K_T					
Extensão do quebramar: 240 m																								
Profundidade: 5 m	-14.39	6.83	1.17	-13.17	6.15	1.09	-14.16	6.70	1.11	-12.59	5.14	0.67												

Tabela 5 – Resultados das taxas de recuo/avanço da linha de costa (m/ano) para quebramares a uma profundidade de 6.5 m.

Características	Taxas de recuo/avanço (m/ano) para $K_T=0$						Taxas de recuo/avanço (m/ano) para $K_T=0.25$																	
	Quebramar retilíneo			Quebramar em V			Quebramar retilíneo			Quebramar em V														
Distância ao esporão: 60 m	Teste 10						Teste 8						Teste 10 K_T						Teste 8 K_T					
Extensão do quebramar: 240 m																								
Profundidade: 6.5 m	-9.79	3.24	0.70	-9.33	2.86	0.71	-9.74	3.20	0.70	-9.27	2.82	0.71												
Distância ao esporão: 120m	Teste 6						Teste 4						Teste 6 K_T						Teste 4 K_T					
Extensão do quebramar: 120m																								
Profundidade: 6.5 m	-10.62	3.93	0.71	-7.93	1.87	0.63	-10.54	3.86	0.71	-7.71	1.75	0.72												
Distância ao esporão: 120m	Teste 1						Teste 2						Teste 1 K_T						Teste 2 K_T					
Extensão do quebramar: 240m																								
Profundidade: 6.5 m	-11.75	4.85	0.65	-10.68	4.79	0.64	-11.67	4.79	0.64	-10.52	3.72	0.67												
Distância ao esporão: 120m	Teste 5						Teste 3						Teste 5 K_T						Teste 3 K_T					
Extensão do quebramar: 480m																								
Profundidade: 6.5 m	-15.43	6.85	1.48	-13.85	5.40	1.67	-15.31	6.79	1.41	-13.65	5.66	1.72												
Distância ao esporão: 240 m	Teste 9						Teste 7						Teste 9 K_T						Teste 7 K_T					
Extensão do quebramar: 240m																								
Profundidade: 6.5 m	-12.50	5.20	0.65	-10.04	3.92	0.88	-12.53	5.20	0.64	-9.98	3.89	0.88												

Tabela 6 – Resultados das taxas de recuo/avanço da linha de costa (m/ano) para quebramares a uma profundidade de 8 m.

Características	Taxas de recuo/avanço (m/ano) para $K_T=0$						Taxas de recuo/avanço (m/ano) para $K_T=0.25$																	
	Quebramar retilíneo			Quebramar em V			Quebramar retilíneo			Quebramar em V														
Distância ao esporão: 120m	Teste 19						Teste 20						Teste 19 K_T						Teste 20 K_T					
Extensão do quebramar: 120 m																								
Profundidade: 8 m	-4.88	1.05	0.75	-2.08	0.76	0.80	-4.44	1.00	0.75	-1.70	0.08	0.40												
Distância ao esporão: 120m	Teste 14						Teste 13						Teste 14 K_T						Teste 13 K_T					
Extensão do quebramar: 240 m																								
Profundidade: 8 m	-11.05	4.01	0.81	-8.18	1.98	0.89	-10.97	3.93	0.82	-6.65	1.18	0.47												
Distância ao esporão: 240m	Teste 21						Teste 22						Teste 21 K_T						Teste 22 K_T					
Extensão do quebramar: 240 m																								
Profundidade: 8 m	-14.53	6.38	1.21	-11.05	3.61	1.14	-14.34	6.23	1.19	-9.47	2.44	0.70												

As Figuras 4 a 14 mostram o impacto da introdução destas estruturas marítimas na linha de costa, para cada um dos testes simulados.

4. DISCUSSÃO

Considerando o efeito de difração introduzido pelos quebramares, os resultados obtidos vão de encontro ao expectável no que diz respeito à evolução da linha de costa, pois todos os testes, na frente urbana, conduzem a valores positivos das taxas de variação da posição da linha de costa, ou seja, há acumulação de sedimentos neste trecho.

Em todas as simulações efetuadas, os testes com quebramares destacados retilíneos produzem uma maior acumulação de sedimentos na frente urbana e, conseqüentemente, maior erosão a sul do esporão da Vagueira. Os testes com quebramares destacados em forma de "V" produzem menores taxas de erosão a sul do esporão da Vagueira comparativamente com os quebramares retilíneos. No entanto, na frente urbana, estes quebramares também promovem acumulação de sedimentos, quer para $K_T=0$ quer para $K_T=0.25$. Verifica-

se que a diferença de comportamento nos testes do coeficiente de transmissão reside em menores valores de erosão e acumulação de sedimentos quando se considera o valor de $K_T=0.25$.

Para quebramares mais extensos, existe uma maior acumulação de sedimentos na frente urbana. Este facto verifica-se para todas as profundidades.

Para a mesma distância ao esporão da Vagueira (120 m), o fator que melhores resultados produz é a extensão do quebramar, ou seja, quanto maior for o quebramar maior proteção confere na frente urbana.

Para uma profundidade intermédia, para além dos testes com parâmetros comuns às três profundidades, foram realizados mais dois testes complementares para cada um dos quebramares: Testes 8 e 10 para uma distância ao esporão de 60 m e Testes 3 e 5 para uma extensão do quebramar de 480 m. A proximidade do quebramar ao esporão reduz a taxa de erosão no trecho a sotamar, mas também diminui a acumulação de sedimentos na frente urbana. O aumento da extensão do quebramar para 480 metros origina maiores acumulações a norte do esporão da Vagueira e maiores erosões a sul.

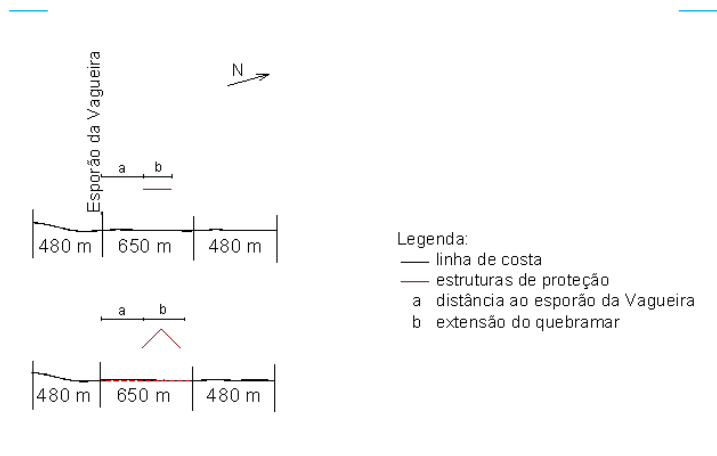


Figura 3 – Esquema representativo das estruturas testadas em diferentes cenários.

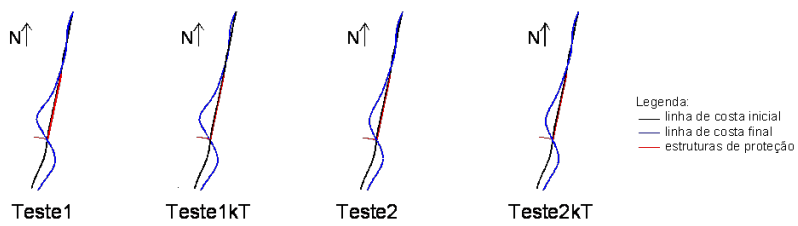


Figura 4 – Representação esquemática dos Testes 1 e 2 para $K_r=0$ e para $K_r=0.25$.

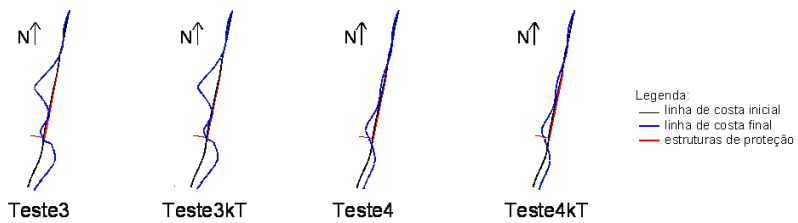


Figura 5 – Representação esquemática dos Testes 3 e 4 para $K_r=0$ e para $K_r=0.25$.

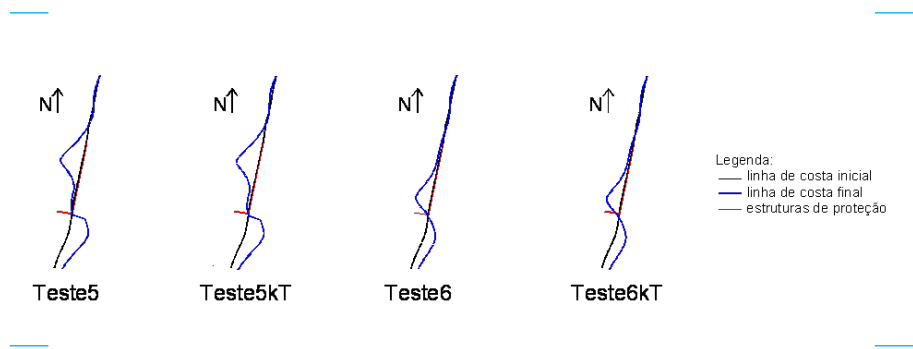


Figura 6 – Representação esquemática dos Testes 5 e 6 para $K_T=0$ e para $K_T=0.25$.

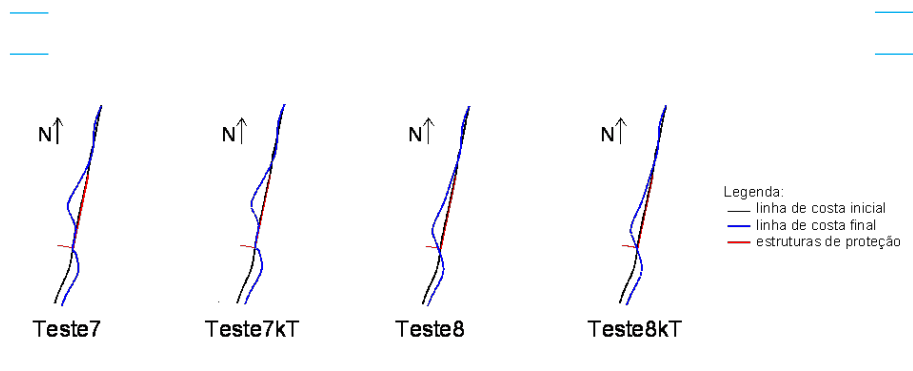


Figura 7 – Representação esquemática dos Testes 7 e 8 para $K_T=0$ e para $K_T=0.25$.

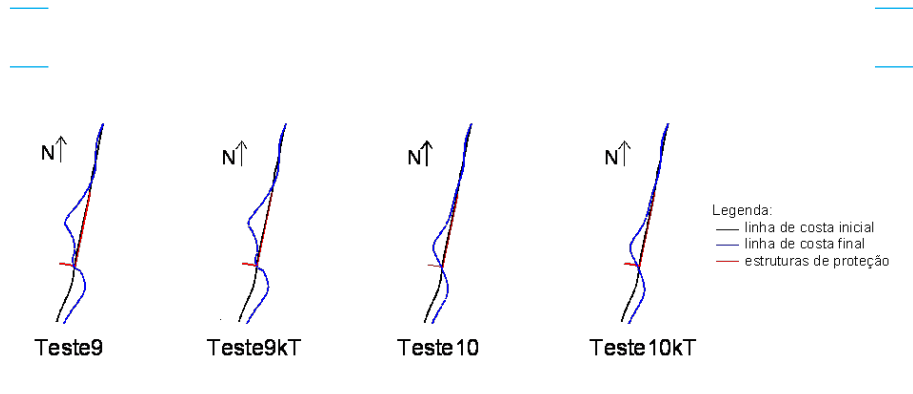


Figura 8 – Representação esquemática dos Testes 9 e 10 para $K_T=0$ e para $K_T=0.25$.

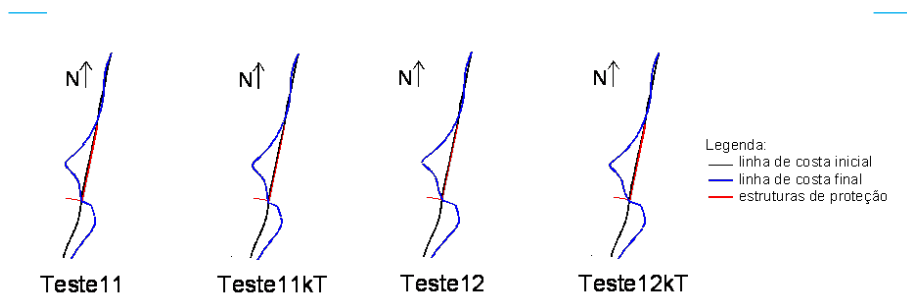


Figura 9 – Representação esquemática dos Testes 11 e 12 para $K_T=0$ e para $K_T=0.25$.

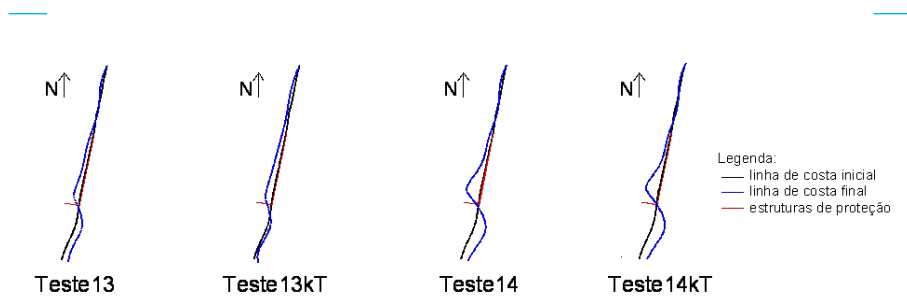


Figura 10 – Representação esquemática dos Testes 13 e 14 para $K_T=0$ e para $K_T=0.25$.

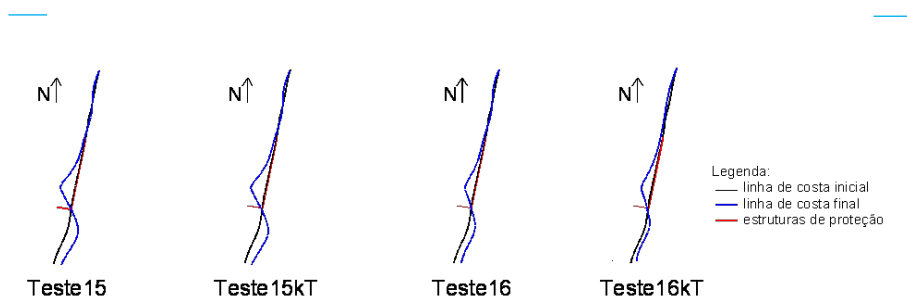


Figura 11 – Representação esquemática dos Testes 15 e 16 para $K_T=0$ e para $K_T=0.25$.

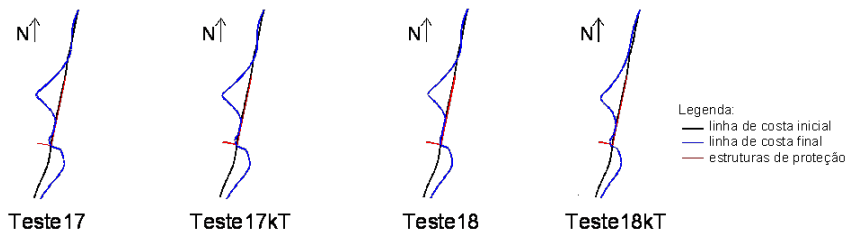


Figura 12 – Representação esquemática dos Testes 17 e 18 para $K_T=0$ e para $K_T=0.25$.

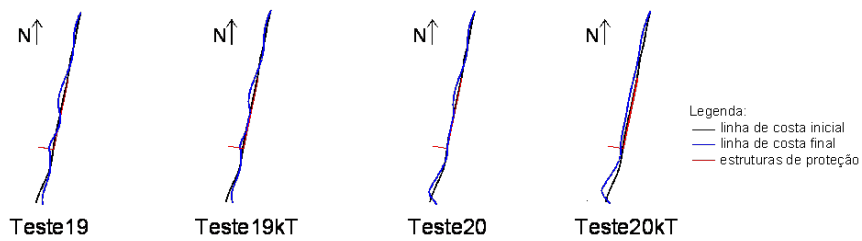


Figura 13 – Representação esquemática dos Testes 19 e 20 para $K_T=0$ e para $K_T=0.25$.

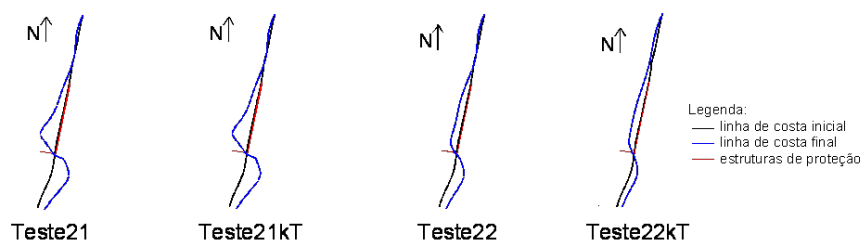


Figura 14 – Representação esquemática dos Testes 21 e 22 para $K_T=0$ e para $K_T=0.25$.

5. CONCLUSÕES

Quando se pretende proteger a linha de costa, os quebramares retilíneos oferecem uma maior proteção em relação aos quebramares em "V", no entanto agravam a erosão a sul dos mesmos. Como os quebramares em forma de "V" também oferecem proteção na frente urbana e têm um impacto menor a sul, aliado ao facto de poderem contribuir para melhorar as características das ondas para a prática de *surf*, são uma opção viável na proteção da linha de costa.

A forma do quebramar, a profundidade, a distância ao esporão da Vagueira e a extensão do quebramar são fatores que interferem diretamente na erosão e acumulação de sedimentos na linha de costa. Para a profundidade de 5 m, os Testes que oferecem maior contribuição para a zona de praia são os Testes 11 e 12 para $K_T=0$ e, consequentemente, os Testes $11K_T$ e $12K_T$ para $K_T=0.25$. Para a profundidade de 6.5 m, os Testes que melhor se adaptam para efeitos de proteção da frente urbana são os Testes 3, 5 e 9, bem como os Testes $3K_T$, $5K_T$ e $9K_T$. Para a profundidade de 8 m, os Testes que produzem maior acumulação de sedimentos na frente urbana são os Testes 21 e 22, tal como os Testes $21K_T$ e $22K_T$.

Segundo os resultados apresentados neste artigo relativamente à eficiência dos quebramares destacados, fica provado, mais uma vez, que são uma boa opção para proteção da costa. O grau de submersão, ou seja a altura do quebramar, a forma e as dimensões, junto com as características da agitação, são fatores determinantes na definição da melhor localização para efeitos de funcionamento como recife artificial multifuncional, capaz de gerar ondas com características para a prática de *surf* e outros desportos náuticos.

BIBLIOGRAFIA

Antunes do Carmo, J.S. (2013). "Experiência de recuperação de um sistema dunar e proposta de instrumentos complementares de proteção, atração e valorização ambiental". *Revista de Gestão Costeira Integrada*, Vol. 13(3), pp. 317-328.

Antunes do Carmo, J. S., Neves, M. e Voorde, M. (2011). "Designing a multifunctional artificial reef: studies on the influence of parameters with most influence in the vertical plane". *Journal of Coastal Conservation*, Vol. 15(1), pp. 99-112.

Birkemeier, W. A., (1985). "Field data on seaward limit of profile change", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Division*, Vol. 3, ASCE, pp. 598-602.

Coelho, C. (2005). "Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa

Costeira". Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro.

Coelho, C. e Veloso-Gomes, F. (2003). "Wave Climate and Longshore Sediment Transport in the Northwest Portuguese Coast". 3rd IAHR *Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*. Barcelona, Espanha.

Di Bona, S., Trigo-Teixeira, A. e Ruol, P. (2013). "Costal line change - Longterm simulation in the Vagueira region". 2^a Conferência sobre Morfodinâmica Estuarina e Costeira. Universidade de Aveiro.

Hanson, H. (1989). "Genesis - A generalized Shoreline Change Numerical Model". Department of Water Resources Engineering, University of Lund, Lund, Sweden.

Hanson, H. (1987). "GENESIS - A generalized shoreline change numerical model for engineering use" - Report No. 1007. Department of Water Resources Engineering, University of Lund, Lund, Sweden.

Hanson, H. e Kraus, N. C. (1991). "GENESIS - Generalized model for simulating shoreline change". Vol. 2: Reference Manual and Users Guide, US Army Corps of Engineers, 431 pp.

Hallermeier, R. J., (1978). "Uses for a calculated limit depth to beach erosion", *Oceanographer*, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, Virginia.

Mendonça, A., Fortes, C., Capitão, R., Neves, M., Moura, T. e Antunes do Carmo, J.S. (2012). "Wave hydrodynamics around a multi-functional artificial reef at Leirosa". *Journal of Coastal Conservation*, Vol. 16(4), pp. 543-553.

Mendonça, A., Proença, B., Fortes, C. e Neves, A. (2010). "Estudo da Hidrodinâmica em torno do Recife Artificial para a prática do Surf a construir em São Pedro do Estoril, Cascais. Aplicação dos Modelos de Boussinesq: COULWAVE e FUNWAVE". *Revista da Gestão Costeira Integrada*, Vol. 10 (1), pp. 95-125.

Nicholls, R., Birkemeier, W. e Lee, G. (1998). "Evaluation of depth of closure using data from Duck, NC, USA". *Marine Geology*, Vol. 148(3-4), pp. 179-201.

Pereira, C. (2012). "Manual de utilização do modelo numérico CEDAS - Módulo Beach". Universidade de Aveiro, Aveiro (não publicado).

Pereira, C. e Coelho, C. (2011). "Base de dados da Acção Marítima sobre o Litoral: Trecho Espinho - Mira". Relatório técnico ADAPTARIA. Universidade de Aveiro, Aveiro (não publicado).

Sena, M. (2010). "Modelação de Evolução da Linha de Costa - Influência do Uso de Séries Sintéticas de Agitação". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

- Simioni, B. e Esteves, L. (2010). "Avaliação Qualitativa do Desempenho dos Recifes Artificiais Multifuncionais (RAM)". *Revista da Gestão Costeira Integrada*, Vol. 10(1), pp. 127-145.
- Simões, S. (2013). "Associações de Quebramares Submersos com Diferentes Configurações: Análises de Eficiência". Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F., Neves, L., Pais Barbosa, J. e Coelho, C. (2004). "Erosion risk levels at the NW Portuguese coast: The Douro mouth - Cape Mondego stretch". *Journal of Coastal Conservation*, Vol. 10, pp. 43-52.
- Voorde, M., Antunes do Carmo, J.S. e Neves, M. (2009). "Designing a preliminar multifunctional artificial reef to protect the Portuguese coast". *Journal of Coastal Research*, Vol. 25(1), pp. 69-79.
- Whitmarsh, D., Santos, M., Ramos, J. e Monteiro, C. (2008). "Marine habitat modification through artificial reefs off the Algarve (Southern Portugal): an economic analysis of the fisheries and the prospects for management". *Ocean & Management*, Vol. 51(6), pp. 463-468.
- SNIRL@ (2013). *Sistema Nacional de Informação dos Recursos do Litoral* (<http://geo.snirh.pt/snirlit/site/index.php?ul=14&ulc=07>) - Consultado em Março de 2013.