



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Associação de Quebramares Submersos com Diferentes Configurações: Análises de Eficiência

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Território e Gestão do Ambiente

Autor

Sara Carolina Santos Simões

Orientador

Professor Doutor: José Simão Antunes do Carmo

Orientador

Professor Doutor: Carlos Daniel Borges Coelho

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, 8 de Julho, 2013

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Professor José Simão Antunes do Carmo e Professor Carlos Coelho por toda a orientação, disponibilidade, motivação, comentários e sugestões que me facultaram ao longo deste período.

À Carla Pereira, pela disponibilidade, paciência e grande ajuda que me deu ao longo deste trabalho.

Aos meus Pais e irmã, um sincero agradecimento por todo o apoio e incentivo ao longo deste percurso académico.

Ao Pedro, pela força e ajuda que me deu ao longo deste tempo, pelo companheirismo e por todos os grandes momentos que me proporcionou.

À Cátia e à Vanessa por todo o apoio, paciência, amizade, companhia, sorrisos e palavras reconfortantes naqueles momentos de desalento.

A todos os outros, não mencionados, que de uma forma ou de outra tornaram possível esta experiência.

RESUMO

Atualmente, a costa Portuguesa encontra-se bastante fragilizada, necessitando de urgentes medidas reparadoras que satisfaçam simultaneamente os requisitos essenciais de proteção, salvaguardem a atração turística e promovam o desenvolvimento sustentável. Uma das possíveis medidas reparadoras é o recurso a quebramares destacados submersos, ou recifes artificiais, adequadamente localizados em relação à linha de costa e com dimensões, formas e materiais construtivos que satisfaçam aqueles requisitos. Mais concretamente, pretende-se que um recife artificial a instalar não tenha apenas funções de proteção de sistemas naturais, como praias e dunas, mas que contribua também para a valorização ambiental e para a viabilização de práticas desportivas como *surf*, mergulho e pesca. É neste contexto que se insere o estudo a desenvolver nesta dissertação. Para tal recorre-se a um modelo numérico com vastas aplicações e resultados sobejamente conhecidos - o GENESIS. Este modelo permite analisar o comportamento de um quebramar ou associações de quebramares destacados, ondas com diferentes alturas, períodos e direções, sequência de ondas, efeitos da difração e o transporte de sedimentos. Por conseguinte, satisfaz os requisitos essenciais para a elaboração dos estudos preliminares que são objeto de desenvolvimento no âmbito deste trabalho.

ABSTRACT

Currently, the Portuguese coast is quite fragile, requiring urgent remedial measures which satisfy both the essential protection, safeguard tourist attraction and promote sustainable development. One of the possible remedial measures is the use of detached breakwaters or artificial reefs, rightly located in relation to the coastline and with dimensions, shapes and construction materials that meet those requirements. More specifically, it is intended that an artificial reef to install not only have the protective functions of natural systems, such as beaches and dunes, but also contribute to environmental improvement and to the viability of sports activities like surfing, diving and fishing. For this, we will use a numerical model with broad applications and results well known - the GENESIS. This model allows us to analyze the behavior of a breakwater or associations of detached breakwaters, waves sequences, periods and directions, diffraction effects and sediment transportation by waves with oblique incidence. Therefore it meets the essential requirements for the preparation of preliminary studies that are the subject of development in this work.

ÍNDICE

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|------|
| AGRADECIMENTOS | i |
| RESUMO | ii |
| ABSTRACT | iii |
| ÍNDICE..... | iv |
| ÍNDICE DE FIGURAS | vi |
| ÍNDICE DE QUADROS | viii |
| SIMBOLOGIA | ix |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. Enquadramento e motivação | 1 |
| 1.2. Objetivos..... | 3 |
| 1.3. Estrutura da dissertação | 4 |
| 2. CARACTERIZAÇÃO GERAL DO ESTUDO..... | 5 |
| 2.1. Estado da arte..... | 5 |
| 2.2. Levantamento Histórico – Vagueira | 10 |
| 2.3. Quebramares | 10 |
| 2.3.1. Quebramares destacados..... | 11 |
| 2.3.2. Recifes artificiais multifuncionais..... | 11 |
| 2.4. Condições de agitação | 14 |
| 2.4.1. Onda | 14 |
| 2.4.2. Sedimentos | 15 |
| 2.5. Fenómenos de alteração da agitação na propagação em direção à costa..... | 16 |
| 2.5.1. Refração..... | 16 |
| 2.5.2. Difração | 17 |
| 2.5.3. Espriamento e refluxo..... | 18 |
| 2.5.4. Reflexão..... | 18 |
| 2.6. Profundidade de fecho | 19 |
| 2.7. Cota de berma | 21 |
| 2.8. Taxa de recuo..... | 21 |
| 2.9. Transporte sedimentar - Fórmula de CERC..... | 22 |
| 3. METODOLOGIA..... | 25 |
| 3.1. Preparação dos dados de modelação..... | 25 |
| 3.1.1. GRID GENERATOR | 25 |
| 3.1.2. WWWL | 27 |
| 3.1.3. SPECGEN | 28 |
| 3.2. STWAVE..... | 28 |

| | |
|--------------------------------------------------------|----|
| 3.3. GENESIS | 29 |
| 3.3.1. Considerações gerais | 29 |
| 3.3.2. Quantificação do transporte sólido | 30 |
| 3.3.3. Condições de fronteira..... | 31 |
| 3.3.4. Capacidades e limitações do modelo..... | 32 |
| 3.4. Calibração do modelo | 34 |
| 3.4.1. Calibração para o primeiro caso de estudo | 36 |
| 3.4.2. Calibração para o segundo caso de estudo | 38 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 42 |
| 4.1. Resultados do primeiro caso de estudo | 42 |
| 4.2. Resultados do segundo caso de estudo | 46 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 50 |
| 5.1. Conclusões | 50 |
| 5.2. Desenvolvimentos futuros | 51 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 52 |
| ANEXO | 56 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Figura 1.2 - Praia da Vagueira (destaque para o esporão da Vagueira) - Foto do autor tirada em 17 de Março de 2013.</i> | 3 |
| <i>Figura 1.1 - Praia da Vagueira (destaque para a obra de defesa aderente) - Foto do autor tirada em 17 de Março de 2013.</i> | 3 |
| <i>Figura 2.1 - Praia de Marataízes, Brasil (Fonte: http://www.assufemg.org.br/convenios/condominio-praia-de-marataizes/ - consultado em Janeiro de 2013).</i> | 6 |
| <i>Figura 2.2 - Quebramares destacados na costa mediterrânica de Espanha (Fonte: P.D.Komar 1998 - http://web.letras.up.pt/asaraujo/seminario/Aula10.htm - Consultado em Janeiro de 2013).</i> | 7 |
| <i>Figura 2.3 - Recife artificial de estátuas, México (Fonte: http://jaomonlevade.blogspot.pt/2010/10/coral-artificial-de-estatuas.html - Consultado em Março de 2013).</i> | 7 |
| <i>Figura 2.4 - Recife multifuncional Kovalam, Índia (Fonte: http://marcosgandor.blogspot.pt - Consultado em Março de 2013).</i> | 8 |
| <i>Figura 2.5 - Recife multifuncional, Nova Zelândia (Fonte: http://marcosgandor.blogspot.pt/2009/02/projeto-conceitual-de-recife-artificial.html - Consultado em Março de 2013).</i> | 9 |
| <i>Figura 2.6 - Parâmetros relevantes a serem estudados num quebramar destacado submerso. a altura (h_{reef}) e submersão (S) do recife; b ângulo do recife (θ_{reef}) e inclinação da estrutura (s_{reef}); c geometria do recife, com e sem plataforma. (Fonte: Antunes do Carmo et al., 2011).</i> | 12 |
| <i>Figura 2.7 - Recife artificial multifuncional construído com geotêxteis (Fonte: http://pordentrodasondas.blogspot.pt/2010/10/querer-e-poder-sim.html - Consultado em Março de 2013).</i> | 14 |
| <i>Figura 2.8 - Esquema representativo de uma onda (Fonte: http://www.aprh.pt/rgci/glossario/onda.html# - Consultado em Fevereiro de 2013).</i> | 15 |
| <i>Figura 2.9 - Representação esquemática de fenómenos de alteração de propagação da onda (Coelho, 2005).</i> | 17 |
| <i>Figura 4.1 - Resultados dos Testes 1, 2, 3 e 4.</i> | 43 |
| <i>Figura 4.2 - Resultados dos Testes 5, 6, 7 e 8.</i> | 45 |
| <i>Figura 4.3 - Resultados dos Testes A, B, C e D.</i> | 47 |
| <i>Figura 4.4 - Resultados dos Testes E, F, G e H.</i> | 49 |
| <i>Figura 0.1 - Linha de costa de referência para $k_1=0.1$ e $k_2=0.1$ (10 anos de simulação).</i> | 56 |
| <i>Figura 0.2 - Linha de costa final após 10 anos de simulação - Teste 1.</i> | 56 |
| <i>Figura 0.3 - Linha de costa final após 10 anos de simulação - Teste 2.</i> | 57 |
| <i>Figura 0.4 - Linha de costa final após 10 anos de simulação - Teste 3.</i> | 57 |
| <i>Figura 0.5 - Linha de costa final após 10 anos de simulação - Teste 4.</i> | 58 |
| <i>Figura 0.6 - Linha de costa de referência para $k_1=0.5$ e $k_2=0.5$ (10 anos de simulação).</i> | 58 |
| <i>Figura 0.7 - Linha de costa final após 10 anos de simulação - Teste 5.</i> | 59 |
| <i>Figura 0.8 - Linha de costa final após 10 anos de simulação - Teste 6.</i> | 59 |
| <i>Figura 0.9 - Linha de costa final após 14 anos de simulação - Teste 7.</i> | 60 |
| <i>Figura 0.10 - Linha de costa final após 19 anos de simulação - Teste 8.</i> | 60 |
| <i>Figura 0.11 - Linha de costa de referência para $k_1=0.02$ e $k_2=0.01$ (10 anos de simulação).</i> | 61 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Figura 0.12 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste A.....</i> | <i>61</i> |
| <i>Figura 0.13 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste B.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Figura 0.14 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste C.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Figura 0.15 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste D.....</i> | <i>63</i> |
| <i>Figura 0.16 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste E.....</i> | <i>63</i> |
| <i>Figura 0.17 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste F.....</i> | <i>64</i> |
| <i>Figura 0.18 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste G.....</i> | <i>64</i> |
| <i>Figura 0.19 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste H.....</i> | <i>65</i> |

ÍNDICE DE QUADROS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Quadro 2.1 - Classificação das areias pelo tamanho do grão (Classificação de J. Boucout – adaptado de: http://oficina.cienciaviva.pt/~pw054/vidro/Areias.htm#_ftnref1)</i> | 16 |
| <i>Quadro 2.2 - Classificação da rebentação das ondas segundo Iribarren</i> | 19 |
| <i>Quadro 2.3 - Valores estimados para a profundidade de fecho (m) segundo diferentes propostas</i> | 21 |
| <i>Quadro 2.4 - Taxas de recuo médias (m/no) para os trechos considerados (Pereira e Coelho, 2011)</i> | 22 |
| <i>Quadro 3.1 – Clima de agitação médio anual com base nos registos da boia de Leixões, entre 1981 e 2001 - percentagem de ocorrência (%); Fonte: Coelho e Veloso-Gomes (2003)</i> | 39 |
| <i>Quadro 3.2 - Frequência e características das ondas usadas no STWAVE</i> | 39 |
| <i>Quadro 3.3 - Resultados das taxas de recuo para dois climas de agitação aleatórios (com a mesma frequência de ondas) – Sinal (-) significa recuo da linha de costa</i> | 40 |
| <i>Quadro 3.4 - Frequência e características das ondas usadas no processo de calibração do segundo caso de estudo</i> | 41 |
| <i>Quadro 4.1 – Resultados da variação da posição média da linha de (m/ano) e do transporte sólido para o primeiro cenário. (Sinal (-) significa recuo da linha de costa)</i> | 44 |
| <i>Quadro 4.2 – Resultados da variação da posição média da linha de (m/ano) e do transporte sólido para o segundo cenário. (Sinal (-) significa recuo da linha de costa)</i> | 46 |
| <i>Quadro 4.3 - Resultados da variação da posição média da linha de (m/ano) e do transporte sólido para o segundo caso de estudo. (Sinal (-) significa recuo da linha de costa)</i> | 48 |
| <i>Quadro 4.4 - Resultados da variação da posição média da linha de (m/ano) e do transporte sólido para dois casos particulares do segundo caso de estudo. (Sinal (-) significa recuo da linha de costa)</i> | 49 |

SIMBOLOGIA

- a_1 e a_2 - Parâmetros adimensionais usados no modelo GENESIS [-]
 c - Celeridade da onda [m/s]
 c_1 e c_2 - Velocidade da onda 1 e da onda 2, respectivamente, na lei de Snell [m/s]
 d_B - altura da berma [m]
 d_1 e d_2 - Profundidade da onda 1 e da onda 2, respectivamente, na lei de Snell [m]
 d_{50} - Diâmetro médio dos sedimentos [mm]
 g - Aceleração da gravidade [m/s²]
 h_b - Profundidade na zona de rebentação [m]
 h_c - Profundidade de fecho [m]
 k_b - Índice de rebentação [-]
 k - Coeficiente de proporcionalidade empírico e adimensional na fórmula de CERC [-]
 p - Coeficiente de porosidade [-]
 u_{mb} - Velocidade orbital [m/s]
- C_{gb} - Celeridade da onda da zona de rebentação [m/s]
 H_s - Altura da onda significativa que é excedida 12 horas por ano [m]
 H_b - Altura da onda na rebentação [m]
 H_{bs} - Altura da onda significativa na zona de rebentação [m]
 H_r - Altura da onda refletida [m]
 H_i - Altura da onda incidente [m]
 H_{mas} - Altura da onda significativa máxima anual [m]
 H_{rms} - Raiz quadrada da altura média da onda [m]
 K_r - Coeficiente de reflexão [-]
 K_1 e K_2 - Coeficientes empíricos de calibração do modelo GENESIS [-]
 L - Comprimento de onda [m]
 Q_l - Caudal de transporte longitudinal [m³/s]
 T - Período da onda [s]
 T_{H_s} - Período associado à altura da onda significativa [s]
- α_b - Ângulo de incidência da onda na zona de rebentação [°]
 β - Inclinação da praia [%]
 δ - Declive de onda [m]

θ_1 e θ_2 - Ângulo de incidência da onda 1 e da onda 2, respectivamente, na lei de Snell [°]

ρ - Massa volúmica da água do mar [kg/m^3]

ρ_s - Massa volúmica dos sedimentos [kg/m^3]

ξ - Número de Iribarren [-]

ω_s - Velocidade de queda dos sedimentos [m/s]

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento e motivação

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. Um dos grandes problemas com que a zona costeira portuguesa se tem vindo a confrontar é a erosão costeira. Esta situação leva a galgamentos oceânicos o que, juntamente com a excessiva ocupação do território junto à costa, causa diversos prejuízos para os *habitats* naturais e para a própria população.

Portugal continental dispõe de 943 km de costa, sendo por isso necessárias uma gestão e manutenção adequadas, de modo a encontrar as soluções mais apropriadas para os problemas de cada local. Existe uma forte dependência da qualidade das praias, pois é delas que dependem muitas das atividades de verão, tanto para os habitantes como para os turistas, e também das vilas piscatórias existentes, um pouco ao longo de toda a costa portuguesa. Assim, é do maior interesse protegê-las para que mais turistas sejam atraídos e para que os habitantes e comerciantes da zona litoral se sintam em segurança (Duarte, 2009).

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. Outra causa do recuo da linha de costa deve-se a alterações pontuais dos padrões de agitação local e das movimentações sedimentares. Globalmente, os previsíveis efeitos de aumento da temperatura levarão a uma subida do nível médio das águas do mar, alterando assim os padrões de circulação oceânica, o que conduzirá a um agravamento da panorâmica atual (Ramos, 2012).

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. Como exemplo, releva-se a construção de quebramares destacados ao longo da costa. Os quebramares podem assumir várias formas e podem ser construídos com diversos materiais,

consoante o objetivo e as características do local em questão, podendo ser estruturas emersas ou submersas (recifes artificiais), paralelas ou não à linha de costa.

Em Portugal, o recurso a esporões tem sido uma solução viável para combater a crescente fragilidade da zona costeira, em particular de frentes urbanas, evitando assim que esta “desapareça” ao longo do tempo, pondo em causa a segurança das populações existentes no litoral. Os quebramares (ou molhes) são utilizados como estruturas portuárias com o objetivo de melhorar as condições de acesso ao porto, proporcionando assim melhores condições de navegação.

A presente Dissertação pretende determinar a evolução da linha de costa com recurso a associações de quebramares destacados submersos com diferentes configurações, sendo que a zona de estudo se insere no litoral português, mais concretamente na zona da Vagueira, no distrito de Aveiro. Segundo Veloso Gomes *et al* (2004), a área entre a Costa Nova e a Praia de Mira está classificada como “muito vulnerável” em termos de problemas de erosão. Ainda segundo os mesmos autores, futuramente, a evolução da linha de costa irá depender da implementação, ou não, de um sistema de reposição de areia para proteger as zonas urbanas. Em outubro de 2011, a zona costeira entre Espinho e Vagos, já bastante fragilizada, foi atingida por uma forte ondulação, sendo que, na praia a sul do Labrego, Vagueira, o rompimento do cordão dunar levou ao aluimento da estrada local, criando uma ligação entre o oceano e a Ria de Aveiro. Como o litoral continua a sofrer de uma erosão significativa e vai recuando cada vez mais, tal poderá levar a um novo rompimento para uma nova entrada da Ria de Aveiro.

O estudo desta zona será feito com recurso a um modelo numérico – GENESIS. Este modelo permite estimar o impacto de várias configurações de quebramares destacados na evolução da linha de costa, avaliando assim a fiabilidade destas estruturas como obras de defesa costeira. Mais pormenores sobre este modelo podem ser encontrados no Capítulo 3 da presente Dissertação.

1.2. Objetivos

O presente estudo incide sobre a Praia da Vagueira (Figuras 1.1 e 1.2), a qual, ao longo do tempo, tem vindo a ser sujeita a diversos fenómenos de erosão, o que conseqüentemente, tem conduzido a um recuo da linha de costa. É uma zona que se encontra bastante fragilizada e que tem vindo a ser alvo de medidas de recuperação, nomeadamente com reposição de areia (Notícias de Aveiro@, 2006) e com a construção de uma obra de defesa aderente para proteger a zona urbana. A praia da Vagueira, além da obra longitudinal à linha de costa, tem duas estruturas de proteção: o esporão da Vagueira, que se situa a sul da zona urbana, e o esporão do Labrego, que se situa a sul do esporão da Vagueira.



Figura 1.1 - Praia da Vagueira (destaque para a obra de defesa aderente) - Foto do autor tirada em 17 de Março de 2013.



Figura 1.2 - Praia da Vagueira (destaque para o esporão da Vagueira) - Foto do autor tirada em 17 de Março de 2013.

Neste sentido, a presente Dissertação tem como objetivo principal calibrar e aplicar o modelo GENESIS a esta zona do litoral português, avaliando assim o impacto que diferentes associações de quebramares destacados submersos possam ter na evolução da linha de costa. Para efeitos de calibração serão consideradas as características das ondas, da praia e dos sedimentos. Após a calibração do modelo, serão testados vários tipos de estruturas destacadas submersas, avaliando assim qual ou quais as estruturas mais adequadas ao local, e que dimensões relativas devem ter, tendo em conta que se pretende proteger a linha de costa.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente Dissertação está organizada em 5 capítulos distintos, sendo o primeiro a Introdução, onde, para além da organização da Dissertação é também apresentado um breve enquadramento do trabalho e os objetivos pretendidos. O segundo capítulo corresponde ao enquadramento teórico, que inclui o estado da arte e conceitos importantes para a compreensão do trabalho. No terceiro capítulo é feita uma breve descrição do modelo numérico utilizado e são abordados os procedimentos a seguir para a sua aplicação. O quarto capítulo é dedicado à apresentação dos resultados obtidos, seguida de análise e discussão dos mesmos. Por fim, no quinto capítulo encontram-se as conclusões deste trabalho e algumas recomendações para trabalhos futuros.

2. CARACTERIZAÇÃO GERAL DO ESTUDO

2.1. Estado da arte

No passado, os quebramares tinham como principais funções criar condições de abrigo na entrada dos portos, desviar a zona de deposição de areias da entrada dos canais de acesso ou formar uma zona calma para refúgio de pequenas embarcações. Porém, à medida que o século XX foi decorrendo, intensificou-se a utilização destas estruturas na proteção costeira, controlo de correntes e na criação ou ampliação da área útil de praia para fins balneares (APRH@, 2007).

Os quebramares destacados têm sido utilizados em diversos locais do planeta com o objetivo principal de proteção da costa. Como exemplos ilustrativos das formas que podem apresentar, destacam-se, entre muitos outros, os quebramares construídos na praia de Marataízes no Brasil, que apresentam uma forma curvilínea, e os quebramares na costa mediterrânica de Espanha, que são os mais “tradicional”, paralelos à linha de costa (Figuras 2.1 e 2.2, respetivamente). Em Portugal, destaca-se o quebramar construído em 1999, em Castelo de Neiva, Viana do Castelo. Posteriormente, na praia de Aguda, Porto, foi também construído um quebramar destacado (2001-2002) e, mais recentemente, na barra do Douro, em 2009. Estes quebramares não foram construídos com o objetivo de proteção costeira mas sim como defesas portuárias.

Os quebramares destacados submersos, em que se enquadram os denominados recifes artificiais com múltiplas funções, encontram-se por todo o mundo. A ideia de usar estruturas físicas submersas para melhorar os recursos marinhos vivos pode ter sido descoberta por acaso. Desde o século XVII que o Japão é pioneiro em utilizar esta técnica para aumentar o crescimento de espécies marinhas. Desde então, vários têm sido os materiais usados nos recifes artificiais, que vão desde estruturas feitas para esse fim até “materiais de oportunidade”, tais como galhos de árvores, pneus, pedras e automóveis. Na América do Norte, *habitats* artificiais têm sido usados para uma variedade de fins, tendo um maior potencial para a pesca desportiva e mergulho. Hong Kong embarcou num programa inovador de implementação de recifes artificiais ligados à criação restrita de espécies marinhas protegidas como forma de reverter os efeitos do excesso de pesca (Whitmarsh *et al*, 2008). No México, foi construído um recife artificial com estátuas humanas, construídas por uma

mistura de cimento, areia, pedras e fibra de vidro, com o objetivo de criar vida marinha (Figura 2.3). O Brasil já conta com mais de 2500 recifes artificiais que permitiram a criação de novos *habitats* marinhos e incentivaram a pesca local. No Mediterrâneo os recifes artificiais são frequentemente usados para apoiar iniciativas de proteção de *habitats* marinhos. Por toda a Europa, os recifes artificiais são vistos como uma ferramenta de gestão para sustentar a pesca costeira. Em Portugal 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 43 km² de recifes artificiais, sendo uma dos maiores da Europa (Whitmarsh *et al*, 2008).



Figura 2.1 - Praia de Marataízes, Brasil (Fonte: <http://www.assufemg.org.br/convenios/condominio-praia-de-marataizes/> - consultado em Janeiro de 2013).

Mais recentemente têm sido propostos recifes artificiais multifuncionais 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, construído em 1999, e o recife artificial na praia de Narrowneck, construído em 2000, ambos situados na Austrália.



Figura 2.2 - Quebramares destacados na costa mediterrânea de Espanha (Fonte: P.D.Komar 1998 - <http://web.lettras.up.pt/asarauio/seminario/Aula10.htm> - Consultado em Janeiro de 2013).



Figura 2.3 - Recife artificial de estátuas, México (Fonte: <http://jaomonlevade.blogspot.pt/2010/10/coral-artificial-de-estatuas.html> - Consultado em Março de 2013).

Em 2001, na Califórnia, foi construído 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, em 2008 teve início a construção de um recife com objetivo de aumentar o número de visitantes de modo a promover o crescimento económico mas, nos dois anos seguintes à construção, o recife sofreu danos significativos, o que inviabilizou os efeitos de proteção relativamente à acumulação de areias (Antunes do Carmo, 2013). 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 criaram ondas consideradas ótimas para a prática de *surf* (Figura 2.4). 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 objetivo principal de melhorar as condições locais para a prática de surf (Figura 2.5) (Simioni e Esteves, 2010).

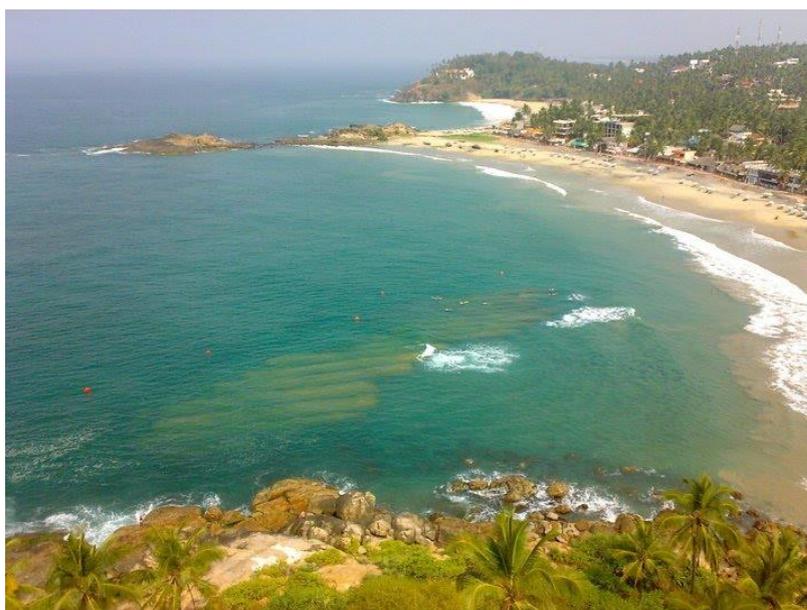


Figura 2.4 - Recife multifuncional Kovalam, Índia (Fonte: <http://marcosgandor.blogspot.pt> – Consultado em Março de 2013).

Em Portugal, ainda não existem recifes multifuncionais, embora tenham vindo a ser feitos diversos estudos para a sua implementação em alguns locais que se julga poderem vir a ser beneficiados com boas condições para a prática de surf, para além de necessitarem de urgentes medidas de proteção costeira. São exemplos disso 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 (objeto de estudo desta Dissertação).



Figura 2.5 - Recife multifuncional, Nova Zelândia (Fonte: <http://marcosgandor.blogspot.pt/2009/02/projeto-conceitual-de-recife-artificial.html> - Consultado em Março de 2013).

Para analisar quais os impactos que estruturas deste tipo poderão ter ao longo da linha de costa recorre-se, neste trabalho, ao modelo numérico GENESIS. Este modelo utiliza o clima de agitação e as características locais da praia e dos sedimentos para simular a evolução da linha de costa.

Hanson (1989) estudou a influência de uma sequência de ondas como dados de entrada no modelo GENESIS, numa zona de costa hipotética que continha um esporão. Nesta análise, Hanson (1989) simulou cenários onde as ondas eram ordenadas por ordem crescente e decrescente de direção e altura de onda, bem como cenários onde a ordem das ondas era aleatória em cada série de dados mas onde o fluxo de energia se mantinha constante para os diferentes cenários. Como conclusão do seu estudo, Hanson (1989) afirma que a evolução da linha de costa é extremamente sensível à ordem dos ângulos de incidência da onda e a altura de onda é relativamente independente da direção da mesma.

2.2. Levantamento Histórico – Vagueira

Sendo a zona da Vagueira o local de estudo desta Dissertação, é necessário descrever o que se tem passado nesta região, para assim se compreender a necessidade de um estudo desta natureza.

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 os esporões, têm limitado a evolução desta zona do litoral. A praia em frente à obra de defesa aderente já se encontra muito próxima do seu equilíbrio estático, enquanto a praia entre os esporões da Vagueira e do Labrego sofre variações sazonais. Em situações de temporais, esta zona fica ainda mais vulnerável a galgamentos oceânicos. De modo a proteger esta zona, os materiais dragados da Ria de Aveiro têm sido colocados a norte da frente urbana para evitar galgamentos, pois é um local que tem uma ligeira inclinação no sentido da zona urbana (Coelho, 2005).

Segundo Coelho (2005), *“a sul da Vagueira a erosão tem sido muito violenta. A comparação de levantamentos de 1973 e 1996 mostra que a costa recuou, em alguns sítios cerca de 200m. A duna que aparecia bem desenvolvida, para sul da Vagueira, praticamente desapareceu. Para delimitação da faixa de risco admite-se que, a longo prazo, o trecho a sul do esporão do Labrego rodará em torno do ponto fixo materializado pelo esporão norte da praia de Mira até atingir a posição de equilíbrio estático $\alpha_N = 20^\circ$, conforme os estudos de dinâmica costeira do POOC (1998) Ovar – Marinha Grande. Este segmento costeiro é considerado de risco elevado.”*

2.3. Quebramares

Várias estruturas costeiras podem ser usadas para resolver, ou pelo menos reduzir os problemas de erosão costeira. Algumas delas, como quebramares, paredões e diques são estruturas de proteção direta, enquanto estruturas como quebramares destacados e recifes artificiais são estruturas de proteção indireta, pois reduzem a carga hidráulica ao nível da costa, mantendo assim um equilíbrio dinâmico. Os quebramares 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 à costa (Antunes do Carmo *et al.*, 2011).

2.3.1. Quebramares destacados

Paredões de pedra, quebramares ou esporões geralmente têm a finalidade de proteger a costa da erosão e/ou assegurar as condições de navegação nos portos e marinas, mas também poderão ter um propósito de valor comercial, tal como lazer, que pode ser incorporado na proteção costeira e em projetos de desenvolvimento costeiro. Os quebramares submersos podem ser uma solução interessante e eficiente, uma vez que poderão funcionar como proteção de um sistema costeiro, melhorando, simultaneamente, as condições balneares das zonas costeiras (Antunes do Carmo *et al.*, 2011).

Os quebramares destacados dispõem-se de forma mais ou menos grosseira paralelamente à linha de costa, pelo que subtraem a zona interna da incidência direta da agitação marítima. Consequentemente, acabam por criar novas condições em que a difração da onda nas extremidades do quebramar, propicia na zona de sombra, transporte sedimentar convergente, o que resulta na formação de uma praia saliente. Se o quebramar não for dimensionado de forma adequada, isto é, se o seu comprimento não é pequeno relativamente à distância à costa, a acumulação sedimentar acaba, com o tempo, por se converter num tómbolo (Figura 2.2), ficando a estrutura ligada diretamente à praia (APRH@, 2007).

2.3.2. Recifes artificiais multifuncionais

Os recifes artificiais multifuncionais (MFAR – *Multifunctional artificial reefs*) 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 MFARs fornecem uma perfeita comodidade visual e podem oferecer benefícios turísticos e económicos à região onde se encontram (Antunes do Carmo *et al.*, 2011).

Quanto à funcionalidade de um MFAR, muita pesquisa tem sido feita sobre *surfabilidade*, ou seja, as características de uma onda para a prática de *surf*. No entanto, não existe ainda uma configuração ótima para a estrutura do recife. A geometria preliminar de uma estrutura foi obtida passo a passo, recorrendo à teoria e ao estado da arte sobre recifes artificiais multifuncionais. Esta mesma geometria foi então utilizada em Antunes do Carmo *et al.*, (2011) como uma estrutura base em testes físicos e numéricos; pode ser observada na Figura 2.6.

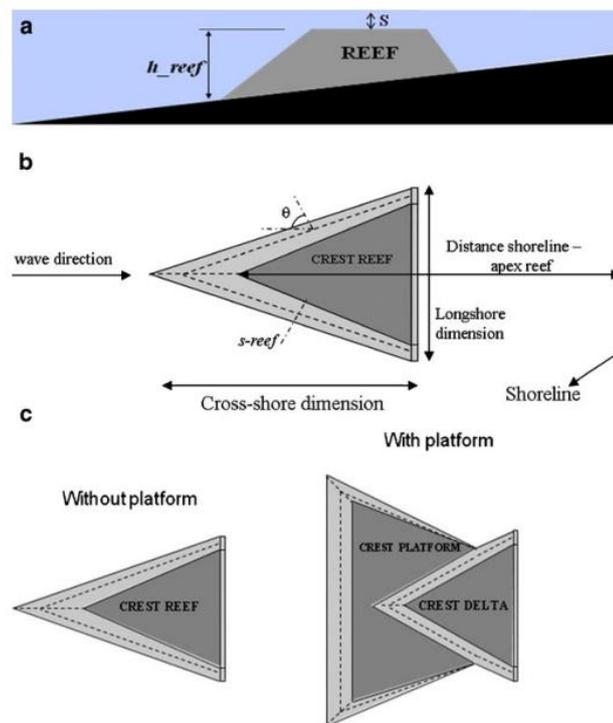


Figura 2.6 - Parâmetros relevantes a serem estudados num quebramar destacado submerso. **a** altura (h_{reef}) e submersão (S) do recife; **b** ângulo do recife (θ_{reef}) e inclinação da estrutura (s_{reef}); **c** geometria do recife, com e sem plataforma. (Fonte: Antunes do Carmo *et al.*, 2011).

A Figura 2.6 mostra os parâmetros mais relevantes a serem estudados no plano vertical de um recife. A altura do recife depende da sua submersão, da inclinação das paredes laterais, das suas dimensões e da sua distância à costa. A submersão do recife é determinada por dois fatores: primeiro, deve ser reduzida o suficiente para que as ondas rebentem sobre o recife; segundo, deve ser elevada o suficiente para garantir a segurança dos surfistas.

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.

Os recifes artificiais multifuncionais podem assumir várias formas e podem ser construídos com diversos materiais consoante o objetivo e as características do local em questão.

Um dos materiais mais adequados, tanto ambiental como economicamente, para a construção de recifes artificiais multifuncionais é o geotêxtil (Figura 2.7). Os tubos de material geotêxtil são estruturas cilíndricas, em forma de “salsicha”, com algumas dezenas de metros de comprimento, frequentemente entre 40 a 60 m, por 3 a 5 m de diâmetro, preenchidos com areias, argilas ou materiais capazes de serem dragados. Durante o seu processo construtivo, ou de enchimento através de bombeamento de uma mistura de água com areia, a água passa e é naturalmente expulsa através das paredes (material geotêxtil) enquanto os sólidos ficam retidos dentro do tubo. Pouco a pouco, o tubo de geotêxtil vai-se consolidando, permitindo a obtenção de estruturas maciças, capazes de resistirem à abrasão e a cortes, tolerando a degradação biológica e química gerada no meio natural e funcionando com um certo grau de confiabilidade (Antunes do Carmo *et al.*, 2011).

O material geotêxtil, envolvendo grandes volumes de areia, particularmente com formas tubulares, parece ser, com efeito, o mais económico e mais adequado para a construção de recifes artificiais com multifuncionalidades. De facto, estes contentores de areia que são fabricados previamente com material geotêxtil e cheios *in situ* parecem constituir não só um excelente substrato para a flora marinha e para o desenvolvimento de ecossistemas diversificados, como aumentam também a segurança no recife, ao formarem uma estrutura relativamente suave, sem arestas cortantes; por conseguinte, diminuindo os riscos de ferimentos de surfistas, mergulhadores e pescadores, entre outros, caso estes entrem em contato com a superfície do recife (Antunes do Carmo, 2013).

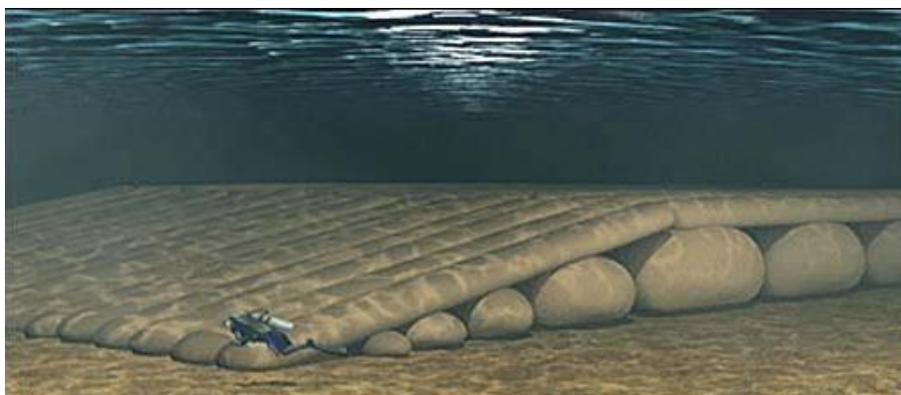


Figura 2.7 - Recife artificial multifuncional construído com geotêxteis (Fonte: <http://pordentrodasondas.blogspot.pt/2010/10/querer-e-poder-sim.html> - Consultado em Março de 2013).

2.4. Condições de agitação

A agitação marítima é caracterizada por diversos fenómenos. De seguida são apresentados alguns princípios para a compreensão deste trabalho.

2.4.1. Onda

As ondas são fenómenos oscilatórios de transferência de energia e são caracterizadas pela altura da onda H – diferença vertical entre a crista da onda e a cava adjacente, pelo comprimento de onda L – distância entre duas cristas ou duas cavas sucessivas, e pelo período T – intervalo de tempo (medido em segundos) que decorre entre a passagem de duas cristas ou duas cavas sucessivas por um dado ponto fixo.

Na Figura 2.8 pode visualizar-se um esquema de uma onda.

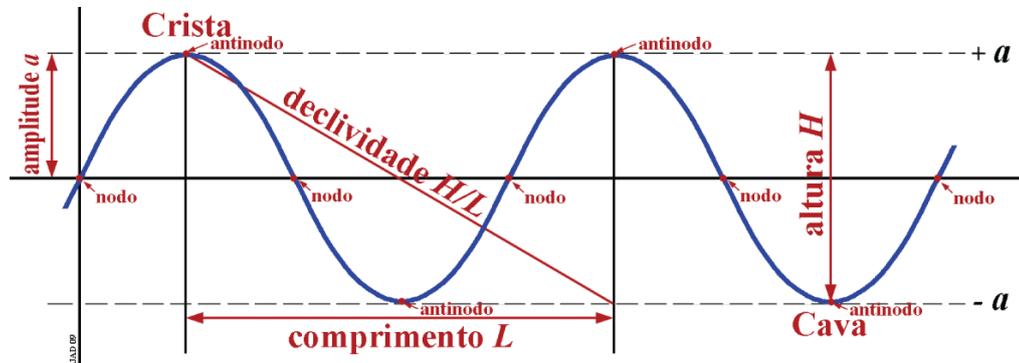


Figura 2.8 - Esquema representativo de uma onda (Fonte: <http://www.aprh.pt/rgci/glossario/onda.html#> - Consultado em Fevereiro de 2013).

2.4.2. Sedimentos

Coelho (2005) refere que “a evolução da linha de costa está relacionada com o transporte de sedimentos, que condiciona diretamente a morfologia do litoral. Os processos de transporte são de bastante importância na caracterização da zona costeira, sendo que a série de alturas de ondas significativas que incidem sobre uma região costeira serve como indicador da energia das ondas e relaciona-se diretamente com o potencial de transporte de sedimentos. A dimensão dos sedimentos é um aspeto fundamental na caracterização de diversos processos costeiros, como por exemplo, o de transporte longitudinal da deriva continental.”

A dimensão dos grãos de areia da praia (Quadro 2.1) varia no tempo e no espaço. No inverno, a dimensão dos sedimentos é tipicamente maior do que no verão. “A variabilidade da dimensão dos grãos é também maior na parte da praia deixada a descoberto na maré baixa do que na praia emersa. A maior dimensão dos sedimentos está localizada na rebentação das ondas. A forma de exprimir esta dimensão está generalizada como sendo d_n , em que n representa a percentagem, em massa, de partículas com dimensão inferior a um determinado valor. Os percentis mais relevantes e com mais utilização são, em geral, o d_{50} (dimensão média) e o d_{90} ” (Coelho, 2005).

Quadro 2.1 - Classificação das areias pelo tamanho do grão (Classificação de J. Boucout – adaptado de: http://oficina.cienciaviva.pt/~pw054/vidro/Areias.htm#_ftnref1)

| Areias | Diâmetro do grão (mm) |
|-------------|-----------------------|
| Grossas | [1; 2] |
| Médias | [0.5; 1] |
| Finas | [0.2; 0.5] |
| Muito finas | [0.02; 0.2] |

A praia da Vagueira é classificada pelo SNIRL (SNIRL@) como uma praia arenosa com sedimentos médios. Analisando o Quadro 2.1 conclui-se que os sedimentos têm um diâmetro médio entre 0.5 e 1 mm.

2.5. Fenómenos de alteração da agitação na propagação em direção à costa

2.5.1. Refração

A refração é o processo pelo qual as ondas que se deslocam em águas pouco profundas em direção oblíqua à batimetria mudam de direção, tendendo as cristas a ficar mais paralelas a essa batimetria (Figura 2.9a).

A refração ocorre em consequência da redução da profundidade em que a onda se desloca e, conseqüentemente, a celeridade da onda diminui. À medida que a onda se aproxima do litoral, os segmentos da crista que se deslocam a menor profundidade propagam-se mais lentamente do que os segmentos em que a profundidade é maior. Assim, a crista tende a encurvar-se, adaptando-se à morfologia do fundo (APRH@, 2007).

O fenómeno de refração das ondas pode ser avaliado pela aplicação da Lei de Snell.

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (2.1)$$

- θ_1 e θ_2 - ângulos de incidência da onda nas profundidades d_1 e d_2 , respetivamente [°];
- c_1 e c_2 - velocidades de propagação da onda nos pontos 1 e 2 [m/s].

2.5.2. Difração

A difração é um encurvamento da propagação da onda quando, no seu percurso, encontra a extremidade de um corpo. É um fenómeno que está intimamente ligado às variações súbitas das condições de propagação da onda provocadas por obstáculos naturais como, por exemplo, ilhas, e por obstáculos artificiais como o caso de quebramares (Figura 2.9b).

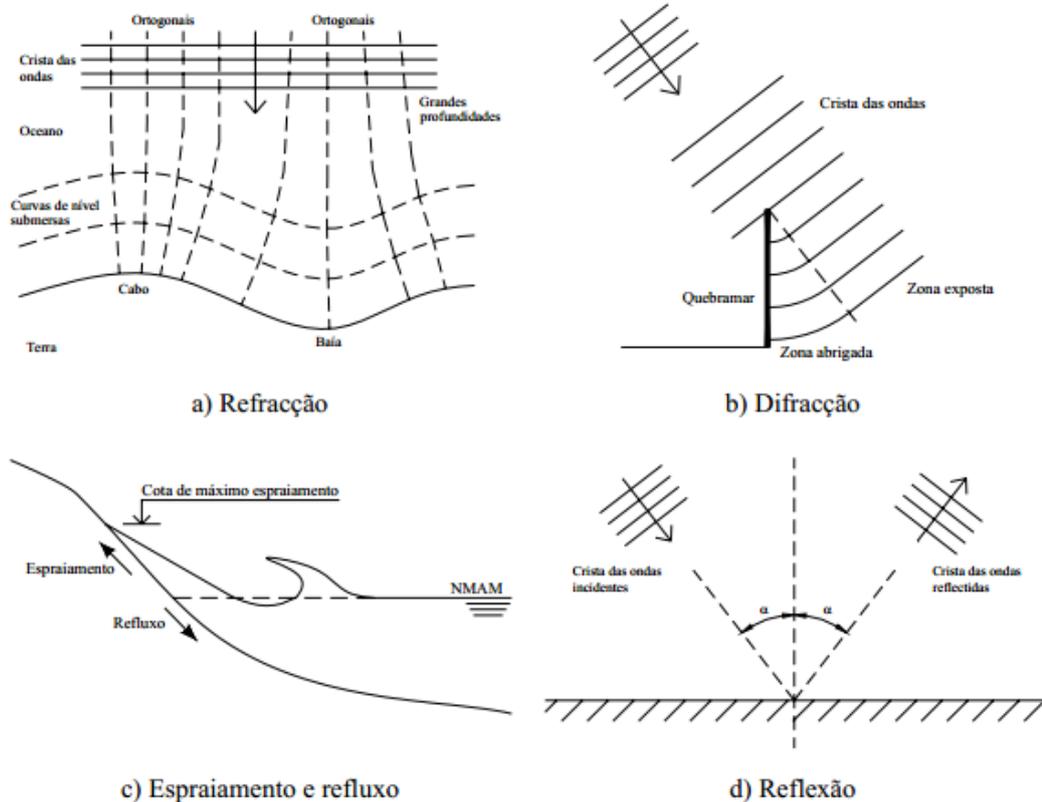


Figura 2.9 - Representação esquemática de fenómenos de alteração de propagação da onda (Coelho, 2005).

A difração da onda resulta assim de uma distribuição espacial não uniforme da altura de onda que provoca modificação da direção de propagação e aumento do comprimento de onda. É um fenómeno de transmissão lateral da energia da onda ao longo da sua crista, no sentido das zonas em que a altura da onda é menor (APRH@, 2007).

2.5.3. Espraimento e refluxo

O espraimento é a movimentação ascendente da água da onda incidente, após a rebentação, através da face da praia. Através do espraio, a água atinge níveis superiores ao da superfície de equilíbrio, ou seja, ao nível médio do mar nesse momento. A direção do espraio é fortemente influenciada pela direção do vento. Esta movimentação de água transporta sedimentos para a parte superior da face da praia, embora de forma seletiva, pois as partículas à medida que o fluxo vai perdendo energia, vão-se depositando de acordo com o diâmetro de sedimentação.

Como se estabelece uma situação de desequilíbrio, verifica-se imediatamente a seguir um refluxo, ou seja, a água, devido à gravidade, movimenta-se no sentido contrário, em direção ao oceano, seguindo o percurso mais fácil, isto é, o de maior declive. O refluxo tem também a capacidade transportadora de sedimentos, começando por mobilizar apenas partículas mais pequenas quando a velocidade do fluxo é reduzida mas que, progressivamente, vai podendo transportar partículas cada vez maiores, à medida que a velocidade aumenta (Figura 2.9c).

2.5.4. Reflexão

Este processo consiste na inversão da direção de propagação da onda ao incidir numa superfície rígida. Se a onda, no final da sua propagação, encontra uma superfície vertical ou de forte inclinação (artificial ou natural), a energia remanescente acaba por ser refletida, total ou parcialmente, para o mar, com pequena transformação de energia (Figura 2.9d).

A quantidade de energia que é refletida por uma praia ou uma estrutura artificial é função da inclinação, da rugosidade e da permeabilidade dessa praia ou dessa estrutura, bem como do declive e do ângulo de incidência da onda (APRH@, 2007).

A forma mais simples para estimar a quantidade de energia que é refletida é através do coeficiente de reflexão (K_r), equação (2.2), havendo expressões empíricas que fornecem melhores estimativas utilizando o Número de Iribarren ξ - *surf similarity parameter*, equação (2.3).

$$K_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (2.2)$$

$$\xi = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\delta}} \quad (2.3)$$

em que:

- H_r - altura da onda refletida [m];
- H_i - altura da onda incidente [m];
- β - inclinação da praia [$^\circ$];
- δ - declividade da onda [m].

O Quadro 2.2 apresenta os tipos de rebentação da ondulação em função do Número de Iribarren.

Quadro 2.2 - Classificação da rebentação das ondas segundo Iribarren.

| Tipo de rebentação | Intervalo de Iribarren |
|--------------------|------------------------|
| Progressiva | $\xi < 0.5$ |
| Mergulhante | $0.5 < \xi < 3.3$ |
| De fundo | $3.3 < \xi$ |

2.6. Profundidade de fecho

A profundidade de fecho 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.

Há várias expressões que permitem determinar a profundidade de fecho h_c , sendo a proposta por Hallermeier (1977) uma das mais utilizadas, equação (2.4) (Nicholls *et al*, 1998):

$$h_c = 2.28H_s - 68.5 \left(\frac{H_s^2}{gT_{H_s}^2} \right) \quad (2.4)$$

em que

- H_s - altura da onda significativa que é excedida 12 horas por ano [m];
- T_{H_s} - período associado à altura da onda significativa [s];
- g - aceleração da gravidade [m/s^2].

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 para a profundidade de fecho (Nicholls *et al*, 1998):

$$h_c = 1.75H_s - 57.9 \left(\frac{H_s^2}{gT_{H_s}^2} \right) \quad (2.5)$$

A equação de Birkemeier produz valores para a profundidade de fecho menores que a equação de Hallermeier, devido aos coeficientes mais baixos 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:

$$h_c = 2H_{mas} \quad (2.6)$$

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

No Quadro 2.3 encontram-se os valores calculados para a profundidade de fecho segundos os autores referidos acima. Os valores para a altura máxima significativa e para o período dessa mesma onda são, respetivamente, 8 m e 15 s. Estes valores foram retirados dos dados

registados entre maio de 2012 e maio de 2013, pela boia ondógrafo de Leixões, disponibilizados pelo Instituto Hidrográfico.

Quadro 2.3 - Valores estimados para a profundidade de fecho (m) segundo diferentes propostas.

| Hallermeier | Birkemeier | GENESIS |
|-------------|------------|---------|
| 16.3 | 12.3 | 16.0 |

Tal como esperado, os valores para a profundidade de fecho são menores quando se usa a expressão de Birkemeier. Estes resultados vão ao encontro dos valores atingidos 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 para a fórmula de Hallermeier e 12.1 m para a fórmula de Birkmeier.

2.7. Cota de berma

A berma é a zona da praia quase horizontal, constituída por deposição de sedimentos pelas ondas, e que apresenta, em geral, uma inclinação suave em direção ao continente e mais acentuada em direção ao mar. Sendo assim, a cota de berma é definida como o limite do perfil transversal ativo da praia (lado da terra), comparativamente com a profundidade de fecho que pode considerar-se ser o limite do lado do mar.

2.8. Taxa de recuo

A taxa de recuo da linha de costa deve-se ao fato do mar avançar sobre a mesma, “roubando” espaço que anteriormente era terra (areia) e agora é ocupado pelo mar.

“Na frente costeira entre a Costa Nova e a Vagueira, o levantamento de 1973 mostra uma restinga arenosa que separa a ria do mar com cotas muito baixas e onde o sistema dunar já nessa data era apenas vestigiário. De 1973 para cá, a erosão foi muito violenta neste segmento litoral, registando-se valores de recuo que, em alguns pontos, chegaram a atingir os 280 m, ou seja, uma taxa de recuo de cerca de 12 m/ano. À medida que se avança para sul

em direção ao esporão da Vagueira, as taxas de erosão vão diminuindo progressivamente” (Coelho, 2005).

Atualmente, na zona da Vagueira a taxa de erosão é muito pequena, devido às obras de proteção costeira existentes no local (esporão da Vagueira e obra de defesa aderente), que estão a cumprir o objetivo de proteção da praia e da frente urbana. Nas fronteiras da zona de estudo, valores de erosão variam ligeiramente como se pode verificar no Quadro 2.4. Em relação ao transporte longitudinal sedimentar, Coelho (2005) refere que na costa Noroeste portuguesa, o balanço anual médio de sedimentos no sentido norte-sul, aproxima-se de $2.0 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Quadro 2.4 - Taxas de recuo médias (m/no) para os trechos considerados (Pereira e Coelho, 2011).

| Trecho | Taxas de recuo médias (m/ano) |
|--------------------------|-------------------------------|
| Norte da Vagueira | 6.6 |
| Vagueira – Frente urbana | - |
| Sul da Vagueira | 6.7 |

2.9. Transporte sedimentar - Fórmula de CERC

Munch-Peterson, engenheiro dinamarquês, foi o primeiro a desenvolver uma fórmula para prever o transporte longitudinal de sedimentos, em 1938. Nos Estados Unidos, o uso de uma fórmula para prever o transporte de sedimentos foi sugerida pela *Scripps Institute of Oceanography*, e foi aplicada pelo *U.S. Army Corps of Engineers*, na costa da Califórnia. Watts e Caldwell (1953 e 1956) fizeram as primeiras medições documentadas de transporte de sedimentos, na Flórida e na Califórnia, o que levou a alterações na fórmula existente. Em 1962, Savage resumiu os dados disponíveis e desenvolveu uma equação que foi adotada em 1966 pelo *U.S. Army Corps of Engineers*, ficando conhecida como fórmula de CERC, *Costal Engineering Research Center*. Os Manuais de Proteção Costeira (*Shore Protection Manual*) de 1977 e 1984 foram atualizando a fórmula de CERC, sendo que a versão mais recente destes manuais é o *Coastal Engineering Manual* (CEM) (U.S. Corp of Engineers (2006).

Apesar desta ser uma das fórmulas mais antigas, é ainda um dos métodos de maior sucesso na determinação do potencial de transporte sedimentar longitudinal. No entanto, a aplicação da

fórmula de CERC (Equação 2.7) fica limitada quando o efeito das correntes se torna significativo. A fórmula assume que a rebentação das ondas se dá em águas pouco profundas e relaciona, de uma forma empírica, o potencial de transporte e o fluxo de energia da onda na rebentação.

$$Q_l = k \left(\frac{\rho \sqrt{g}}{1.6k_b^{0.5}(\rho_s - \rho)(1 - p)} \right) H_b^{2.5} \sin(2\alpha_b) \quad (2.7)$$

em que

- k - coeficiente de proporcionalidade empírico e adimensional [-];
- k_b - índice de rebentação [-];
- ρ_s - massa volúmica dos sedimentos [kg/m^3];
- ρ - massa volúmica da água do mar [kg/m^3];
- g - aceleração da gravidade [m/s^2];
- H_b - altura da onda na rebentação [m];
- α_b - ângulo entre a crista da onda na rebentação e a linha de costa [$^\circ$];
- p - coeficiente de porosidade [-].

Valle *et al.* (1993) propõem uma expressão empírica que relaciona o valor de k (coeficiente de proporcionalidade empírico), equação (2.8), com o diâmetro mediano dos sedimentos. Os resultados que obtiveram do estudo feito no rio Adra, Espanha, evidenciam a tendência de diminuição de k com o aumento da dimensão dos sedimentos (U.S. Corp of Engineers, 2006):

$$k = 1.4e^{(-2.5d_{50})} \quad (2.8)$$

O índice de rebentação permite estimar a profundidade a que se verifica a rebentação e a altura atingida por esta; uma das fórmulas mais utilizadas continua a ser a de McCowan, publicada no século XIX, segundo a qual o índice de rebentação corresponde a:

$$k_b = \frac{H_b}{h_b} = 0.78 \quad (2.9)$$

em que H_b e h_b são, respetivamente, a altura da onda e a profundidade na zona de rebentação (APRH@, 2007).

Bailard (1981-1984) admite ser possível apresentar k em função do ângulo de rebentação das ondas e da relação entre a magnitude da velocidade orbital e a velocidade de queda ou de sedimentação. A velocidade orbital é calculada com base na altura da onda na rebentação, bem como das constantes de Von Karman, de acordo com a seguinte expressão:

$$u_{mb} = \frac{k}{2} \sqrt{gh_b} \quad (2.10)$$

em que

- u_{mb} - velocidade orbital [m/s].

Assim, k poderá ser obtido da seguinte forma:

$$k = 0.05 + 2.6 \sin^2(2\alpha_b) + 0.07 \frac{u_{mb}}{\omega_s} \quad (2.11)$$

em que

- ω_s - velocidade de queda dos sedimentos [m/s].

3. 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 as aplicações disponíveis, foi utilizada o NEMOS, *Nearshore Evolution MOdeling System*, incluído no módulo *Beach*. Esta aplicação é útil para simular a evolução da linha de costa com a informação relativa à batimetria e cartografia da zona de estudo, bem como as condições de agitação.

Dentro do NEMOS, os modelos utilizados são o STWAVE e o GENESIS. O STWAVE é um modelo de diferenças finitas formulado numa grelha de células quadradas e que funciona sobre um sistema de coordenadas locais. Uma descrição mais detalhada deste modelo é apresentada no subcapítulo 3.2. O GENESIS é o modelo responsável por calcular a evolução da linha de costa, em consequência da ação das ondas. A formulação matemática, bem como as potencialidades e limitações deste modelo são apresentadas com mais detalhe no subcapítulo 3.3.

3.1. Preparação dos dados de modelação

3.1.1. GRID GENERATOR

A ferramenta *GRID GENERATOR* do 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). A base de informação do terreno deve contemplar informação batimétrica e cartográfica. Quando os dados existentes

são relativos a coordenadas geográficas, devem ser convertidos em coordenadas cartesianas (UTM) para ser possível a sua utilização nas aplicações do NEMOS (Pereira, 2012).

A Figura 3.1 representa a grelha da zona de estudo, em 3D, sobre a qual é aplicado o STWAVE, em que é possível relacionar a elevação (profundidade) com as coordenadas dos pontos do litoral costeiro em estudo.

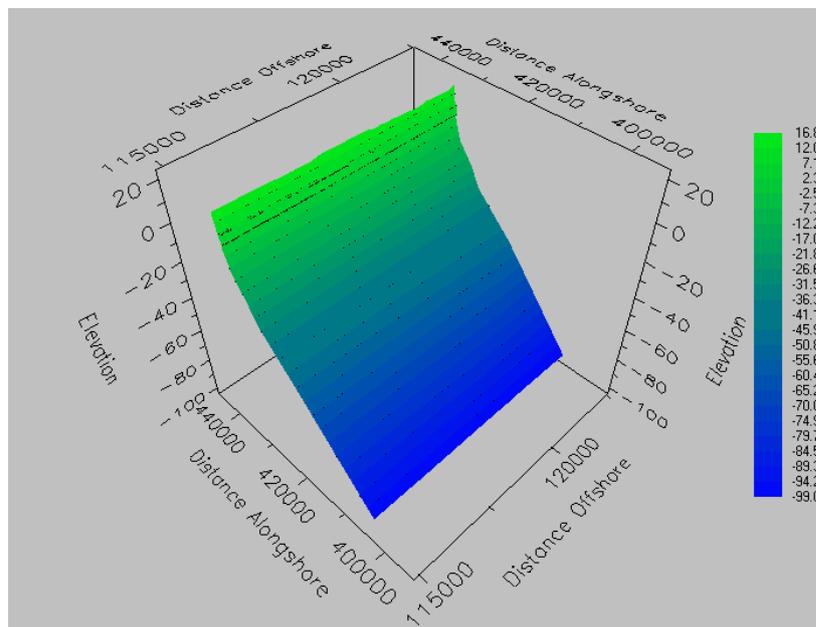


Figura 3.1 - Representação 3D da grelha do STWAVE, CEDAS.

A grelha do GENESIS é o domínio computacional para a simulação da evolução da linha de costa ao longo do tempo. Ao definir a grelha, identifica-se nesta a localização da origem do referencial, o seu espaçamento uniforme, a extensão da zona em estudo e a profundidade de fecho.

A grelha para o modelo GENESIS foi definida de sul para norte, permitindo a análise de 5600m 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 de 10 m de lado.

O GRID GENERATOR permite ainda a definição da localização das estações que funcionam como pontos de registo de dados da agitação ao longo da costa para o modelo de propagação de ondas STWAVE, os quais são posteriormente utilizados como dados de entrada para o modelo GENESIS (Pereira, 2012).

A Figura 3.2 mostra o trecho que é objeto de estudo no âmbito deste trabalho.



Figura 3.2 - Zona de estudo (Imagem Google Earth – Retirado em Março de 2013).

3.1.2. WWWL

Para especificar registos de dados como ondas, vento e níveis da superfície da água utiliza-se a ferramenta WWWL do NEMOS (*Waves, Wind and Water Levels*).

Os cenários de simulação foram criados assumindo registos diários de ondulação espaçados de 6 horas, respeitando a gama de frequência de ocorrência das ondas.

A aplicação WWWL permite filtrar os dados de onda tendo em conta vários critérios, como a altura de onda, o período, ou por intervalo de dados. Em relação ao transporte de sedimentos, estes podem ser filtrados para que as taxas de transporte insignificantes sejam removidas, o que é bastante útil para a realização das simulações no GENESIS. Ao remover esses eventos, o modelo vai realizar simulações mais eficientes em termos de tempo de execução (Pereira, 2012).

3.1.3. SPECGEN

A aplicação SPECGEN consiste em criar os espectros de densidade de energia relativos a cada onda.

O espectro empírico utilizado pelo SPECGEN é o TMA, *Texel, Maarsen and Arsloe*, nomes das fontes de dados usadas no seu desenvolvimento. O TMA apresenta-se como uma variação do espectro de energia de *Jonswap*, tendo em conta a influência da profundidade da coluna de água finita, dada pela função *Kitaigorodoski* (U.S. Army Corps of Engineers, 2006).

Este espectro empírico é usado para determinar a distribuição da densidade de energia realizada através de uma função *cos seno*, em função do desvio angular da direção da onda espectral (Pereira, 2012).

3.2. STWAVE

A ferramenta do NEMOS responsável pela simulação da propagação do clima de agitação de condições ao largo (*offshore*) para a proximidade da costa (*nearshore*) é a STWAVE, *Steady-State Spectral Wave Model*. O seu nome advém do fato de se assumir uma condição estacionária do vento em tempo suficiente para que as ondas sejam limitadas pelo *fetch* ou tenham atingido o estado completo de desenvolvimento, *Steady-State*, e do fato dos dados de entrada serem espectros de energia de onda (Pereira, 2012).

O objetivo dos modelos que fazem a propagação de ondas desde condições ao largo até condições junto à costa é a descrição quantitativa das mudanças que ocorrem nos parâmetros da onda, tais como a altura de onda, o período/frequência, a direção e o espectro.

O STWAVE 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 ficheiro contendo informação relativa ao espectro direcional de cada onda é lido na fronteira oceânica e é depois propagado até às estações (profundidade de fecho) onde é recolhida a informação de cálculo dos valores da distribuição das alturas, dos períodos significativos, das direções predominantes e da distribuição espectral de energia (Pereira, 2012).

O STWAVE é um modelo do tipo *half-plane*, ou seja, apenas efetua a propagação em direção à costa. Porém, não contempla fenómenos de refração e de reflexão de ondas provenientes da costa, por estruturas marítimas ou pela inclinação de fundo que dê origem a ondas com direções entre os 85° e os 275° (Pereira, 2012).

3.3. GENESIS

3.3.1. Considerações gerais

O GENESIS, *GENERALized model for SIMulating Shoreline change*, foi desenvolvido pelo *U.S. Army's Corps of Engineers*. Este modelo numérico simula as alterações da linha de costa de uma determinada região, sendo capaz de determinar os avanços e recuos da mesma.

O GENESIS é um sistema de modelos numéricos que permite a simulação da alteração do litoral durante um longo período, de meses a anos, causada principalmente pela ação das ondas. A escala física do comprimento horizontal do modelo varia de um a dez quilómetros. O sistema é generalizado, no sentido em que o modelo pode ser usado para simular as alterações no litoral com uma grande variedade de configurações de praia e de estruturas na costa, especificadas pelo utilizador (Hanson, 1987).

A rebentação das ondas incidentes com um dado ângulo, provocam um transporte longitudinal ao longo da linha de estudo e os gradientes entre os volumes que entram e saem num determinado trecho costeiro fazem avançar ou regredir a mesma. 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 pela alteração da linha de costa através da avaliação do balanço de massas.

O volume de sedimentos em circulação é calculado pela fórmula de CERC, mas com uma correção para o comportamento das ondas por difração na proximidade de estruturas. O modelo utiliza um valor único da profundidade de fecho para toda a costa apesar de, na proximidade de grandes estruturas, como quebramares e esporões extensos, o clima de agitação ser mais calmo e conseqüentemente a profundidade de fecho ser menor (Coelho, 2005). O modelo GENESIS utiliza uma grelha unidimensional para a representação dos resultados após corridas as simulações.

3.3.2. Quantificação do transporte sólido

Hanson (1989) salienta que o volume de transporte de sedimentos, no GENESIS, é dado pela seguinte expressão:

$$Q_l = H_{bs}^2 C_{gb} \left(a_1 \sin 2\alpha_b - a_2 \cos \alpha_b \frac{\delta H_{bs}}{\delta x} \right) \quad (3.1)$$

onde os parâmetros adimensionais a_1 e a_2 são, respetivamente:

$$a_1 = \frac{K_1}{16 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1 - p) (1.416)^{2.5}} \quad (3.2)$$

$$a_2 = \frac{K_2}{8 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1 - p) \tan \beta (1.416)^{2.5}} \quad (3.3)$$

em que

- H_{bs} - altura da onda significativa na zona de rebentação [m];
- C_{gb} - celeridade na zona de rebentação [m/s];

- α_b - ângulo entre a crista da onda na rebentação e a linha de costa [$^\circ$];
- $\tan \beta$ - declive do fundo [m];
- K_1 e K_2 - 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 do GENESIS $[H_{bs}^2 C_{gb} (a_1 \sin 2\alpha_b)]$, é conhecido como fórmula de CERC (Equação 2.7) e trata o transporte litoral produzido pela rebentação das ondas incidentes, enquanto o segundo termo $[H_{bs}^2 C_{gb} (a_2 \cos \alpha_b \frac{\delta H_{bs}}{\delta x})]$ está relacionado com a altura de onda na rebentação e com o gradiente de transporte litoral $[\frac{\delta H_{bs}}{\delta x}]$.

3.3.3. Condições de fronteira

Os limites físicos que permitem confinar a área de trabalho facilitam e objetivam a análise do caso de estudo. Todos os cálculos relativos à evolução da linha de costa estão dependentes da formulação das condições de fronteira. Neste sentido, o estabelecimento das condições de fronteira num projeto é um passo importante na modelação de um trecho da costa, embora nem sempre seja fácil a sua definição (Sena, 2010).

No modelo GENESIS, as condições de fronteira estão diretamente relacionadas com o transporte longitudinal, sendo que a forma mais expedita de formular as condições de fronteira é a de adotar estruturas (fixas) existentes no domínio que permitam o estabelecimento dos limites de cálculo.

Na prática, morfologicamente as condições de fronteira podem ser representadas pelos seguintes locais ou construções marítimas (Sena, 2010):

- Esporões, quebramares, ou outro tipo de estrutura que bloqueie por completo o transporte de sedimentos;
- Locais onde o transporte de sedimentos seja conhecido – zonas onde a linha de costa se mantém inalterada durante longos períodos de tempo;
- Locais onde se conheça exatamente o fluxo de transporte – aberturas em quebramares ou locais onde se efetue o bombeamento de sedimentos por sucção contínua.

Nem sempre existem condições de fronteira de implantação evidente, quer seja porque a zona de estudo não possui limites físicos claros ou porque os dados disponíveis são incoerentes. Nestes casos cabe ao utilizador ponderar sobre os limites de fronteira a adotar.

3.3.4. 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 (Pereira, 2012).

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 ;
- 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 pode ser aplicado.

3.4. 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.

Nesta dissertação simularam-se dois casos de estudo, sendo que o primeiro corresponde à simulação de apenas uma onda e o segundo corresponde à simulação com um clima de agitação representativo do real. Os parâmetros de calibração específicos para cada caso de estudo encontram-se descritos nos seguintes subcapítulos.

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 utiliza o sistema de coordenadas *Datum* Europeu de 1950. Associado aos 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 (Pereira e Coelho, 2012).

Sendo a linha de costa o lugar geométrico dos pontos obtidos pela interseção do plano do nível médio da água do mar (cota +2.0 m ZH) com o terreno costeiro, foram realizados alguns ajustes na batimetria e topografia, de modo a que a linha de costa fosse coincidente com a posição definida através da imagem de satélite atual. Como referido, a criação da grelha regular para efeitos de modelação, foram consideradas células de malha quadrada, com espaçamento de 10 m.

As obras de defesa costeiras 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. A posição do esporão da Vagueira (limite sul da zona de estudo) encontra-se, no GENESIS, no *Index* 48 e o esporão da Costa-Nova (limite norte da zona de estudo) está posicionado no *Index* 512. A distância entre estes dois esporões é de 4640 m. Ambos têm as dimensões próximas da realidade (têm respetivamente, 130 m e 150 m) e a sua permeabilidade foi ajustada para os casos em estudo, de modo a obter resultados os mais realistas possíveis. Há ainda outra obra de defesa costeira correspondente à estrutura aderente que protege a frente urbana da Vagueira. Esta obra inicia-se na mesma

posição do esporão da Vagueira e termina no *Index* 113, tendo assim um comprimento de 650 m. Na Figura 3.3 pode visualizar-se o esquema da zona de estudo.

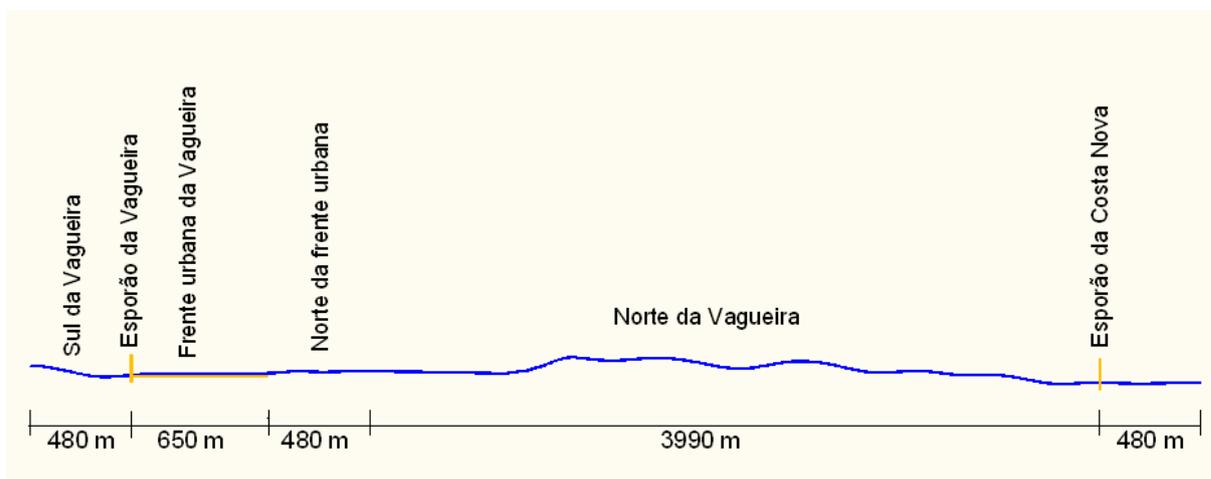


Figura 3.3 - Situação inicial para todos os casos de estudo.

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 (Equação 2.5). A dimensão média dos sedimentos foi considerada igual a 0.5 m (SNIRL@) e os parâmetros de calibração relativos ao transporte e deposição dos sedimentos, k_1 e k_2 , variam consoante os casos em 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 - Quadro 2.4 (Pereira e Coelho, 2011).

Os resultados apresentados nos Quadros 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 foram calculados tendo em conta a média das diferenças entre as linhas de costa inicial e finais para cada teste, estando limitada a três zonas: Sul do esporão da Vagueira (480 m de comprimento), Frente urbana da Vagueira (650 m de comprimento) e Norte da frente urbana (480 m de comprimento). Estes intervalos foram os considerados de interesse para o caso de estudo da presente Dissertação.

3.4.1. Calibração para o primeiro caso de estudo

Neste caso, apenas foi considerada uma onda com altura de 1.5 m e período 6 s, de orientação NNW (nor-noroeste). Esta escolha teve por base, o fato de ser uma onda significativa média da zona de estudo. Esta onda foi definida no SPECGEN com as características mencionadas. Este modelo produziu o espectro energético da onda e foi usado como ficheiro de entrada no modelo STWAVE. Este modelo propagou esta onda desde o largo até à profundidade de fecho, armazenando essa informação nas estações.

No GENESIS, após várias simulações e análise das mesmas, o modelo ficou calibrado para dois cenários. Ambos para permeabilidade 1 no esporão da Vagueira, mas valores diferentes para os parâmetros k_1 e k_2 . A permeabilidade dos esporões foi considerada 1 de modo a obter taxas de recuo de acordo com os dados apresentados no Quadro 2.4. Os valores da permeabilidade juntamente com os valores de k_1 e k_2 , permitiram uma calibração mais eficiente, justamente para estar de acordo com os dados apresentados.

A fim de avaliar os impactos que a taxa de transporte longitudinal de sedimentos provoca quando se introduz uma estrutura marítima, consideraram-se dois cenários: o primeiro, em que $k_1 = k_2 = 0.1$ o que conduz a menores taxas de transporte longitudinal de sedimentos; e o segundo com $k_1 = k_2 = 0.5$, em que o transporte é mais elevado. Ainda que haja variação no transporte, os valores das taxas de recuo a sul do esporão da Vagueira, mantém-se de acordo com os valores apresentados por Pereira e Coelho (2011).

Após calibração do modelo, testou-se a introdução de estruturas marítimas, neste caso quebramares destacados, o que, após várias simulações e análise das mesmas, tornou-se possível chegar a dois tipos de combinação, ou seja, uma primeira combinação composta por dois quebramares destacados (um retilíneo e um em forma de V) e uma segunda combinação composta por três quebramares (um retilíneo, seguido de um em forma de V e um outro retilíneo) – Figura 3.4. Nesta Figura é possível verificar as distâncias entre os quebramares destacados, bem como a distância ao esporão da Vagueira. Estas dimensões foram conseguidas após várias simulações, sendo estas as configurações que melhor se adaptam aos cenários testados.

Estas duas combinações foram testadas para vários coeficientes de transmissão - K_T , sendo que apenas serão apresentados os resultados para um coeficiente de 0 e para um coeficiente de 0.25. Este coeficiente descreve o movimento das ondas através da estrutura e o seu impacto na

posição da linha de costa, indicando qual a relação entre a altura da onda antes do quebramar destacado e a altura da onda após a estrutura, variando entre 0 e 1, em que 0 significa que o quebramar é uma estrutura impermeável e 1 significa uma transmissão completa da onda. O valor 0.25 foi admitido como o máximo razoável em função dos resultados obtidos.

Os resultados finais que são apresentados no Capítulo 4 da presente Dissertação foram precedidos de vários testes de calibração, de modo a obter o melhor resultado de taxas de recuo em frente à obra de defesa frontal, no que diz respeito ao tamanho e posição dos quebramares, bem como a sua composição e respetivos coeficientes de transmissão.

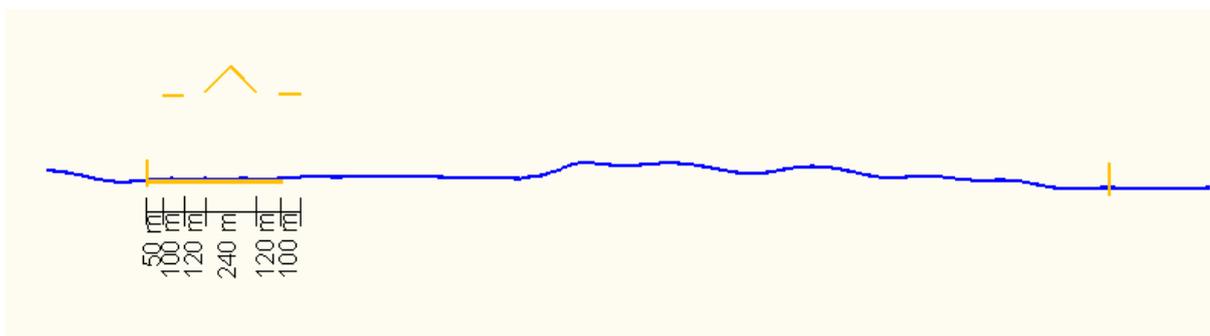


Figura 3.4 - Esquema representativo da configuração dos quebramares destacados.

Os quebramares têm dimensões iguais a 100 m de comprimento (no caso dos quebramares retilíneos) e o quebramar em V tem 170 m em cada braço com comprimento total de 240 m (Figura 3.4). Encontram-se ambos a uma profundidade de 6.5 m, em situação de baixa-mar de modo a ficarem sempre submersos. A altura de cada estrutura pode variar entre os 3 e os 5 m.

O seguinte esquema (Figura 3.5) resume os testes do primeiro caso de estudo, apresentados no Capítulo 4.

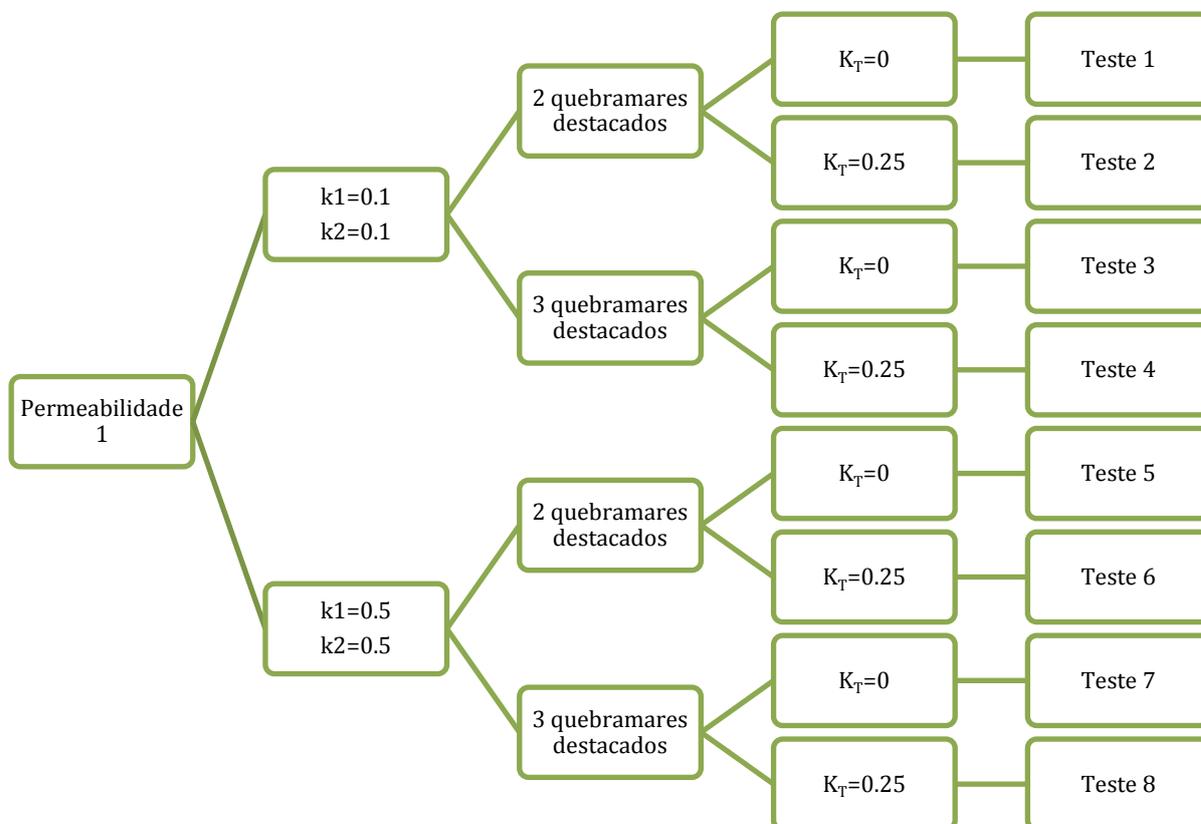


Figura 3.5 – Esquema representativo dos testes realizados para o primeiro caso de estudo.

3.4.2. Calibração para o segundo caso de estudo

Para analisar o comportamento da linha de costa na presença de quebramares destacados, optou-se por simular um clima de agitação representativo do real. Neste caso, o clima de agitação simulado teve como base o registado entre 1981 e 2001 na boia de Leixões.

Estes dados foram tratados estatisticamente e foram consideradas 5 classes de altura e períodos de onda para 7 classes de direção da onda, dando como resultado 35 ondas características do clima de agitação para a zona de estudo. Esses mesmos dados foram obtidos por Coelho e Veloso-Gomes (2003) e podem ser visualizados Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Clima de agitação médio anual com base nos registos da boia de Leixões, entre 1981 e 2001 - percentagem de ocorrência (%); Fonte: Coelho e Veloso-Gomes (2003).

| Altura e período de onda | Direção da onda | | | | | | | Σ |
|---------------------------------------------------|-----------------|-------|-------|------|------|------|------|------------|
| | NNW | NW | WNW | W | WSW | SW | SSW | |
| H_s=0,5 m; T_{Hs}=7,6 s | 3.62 | 9.93 | 7.63 | 1.99 | 0.40 | 0.21 | 0.11 | 23.87 |
| H_s=1,5 m; T_{Hs}=8,8 s | 6.73 | 18.78 | 13.35 | 3.40 | 0.87 | 0.68 | 0.25 | 44.06 |
| H_s=2,5 m; T_{Hs}=10,0 s | 3.32 | 10.97 | 7.16 | 1.68 | 0.64 | 0.58 | 0.17 | 24.52 |
| H_s=4,5 m; T_{Hs}=12,4 s | 0.14 | 3.37 | 2.41 | 0.34 | 0.08 | 0.05 | 0.02 | 6.40 |
| H_s=8,5 m; T_{Hs}=17,2 s | 0.00 | 0.55 | 0.34 | 0.26 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.15 |
| Σ | 13.79 | 43.60 | 30.89 | 7.67 | 1.99 | 1.52 | 0.55 | 100 |

As ondas introduzidas no SPECGEN têm as características presentes no Quadro 3.2. Estes dados foram retirados do Quadro 3.1 tendo em conta que, para a mesma classe de onda foram consideradas orientações diferentes. Os registos com valores inferiores a 1% não foram considerados pois admitiu-se que não têm influência nos resultados, sendo que os outros foram sujeitos a pequenas correções. Depois desta análise ficou-se apenas com quatro orientações diferentes das ondas (NNW, NW, WNW, W), reduzindo assim o volume de cálculos de propagação de cenários de ondas (Quadro 3.2).

Quadro 3.2 - Frequência e características das ondas usadas no STWAVE.

| Altura (m) | Período (s) | Orientação | Frequência (%) |
|------------|-------------|------------|----------------|
| 0.5 | 7.6 | NNW | 4 |
| 0.5 | 7.6 | NW | 10 |
| 0.5 | 7.6 | WNW | 8 |
| 0.5 | 7.6 | W | 2 |
| 1.5 | 8.8 | NNW | 7 |
| 1.5 | 8.8 | NW | 19 |
| 1.5 | 8.8 | WNW | 14 |
| 1.5 | 8.8 | W | 4 |
| 2.5 | 10 | NNW | 4 |
| 2.5 | 10 | NW | 11 |
| 2.5 | 10 | WNW | 8 |
| 2.5 | 10 | W | 2 |
| 4.5 | 12.4 | NW | 4 |
| 4.5 | 12.4 | WNW | 3 |

O espectro de ondas produzido pelo SPECGEN é um dos ficheiros de entrada do STWAVE. Após a corrida de ondas com este modelo, procedeu-se à calibração do GENESIS. Os valores de calibração usados no primeiro caso de estudo não possibilitaram que, com o clima de agitação representativo do real, se obtivessem as condições necessárias para que o modelo ficasse calibrado. Como tal, foram realizadas várias simulações de modo a encontrar os valores dos coeficientes que mais se adequam à zona de estudo com este clima de agitação.

Mantendo a mesma permeabilidade do caso anterior, os valores mais adequados de k_1 e k_2 são: $k_1 = 0.02$ e $k_2 = 0.01$. Estes valores produzem baixas taxas médias de acumulação de sedimentos na frente urbana e foram os melhores valores encontrados no processo de calibração do modelo para o clima de agitação definido.

Na tentativa de melhorar as taxas de sedimentos testaram-se climas de agitação diferentes, ou seja, o mesmo conjunto de ondas (respeitando a ocorrência das mesmas) mas com sequência diferente. No entanto, a sequência de ondas não alterou significativamente os resultados e como tal o clima de agitação foi considerado o mesmo em todos os testes realizados. O mesmo pode ser confirmado no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Resultados das taxas de recuo para dois climas de agitação aleatórios (com a mesma frequência de ondas) – Sinal (-) significa recuo da linha de costa.

| Taxas de recuo (m/ano) | Clima de agitação aleatório 1 | Clima de agitação aleatório 2 |
|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Sul do esporão da Vagueira | - 5.20 | -5.25 |
| Frente urbana da Vagueira | 0.61 | 0.61 |
| Norte da frente urbana | 0.39 | 0.35 |

Este clima de agitação foi bastante difícil de calibrar. Isto acontece porque se trata de um conjunto de ondas diferentes, com rumos diferentes, o que provoca instabilidades numéricas às quais o GENESIS é sensível, nomeadamente na posição da linha de costa. Para contornar este problema, optou-se por excluir as ondas com altura de 4.5 m e as ondas com orientação W (oeste). Esta opção teve como base a baixa frequência de ocorrência de ondas de 4.5 m (cerca de 7%) tal com a baixa frequência de ondas orientadas a oeste (cerca de 7%).

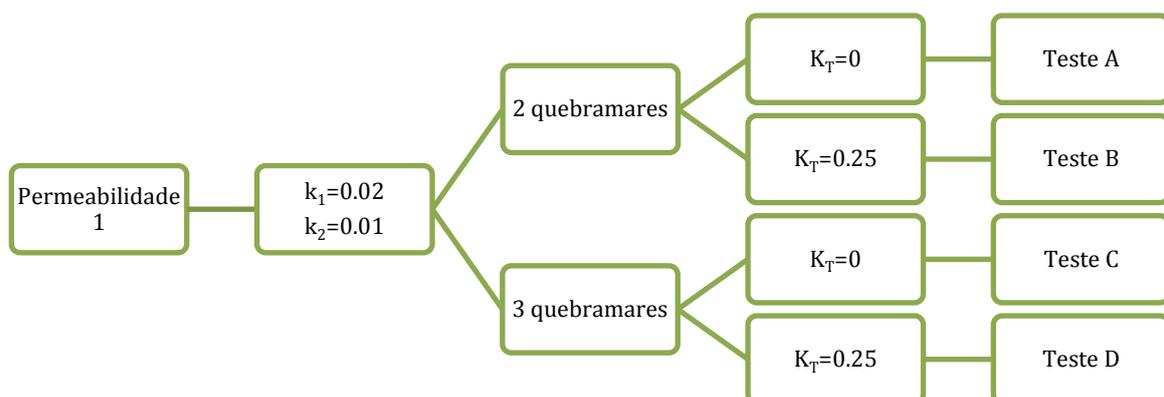
Sendo assim, o Quadro 3.2 sofre alterações, dando origem ao Quadro 3.4. Este tem a informação utilizada nos testes para o segundo caso de estudo.

Quadro 3.4 - Frequência e características das ondas usadas no processo de calibração do segundo caso de estudo.

| Altura (m) | Período (s) | Orientação | Frequência (%) |
|------------|-------------|------------|----------------|
| 0.5 | 7.6 | NNW | 5 |
| 0.5 | 7.6 | NW | 12 |
| 0.5 | 7.6 | WNW | 9 |
| 1.5 | 8.8 | NNW | 8 |
| 1.5 | 8.8 | NW | 22 |
| 1.5 | 8.8 | WNW | 16 |
| 2.5 | 10 | NNW | 5 |
| 2.5 | 10 | NW | 13 |
| 2.5 | 10 | WNW | 9 |

De modo a compreender quais as estruturas que mais se adequam à zona de estudo, as combinações de quebramares destacados vão manter-se iguais às testadas no primeiro caso de estudo, tal como os coeficientes de transmissão.

De forma análoga ao primeiro caso de estudo, os testes resumem-se ao seguinte esquema (Figura 3.6).

**Figura 3.6 – Esquema representativo dos testes realizados para o segundo caso de estudo.**

Os resultados finais para este caso de estudo são apresentados no Capítulo 4 da presente Dissertação, bem como a análise dos mesmos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados mantêm as mesmas dimensões e distâncias entre os quebramares destacados (Figura 3.4), de modo a haver condições iguais para comparação. Os testes que dizem respeito à estrutura constituída por dois quebramares, naturalmente, não têm o quebramar retilíneo a norte do quebramar em V representados na Figura 3.4.

O tempo de simulação de cada teste foi de 10 anos e estes foram sempre comparados com a situação de referência, ou seja, sem a presença de quebramares destacados. A situação de referência em cada Figura deste capítulo corresponde à primeira linha de costa ilustrada nas mesmas e diz respeito à simulação sem quebramares destacados para cada caso de estudo. As quatro linhas de costa seguintes dizem respeito aos resultados finais dos testes efetuados para cada caso.

Os resultados da linha de costa ao fim de 10 anos de simulação foram tratados no software AutoCAD. Os resultados dados pelo GENESIS para todos os testes descritos encontram-se em Anexo.

4.1. Resultados do primeiro caso de estudo

Na Figura 4.1 é possível verificar a evolução da linha de costa para os Testes 1, 2, 3 e 4 em relação à situação sem quebramares destacados. Para este caso, encontram-se em Anexo os resultados obtidos pelo GENESIS, e dizem respeito às Figuras 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 e 0.5.

Para o cenário em que $k_1 = 0.1$ e $k_2 = 0.1$ e pela análise da Figura 4.1 e do Quadro 4.1, verifica-se um aumento de sedimentos na zona dos quebramares destacados em relação à situação inicial.

Em termos visuais, os Testes 1 e 2 são os que apresentam uma linha de costa mais uniforme em relação à situação de referência. A frente urbana tem um ganho bastante positivo, aumentando de cerca de 1 m/ano para aproximadamente 9 m/ano no caso do Teste 1, e

aumentando cerca de 6 m/ano no caso do Teste 2. A zona a norte da frente urbana também tem um ganho positivo para estes dois testes, embora só se considerem 480 m de extensão para norte. A zona a sul do esporão da Vagueira, como era esperado, vai recuar para o dobro da situação sem quebramares. No entanto, como o objetivo é proteger a frente urbana, os ganhos neste trecho compensam as perdas a sul do esporão.

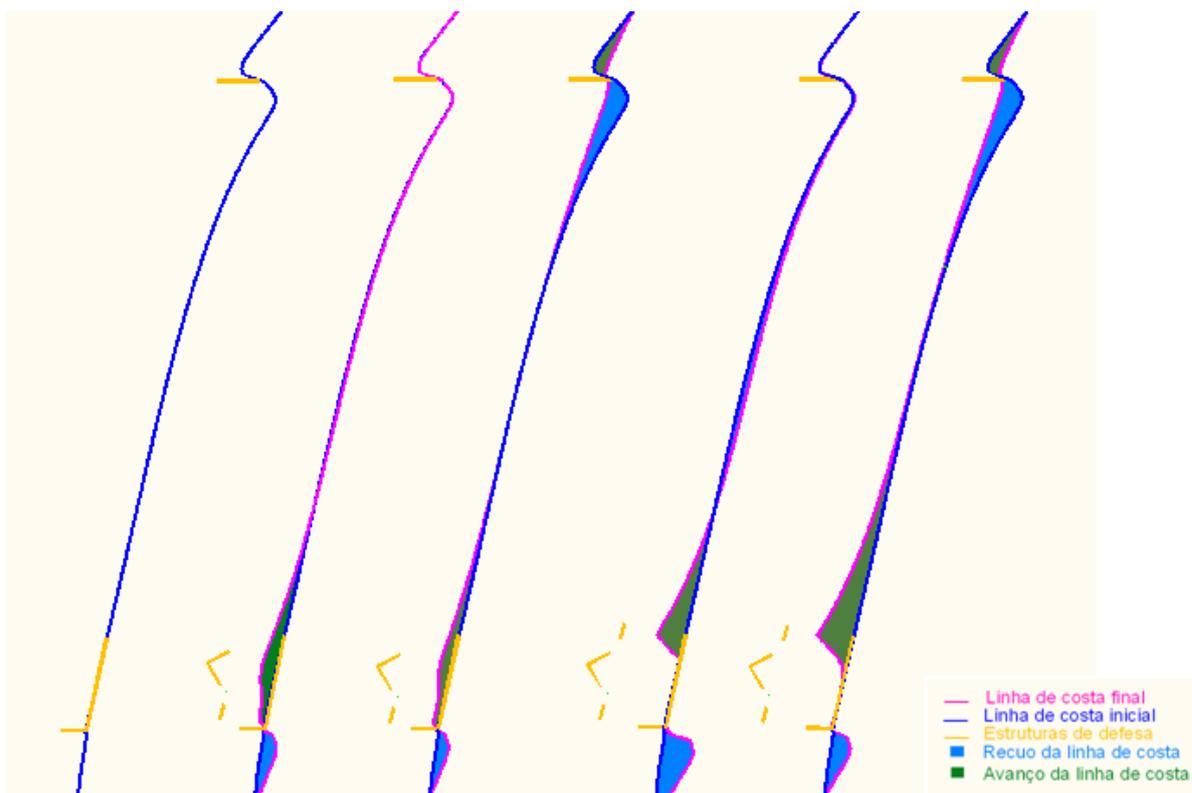


Figura 4.1 – Resultados dos Testes 1, 2, 3 e 4.

O Testes 3 e 4 apresentam valores médios mais baixos na frente urbana, pois existe uma maior acumulação a norte deste trecho. Isto acontece porque o quebramar retilíneo, a norte do quebramar em V, dificulta a passagem de sedimentos para a zona do esporão da Vagueira. Consequentemente, os valores para o trecho a norte da frente urbana são bastante elevados. O contrário se passa a sul, ou seja, há um agravamento ainda maior nas taxas de recuo a sul da Vagueira.

Os valores das taxas de acumulação de sedimentos na frente urbana são mais pequenos quando se usa um coeficiente de transmissão não nulo.

Como seria de esperar, as taxas de transporte sólido médias anuais diminuem consoante a eficiência das estruturas, pois os sedimentos tendem a acumular nas zonas dos quebramares.

Quadro 4.1 – Resultados da variação da posição média da linha de (m/ano) e do transporte sólido para o primeiro cenário. (Sinal (-) significa recuo da linha de costa).

| <i>Trechos</i> | <i>Taxas de recuo médias (m/ano)</i> | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | Sem quebramares | Teste 1 | Teste 2 | Teste 3 | Teste 4 |
| Sul do esporão da Vagueira | -4.69 | -9.87 | -9.72 | -13.19 | -13.16 |
| Frente urbana da Vagueira | 0.08 | 8.67 | 6.07 | 5.12 | 4.82 |
| Norte da frente urbana | 0.14 | 5.86 | 4.09 | 16.36 | 14.61 |
| Transporte sólido médio anual (x 10³ m³) | 254 | 222 | 226 | 187 | 187 |

Na Figura 4.2 está representada a evolução da linha de costa para os Testes 5, 6, 7 e 8 em relação à situação sem quebramares destacados. Para este caso, encontram-se em Anexo os resultados obtidos pelo GENESIS, e dizem respeito às Figuras 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 e 0.10.

Para o cenário em que $k_1 = 0.5$ e $k_2 = 0.5$, as diferenças observadas relativamente ao cenário anterior, correspondem a maiores taxas de acumulação de sedimentos, tal como se pode observar na Figura 4.2 e comprovar com os dados do Quadro 4.2. O tempo de corrida de simulação manteve-se igual ao anterior (10 anos), mas no caso do Teste 7 e do Teste 8, o programa não permitiu que a simulação se estendesse até aos 10 anos pois os sedimentos entraram em contato com um dos quebramares destacados, formando um tómbolo, o que levou ao término da simulação.

As taxas de sedimentos na frente urbana são bastante superiores às do cenário anterior. Isto acontece porque, neste caso, os valores de k_1 e k_2 aumentaram o que, conseqüentemente, levou a que o transporte sólido médio anual aumentasse. O mesmo se passa a norte da frente urbana e agrava-se ainda mais nos Testes 7 e 8 pela mesma razão apresentada no cenário anterior, ou seja, o quebramar a norte dificulta a passagem dos sedimentos para sul.

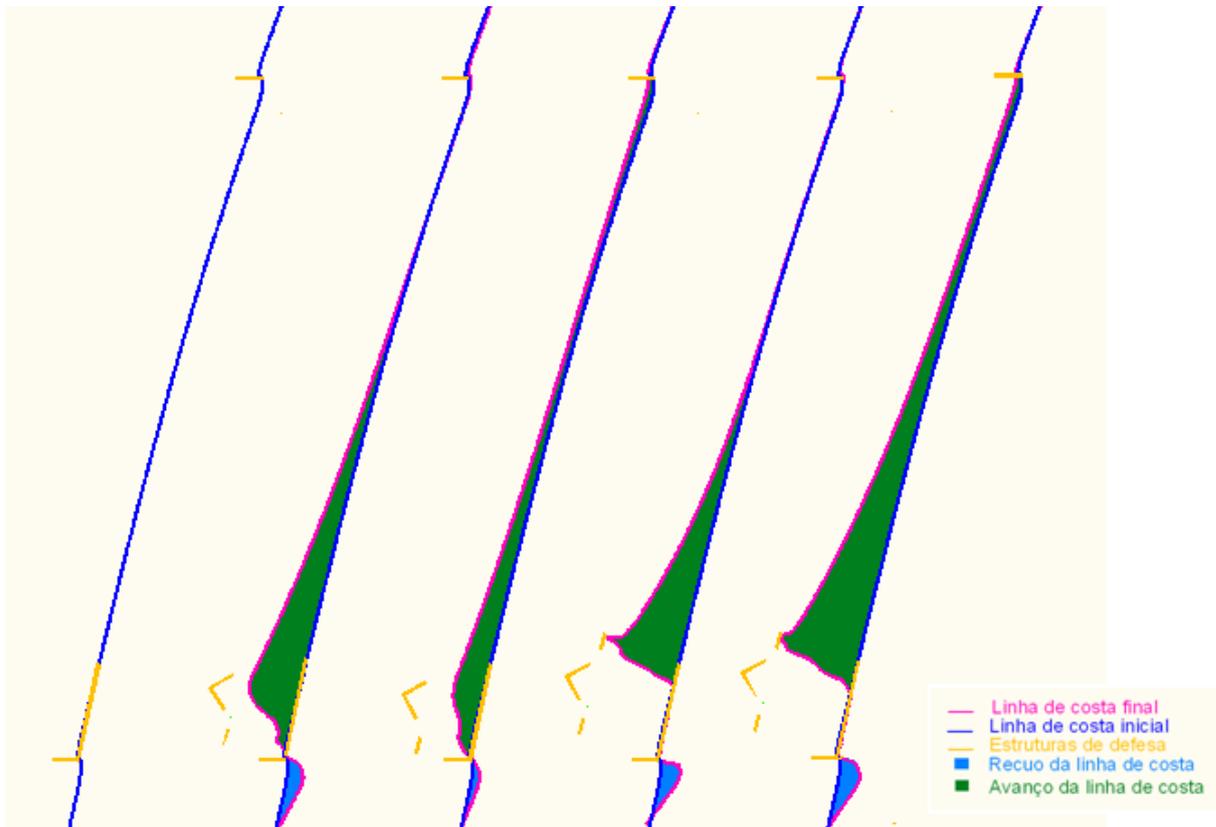


Figura 4.2 – Resultados dos Testes 5, 6, 7 e 8.

Os Testes 5 e 6, apesar de terem uma elevada taxa de acumulação de sedimentos junto à obra de defesa frontal, são o conjunto de estruturas que mais se adequam ao clima de agitação testado. Para a situação de dois quebramares destacados, o maior coeficiente de transmissão (0.25) conduz a taxas de acumulação inferiores comparando com o coeficiente 0.

É de notar que, entre os dois cenários testados, as diferenças do transporte sólido médio anual se devem aos valores de k_1 e k_2 . Maiores valores para estes parâmetros levam a maior caudal sólido transportado, com uma maior e mais rápida reação da linha de costa à introdução das novas estruturas.

Quadro 4.2 – Resultados da variação da posição média da linha de (m/ano) e do transporte sólido para o segundo cenário. (Sinal (-) significa recuo da linha de costa).

| <i>Trechos</i> | <i>Taxas de recuo médias (m/ano)</i> | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | Sem quebramares | Teste 5 | Teste 6 | Teste 7 | Teste 8 |
| Sul do esporão da Vagueira | -6.6 | -11.98 | -9.64 | -9.67 | -13.88 |
| Frente urbana da Vagueira | 0.20 | 22.66 | 14.40 | 9.35 | 9.57 |
| Norte da frente urbana | -0.37 | 23.52 | 13.79 | 33.33 | 39.69 |
| Transporte sólido médio anual (x 10³ m³) | 1368 | 1137 | 1113 | 446 | 795 |

Dos vários testes realizados, verificou-se que a profundidade tem influência direta com a acumulação de sedimentos, ou seja, quanto mais próximo o quebramar estiver da costa, conseqüentemente a uma profundidade menor, maior a quantidade de sedimentos acumulados na frente urbana.

4.2. Resultados do segundo caso de estudo

Na Figura 4.3 é possível verificar a evolução da linha de costa para os testes A, B, C e D em relação à situação sem quebramares destacados. Para este caso, encontram-se em Anexo os resultados obtidos pelo GENESIS, e dizem respeito às Figuras 0.11, 0.12, 0.13, 0.14 e 0.15.

Para o segundo caso de estudo em que $k_1 = 0.02$ e $k_2 = 0.01$, e analisando a Figura 4.3 e o Quadro 4.3, é possível verificar que em todos os Testes existe acumulação de sedimentos na frente urbana. Neste caso, a linha de costa é mais irregular, comparando com o caso de estudo anterior, devido ao clima de agitação não ser constante.

Ainda assim, a função dos quebramares destacados está a ser cumprida. Apesar de todos os testes apresentarem acumulação de sedimentos, os que melhor se ajustam às condições testadas são os Testes A e B. Mais uma vez, os coeficientes de transmissão iguais a 0.25 apresentam resultados mais baixos relativamente ao coeficiente 0.

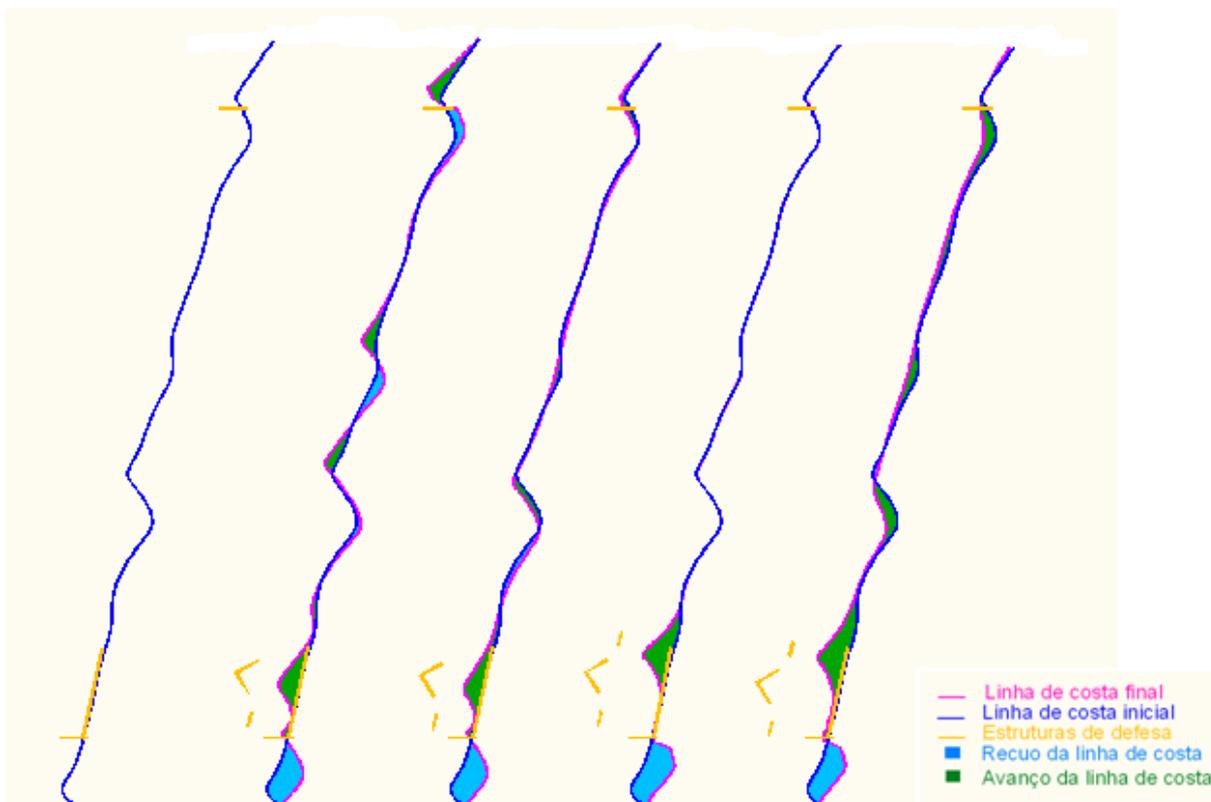


Figura 4.3 – Resultados dos Testes A, B, C e D.

Neste caso, os valores de k_1 e k_2 são bastante inferiores relativamente aos valores do primeiro caso de estudo, e como já foi referido aquando da calibração do modelo, foi difícil calibrar para este clima de agitação, não sendo possível atingir os valores a sul do esporão da Vagueira descritos no Quadro 2.4. No entanto, após a introdução dos quebramares destacados, os valores a sul da Vagueira vão ao encontro dos os valores obtidos para o primeiro caso de estudo.

Ao ter valores de k_1 e k_2 inferiores, já era esperado ter valores inferiores de transporte sólido médio anual.

Quadro 4.3 - Resultados da variação da posição média da linha de (m/ano) e do transporte sólido para o segundo caso de estudo. (Sinal (-) significa recuo da linha de costa).

| <i>Trechos</i> | <i>Taxas de recuo médias (m/ano)</i> | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | Sem quebramares | Teste A | Teste B | Teste C | Teste D |
| Sul do esporão da Vagueira | -0.99 | -12.87 | -12.90 | -15.43 | -15.12 |
| Frente urbana da Vagueira | 0.15 | 6.72 | 6.50 | 5.39 | 4.97 |
| Norte da frente urbana | 0.53 | 1.93 | 0.86 | 4.70 | 4.08 |
| Transporte sólido médio anual (x 10³ m³) | 93 | 117 | 117 | 81 | 78 |

Novamente, a configuração de três quebramares impede que haja acumulação de sedimentos a sul da frente urbana (junto ao esporão da Vagueira), pois o quebramar retilíneo, a norte, acaba por inviabilizar a função dos outros dois quebramares.

Na tentativa de melhorar esta questão (Testes C e D), alterou-se a distância entre os quebramares da combinação das três estruturas (de 120 m para 100 m) e os resultados melhoraram ligeiramente (Testes E e F). Tal pode ser observado na Figura 4.4 e mais facilmente no Quadro 4.4. Ainda na Figura 4.4 é possível visualizar um outro teste (Teste G e H), realizado no sentido de confirmar a viabilidade do quebramar em V. Neste caso, o quebramar dista 120 m do esporão da Vagueira. Os resultados para estes testes são também apresentados no Quadro 4.4.

Para o caso dos Testes E e F verifica-se um ligeiro acréscimo de sedimentos junto à frente urbana (aproximadamente 1 m/ano). Também há uma diminuição de sedimentos a norte da frente urbana porque ao se diminuir o espaçamento entre os quebramares destacados acaba por se “arrastar” as estruturas mais para sul.

Para os Testes G e H, verifica-se uma acumulação de sedimentos mais uniforme em toda a frente urbana, comprovando assim que o quebramar com a configuração em V é uma opção viável para a proteção da linha de costa. Com esta configuração também é possível obter resultados bastante aceitáveis.

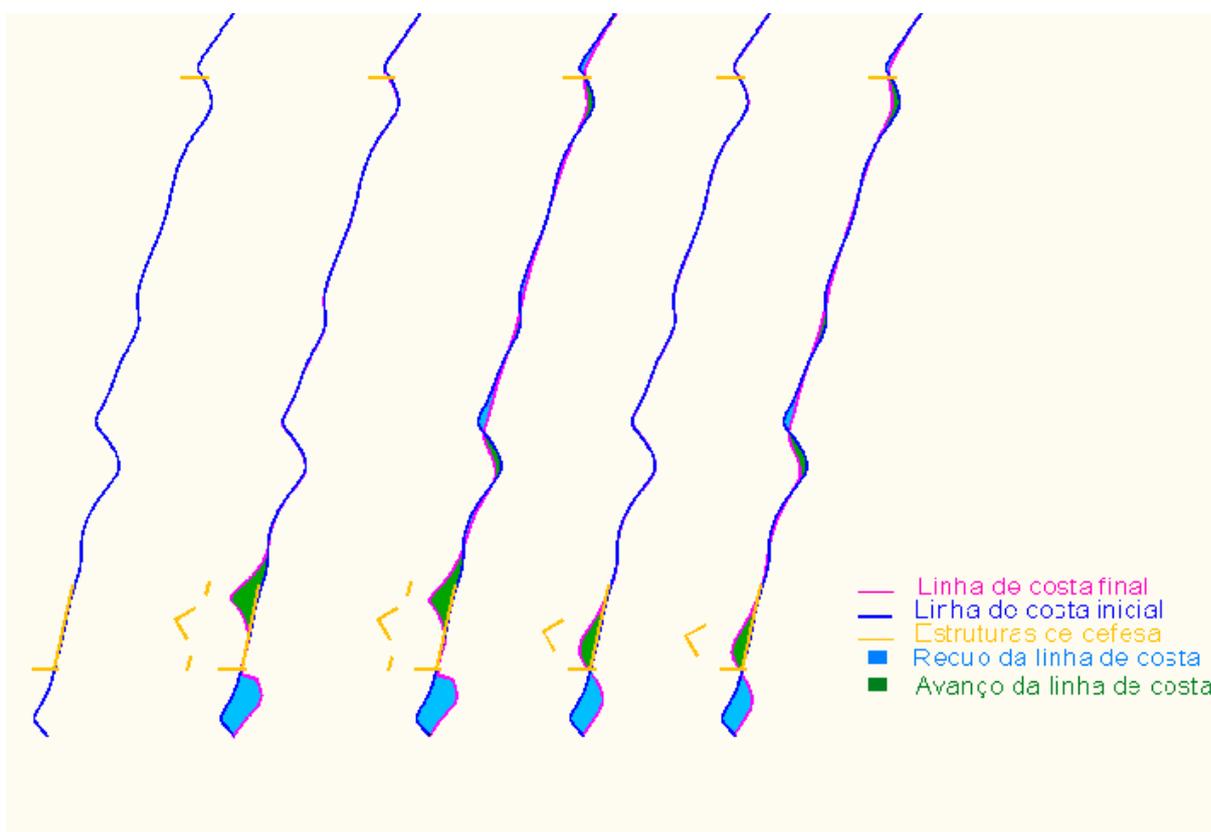


Figura 4.4 – Resultados dos Testes E, F, G e H.

Quadro 4.4 - Resultados da variação da posição média da linha de (m/ano) e do transporte sólido para dois casos particulares do segundo caso de estudo. (Sinal (-) significa reco da linha de costa).

| <i>Trechos</i> | <i>Taxas de reco médias (m/ano)</i> | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | Sem quebramares | Teste E | Teste F | Teste G | Teste H |
| Sul do esporão da Vagueira | -0.99 | -15.47 | -15.15 | -11.56 | -10.85 |
| Frente urbana da Vagueira | 0.15 | 6.28 | 5.72 | 6.11 | 5.13 |
| Norte da frente urbana | 0.53 | 3.65 | 3.19 | 0.52 | 0.14 |
| Transporte sólido médio anual (x 10³ m³) | 93 | 81 | 78 | 89 | 86 |

Em Anexo, encontram-se as imagens do GENESIS para os Testes E, F, G e H sendo respetivamente, as Figuras 0.16, 0.17, 0.18 e 0.19.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

Dos testes apresentados, os que melhor se ajustam ao clima de agitação definido para o primeiro caso de estudo dizem respeito ao conjunto de dois quebramares destacados: um em forma rectilínea seguido de um em forma de V. Este conjunto é válido para os dois cenários testados. Ambos permitem a formação de uma praia mais uniforme, embora haja variação na quantidade de sedimentos acumulados na frente urbana quando se aumentam k_1 e k_2 . Maiores valores para estes parâmetros implicam maior taxa de transporte de sedimentos.

De todos os testes realizados para uma situação com um clima de agitação mais representativo do real, o que melhor se adapta às condições e características do local de estudo é o Teste H, pois é o que apresenta uma configuração de praia mais linear e apresenta valores satisfatórios de acumulação de sedimentos na frente urbana, cumprindo assim o seu objetivo principal. Com esta configuração (quebramar em V) também é possível criar condições adequadas para a prática de *surf*. Estas duas vertentes são uma combinação perfeita para melhorar a qualidade de vida das zonas costeiras quer em termos ambientais, pois é uma solução com impacto ambiental reduzido, quer em termos económicos, pois beneficia o turismo na zona de estudo.

No âmbito do funcionamento do software usado na realização dos testes desta Dissertação, constatou-se que é bastante sensível aos parâmetros usados na calibração do mesmo. Pequenas variações nos parâmetros de calibração produzem resultados muito diversos. O programa produz bons resultados quando se trata apenas de clima de agitação constante e equivalente a uma onda, mas quando se tenta simular com um clima de agitação mais realista os resultados obtidos são irregulares e difíceis de calibrar. Isto acontece por se tratar de um trecho longo e o programa não consegue resultados estáveis. Após a introdução de estruturas com o objetivo de proteção costeira, o programa produziu resultados que vão ao encontro do esperado, ou seja, acumulação de sedimentos na zona dos quebramares destacados, comprovando mais uma vez a sua utilidade.

Com esta Dissertação é possível concluir que, o recurso a quebramares destacados submersos é uma mais-valia no que diz respeito ao aumento da linha de costa, permitindo assim uma maior proteção da zona em que são implementados, sendo neste caso a praia e a zona urbana da Vagueira.

Com este estudo, é mais uma vez reforçada a ideia de que a construção de recifes artificiais multifuncionais é uma opção a ter em consideração quando se pretender proteger uma determinada zona da costa. E sendo a costa Portuguesa alvo de recuos constantes e galgamentos oceânicos, nada mais útil que a construção destas estruturas. Para tal é necessário analisar cada caso e perceber qual ou quais as estruturas que mais se adequam à zona em estudo, completando essa observação com informações relativas à agitação, à batimetria e com o uso de *softwares* adequados. Sem dúvida que esta é uma área de grande interesse e com grandes valores turístico e ambiental.

5.2. Desenvolvimentos futuros

Face aos bons resultados obtidos no âmbito deste trabalho, que demonstram a viabilidade de quebramares submersos em forma de V (recifes artificiais multifuncionais), recomenda-se o prosseguimento de estudos aprofundados sobre os movimentos sedimentares que deverão ocorrer na base e em torno da estrutura pois, em geral, o local de instalação e a zona envolvente serão constituídos por areias, tratando-se assim de um fundo móvel. No entanto, os estudos morfodinâmicos na envolvente da estrutura, em particular os efeitos erosivos que deverão ocorrer em torno e na base da mesma, são escassos. Como tal, um estudo mais aprofundado desta componente é assim essencial do ponto de vista construtivo e para implementação de medidas mais eficazes de proteção.

As características dos materiais usados na construção dos recifes artificiais devem ser as mais adequadas para efeitos de proteção costeira e geração de ondas para a prática de *surf*, devendo ser feitos estudos nesse sentido, testando a viabilidade e funcionalidade dos mesmos. Em relação à eficácia dos quebramares multifuncionais, devem ser elaborados estudos mais aprofundados e relacionados com a forma e configuração da estrutura relativamente à sua posição em relação à linha de costa, à profundidade a que devem ser instalados e às dimensões mais apropriadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Antunes do Carmo, J., (2013). *“Experiência de recuperação de um sistema dunar e proposta de instrumentos complementares de proteção, atração e valorização ambiental”*. *Revista de Gestão Costeira Integrada*.

Antunes do Carmo, J., 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, pp 99-112.

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., 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.

Duarte, S. (2009). *“Projecto de um Sistema de Quebramares destacados para a frente marítima da foz do rio Douro no Porto”*. Projeto de Mestre em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto.

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. (1989). *“Genesis – A generalized Shoreline Change Numerical Model”*. Department of Water Resources Engineering, University of Lund, Lund, Sweden.

Kraus, N., Gravens, M., Hanson, H. (1991). *“Genesis: Generalized Model for Simulating Shoreline Change”*. Report 2, Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, Lund, Sweden.

Mendonça, A., Proença, B., Fortes, C., 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, pp 95-125.

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

Nicholls, R., Birkemeier, W., Lee, G. (1998). "Evaluation of depth of closure using data from Duck, NC, USA". *Marine Geology*, Vol. 148, pp179-201.

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

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

Pereira, C., Coelho, C (2012). "Projecção de cenários da evolução da linha de costa, no Litoral de Aveiro. Estudos em modelos Numéricos". Relatório da Avaliação e Mapeamento do Risco de Cheias no Litoral da Ria de Aveiro. Aveiro

Ramos, A. (2012). "Análise do comportamento de uma estrutura de protecção submersa face a diferentes regimes de ondulação". Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra.

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., Esteves, L. (2010). "Avaliação Qualitativa do Desempenho dos Recifes Artificiais Multifuncionais (RAM)". Revista da Gestão Costeira Integrada. 10(1), 127-145.

U.S. Corp of Engineers (2006). "Costal Engineer Manual, CEM" Part III, Chapter 2: Longshore Sediment Transport.

Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F. (sem informação). "Vagueira-Mira (Portugal)". Eurovision Case Study. Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos, Porto.

Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F., das Neves, L., Pais Barbosa, J., 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. 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., Monteiro, C. (2008). “*Marine habitat modification trough artificial reefs off the Algarve (Southern Portugal): an economic analysis of the fisheries and the prospects for management*”. *Ocean& Management*, Vol. 51, pp 463-468.

Sites da internet

APRH@ (2007). Associação Portuguesa de Recursos Hídricos (<http://www.aprh.pt/rgci/glossario/index.html>) - Consultado em Fevereiro e Março de 2013.

Notícias de Aveiro@ (2006). (<http://www.noticiasdeaveiro.pt/pt/23601/cordao-dunar-vai-ser-reposto-a-sul-da-vagueira/>); (<http://www.noticiasdeaveiro.pt/pt/1417/um-milhao-de-metros-cubicos-de-areia-para-reforçar-a-vagueira/>); (http://rr.sapo.pt/informacao_detalle.aspx?fid=25&did=37099) - Consultados em Fevereiro e Março de 2013.

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.

Classificação de areias (http://oficina.cienciaviva.pt/~pw054/vidro/Areias.htm#_ftnref1) - Consultado em Março de 2013.

Instituto Hidrográfico (<http://www.hidrografico.pt/>) – Consultado em Maio de 2013.

Imagens retiradas de:

<http://www.assufemg.org.br/convenios/condominio-praia-de-marataizes/> - Consultado em Janeiro de 2013.

<http://web.lettras.up.pt/asaraujo/seminario/Aula10.htm> - Consultado em Janeiro de 2013.

<http://jaomonlevade.blogspot.pt/2010/10/coral-artificial-de-estatuas.html> - Consultado em Março de 2013.

<http://marcosgandor.blogspot.pt> - Consultado em Março de 2013.

<http://pordentrodasondas.blogspot.pt/2010/10/querer-e-poder-sim.html> - Consultado em Março de 2013.

ANEXO

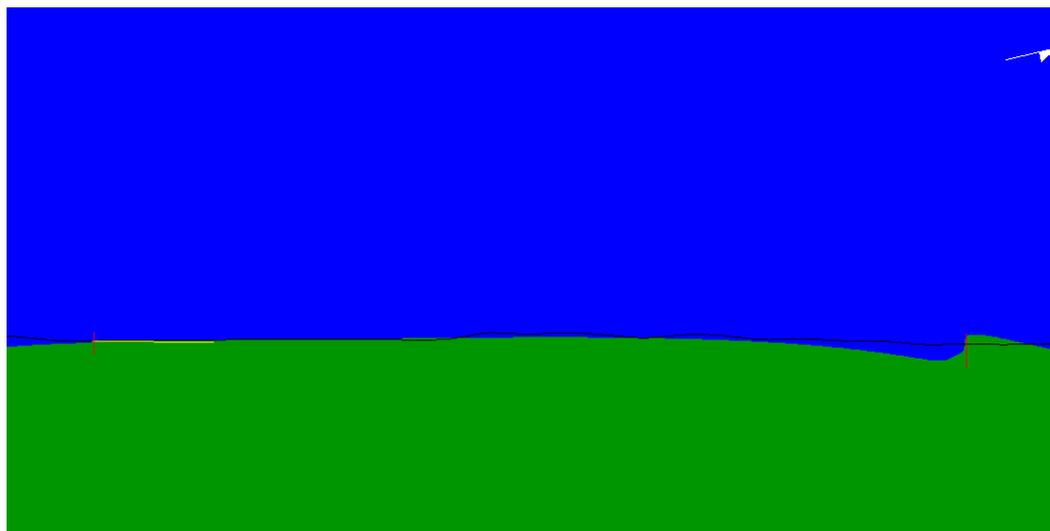


Figura 0.1 - Linha de costa de referência para $k_1=0.1$ e $k_2=0.1$ (10 anos de simulação).

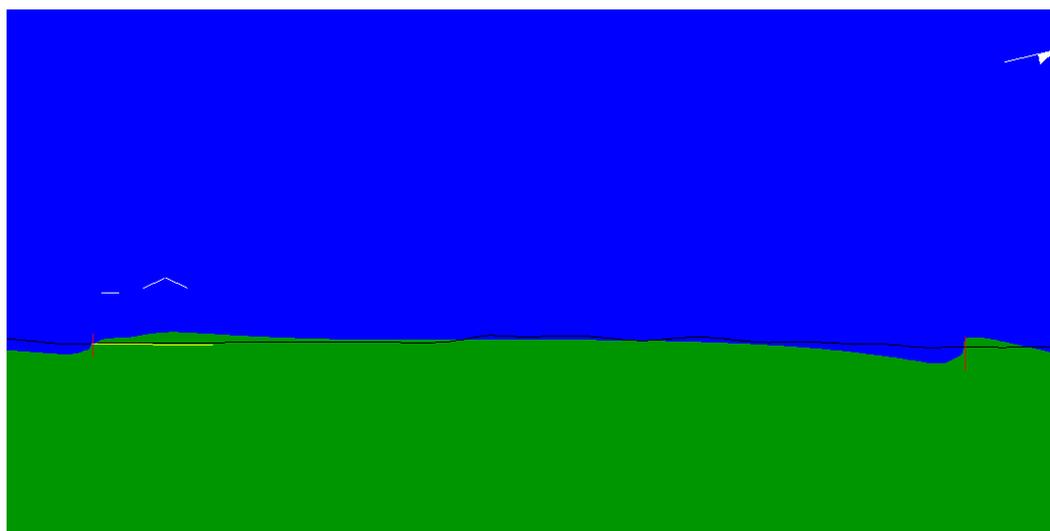


Figura 0.2 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste 1.

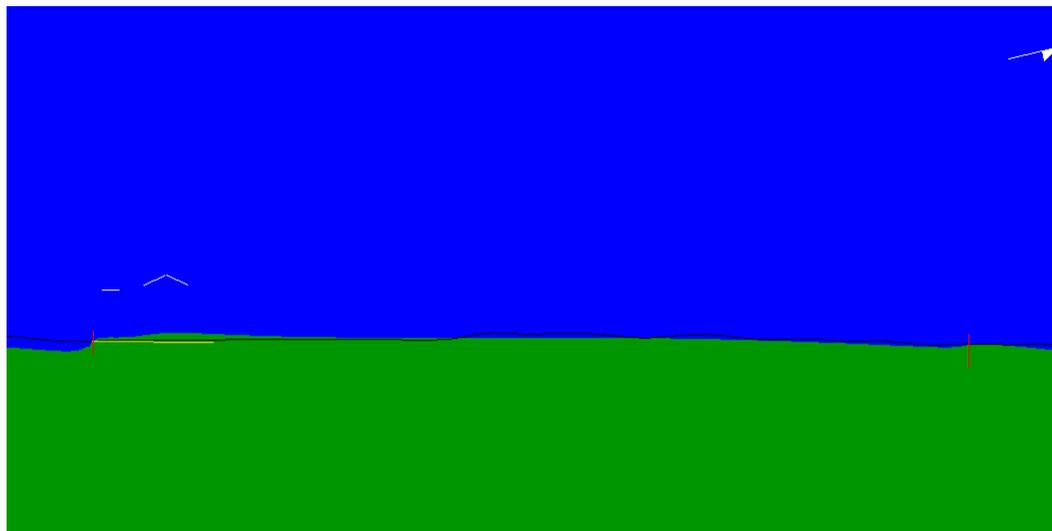


Figura 0.3 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste 2.

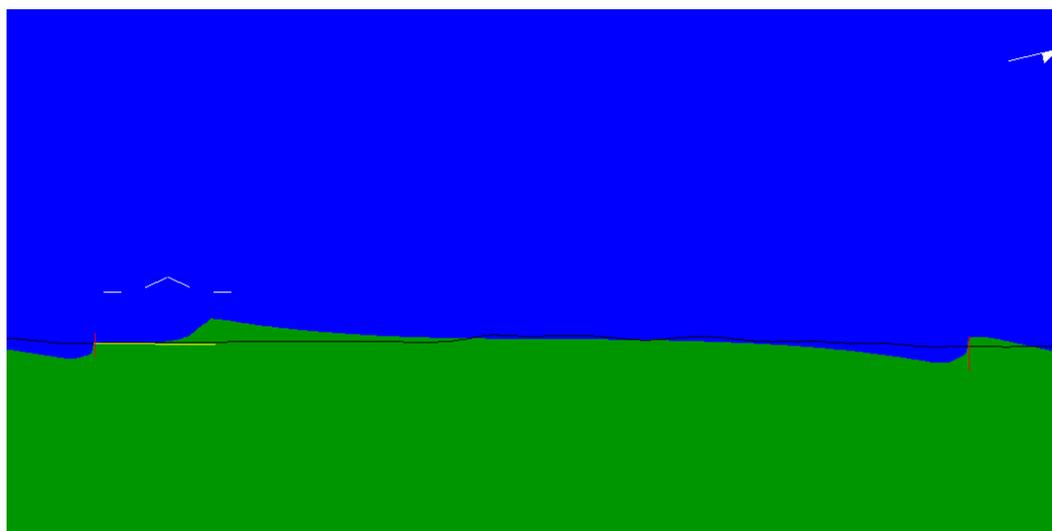


Figura 0.4 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste 3.

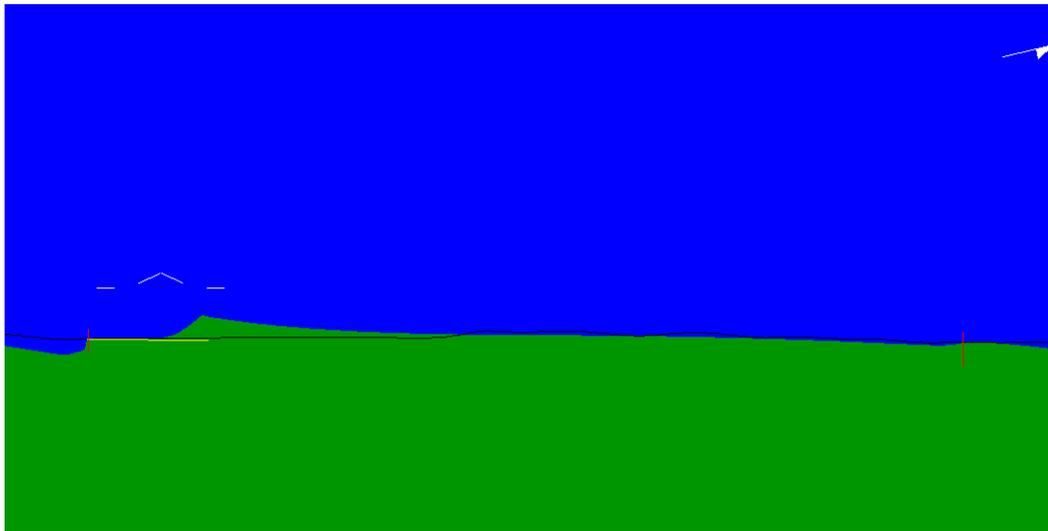


Figura 0.5 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste 4.

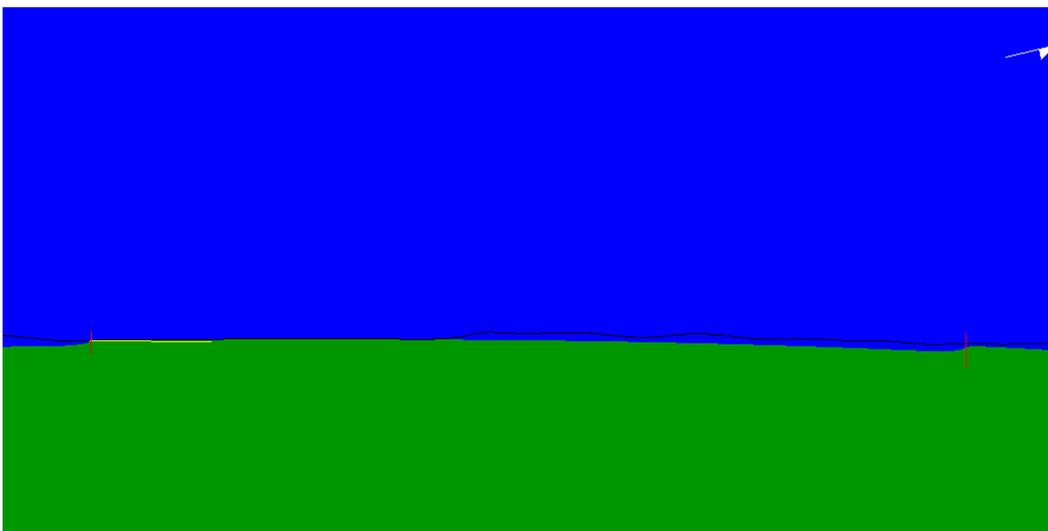


Figura 0.6 - Linha de costa de referência para $k_1=0.5$ e $k_2=0.5$ (10 anos de simulação).

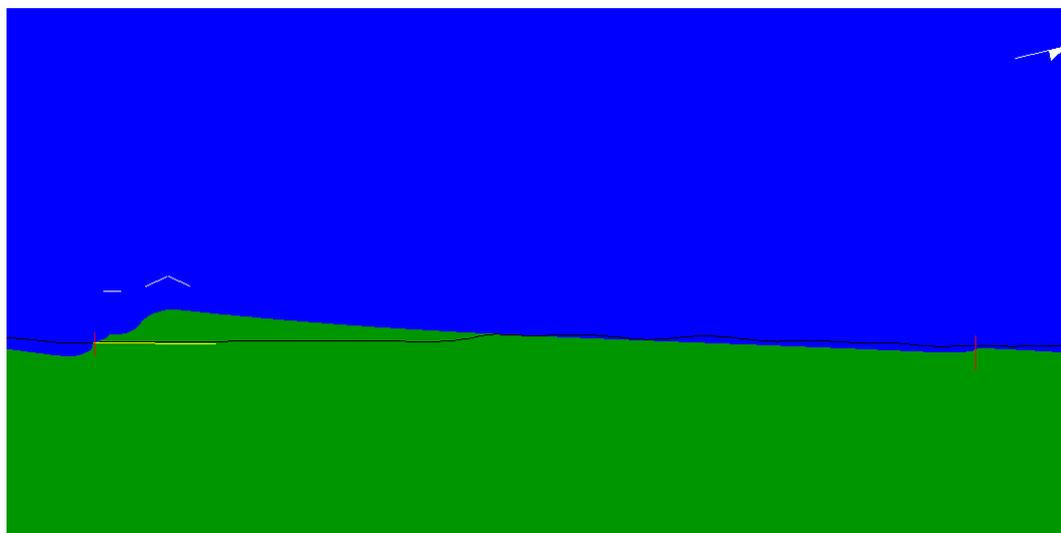


Figura 0.7 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste 5.

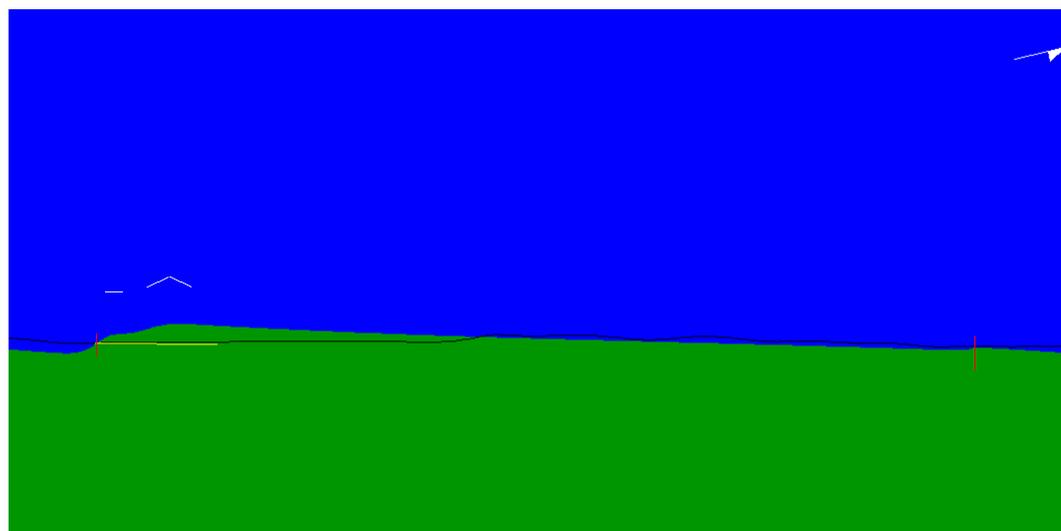


Figura 0.8 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste 6.

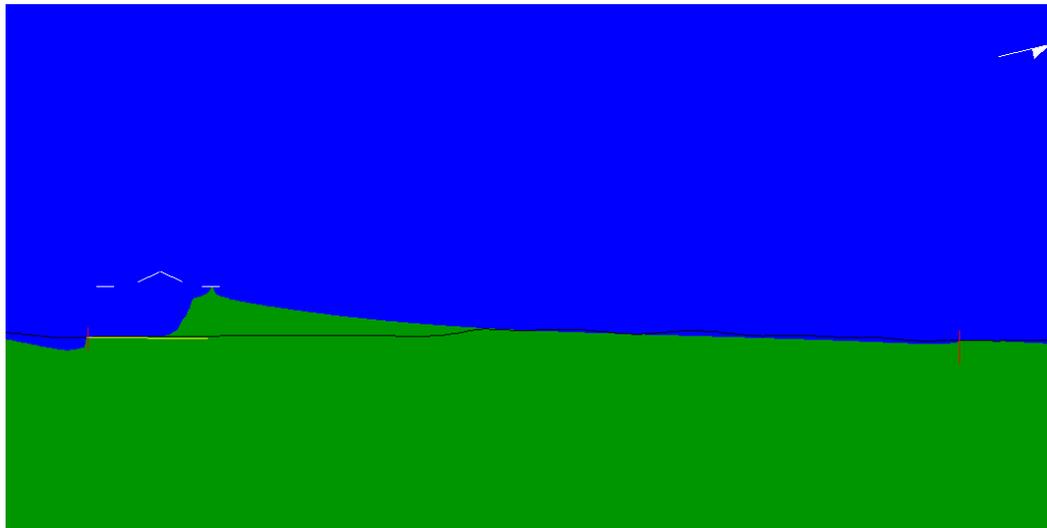


Figura 0.9 - Linha de costa final após 14 anos de simulação – Teste 7.

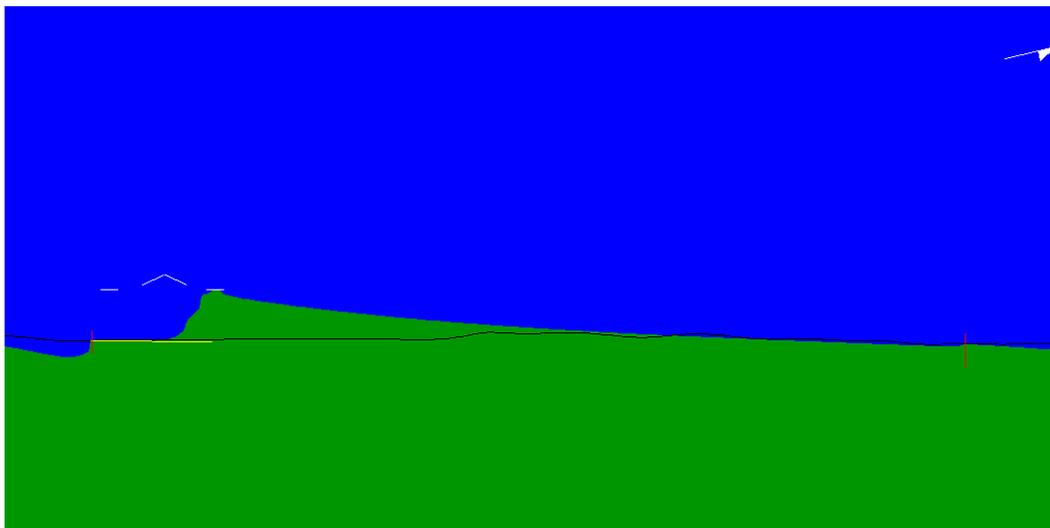


Figura 0.10 - Linha de costa final após 19 anos de simulação – Teste 8.

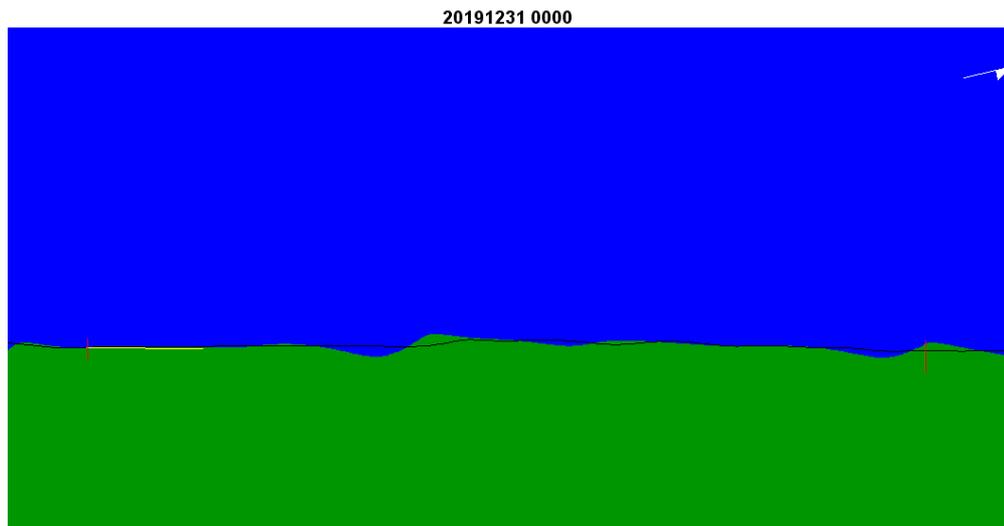


Figura 0.11 - Linha de costa de referência para $k_1=0.02$ e $k_2=0.01$ (10 anos de simulação).

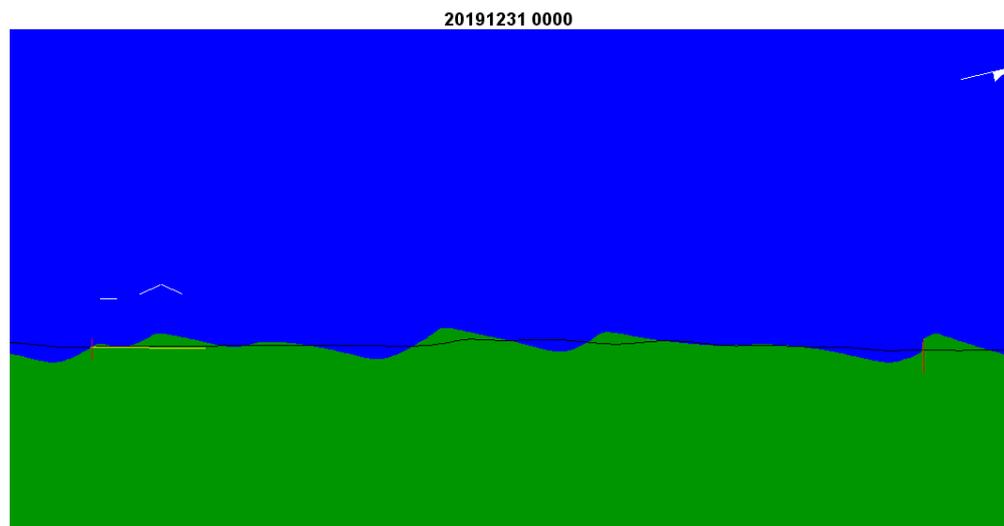


Figura 0.12 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste A.

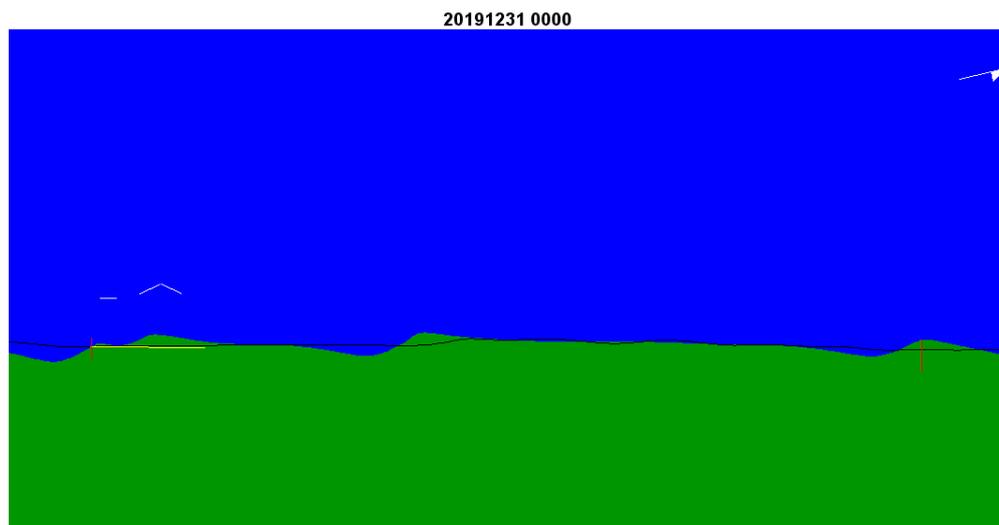


Figura 0.13 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste B.

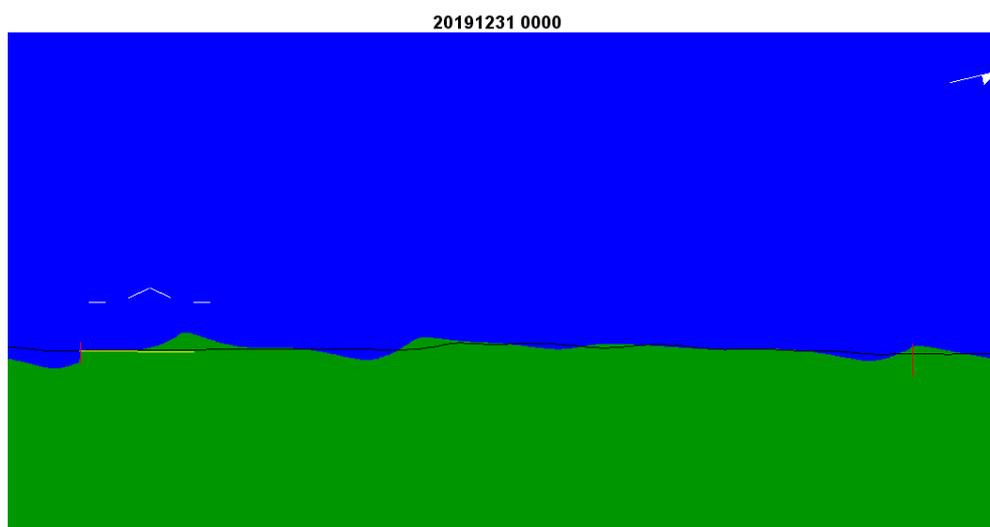


Figura 0.14 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste C.

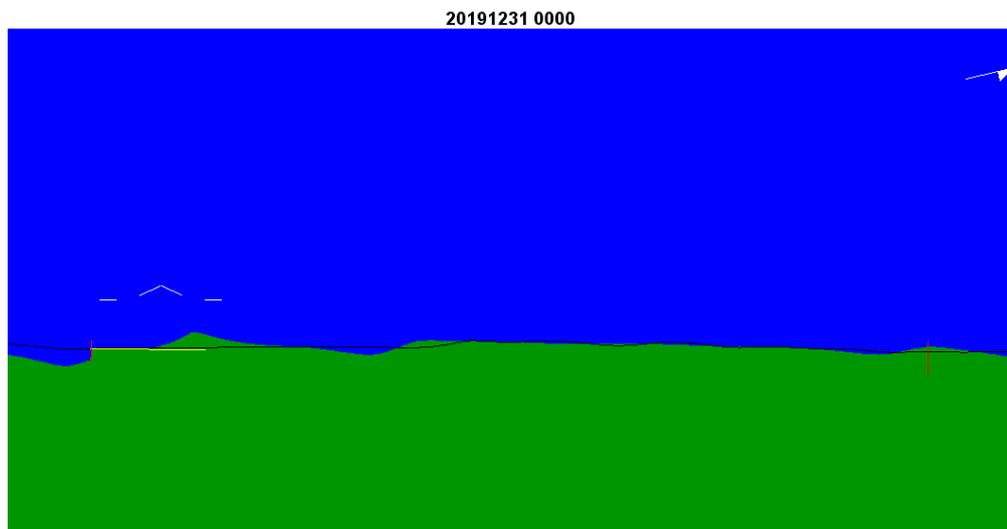


Figura 0.15 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste D.

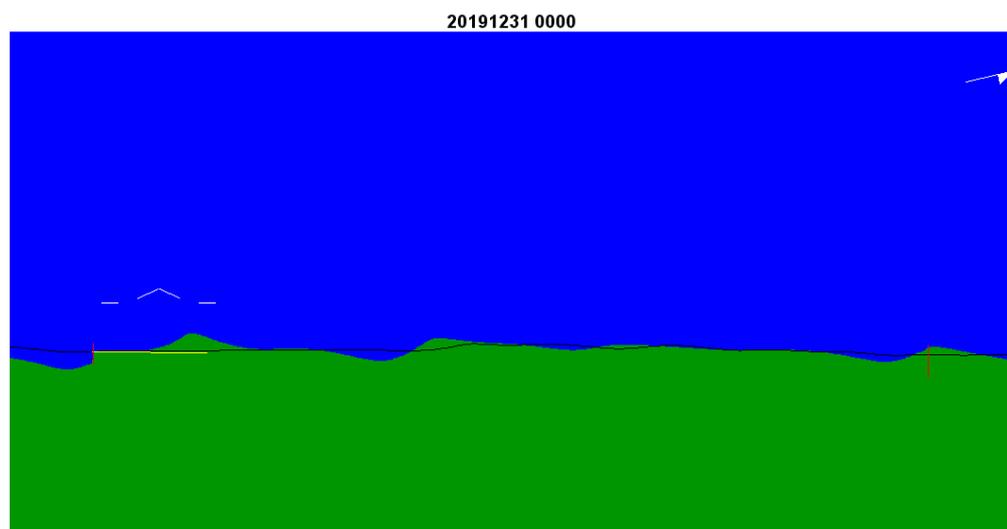


Figura 0.16 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste E.

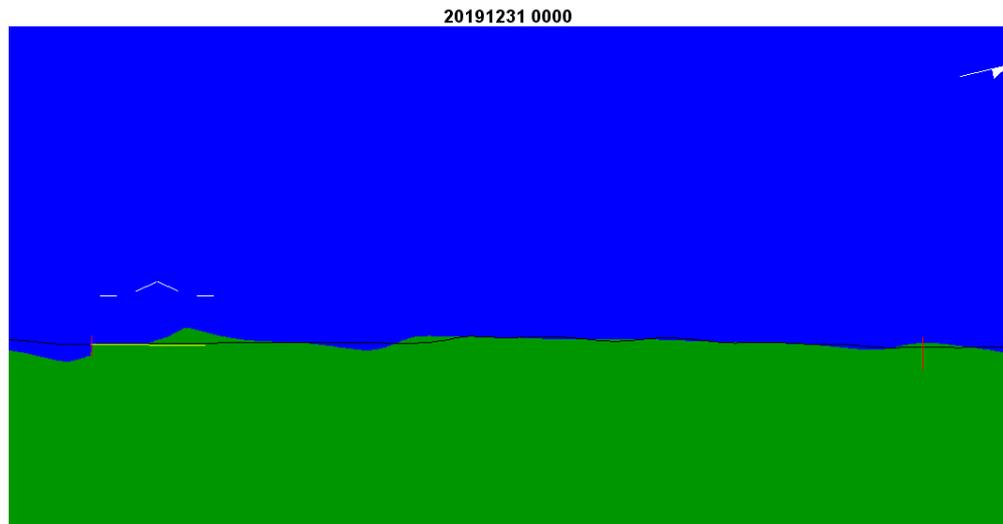


Figura 0.17 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste F.

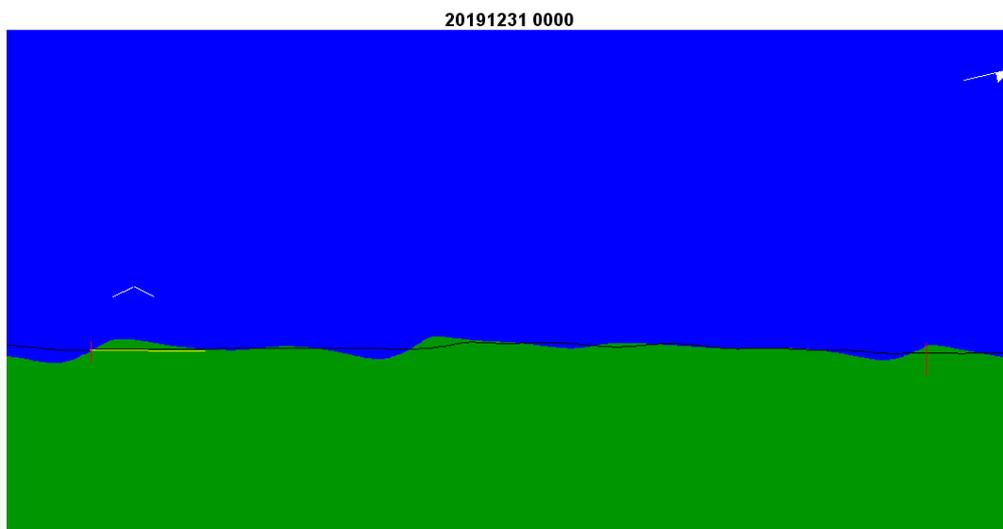


Figura 0.18 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste G.

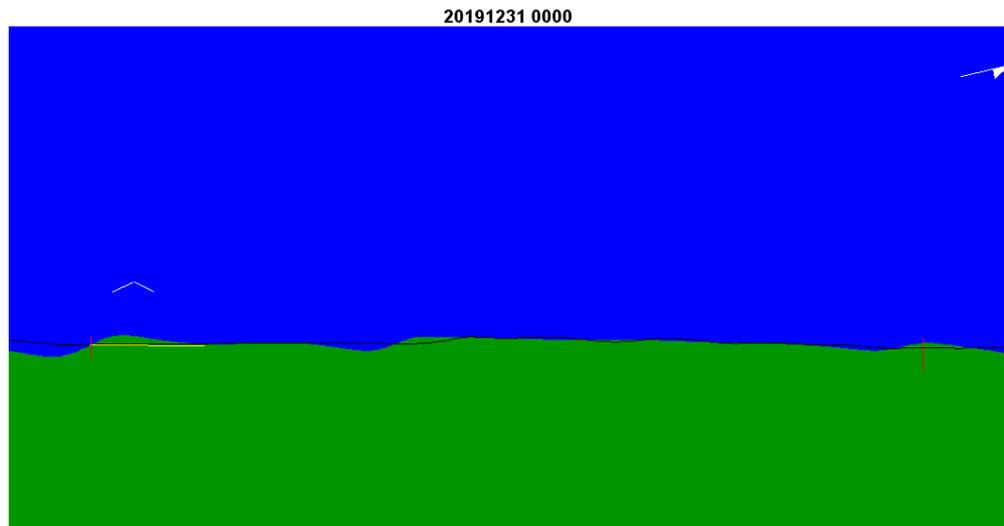


Figura 0.19 - Linha de costa final após 10 anos de simulação – Teste H.