



Márcia Lima

Ferramenta numérica de análise do impacto de intervenções de defesa costeira na evolução da linha de costa: custos e benefícios



Márcia Lima

Ferramenta numérica de análise do impacto de intervenções de defesa costeira na evolução da linha de costa: custos e benefícios

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, e coorientação científica do Doutor Fernando Francisco Machado Veloso Gomes, Professor Catedrático da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Apoio financeiro da FCT e do FSE no âmbito do III Quadro Comunitário de Apoio, através da bolsa de doutoramento SFRH/BD/79868/2011.



Dedico este trabalho àqueles que me viram iniciar esta caminhada, mas não esperaram que a terminasse. Estarão, com a maior das certezas, orgulhosos de mim.

Ao avô Tino e ao avô Aristides

o júri

presidente

Prof. Doutor Carlos Fernandes da Silva
professor catedrático da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Armando Baptista da Silva Afonso
professor catedrático convidado aposentado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor António Alexandre Trigo Teixeira
professor associado do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa

Prof. Doutor José Luís da Silva Pinho
professor associado da Universidade do Minho

Doutora Raquel Castro Alves Ferreira da Silva
consultora da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

agradecimentos

Um trabalho de doutoramento é um caminho solitário, que, pela duração, empenho e dedicação que exige, é muitas vezes acompanhado por fases de desmotivação, de interrogação e de desinteresse. É nestes momentos que o apoio daqueles que nos rodeiam é essencial para se 'chegar a bom porto', e que por isso, deve ser reconhecido.

Começo por agradecer ao meu orientador, Professor Carlos Coelho, que nesses momentos de dúvida acreditou mais que eu própria, e teve um papel crucial para que esta caminhada terminasse com sucesso. Agradeço a disponibilidade, a partilha de ideias, as leituras atentas, comentários, correções e dicas, e todo o empenho extra na fase final deste trabalho. Agradeço ainda a compreensão nos momentos menos fáceis destes últimos anos e as palavras de incentivo, que foram fundamentais para finalizar este documento. Um sincero, obrigada!

Ao meu coorientador, Professor Veloso-Gomes, agradeço a disponibilidade em participar neste trabalho e todas as correções e sugestões ao documento final. Agradeço também aos Professores Magnus Larson e Hans Hanson o apoio, a hospitalidade e todo o acompanhamento durante os 4 meses que estive na Universidade de Lund.

À Engenheira Lucília Luís e à empresa Consulmar®, por todos os contributos ao modelo XD-Coast. À Sílvia Di Bona, toda a ajuda com o programa GENESIS. Ao João Cardoso, todo o apoio com o C# (e ao meu afilhado, por todos os conselhos).

Ao André, por ajudar a 'nascer' esta interface, pelo empenho que lhe dedicou, pelos 'bugs' que resolveu, pelo símbolo que desenhou, pelas ideias, pelos contributos, pelo apoio e incentivo (agradeço também a influência positiva e importância na minha vida). Aos 'meus técnicos informáticos', Tiago e Pedro. Ao Pedro, agradeço ainda todas as discussões científicas que resultaram em contributos positivos para este trabalho, bem como ao Guimas e a todos os restantes elementos do NEFEC.

Ao Departamento de Engenharia Civil, que com certeza teve mais horas de mim que a minha própria casa, mas onde sem dúvida me sinto em casa! Devo isso a todos aqueles que dele fazem ou já fizeram parte. A todos os professores, pelo conhecimento e experiências transmitidas no decorrer do meu percurso académico (ao Professor Cachim em particular, por despoletar o gosto pela programação, que se refletiu neste trabalho). A todos os funcionários, pelo papel fundamental que desempenham (em especial à D. Filomena, por tanto carinho e ajuda nestes anos). A todos os colegas de curso e de investigação, essencialmente àqueles que se tornaram amigos (ao Flávio em particular, pela ajuda e disponibilidade constante durante estes anos).

À ANQIP, desafio que abracei em paralelo, e onde aprendi muito e cresci profissionalmente, agradeço toda a compreensão e disponibilidade.

À FCT, pelo suporte financeiro, sem o qual este trabalho não seria possível.

Por fim, mas não menos importantes, aos meus pais, ao meu irmão, à minha avó Amélia e à minha madrinha, por existirem e me fazerem existir. Ao meu avô Tino também, por todos os ensinamentos que me deixou.

palavras-chave

programação, LTC, XD-Coast, interface gráfica, otimização de soluções.

resumo

Face à importância económica e social das zonas costeiras e aos problemas de erosão que enfrentam, é de antecipar um aumento dos investimentos necessários à realização e manutenção de intervenções de defesa costeira. Assim, a necessidade de meios que permitam uma análise e comparação de soluções que se pretendem rápidas e otimizadas, avaliando custos e benefícios, motivou o trabalho de investigação proposto, que surge com o principal objetivo de desenvolver uma ferramenta numérica que promove a otimização das propostas de intervenção de defesa costeira para mitigação do problema da erosão, reunindo a capacidade simultânea de projetar a evolução da linha de costa ao longo do tempo, pré-dimensionar as estruturas de defesa costeira e quantificar os custos e os benefícios que lhes estão associados. Paralelamente, foi objetivo contribuir para a melhoria da capacidade de simulação numérica da evolução da linha de costa, através da análise do desempenho do modelo numérico LTC.

A concretização do trabalho resultou no desenvolvimento de uma ferramenta de análise do impacto de intervenções de defesa costeira, a COAST (*Coastal Optimization Assessment Tool*), composta por três módulos integrados. O módulo de evolução da linha de costa resultou da interface gráfica desenvolvida para o modelo numérico LTC e das alterações realizadas no algoritmo, que culminaram na versão LTC-ML2017. O módulo de pré-dimensionamento teve por base o aperfeiçoamento e a melhoria da ferramenta XD-Coast. Partindo dos resultados da evolução da linha de costa (áreas de acreção e erosão, que permitem a estimativa dos benefícios) e do pré-dimensionamento da intervenção (quantificação do volume de material envolvido na implantação da solução, que permite a estimativa dos custos), e considerando os valores monetários atribuídos pelo utilizador (tendo em conta, simultaneamente, fatores económicos, sociais, ambientais, culturais, etc.), no terceiro e último módulo, é realizada a análise de custos e de benefícios, que resulta no valor atual líquido e no rácio benefício-custo inerente a cada solução.

A aplicação da COAST a um caso de estudo, permitiu comprovar a versatilidade e potencialidades da ferramenta e mostrou que, na generalidade dos cenários propostos, na perspetiva económica é conveniente intervir, apesar de se manter a tendência de perda de território ao longo do tempo. O desenvolvimento da interface gráfica para o modelo numérico LTC e a análise do desempenho e comparação com outros modelos (Pelnaud-Considère, 1956 e GENESIS), sustentam a capacidade de projetar a evolução da linha de costa da COAST que, integrada com a capacidade de pré-dimensionar as estruturas de defesa costeira e quantificar custos e benefícios, traduzem um meio importante para auxiliar as entidades responsáveis a sustentar as opções estratégicas adotadas para a gestão do litoral.

keywords

programming, LTC, XD-Coast, graphical user interface, optimized solutions.

abstract

An increase of the investments required to the construction and maintenance of coastal interventions can be anticipated, due to economic and social importance of coastal areas coupled with their erosion problems. Thus, the present research work was motivated by the need for automatic tools that allow the quickly comparison of different solutions in order to get enhanced results, based on their costs and benefits. So, the main purpose of this work was the development of a numerical tool that leads to optimized coastal interventions proposals to mitigate the erosion problem. The numerical tool is able to predict the shoreline evolution along time, pre-design structures and quantify inherent costs and benefits. At the same time, this work aims the numerical capability improvement of the shoreline evolution simulation, through the analysis of the LTC numerical model performance.

The achievement of the work's goal results in a numerical tool with 3 integrated modules, developed in order to analyse the impact of coastal interventions (COAST: Coastal Optimization ASsessment Tool). The shoreline evolution module is composed by the graphical user interface and algorithm changes (which resulted in the LTC-ML2017 version) developed on the LTC numerical model. The pre-design module is the result of improvements made on XD-Coast tool. Considering the shoreline evolution results (accretion and erosion areas which allow the quantification of benefits) and the structure pre-design (which gives the volume of material and allows to estimate the costs), and after the definition of monetary values by the user (taking into account, simultaneously, economic, social, environmental and cultural effects), the economic balance between total costs and total benefits was made. This action occurs on the third and last module of the numerical tool and returns the net present value and the benefit-cost ratio.

The COAST was applied to a case study, which allows to prove its versatility and potentialities. In the generality of the proposed scenarios, from an economic perspective, the implementation of coastal interventions is advantageous, although the shoreline retreat being still verified. The COAST's capability to predict shoreline evolution along time is sustained by the graphical user interface development and by the performance analysis of the LTC numerical model (and its comparison with Pelnard-Considère, 1956 and GENESIS). This skill combined with costal structures pre-design capability and with the costs and benefits quantification, leads to a useful tool to assist the responsible entities to support the strategic options adopted for coastal management.

ÍNDICES

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	xvii
ÍNDICE DE FIGURAS	xxi
ÍNDICE DE TABELAS	xxix
LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS	xxxiii
1. INTRODUÇÃO	3
1.1. Enquadramento do problema	3
1.2. Proposta de investigação	4
1.2.1. Motivação	4
1.2.2. Objetivos	5
1.2.3. Plano de trabalhos	6
1.3. Estrutura da dissertação	9
2. MODELAÇÃO NUMÉRICA DE INTERVENÇÕES DE DEFESA COSTEIRA	15
2.1. Evolução da linha de costa	15
2.1.1. Considerações genéricas	16
2.1.2. Modelos numéricos	20
2.2. Pré-Dimensionamento	24
2.2.1. Considerações genéricas	24
2.2.2. Ferramentas de cálculo	26
2.3. Custo-benefício	29
3. MODELOS E FORMULAÇÕES DE BASE	35
3.1. Pelnard-Considère (1956)	36
3.2. GENESIS	42
3.2.1. Aplicação NEMOS	43
3.2.2. Conceitos teóricos do GENESIS	46
3.2.3. Dados de entrada	50
3.3. LTC	51
3.3.1. Descrição do LTC	51
3.3.1.1. Formulação teórica	53
3.3.1.2. Estrutura computacional	58

3.3.2.	Evolução do LTC	58
3.3.2.1.	Versão LTC-RS2010.....	59
3.3.2.2.	Versão LTC-CC2012.....	62
3.3.3.	Aplicação do LTC	65
3.4.	XD-Coast	69
3.4.1.	Descrição do XD-Coast.....	69
3.4.2.	Formulações do XD-Coast	71
3.5.	Custo-Benefício	78
3.6.	Notas Finais	80
3.6.1.	Resumo das potencialidades e lacunas dos modelos	81
3.6.2.	Propostas de melhoria.....	83
4.	FERRAMENTA NUMÉRICA COAST	87
4.1.	Módulo de evolução da linha de costa.....	88
4.1.1.	Interface gráfica para o LTC	88
4.1.1.1.	Linguagem de programação	89
4.1.1.2.	Relação entre a interface gráfica e o algoritmo existente	89
4.1.2.	Apresentação da interface.....	90
4.1.2.1.	Definição dos dados da simulação.....	91
4.1.2.2.	Parâmetros de cálculo.....	99
4.1.2.3.	Área de desenho	101
4.1.2.4.	Resultados da simulação.....	105
4.1.3.	Alterações no algoritmo: versão LTC-ML2017	108
4.2.	Módulo de pré-dimensionamento	111
4.2.1.	Interface do XD-Coast.....	112
4.2.2.	Definição da altura de onda de projeto.....	121
4.2.3.	Definição do coeficiente de estabilidade	123
4.2.3.1.	Generalidades	124
4.2.3.2.	Valores recomendados.....	125
4.2.3.3.	Janela de auxílio à definição do coeficiente de estabilidade	126
4.2.3.4.	Síntese	129
4.2.4.	Contabilização do volume de material	130
4.3.	Módulo de análise custo-benefício	135
4.3.1.	Quantificação de custos.....	135

4.3.1.1.	Custos de construção	137
4.3.1.2.	Custos de manutenção	139
4.3.2.	Quantificação de benefícios	142
4.3.3.	Interface do módulo de custo-benefício	143
4.4.	Notas finais	152
5.	MODELAÇÃO DE EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA.....	157
5.1.	Caso de estudo	157
5.2.	Desempenho do LTC	160
5.2.1.	Resultados	160
5.2.2.	Síntese	165
5.3.	Comparação com o modelo GENESIS	166
5.3.1.	Diferenças entre modelos	167
5.3.1.1.	Diferenças genéricas.....	167
5.3.1.2.	Influência da definição da largura do perfil ativo.....	168
5.3.2.	Calibração.....	172
5.3.3.	Modelação do caso de estudo no NEMOS	173
5.3.4.	Resultados	176
5.3.5.	Síntese	179
5.4.	Comparação com o modelo analítico de Pelnard-Considère	179
5.4.1.	Tempo de enchimento	180
5.4.2.	Resultados	181
5.4.3.	Síntese	185
5.5.	Notas Finais	185
6.	APLICAÇÃO DA COAST	189
6.1.	Cenário de referência	191
6.2.	Esporões.....	194
6.2.1.	Agitação marítima	199
6.2.2.	Batimetria	201
6.2.3.	Comprimento.....	204
6.2.4.	Localização.....	206
6.2.5.	Campo de esporões.....	207
6.2.6.	Valor do território.....	209
6.2.7.	Taxa de desconto ou atualização	210

6.2.8. Síntese	211
6.3. Estruturas longitudinais aderentes	214
6.3.1. Comprimento	219
6.3.2. Cota de coroamento	220
6.3.3. Estrutura aderente a sul do esporão	222
6.3.4. Síntese	223
6.4. Alimentações artificiais de praia.....	225
6.4.1. Extensão	230
6.4.2. Localização.....	231
6.4.3. Frequência	232
6.4.4. Volume	233
6.4.5. Custo unitário do material	234
6.4.6. Síntese	235
6.5. Transposição artificial de areias.....	237
6.5.1. Posição.....	241
6.5.2. Caudal transposto	241
6.5.3. Custo de investimento	243
6.5.4. Custo unitário do material	243
6.5.5. Síntese	244
6.6. Notas finais	246
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	255
7.1. Síntese da dissertação	255
7.2. Conclusões.....	267
7.3. Desenvolvimentos Futuros.....	270
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	277

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1: Introdução

Figura 1.1: Danos ocorridos no inverno de 2013/2014, consequência da erosão costeira..... 4

Figura 1.2: Organigrama de tarefas do trabalho de investigação proposto..... 7

Capítulo 2: Modelação numérica de intervenções de defesa costeira

Figura 2.1: Classificação dos modelos numéricos de evolução da linha de costa, de acordo com Hanson e Kraus (1991)..... 17

Figura 2.2: Esquema de definição de um modelo de “uma linha” (Gravens *et al.*, 1991)..... 18

Figura 2.3: Faseamento de um projeto de obras costeiras (baseado em Pita, 1985 e Lima, 2011). 24

Figura 2.4: Exemplo de uma janela de cálculo do XD-Coast (Lima, 2011)..... 27

Figura 2.5: Exemplo de janelas de cálculo do BREAKWAT (Deltares, 2016)..... 28

Figura 2.6: Exemplo de janela de cálculo do programa CRESS, à esquerda (CRESS, 2016), e da ferramenta CLI, à direita (CLI, 2017)..... 28

Capítulo 3: Modelos e formulações de base

Figura 3.1: Organigrama de modelos e formulações de base para o desenvolvimento da COAST - *Coastal Optimization ASsessment Tool*. 36

Figura 3.2: Evolução da posição da linha de costa ao longo do tempo, com base na formulação analítica de Pelnard-Considère, 1956 (baseado em Rosati *et al.*, 2002). 37

Figura 3.3: Influência do coeficiente de transporte na evolução da posição da linha de costa, segundo Pelnard-Considère, 1956 (Guimarães, 2014). 42

Figura 3.4: Interação entre os diferentes módulos da NEMOS. 44

Figura 3.5: Evolução do perfil transversal no modelo GENESIS (baseado em Di Bona, 2013). ...	47
Figura 3.6: Definição dos ângulos que definem a orientação da linha de costa e da linha de rebentação no GENESIS (Hanson e Kraus, 1989).	48
Figura 3.7: Propagação da onda no modelo GENESIS (Hanson e Kraus, 1989).....	49
Figura 3.8: Caracterização da difração na zona abrigada de uma obra de defesa perpendicular à linha de costa (Coelho, 2005).....	55
Figura 3.9: Estrutura computacional do modelo LTC (baseado em Coelho, 2005 e Silva, 2010)..	59
Figura 3.10: Representação dos ângulos máximos do terreno com a horizontal, submersos e emersos, em situação de acreção e erosão.	64
Figura 3.11: Número de publicações onde se descrevem aplicações do modelo numérico LTC. ..	65
Figura 3.12: Organigrama do modelo XD-Coast.	70
Figura 3.13: Representação da altura de galgamento (Burcharth e Hughes, 2006).	75
Figura 3.14: Representação da altura da obra submersa.	76
Figura 3.15: Parâmetros considerados para a avaliação das características da secção transversal.	76
Figura 3.16: Secção transversal-tipo de estruturas em talude (Burcharth e Hughes, 2006).....	77

Capítulo 4: Ferramenta numérica COAST

Figura 4.1: Janela inicial da COAST - <i>Coastal Optimization ASsessment Tool</i>	87
Figura 4.2: Desenvolvimento do modelo numérico LTC.	88
Figura 4.3: Esquematização da interação entre LTC-C# e LTC-Fortran.	90
Figura 4.4: Janela principal do módulo de evolução da linha de costa.	91
Figura 4.5: Janela de definição do domínio de cálculo (" <i>Spatial Domain</i> ").	92
Figura 4.6: Janela de definição do regime de ondas (" <i>Waves</i> ").	94
Figura 4.7: Janela de definição do regime de marés (" <i>Tides</i> ").	95

Figura 4.8: Janela de definição das condições fronteira (“ <i>Boundaries</i> ”).	96
Figura 4.9: Janela de definição das intervenções de defesa costeira (“ <i>Interventions</i> ”).	98
Figura 4.10: Janela de definição das características da simulação e dados de saída (“ <i>Outputs</i> ”).	99
Figura 4.11: Janela correspondente à definição dos parâmetros gerais.	100
Figura 4.12: Janela correspondente à estimativa do coeficiente de transporte, k .	101
Figura 4.13: Janela correspondente à escolha das formulações utilizadas no cálculo.	101
Figura 4.14: Janela correspondente à definição dos ângulos mínimos e máximos admissíveis para os taludes dos perfis transversais.	102
Figura 4.15: Janela de propriedades relativas às curvas de nível e linhas de referência.	102
Figura 4.16: Esquematização do conceito para a interpolação bi-linear das cotas do terreno.	103
Figura 4.17: Janela com fotografia/imagem do domínio de cálculo.	104
Figura 4.18: Janela de apresentação de resultados da simulação (“ <i>Results</i> ”).	105
Figura 4.19: Janela de resultados relativamente à evolução da linha de costa.	106
Figura 4.20: Janela Excel® de resultados da simulação no módulo de evolução da linha de costa.	107
Figura 4.21: Representação dos resultados relativos aos perfis transversais.	108
Figura 4.22: Janela de boas-vindas do programa de cálculo XD-Coast.	113
Figura 4.23: Janela de seleção da estrutura costeira a pré-dimensionar.	114
Figura 4.24: Janela de escolha das formulações no módulo de pré-dimensionamento.	114
Figura 4.25: Janela correspondente à formulação de Hudson (estruturas não galgáveis).	115
Figura 4.26: Janela correspondente à formulação de van der Meer para enrocamento (estruturas não galgáveis).	116
Figura 4.27: Janela correspondente à formulação de van der Meer e Jong para tetrápodos (estruturas não galgáveis).	117

Figura 4.28: Janela correspondente à formulação de van der Meer para enrocamento (estruturas galgáveis).	118
Figura 4.29: Janela correspondente à formulação de van der Meer para enrocamento (estruturas submersas).	119
Figura 4.30: Janela de cálculo relativa às características da secção transversal, comum a todas as formulações.	120
Figura 4.31: Área de desenho da secção transversal (estrutura galgável).	120
Figura 4.32: Exemplo de uma tabela de resultados do XD-Coast (formulação de Hudson).	121
Figura 4.33: Janela de auxílio à definição do valor de K_D (blocos pré-fabricados).	128
Figura 4.34: Janela de auxílio à definição do valor de K_D (blocos de enrocamento).	129
Figura 4.35: Janela final do módulo de pré-dimensionamento relativa a obras perpendiculares à linha de costa.	131
Figura 4.36: Janela final do módulo de pré-dimensionamento relativa a estruturas longitudinais aderentes.	132
Figura 4.37: Dimensões para estimativa da área da secção transversal.	133
Figura 4.38: Simplificação do corte longitudinal da estrutura para estimativa do volume.	134
Figura 4.39: Janela de opção de escolha do tipo de análise custo-benefício.	144
Figura 4.40: Janela principal do módulo de custo-benefício.	145
Figura 4.41: Divisão do domínio de cálculo para definição do valor do terreno (ao longo da linha de costa).	146
Figura 4.42: Definição dos parâmetros associados a cada uma das faixas perpendiculares.	147
Figura 4.43: Definição de zonas do domínio de cálculo ao longo da faixa perpendicular.	147
Figura 4.44: Definição dos parâmetros associados a cada uma das faixas paralelas à linha de costa (ao longo da faixa perpendicular à linha de costa).	147
Figura 4.45: Definição dos custos associados a fontes aluvionares de sedimentos.	148

Figura 4.46: Definição dos custos associados a alimentações artificiais de praia.	149
Figura 4.47: Definição dos custos associados a obras perpendiculares à linha de costa.	149
Figura 4.48: Definição dos custos associados a estruturas longitudinais aderentes.....	150
Figura 4.49: Janela final do módulo de custo-benefício.	151

Capítulo 5: Modelação de evolução da linha de costa

Figura 5.1: Representação do caso de estudo no módulo de evolução da linha de costa.	158
Figura 5.2: Evolução da agitação marítima ao longo do tempo.....	161
Figura 5.3: Pormenor do comportamento de α_b ao longo do tempo e em função da distância ao esporão.	162
Figura 5.4: Evolução de parâmetros que caracterizam a dinâmica sedimentar ao longo do tempo.....	164
Figura 5.5: Evolução da linha de costa ao longo do tempo e da distância ao esporão.....	164
Figura 5.6: Evolução da posição da profundidade de fecho, profundidade de rebentação, linha de costa e espraiamento da onda, em função da distância ao esporão.	165
Figura 5.7: Representação esquemática da formulação de base nos modelos de “uma linha” e no modelo LTC (Coelho, 2005).	167
Figura 5.8: Representação de Δy e Δz no perfil transversal, para os modelos GENESIS e LTC.	169
Figura 5.9: Variação na linha de costa (Δy) correspondente a um comprimento infinitesimal (Δx).	170
Figura 5.10: Variação da cota (Δz) em função da variação de H , correspondente a um comprimento infinitesimal (Δx), para cada um dos perfis transversais em análise.....	171
Figura 5.11: Representação do caso de estudo no modelo <i>Grid Generator</i>	174
Figura 5.12: Definição de parâmetros dos sedimentos e do perfil transversal no GENESIS.	175

Figura 5.13: Definição das características do esporão no modelo GENESIS e representação do domínio espacial.....	175
Figura 5.14: Resultados da modelação ao longo do tempo, no LTC e no GENESIS.	178
Figura 5.15: Resultados da modelação, em função da distância ao esporão, no LTC e no GENESIS.	178
Figura 5.16: Posição da linha de costa junto ao esporão (GENESIS, modelo interno).	179
Figura 5.17: Evolução da linha de costa em função da distância ao esporão, segundo Pelnard-Considère (1956).....	182
Figura 5.18: Evolução da linha de costa em função da distância ao esporão, considerando a onda $H_0 = 2$ m e $\alpha_0 = 20^\circ$	183
Figura 5.19: Pormenor da evolução da linha de costa em função da distância ao esporão, considerando a onda $H_0 = 2$ m e $\alpha_0 = 20^\circ$	184

Capítulo 6: Aplicação da COAST

Figura 6.1: Representação das zonas definidas para o domínio de cálculo.	193
Figura 6.2: Posição da linha de costa no cenário de referência, ao longo do tempo (escala horizontal 10 vezes superior à escala vertical).	193
Figura 6.3: Esquematização do cenário base do esporão.	195
Figura 6.4: Posição da linha de costa no cenário base do esporão, ao longo do tempo (escala horizontal 10 vezes superior à escala vertical).	196
Figura 6.5: Secção transversal do esporão do cenário base, correspondente à profundidade da cabeça (módulo de pré-dimensionamento).	197
Figura 6.6: Resultados do módulo de custo-benefício, para o cenário base do esporão.	198
Figura 6.7: Esquematização do cenário base da estrutura longitudinal aderente.	215
Figura 6.8: Posição da linha de costa no cenário base da estrutura longitudinal aderente, ao longo do tempo (escala horizontal 10 vezes superior à escala vertical).	216

Figura 6.9: Secção transversal da estrutura longitudinal aderente do cenário base (módulo de pré-dimensionamento)..... 217

Figura 6.10: Resultados do módulo de custo-benefício, para o cenário base da estrutura longitudinal aderente. 218

Figura 6.11: Esquematização do cenário base da alimentação artificial de praia. 227

Figura 6.12: Posição da linha de costa no cenário base da alimentação artificial de praia, ao longo do tempo (escala horizontal 10 vezes superior à escala vertical)..... 228

Figura 6.13: Resultados do módulo de custo-benefício, para o cenário base da alimentação artificial de praia. 229

Figura 6.14: Esquematização do cenário base da transposição artificial de areias. 238

Figura 6.15: Posição da linha de costa no cenário base da transposição artificial de areias, ao longo do tempo (escala horizontal 10 vezes superior à escala vertical)..... 239

Figura 6.16: Resultados do módulo de custo-benefício, para o cenário base da transposição artificial de areias..... 240

Capítulo 7: Considerações finais

Figura 7.1: Diferença de pressuposto na definição da linha de costa inicial na vizinhança de um esporão, no LTC e no GENESIS..... 271

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 1: Introdução

Tabela 1.1: Interligação entre a estrutura da dissertação e as tarefas definidas no plano de trabalhos. 10

Capítulo 2: Modelação numérica de intervenções de defesa costeira

Tabela 2.1: Classificação dos modelos numéricos tendo em conta a escala temporal e espacial da simulação (Coelho *et al.*, 2009). 17

Tabela 2.2: Principais características, vantagens e limitações dos métodos de análise mais comuns na avaliação económica de opções de adaptação (baseado em Barata e Pinto, 2016). 30

Capítulo 3: Modelos e formulações de base

Tabela 3.1: Critério de classificação do tipo de rebentação das ondas (adaptado de Burcharth e Hughes, 2006). 39

Tabela 3.2: Nomenclatura adotada para as formulações do manto resistente. 71

Tabela 3.3: Peso unitário dos blocos a colocar nas diferentes camadas da secção transversal. 77

Capítulo 4: Ferramenta numérica COAST

Tabela 4.1: Coeficientes de estabilidade para a zona do tronco das estruturas (SPM, 1977, 1984). .. 126

Tabela 4.2: Coeficientes de estabilidade para a zona da cabeça das estruturas (SPM, 1977, 1984)... 127

Capítulo 5: Modelação de evolução da linha de costa

Tabela 5.1: Características das ondas analisadas, para avaliação do impacto das diferenças entre o LTC e o GENESIS. 170

Tabela 5.2: Relação entre Δy e Δz (modelo LTC), em situação de erosão e acreção, para cada um dos perfis transversais (PT). 172

Tabela 5.3: Características da onda na rebentação (ao fim do primeiro passo de tempo), considerando o LTC e o GENESIS (interno e externo). 177

Tabela 5.4: Tempo de enchimento do esporão, considerando parâmetros relativos à simulação da posição da linha de costa com o LTC e com o GENESIS..... 180

Capítulo 6: Aplicação da COAST

Tabela 6.1: Recuo máximo da posição da linha de costa e áreas totais de território perdidas para o cenário de referência, ao longo do tempo de simulação (5, 10 e 20 anos). 193

Tabela 6.2: Definição dos cenários com esporão, testados com a ferramenta COAST. 195

Tabela 6.3: Balanço físico e económico do cenário base do esporão. 199

Tabela 6.4: Recuo máximo da posição da linha de costa e áreas totais de território perdidas para o cenário de “não intervenção”, correspondentes à onda $H_0 = 3$ m e $H_0 = 4$ m..... 200

Tabela 6.5: Balanço físico e económico da influência do clima de agitação nos cenários do esporão. 201

Tabela 6.6: Volume e custo de construção do esporão, considerando diferentes batimetrias..... 202

Tabela 6.7: Balanço físico e económico da influência da batimetria nos cenários do esporão..... 203

Tabela 6.8: Volume e custo de construção do esporão, considerando diferentes comprimentos.. 204

Tabela 6.9: Balanço físico e económico da influência do comprimento do esporão. 205

Tabela 6.10: Balanço físico e económico da influência da posição do esporão..... 207

Tabela 6.11: Volume de material e custo de construção associado a cada cenário, tendo em conta o número de esporões considerado..... 208

Tabela 6.12: Balanço físico e económico da influência do número de esporões. 208

Tabela 6.13: Balanço económico da influência do valor do território nos cenários do esporão. ... 210

Tabela 6.14: Balanço económico da influência da taxa de desconto nos cenários do esporão. 211

Tabela 6.15: Resumo do balanço físico e económico dos cenários do esporão.....	213
Tabela 6.16: Balanço físico e económico do cenário base da estrutura longitudinal aderente.	218
Tabela 6.17: Definição dos cenários com estrutura longitudinal aderente, testados com a ferramenta COAST.....	219
Tabela 6.18: Volume e custo de construção da estrutura longitudinal aderente, considerando diferentes comprimentos.	219
Tabela 6.19: Balanço físico e económico da influência do comprimento da estrutura longitudinal aderente.	220
Tabela 6.20: Volume e custo de construção da estrutura longitudinal aderente, considerando diferentes cotas de coroamento.	221
Tabela 6.21: Balanço físico e económico da influência da cota de coroamento da estrutura longitudinal aderente.....	221
Tabela 6.22: Volume e custo de construção da solução conjunta de esporão com estrutura longitudinal aderente.....	222
Tabela 6.23: Balanço físico e económico da influência da conjugação entre um esporão e estrutura longitudinal aderente.....	223
Tabela 6.24: Resumo do balanço físico e económico dos cenários da estrutura longitudinal aderente.....	224
Tabela 6.25: Definição dos cenários com alimentação artificial de praia, testados com a ferramenta COAST.....	227
Tabela 6.26: Balanço físico e económico do cenário base da alimentação artificial de praia.	229
Tabela 6.27: Balanço físico e económico da influência da extensão da alimentação artificial de praia.....	231
Tabela 6.28: Balanço físico e económico da influência da localização da alimentação artificial de praia.....	231
Tabela 6.29: Balanço físico e económico da influência da frequência de deposição de sedimentos nas alimentações artificiais de praia.....	232

Tabela 6.30: Balanço físico e económico da influência do volume de sedimentos nas alimentações artificiais de praia.	234
Tabela 6.31: Balanço económico da influência do custo unitário dos sedimentos nas alimentações artificiais de praia.	235
Tabela 6.32: Resumo do balanço físico e económico dos cenários de alimentações artificiais de praia.	236
Tabela 6.33: Balanço físico e económico do cenário base da transposição artificial de areias.	240
Tabela 6.34: Definição dos cenários para transposição artificial de areias, testados com a ferramenta COAST.	241
Tabela 6.35: Balanço físico e económico da influência da localização do sistema de transposição artificial de areias.	241
Tabela 6.36: Balanço físico e económico da avaliação da influência do caudal transposto na transposição artificial de areias.	242
Tabela 6.37: Balanço económico da influência do custo de investimento na transposição artificial de areias.	244
Tabela 6.38: Balanço económico da influência do custo unitário dos sedimentos na transposição artificial de areias.	244
Tabela 6.39: Resumo do balanço físico e económico dos cenários de transposição artificial de areias.	246
Tabela 6.40: Resumo do balanço físico dos cenários base analisados com a COAST.	248
Tabela 6.41: Resumo do balanço económico dos cenários base analisados com a COAST.	248

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

Símbolos latinos maiúsculos:

A	Parâmetro de escala dos sedimentos (perfil de <i>Dean</i>)
$AANP$	Área ainda não perdida (m^2)
A_i	Área da camada i que constitui a secção transversal das estruturas (m^2)
A_{in}	Área inundada devido aos galgamentos (m^2)
A_j	Área total da secção transversal correspondente à posição j da estrutura (m^2)
B	Altura da berma da praia (m)
B	Largura de coroamento (m)
B_i	Largura de coroamento da camada i que constitui a secção transversal das estruturas (m)
C	Cota de coroamento (m)
C_g	Custos associados aos danos no edificado e perdas de bens materiais devido a inundações (€)
C_{gb}	Celeridade da ondulação na rebentação (m/s)
C_Q	Parâmetro de calibração da taxa de transporte longitudinal (compreendido entre 0 e 1)
C_1 e C_2	Parâmetros da expressão do cálculo da difração (Coelho, 2005)
D^*	Parâmetro adimensional de caracterização dos sedimentos
D_i	Porcentagem relativa de dano devido a inundações (curvas DDF)
D_n	Diâmetro nominal de blocos pré-fabricados de betão, equivalente a $D_{n,50}$ para enrocamento (m)
$D_{n,50}$	Diâmetro nominal dos blocos a colocar no manto resistente (m)
DoC	Profundidade de fecho (m)
DoC_B	Profundidade de fecho, calculada através da formulação de Birkmeier, 1985 (m)
DoC_H	Profundidade de fecho, calculada através da formulação de Hallermeier, 1978 (m)
H	Altura de onda (m). Nas formulações de pré-dimensionamento corresponde à altura de onda de projeto.
H_b	Altura de onda na rebentação (m)
H_i	Altura de onda incidente (m)
H_s	Altura de onda significativa (m)
$H_{s,0.137}$	Altura de onda significativa que é excedida 12 horas/ano (m)
H_{toe}	Altura de onda na base da estrutura (m)
H_0	Altura de onda ao largo (m)

$H_{1/20}$	Altura de onda média do vigésimo mais alto do número total de ondas registado (m)
$H_{1/10}$	Altura de onda média do décimo mais alto do número total de ondas registado (m)
$H_{2\%}$	Altura de onda excedida em 2% do total de ondas registadas (m)
H/V	Inclinação do talude (horizontal/vertical)
K_D	Coefficiente de estabilidade
K_d	Coefficiente de difração
K_r	Coefficiente de refração
K_s	Coefficiente de empolamento
L	Comprimento de onda local (m)
L	Comprimento da estrutura (m)
L_b	Comprimento de onda correspondente à profundidade de rebentação (m)
L_p	Comprimento de onda local de pico (m)
L_0	Comprimento de onda ao largo: L_{om} - médio e L_{op} - pico (m)
M_{50}	Massa dos blocos a colocar no manto resistente (kg)
N_a/A	Número de blocos por unidade de área
N_i	Funções de forma do ponto i
N_{od}	Número de blocos deslocados do manto resistente, numa camada de espessura D_n
N_s^*	Número de estabilidade espectral
N_z	Número de ondas
P	Permeabilidade do manto resistente das estruturas
P	Posição definida para a estrutura (m)
P'	Porosidade das camadas do manto resistente das estruturas
Q	Taxa potencial de transporte longitudinal de sedimentos (m^3/s)
Q_{ext}	Fornecimentos exteriores de sedimentos ao longo de um comprimento infinitesimal Δx (m^3/s)
Q_l	Taxa real efetiva de transporte longitudinal de sedimentos (m^3/s)
Q_m	Taxa potencial de transporte longitudinal de sedimentos (kg/s)
RBC	Rácio benefício-custo
R_c	Altura de galgamento (m)
R_u	Altura de espraiamento da onda (m)
$R_{u,máx}$	Altura de espraiamento máximo da onda (m)
S	Área erodida relativa ou nível de dano admissível
T	Período da onda (s)
T	Representa a inclinação do talude da estrutura (H/V), admitindo $H = T$ e $V = 1$

T_p	Período de pico da onda (s)
\bar{T}_s	Período de onda significativo médio (s)
V	Volume (m ³)
V	Valores monetários (€)
VA	Valores atualizados (€)
VAB	Valores atuais de benefícios (€)
VAC	Valores atuais de custos (€)
VAL	Valor atual líquido (€)
VB	Valores nominais de benefícios (€)
VC	Valores nominais de custos (€)
W	Largura ativa do perfil transversal (m)
W	Peso unitário dos blocos a colocar no manto resistente (kN)
X, Y e Z	Coordenadas do domínio de cálculo (m)
Y	Comprimento do esporão considerado na expressão de Pelnard-Considère, 1956 (m)

Símbolos latinos minúsculos:

a_1 e a_2	Parâmetros adimensionais da formulação de transporte considerada no GENESIS
d	Profundidade local (m)
d_b	Profundidade de rebentação (m)
d_{50}	Dimensão dos sedimentos (mm)
e_i	Espessura da camada i que constitui a secção transversal das estruturas (m)
f_i	Fator de redução ($D_{n50,Galgável} = f_i D_{n50,Não\ Galgável}$)
g	Aceleração da gravidade (9.81 m/s ²)
h	Profundidade do perfil de praia, determinada através do perfil de <i>Dean</i> (m)
h	Profundidade máxima considerada para o cálculo do volume da cabeça das estruturas (m)
h_c	Altura de água acima da obra, $h_c = d - h'_c$ (m)
h_i	Altura de água da zona inundada para estimativa do valor de danos (m)
h'_c	Altura da obra submersa (m)
i, j, k	Índices auxiliares
k	Coefficiente empírico ou coeficiente de transporte
k	Número de onda ($2\pi/L$)
k_b	Índice ou coeficiente de rebentação (0.78, de acordo com McCowan, 1891)
k_Δ	Coefficiente de camada

k_1 e k_2	Coefficientes empíricos da formulação de transporte considerada no GENESIS
m	Fator de forma dos perfis transversais, função do tipo de dissipação da praia
n	Porosidade dos sedimentos
n	Número de camadas de blocos constituintes do manto resistente
n	Número de pontos da grelha correspondentes ao comprimento da estrutura
n_b	Número de blocos colocados na berma
q_{ext}	Eventuais fornecimentos exteriores de sedimentos em cada iteração do cálculo (m^2/s)
q_s	Eventuais fornecimentos exteriores de sedimentos provenientes de terra (m^2/s)
q_0	Eventuais fornecimentos exteriores de sedimentos provenientes de mar (m^2/s)
r	Distância entre o ponto de difração e a extremidade da estrutura transversal (m)
r	Espessura das camadas do manto resistente (m)
r	Taxa de desconto ou atualização
r_1	Raio menor considerado para o cálculo do volume da cabeça das estruturas (m)
r_2	Raio maior considerado para o cálculo do volume da cabeça das estruturas (m)
s	Relação entre pesos específicos dos sedimentos e da água do mar
s_p	Declividade da onda local de pico ($s_p = H/L_p$)
s_0	Declividade da onda ao largo ($s_{om} = H/L_{om}$ e $s_{op} = H/L_{op}$)
t	Tempo de análise (anos)
t_f	Tempo de enchimento de um esporão (anos)
t_2	Tempo de cálculo após o enchimento total de um esporão (anos)
u_{mb}	Magnitude da velocidade orbital (m/s)
w_s	Velocidade de queda dos sedimentos (m/s)
x	Coordenada de um ponto na direção longitudinal à praia (m)
x	Distância à linha de costa, para determinação do perfil de equilíbrio de <i>Dean</i> (m)
y	Coordenada de um ponto na direção transversal à praia (m)
z	Coordenada vertical (m)
z_i	Cota do ponto i (m)

Símbolos gregos:

α	Inclinação do talude da estrutura (°)
α_b	Ângulo entre a crista da onda na rebentação e a linha de costa (°)
α_i e β_i	Parâmetros adimensionais das curvas DDF
α_s	Ângulo entre a linha de costa e o referencial (°)

α_0	Ângulo entre a crista da onda ao largo e a linha de costa (°)
β	Inclinação do talude de praia (°)
γ	Peso volúmico da água do mar ($\gamma = \rho g$)
γ_s	Peso volúmico dos blocos constituintes do manto resistente ($\gamma_s = \rho_s g$)
Δ	Densidade relativa ($\Delta = \gamma_s/\gamma - 1$)
ΔQ	Varição do caudal sólido em transporte no trecho Δx (m ³ /s)
Δt	Intervalo de tempo no cálculo da variação de volume no trecho Δx (s)
ΔV	Varição de volume (m ³)
Δx	Comprimento dos trechos discretos da linha de costa (m)
Δy	Alteração da posição da linha de costa (m)
Δz	Varição uniforme da cota em toda a largura ativa do perfil transversal (m)
ε	Parâmetro de calibração da formulação de Pelnard-Considère (1956)
θ_1	Ângulo entre a direção de incidência da onda e a obra perpendicular à linha de costa (°)
θ_2	Ângulo entre o ponto de difração e a obra transversal (°)
ν	Coefficiente de viscosidade cinemática da água do mar (m ² /s)
ν_i	Valor das zonas edificadas para estimativa de danos por inundações (€/m ²)
ξ	Número de Iribarren: ξ_m - médio e ξ_c - crítico
ρ	Massa volúmica da água (kg/m ³)
ρ_s	Massa volúmica da areia (kg/m ³)
ϕ_L	Ângulo de atrito dos sedimentos na direção longitudinal (°)
ϕ_1	Ângulo máximo do terreno com a horizontal, submerso, em situação de acreção (°)
ϕ_2	Ângulo máximo do terreno com a horizontal, emerso, em situação de acreção (°)
ϕ_3	Ângulo máximo do terreno com a horizontal, submerso, em situação de erosão (°)
ϕ_4	Ângulo máximo do terreno com a horizontal, emerso, em situação de erosão (°)

Abreviaturas, siglas e acrónimos:

<i>ACB</i>	Análise custo-benefício
<i>ACE</i>	Análise custo-eficácia
<i>BREAKWAT</i>	Modelo de dimensionamento de estruturas costeiras desenvolvido pela Deltares
<i>BSI</i>	<i>British Standard Institution</i>
<i>CB</i>	Cenário base
<i>CEDAS</i>	<i>Coastal Engineering Design & Analysis System</i>
<i>CEM</i>	<i>Coastal Engineering Manual</i>

<i>CERC</i>	<i>Coastal Engineering Research Center</i>
<i>CLI</i>	<i>Concrete Layer Innovations</i>
<i>COAST</i>	<i>Coastal Optimisation ASsessment Tool</i>
<i>CRESS</i>	<i>Coastal and River Engineering Support System</i>
<i>DDF</i>	<i>Depth-damage functions: curvas para estimativa do valor dos danos devido a galgamentos</i>
<i>DINAS-COAST</i>	<i>Dynamic and INteractive ASsessment of National, Regional and Global Vulnerability of COASTal Zones to Climate Change and Sea-Level Rise</i>
<i>DHI</i>	<i>Danish Hydraulic Institute</i>
<i>DIVA</i>	<i>Dynamic and Interactive Vulnerability Assessment</i>
<i>FEUP</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
<i>GENESIS</i>	<i>Generalized Model for Simulation Shoreline Change</i>
<i>GENESISext</i>	Resultados obtidos considerando o modelo externo de propagação da onda (STWAVE)
<i>GENESISint</i>	Resultados obtidos considerando o modelo interno de propagação da onda
<i>GRIDGEN</i>	<i>Grid Generator</i>
<i>INAG</i>	Instituto da Água
<i>LIST</i>	Modelo de transporte de sedimentos não-coesivos
<i>LITDRIFT</i>	Modelo de transporte longitudinal e deriva litoral
<i>LITLINE</i>	Modelo de evolução da linha de costa
<i>LITMOD</i>	Modelo de evolução da linha de costa
<i>LITPACK</i>	<i>Littoral Processes and Coastline Kinetics</i>
<i>LITPROF</i>	Modelo de evolução dos perfis transversais
<i>LITTREN</i>	Modelo de simulação do assoreamento/retenção de sedimentos em canais
<i>LTC</i>	<i>Long-Term Configuration</i>
<i>LTC-CC2005</i>	Versão inicial do algoritmo LTC desenvolvida por Carlos Coelho, em 2005
<i>LTC-CC2012</i>	Versão do algoritmo LTC desenvolvida por Carlos Coelho, em 2012
<i>LTC-C#</i>	Interface gráfica do modelo numérico LTC, desenvolvida em linguagem C#
<i>LTC-Fortran</i>	Algoritmo do modelo numérico LTC, desenvolvido em linguagem <i>Fortran</i>
<i>LTC-ML2017</i>	Versão do algoritmo LTC desenvolvida por Márcia Lima, em 2017
<i>LTC-RS2010</i>	Versão do algoritmo LTC desenvolvida por Raquel Silva, em 2010
<i>NEMOS</i>	<i>Nearshore Evolution MOdeling System</i>
<i>NMM</i>	Nível médio do mar
<i>ONELINE</i>	Modelo de evolução da linha de costa
<i>POO</i>	Programação orientada a objetos
<i>PT</i>	Perfil transversal

<i>ROM</i>	<i>Recomendaciones de Obras Marítimas</i>
<i>SPECGEN</i>	<i>Spectro Generator</i>
<i>SPM</i>	<i>Shore Protection Manual</i>
<i>STWAVE</i>	<i>Steady-State Spectral Wave Model</i>
<i>TMA</i>	Espectro utilizado no SPECGEN: <i>Texel, Maarsen and Arsloe</i>
<i>UA</i>	Universidade de Aveiro
<i>UNIBEST</i>	<i>Uniform Beach Sediment Transport</i>
<i>UNIBEST-CL</i>	Componente do modelo <i>UNIBEST</i> para dinâmica costeira
<i>UNIBEST-CL+</i>	Interface gráfica do <i>UNIBEST</i> para simulação da dinâmica costeira
<i>UNIBEST-LT</i>	Componente do modelo <i>UNIBEST</i> para transporte longitudinal
<i>UNIBEST-TC</i>	Componente do modelo <i>UNIBEST</i> para transporte transversal
<i>USACE</i>	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
<i>WSAV</i>	<i>Wave Station Analysis and Visualization</i>
<i>WWWL</i>	<i>Waves, Winds and Water Levels</i>
<i>XD-Coast</i>	<i>Xpress Design of Coastal Structures</i>
<i>3D</i>	Tridimensional

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

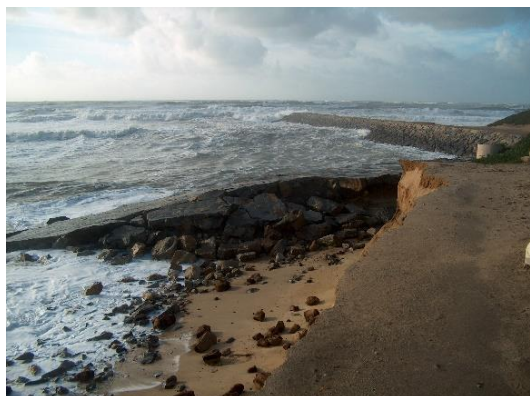
As zonas do litoral enfrentam graves problemas de erosão. Este fenómeno, associado ao recuo da posição da linha de costa, pode causar avultados prejuízos, com particular incidência nas frentes urbanas, colocando em risco pessoas e bens. Por este motivo, é essencial o aprofundamento do estudo de estratégias de previsão, prevenção e mitigação do problema da erosão costeira, nomeadamente no que diz respeito à análise de intervenções de defesa costeira.

Surge assim o presente trabalho de investigação, que consiste no desenvolvimento de uma ferramenta numérica que facilita a análise e comparação preliminar do desempenho de intervenções de defesa costeira, e que visa dotar as entidades decisoras de elementos que permitam, perante determinados cenários, avaliar o impacto na evolução da linha de costa, estimar a dimensão das intervenções e optar por soluções mais eficazes e com menores custos associados.

1.1. Enquadramento do problema

O importante défice sedimentar, o efeito das alterações climáticas e a crescente pressão urbana sobre as zonas costeiras, permitem antever que os investimentos necessários na realização e manutenção de obras de defesa costeira sejam cada vez maiores. No passado recente, os episódios recorrentes de danos nas zonas costeiras, consequentes dos problemas persistentes de erosão costeira (Figura 1.1), permitem antecipar a importância de aprofundar conhecimentos e desenvolver metodologias que possam contribuir para a obtenção de soluções que se pretendam rápidas e otimizadas (face às restrições orçamentais impostas).

Dada a importância económica e social das zonas costeiras, as entidades decisoras precisam de apoio fundamentado, pelo que é necessário o desenvolvimento de ferramentas que lhes facilitem, mediante determinados cenários, avaliar quais as melhores soluções a adotar em cada situação específica. Os técnicos necessitam de meios que ajudem a validar a tomada de decisão, discutindo o custo da intervenção e os impactos que lhe estão associados. Como tal, considera-se útil a existência de ferramentas que possam permitir uma avaliação prévia de intervenções alternativas, avaliando custos e benefícios de diferentes cenários.



a) Cortegaça/Maceda



b) Praia da Barra

Figura 1.1: Danos ocorridos no inverno de 2013/2014, consequência da erosão costeira.

Qualquer estratégia para mitigação do problema da erosão costeira envolve custos elevados. A implantação de uma estrutura de defesa costeira é uma ação que provoca impactos no evoluir do litoral. Assim, é importante desenvolver estudos de investigação, de forma a compreender o comportamento de cada tipo de estrutura e de forma a otimizar soluções (essencialmente na fase de projeto), para que se consigam obras eficazes com o menor custo possível.

1.2. Proposta de investigação

O tema para um trabalho de investigação inerente a uma tese de doutoramento, deverá, acima de tudo, ser pertinente e atual, e ter como objetivo final algo novo que beneficie, direta e/ou indiretamente, a sociedade em geral. Pretende-se, com este trabalho em particular, contribuir para a otimização do desempenho global de soluções de intervenção de defesa costeira, através do desenvolvimento de ferramentas que apoiem e auxiliem a sustentar as tomadas de decisão das entidades responsáveis pelo planeamento e gestão das zonas costeiras.

1.2.1. Motivação

Face ao panorama atual nas zonas costeiras, prevê-se a curto prazo, a crescente necessidade de intervir na orla costeira portuguesa, propondo soluções cada vez mais eficazes para combater os problemas de erosão (GTL, 2014). É importante que as entidades responsáveis pelo planeamento das zonas costeiras justifiquem as opções a tomar, com base em conhecimento científico e análises fundamentadas. A existência de ferramentas de cálculo

automático que permitam uma pré-avaliação global de possíveis soluções de intervenção, que auxiliem tomadas de decisão e que conduzam, simultaneamente, a uma redução de custos, pode revelar-se de grande utilidade para a gestão costeira. Além disso, a informação existente na bibliografia sobre o desempenho de intervenções e a representação de fenómenos que lhes estão associados é dispersa, e muitas vezes baseada em formulações empíricas. Pelo referido, é útil e necessário o desenvolvimento de ferramentas de cálculo automático que permitam pré-avaliar, de forma expedita, o impacto de diferentes parâmetros no dimensionamento de intervenções de mitigação da erosão costeira.

Apesar da já existência de diversos programas de análises de estruturas costeiras, o desenvolvimento de uma ferramenta que contemple a fase de pré-dimensionamento, o estudo de impactos na evolução da linha de costa e a estimativa de custos e benefícios, e que possa facilmente ser melhorada e manipulada no sentido de permitir a sua contínua evolução, representa uma base importante para o contributo à tomada de decisão na gestão das zonas costeiras.

O fácil acesso a um modelo numérico que permite projetar a evolução da linha de costa (LTC, *Long-Term Configuration*, Coelho, 2005) e a uma ferramenta de pré-dimensionamento da secção transversal de estruturas de defesa costeira, que conjuga um modelo numérico e uma interface para o utilizador (XD-Coast, *Xpress Design of COAstal Structures*, Lima, 2011), que podem ambos ser analisados, testados e continuamente desenvolvidos de forma obter áreas de território ganhas e/ou perdidas ao longo do tempo por efeito das diferentes intervenções e quantificar volumes de materiais necessários à sua implementação, motivou a elaboração de uma ferramenta de cálculo que culmina com a estimativa custo-benefício de intervenções costeiras para mitigação do problema da erosão costeira.

1.2.2. Objetivos

O objetivo global do presente trabalho consistiu na apresentação de contributos para a otimização das propostas de intervenção de defesa costeira para mitigação do problema da erosão costeira, com vista à redução dos custos de execução e manutenção das intervenções, e maximização dos impactos positivos na evolução da linha de costa. Pretendeu-se assim, reunir numa ferramenta numérica a capacidade de pré-dimensionar intervenções de defesa

costeira, avaliar o respetivo impacto na evolução da linha de costa e estimar os custos e benefícios que lhes estão associados, permitindo, desta forma, a comparação sustentada entre diversos cenários. Paralelamente, pretendeu-se contribuir para a melhoria do desempenho da capacidade de simulação numérica da evolução da linha de costa a médio e longo prazo, através do modelo numérico LTC.

Assim, foram definidos diferentes objetivos específicos que conduzem à concretização do objetivo geral do trabalho:

- ✓ Produzir uma interface gráfica para o modelo numérico LTC, que permitisse a interação entre o utilizador e o modelo, facilitando a introdução de dados, a visualização de resultados e a análise dos fenómenos simulados.
- ✓ Analisar o desempenho do modelo LTC e comparar com outros modelos numéricos (GENESIS, Hanson e Kraus, 1989) e/ou analíticos (Pelnard-Considère, 1956), permitindo assim a introdução de melhorias no algoritmo existente.
- ✓ Avaliar os parâmetros condicionantes no pré-dimensionamento de estruturas costeiras e incorporar melhorias na definição da secção transversal destas estruturas (introdução de mais alternativas de cálculo no modelo XD-Coast).
- ✓ Quantificar volumes de materiais requeridos pela intervenção (tendo como base o modelo XD-Coast) e áreas de território ganho e/ou perdido (por projeção da posição da linha de costa com recurso ao LTC), de forma a estimar custos e benefícios de cada intervenção.
- ✓ Programar uma metodologia de avaliação de custo-benefício, que interligada com as duas ferramentas numéricas desenvolvidas nos objetivos anteriores, resulta na ferramenta numérica de análise e otimização de intervenções costeiras.
- ✓ Aplicar a ferramenta numérica desenvolvida a casos de estudo hipotéticos, de forma a demonstrar a sua versatilidade e potencialidades.

1.2.3. Plano de trabalhos

Para a concretização dos objetivos propostos, o desenvolvimento dos trabalhos foi estruturado em seis tarefas distintas. Na Figura 1.2, representa-se o organigrama de

interligação das várias tarefas realizadas e, em seguida, uma breve descrição de cada uma delas.

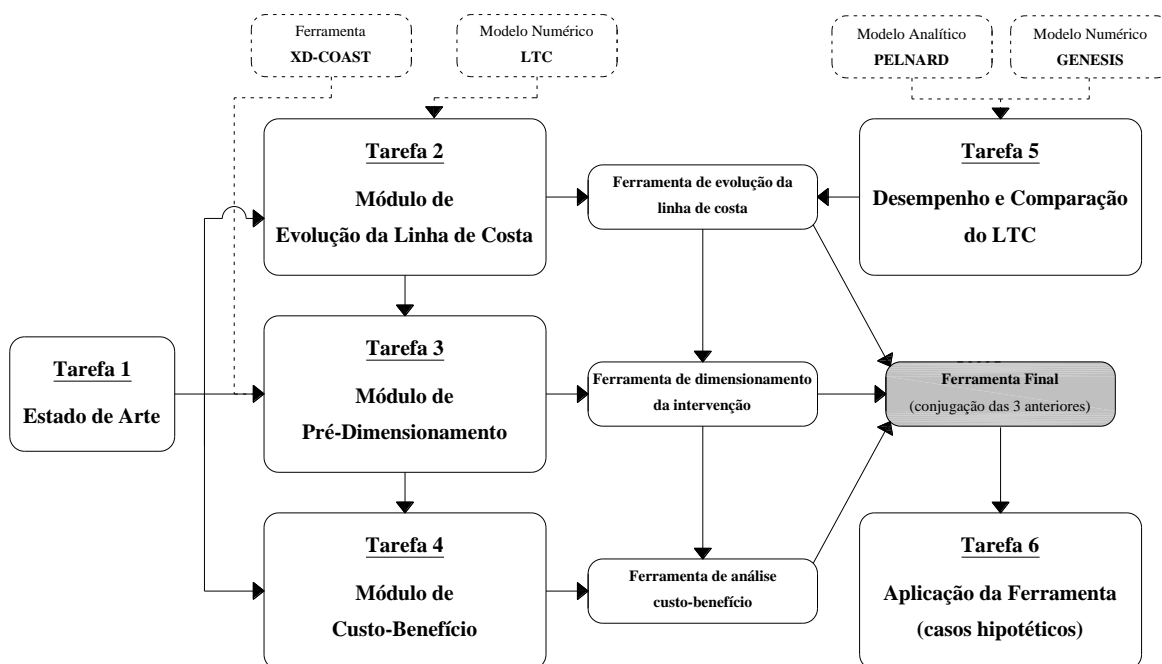


Figura 1.2: Organograma de tarefas do trabalho de investigação proposto.

Tarefa 1

A primeira tarefa consistiu essencialmente numa componente teórica do trabalho e pretendeu reunir os principais modelos de avaliação de intervenções costeiras existentes, no que respeita à avaliação do impacto na evolução da linha de costa, ao pré-dimensionamento, e à análise custo-benefício. Pretendeu-se assim identificar os principais conceitos e metodologias relativos à análise das intervenções de defesa costeira para mitigação do problema da erosão costeira.

Tarefa 2

A Tarefa 2, relativa ao desenvolvimento do módulo de evolução da linha de costa, consistiu na elaboração da interface gráfica do modelo numérico LTC e alteração do algoritmo existente. Entre as alterações realizadas, pretendeu-se nesta tarefa a determinação das áreas de acreção e erosão resultantes da implantação da intervenção de defesa costeira, para incorporação no modelo de análise custo-benefício.

Tarefa 3

Na Tarefa 3 pretendeu-se o desenvolvimento do módulo de pré-dimensionamento de estruturas de defesa costeira, partindo do modelo já existente XD-Coast. Foi objetivo que este módulo fosse ao encontro das necessidades dos projetistas, pelo que se procedeu à incorporação de novas funcionalidades no que respeita à determinação da secção transversal das estruturas, melhorando as potencialidades do modelo XD-Coast. Tendo em conta a definição da secção transversal e a configuração em planta das obras propostas, inseriu-se no modelo a quantificação do volume de material envolvido, permitindo uma fácil estimativa dos custos de intervenção.

Tarefa 4

A Tarefa 4 relaciona-se com o módulo de custo-benefício, envolvendo a estimativa dos custos e dos benefícios decorrentes da implantação de uma intervenção costeira e análise da viabilidade económica dessa intervenção. Foi efetuada a programação de uma metodologia de análise custo-benefício, baseada nos custos das intervenções e no cálculo de áreas de território ganhas e/ou perdidas ao longo do tempo.

Ainda nesta tarefa foi realizada a interligação do módulo de evolução da linha de costa (Tarefa 2), do módulo de pré-dimensionamento (Tarefa 3) e do módulo de custo-benefício. Foi objetivo que as ferramentas numéricas fossem expeditas e intuitivas de tal forma que fosse possível alterar parâmetros/características em cada um dos módulos permitindo a comparação de resultados entre cada um dos cenários. Este processo pode contribuir para que seja agilizada a busca de soluções otimizadas, sustentando a tomada de decisão por parte das entidades com competência na gestão do território costeiro.

Tarefa 5

Na Tarefa 5 avaliou-se o desempenho do modelo LTC com vista à sua melhoria. O desenvolvimento da interface gráfica e as alterações ao algoritmo concretizadas na Tarefa 2 permitiram a visualização de comportamentos intermédios no cálculo e de resultados mais completos, que suscitaram questões relativas a alguns pressupostos de modelação, que antes não eram possíveis de identificar. Assim, nesta tarefa foi analisado o comportamento de

diversos parâmetros intervenientes no modelo numérico LTC e comparado o desempenho com o modelo numérico GENESIS, com base num caso de estudo hipotético. Tendo em conta que ambos os modelos numéricos se baseiam no modelo analítico de Pelnard-Considère (1956), as análises efetuadas culminaram na aplicação deste modelo ao caso de estudo e conseqüente comparação dos resultados.

Tarefa 6

A Tarefa 6 consistiu na aplicação da ferramenta numérica desenvolvida a um caso de estudo genérico na perspectiva de demonstrar a respetiva versatilidade, expondo hipóteses de cenários que podem ser pré-avaliados de forma rápida e expedita. Com o desenvolvimento desta tarefa apresentam-se algumas das potencialidades da ferramenta numérica e o impacto que a alteração de determinados pressupostos de simulação tem nos resultados finais.

1.3. Estrutura da dissertação

No primeiro capítulo deste trabalho foi enquadrado o tema e apresentada a proposta de investigação, estruturada em seis tarefas distintas. O presente documento é composto por mais seis capítulos, mas a respetiva organização não segue de forma linear a sequência de tarefas proposta na Figura 1.2. Por este motivo, e de forma a orientar o leitor no documento, a Tabela 1.1 interliga as seis tarefas definidas no plano de trabalhos, com os capítulos que descrevem os respetivos resultados.

O Capítulo 2 corresponde à concretização da Tarefa 1, isto é, é neste capítulo que se apresenta o estado de arte sobre modelação de intervenções de defesa costeira, dividido nos três aspetos abordados neste trabalho: evolução da linha de costa, pré-dimensionamento de obras costeiras e análise custo-benefício.

No Capítulo 3 são apresentados os modelos e formulações que serviram de base ao desenvolvimento do trabalho de investigação. Assim, são descritos os modelos relativos à simulação da evolução da linha de costa (Tarefa 2 e Tarefa 5), que traduzem a secção 3.1 (modelo analítico de Pelnard-Considère, 1956), a secção 3.2 (modelo numérico GENESIS) e a secção 3.3 (modelo numérico LTC). A descrição dos fundamentos de base para o

desenvolvimento da Tarefa 3 é feita na secção 3.4 (ferramenta XD-Coast) e, por fim, os conceitos de base e a metodologia adotada para o módulo de custo-benefício, desenvolvido na Tarefa 4, são descritos na secção 3.5.

Tabela 1.1: Interligação entre a estrutura da dissertação e as tarefas definidas no plano de trabalhos.

	Tarefa 1	Tarefa 2	Tarefa 3	Tarefa 4	Tarefa 5	Tarefa 6
Capítulo 1						
Capítulo 2						
Capítulo 3						
4.1						
Capítulo 4						
4.2						
4.3						
Capítulo 5						
Capítulo 6						
Capítulo 7						

No Capítulo 4 é apresentada a ferramenta numérica desenvolvida, sendo cada uma das secções reservada a um módulo distinto. Assim, o módulo de evolução da linha de costa, respeitante aos resultados do desenvolvimento da Tarefa 2, é descrito na secção 4.1, o trabalho desenvolvido na Tarefa 3, relativa ao módulo de pré-dimensionamento, é apresentado na secção 4.2 e, por último, na secção 4.3 é descrito o módulo de custo-benefício (Tarefa 4).

O Capítulo 5 é dedicado na totalidade aos resultados do trabalho desenvolvido na Tarefa 5, com a descrição do caso de estudo (secção 5.1) e apresentação dos resultados e análises relativos ao estudo do desempenho do modelo numérico LTC (secção 5.2), comparação do LTC com o modelo numérico GENESIS (secção 5.3) e comparação de ambos os modelos numéricos com o modelo analítico de Pelnard-Considère, 1956 (secção 5.4).

No Capítulo 6 mostram-se os resultados da aplicação da ferramenta numérica desenvolvida, objetivo da Tarefa 6, evidenciando as potencialidades da ferramenta e avaliando o impacto que a definição de diferentes parâmetros característicos de cada tipo intervenção tem no desempenho físico e económico das soluções. A secção 6.1 descreve um cenário hipotético

de referência, que serviu para o estudo de soluções para o problema de erosão, e as secções seguintes são relativas à descrição dos cenários propostos para cada um dos quatro tipos de intervenção para mitigação da erosão: implantação de esporões, na secção 6.2; estruturas longitudinais aderentes, na secção 6.3; cenários de alimentações artificiais, na secção 6.4; e na secção 6.5, cenários de transposição artificial de areias. A secção 6.6 é reservada à discussão global dos resultados obtidos para cada um dos grupos de cenários descritos.

Por fim, no Capítulo 7, são expostas as considerações finais do documento, compostas pela síntese da dissertação (secção 7.1), principais conclusões (secção 7.2) e desenvolvimentos futuros (secção 7.3).

Capítulo 2

MODELAÇÃO NUMÉRICA DE INTERVENÇÕES DE DEFESA COSTEIRA

2. MODELAÇÃO NUMÉRICA DE INTERVENÇÕES DE DEFESA COSTEIRA

No projeto de intervenções de defesa costeira, a modelação numérica assume um papel fundamental, não só no que diz respeito ao pré-dimensionamento da intervenção, como na compreensão e previsão do impacto na evolução da linha de costa a médio e longo prazo. Aliado ao pré-dimensionamento e impacto de cada intervenção, surge a necessidade de encontrar a melhor relação custo-benefício que resulta da opção adotada, tornando-se importante o conhecimento de metodologias e ferramentas que conduzam a essa otimização. Assim, no sentido de enquadrar a ferramenta numérica de análise de intervenções costeiras, este capítulo tem por objetivo descrever algumas considerações sobre a modelação numérica da evolução da linha de costa e identificar os principais modelos de previsão a médio e longo prazo, descrever os princípios base do pré-dimensionamento de estruturas costeiras e identificar algumas ferramentas numéricas já existentes e, por fim, tecer considerações genéricas acerca de metodologias de análise custo-benefício aplicadas a intervenções de defesa costeira.

2.1. Evolução da linha de costa

A modelação numérica da evolução da linha de costa é indispensável, não só para compreender e prever a dinâmica dos sistemas costeiros, como para auxiliar uma efetiva tomada de decisões. De acordo com Hanson *et al.* (2003), não existe um modelo universal para análise e previsão da evolução da costa numa escala de dezenas de anos. Os autores defendem que, dependendo da natureza do problema e dos objetivos do projeto, existe um número alargado de modelos com abordagens distintas e com pontos de vista específicos. Desta forma, neste subcapítulo expõem-se sucintamente os principais pressupostos relativos à modelação numérica da evolução da linha de costa, mais concretamente no que diz respeito à formulação de “uma linha”.

2.1.1. Considerações genéricas

A evolução da morfologia costeira é o resultado da interação de processos físicos complexos que, na maior parte dos casos, não podem ser numericamente representados de forma exata. As formulações numéricas são deterministas, baseadas em leis físicas conhecidas, ou semi-empíricas, obtidas a partir de medições de campo ou em laboratório (Silva, 2010).

Os modelos analíticos de evolução da linha de costa são soluções fechadas da equação diferencial da continuidade, simplificada para o transporte de sedimentos sob condições de agitação marítima constantes no espaço e no tempo (Silva, 2010). O primeiro modelo deste tipo foi introduzido pela teoria de “uma linha” (Pelnard-Considère, 1956), que considera que o perfil de praia, limitado a *offshore* por uma profundidade de fecho para além da qual não existe movimento significativo dos fundos, se move paralelamente a si próprio. LeMéhauté e Brebner (1961), Bakker e Edelman (1965), Bakker (1968), Walton e Chiu (1979) e Dean (1984) são exemplos de outros modelos analíticos citados em Rosati *et al.* (2002).

Por outro lado, os modelos numéricos da evolução da linha de costa são uma generalização dos modelos analíticos, simulando a evolução da linha de costa para diferentes configurações de praia, podendo incluir diversos tipos de estruturas costeiras e condições fronteira, sob ação da agitação marítima variável no espaço e no tempo (Silva, 2010).

As abordagens numéricas para a simulação da evolução da morfologia costeira, e em particular de praias, são diversas, com diferentes graus de complexidade, desde modelos simples, a uma dimensão, até sofisticados modelos tridimensionais. Devido à exigência computacional, os modelos 3D apenas podem ser utilizados em aplicações de curto prazo, enquanto os modelos de evolução da linha de costa podem ser utilizados para a evolução a longo prazo (Silva, 2010). Hanson e Kraus (1991), partindo da classificação feita em Kraus (1983, 1989), desenvolveram o diagrama da Figura 2.1 de classificação dos modelos de evolução da linha de costa à escala temporal e espacial. Por outro lado, Coelho *et al.* (2009) classificam a evolução da morfologia costeira em escalas temporais de curta, média e longa duração de acordo com a Tabela 2.1.

Um dos modelos mais utilizados e simples para prever a evolução da linha de costa é baseado na técnica de “uma linha”, que assume que o perfil de fundo se mantém constante, mas pode ser deslocado na direção perpendicular à costa, como resultado dos fenómenos de erosão ou acreção. Os modelos de múltiplas linhas foram desenvolvidos para descrever o movimento de contornos a determinadas profundidades, de forma análoga aos modelos de “uma linha”. Apesar do detalhe adicional, estes modelos não obtiveram sucesso devido à dificuldade de relacionar de forma realista o transporte transversal e a distribuição do transporte longitudinal. Estes modelos requerem mais calibração e não resultam num acréscimo significativo de resultados (Hanson *et al.*, 2003).

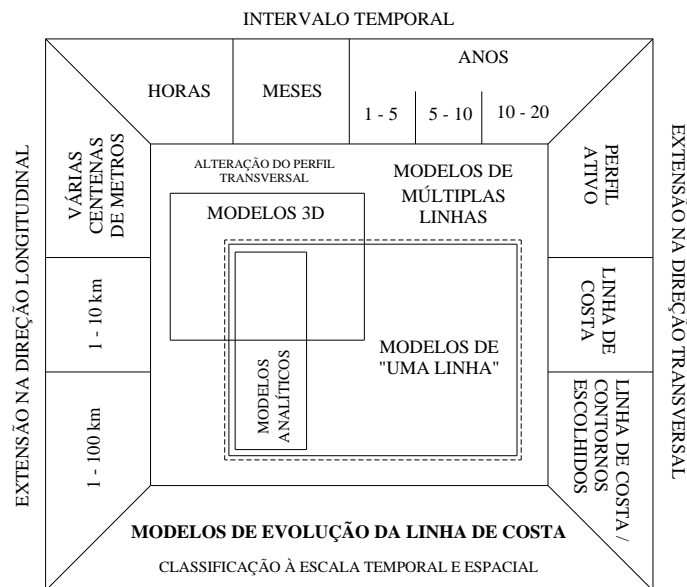


Figura 2.1: Classificação dos modelos numéricos de evolução da linha de costa, de acordo com Hanson e Kraus (1991).

Tabela 2.1: Classificação dos modelos numéricos tendo em conta a escala temporal e espacial da simulação (Coelho *et al.*, 2009).

	Horas	Anos	Décadas	> Séculos
10 m	Curto prazo			
1 km		Médio prazo		
5 km				
10 km			Longo prazo	
>100 km				

Formulação de “uma linha”

Segundo Vicente e Clímaco (2003), o funcionamento dos modelos numéricos unidimensionais baseia-se no cálculo do transporte de sedimentos ao longo do litoral, efetuado a partir das características das ondas na rebentação e na aplicação da equação de continuidade dos volumes de areia movimentados. A variação da posição da linha de água é calculada em cada célula em que se divide o trecho de praia, a partir das diferenças de caudal sólido que nela entram e a abandonam, num certo intervalo de tempo, e admitindo-se que o perfil transversal no seu avanço ou recuo se desloca paralelamente a si próprio, sem alteração de forma.

As alterações na posição da linha de costa são devidas a variações espaciais e temporais nos volumes de transporte sólido longitudinal, pelo que as situações de tendência sistemática na alteração da posição são melhor representadas. A taxa de transporte transversal de sedimentos é, em média, nula a médio e longo prazo. Assim, o transporte transversal e a evolução do perfil de praia não são descritos em termos de modelação de anos ou décadas, devido à dificuldade de reproduzir uma evolução realista nesta escala temporal (Hanson *et al.*, 2003).

Desta forma, admite-se que a variação da topo-hidrografia no tempo é devida unicamente aos gradientes longitudinais do transporte sedimentar. Assim, o balanço dos volumes de sedimentos em transporte numa secção elementar do sector costeiro (Figura 2.2) é traduzido pela equação de continuidade, Expressão 2.1 (Silva, 2010).

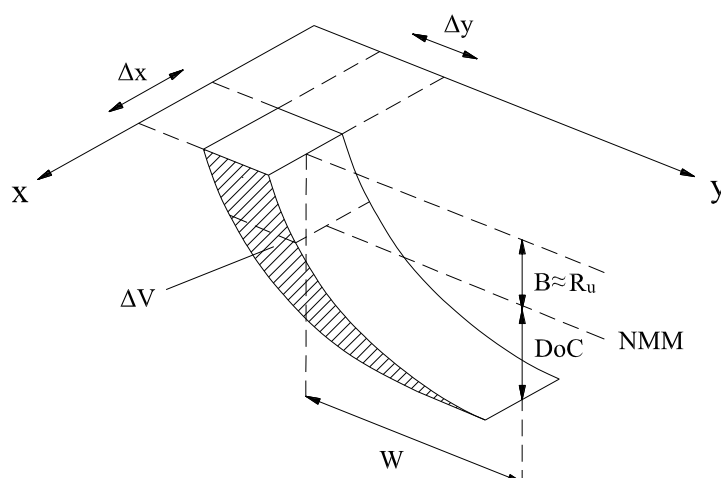


Figura 2.2: Esquema de definição de um modelo de “uma linha” (Gravens *et al.*, 1991).

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q_{ext} \right) dt \quad (2.1)$$

Onde x representa a coordenada longitudinal à praia, V o volume, Q a taxa de transporte longitudinal de sedimentos, t o tempo e q_{ext} eventuais fornecimentos exteriores de sedimentos (fontes aluvionares, por exemplo) por unidade de largura de praia. O valor q_{ext} pode ser caracterizado pela soma de duas parcelas:

$$q_{ext} = q_s + q_0 \quad (2.2)$$

Onde q_s representa os fornecimentos provenientes de terra e q_0 os fornecimentos provenientes de mar, por unidade de largura de praia.

Não havendo alteração da forma do perfil de praia, a evolução da posição da linha de costa é apenas atribuída à variação do transporte longitudinal. Partindo destes pressupostos é possível desenvolver um modelo matemático que consiste na resolução de uma equação de conservação de massa e de uma equação de transporte de sedimentos ao longo de uma praia arenosa.

A conservação de massa ao longo de um comprimento infinitesimal da linha de costa expressa através da equação da continuidade (Expressão 2.1), admitindo que o perfil se move paralelamente a si próprio (Figura 2.2), pode ser expressa segundo:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = - \frac{1}{DoC + R_u} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q_{ext} \right) \quad (2.3)$$

Onde y representa a coordenada transversal à praia, DoC representa a profundidade de fecho e R_u o limite de espraiamento máximo da onda. Em conjunto, estas duas últimas grandezas representam os limites do perfil transversal ativo, com largura W (Figura 2.2). De referir que, na expressão anterior, foi considerado o parâmetro R_u , apesar de na formulação original (Hanson e Kraus, 1989) ser admitida a altura da berma da praia (B), devido à semelhança de valores das duas grandezas (Silva, 2010).

A disponibilidade de sedimentos numa secção de praia não é infinita, sendo a taxa efetiva de transporte longitudinal apenas uma fração da taxa potencial (Expressão 2.4).

$$Q = C_Q Q_l \quad (2.4)$$

Onde Q_l representa a taxa efetiva de transporte longitudinal de sedimentos, Q a taxa potencial de transporte longitudinal de sedimentos e C_Q um parâmetro de calibração, compreendido entre 0 e 1 (Silva, 2010). A taxa potencial de transporte longitudinal pode ser estimada por uma das formulações existentes para o efeito, entre as quais se destacam a fórmula de CERC (SPM, 1984) e de Kamphuis *et al.* (1986).

É importante referir que, a equação da continuidade (Expressão 2.1), com algumas simplificações e hipóteses, pode ser resolvida para condições fronteira simples, obtendo-se soluções analíticas para o problema da evolução da linha de costa sujeito a condições fronteira (Pelnard-Considère, 1956). Informação mais detalhada relativamente às simplificações, hipóteses, pressupostos e limitações, pode ser recolhida em Silva (2010).

Importa ainda salientar que a gestão e planeamento da costa trabalham prioritariamente com escalas temporais de anos ou décadas, em trechos com dezenas ou centenas de quilómetros e com larguras transversais que podem ultrapassar a dezena de quilómetros. A generalidade dos modelos atuais é validada em situações esquemáticas e quando aplicados a casos reais, são calibrados com base em dados específicos. Depois de calibrados, os modelos são aplicados de forma diferenciada, em situações de análise, avaliação de cenários e previsão de condições futuras (Hanson *et al.*, 2003).

2.1.2. Modelos numéricos

Para a avaliação da evolução da linha de costa em situações reais, as equações de base, as condições de agitação marítima e as condições fronteira não podem ser simplificadas de forma a serem encontradas soluções analíticas para o problema. A resolução numérica da equação da continuidade (Expressões 2.1 ou 2.3) elimina a necessidade de alguns dos pressupostos necessários à determinação de soluções analíticas. O GENESIS (Hanson e Kraus, 1989), o ONELINE (Dabees e Kamphuis, 1998), o LITMOD (Vicente e Clímaco, 2003), o LTC (Coelho, 2005), o LITPACK (DHI, 2009), e o UNIBEST (Deltares, 2017), são alguns exemplos de modelos numéricos, baseados na teoria de “uma linha”.

O modelo numérico GENESIS (*Generalized Model for Simulation Shoreline Change*) foi desenvolvido pelo *United States Army Corps of Engineers*. Baseia-se na teoria de “uma linha” e foi desenvolvido para simular as alterações da linha de costa, numa dada região. O modelo assume que o perfil transversal se mantém inalterado, permitindo que a evolução da praia seja descrita unicamente em termos da posição da linha de costa. A aplicação deste modelo é possível num número diversificado de situações, envolvendo esporões, quebramares, quebramares destacados, muros e revestimentos longitudinais aderentes e alimentações de praia. O modelo numérico GENESIS é analisado neste trabalho para comparação com o desempenho do modelo numérico LTC, pelo que os conceitos teóricos subjacentes vão ser descritos com mais detalhe na secção 3.2 deste documento. No entanto, informação mais detalhada sobre o modelo pode ser encontrada em Hanson (1987, 1988), Hanson e Kraus (1989, 1991).

De acordo com Dabees e Kamphuis (1998), os modelos numéricos baseados na teoria de “uma linha”, apesar de demonstrarem bons resultados na previsão das alterações da linha de costa a longo prazo, apresentam ainda alguns constrangimentos que limitam um campo de aplicabilidade mais vasto. Assim, na *Queen’s University* (Canadá), desenvolveram-se trabalhos de melhoramento do modelo ONELINE, modelo baseado na teoria de “uma linha”, iniciado em 1988, com o intuito de alargar o campo de utilização e tornar viável a sua aplicação a configurações de linha de costa mais complexas. Segundo os mesmos autores, os últimos melhoramentos dizem respeito à inclusão da contribuição do transporte transversal de sedimentos, à capacidade de combinação de estruturas ligadas à costa e dela destacadas e ao desenvolvimento de uma interface gráfica mais acessível e expedita.

O modelo LITMOD foi desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em 1990. Tal como o GENESIS, o LITMOD tem por base dois princípios fundamentais. O primeiro impõe a não existência de alteração do perfil da linha de costa para processos de erosão ou acreção, conduzindo a recuos e avanços da linha de costa paralelos do perfil de praia, desde a berma até à cota limite dos fundos. O segundo princípio prende-se com a consideração do transporte sólido longitudinal como fator determinante na evolução geral da linha de costa (Vicente e Clímaco, 2003). Neste modelo, o processo de cálculo depende das condições iniciais da linha de costa e dos caudais sólidos nas células extremas. Poderão ainda ser considerados caudais de alimentação que, quando negativos, correspondem a

extração de areias. Outro dado de entrada é relativo às condições de agitação numa batimetria de aproximação, obtido após aplicação de um modelo de refração, ou de refração e difração, em função das características da onda ao largo (período, altura e rumo). A agitação na batimetria de aproximação pode ser considerada distinta em diversos pontos ao longo da costa e é com base nestes valores que se obtêm os correspondentes valores na rebentação (Vicente e Clímaco, 2003). O trabalho de Vicente e Clímaco (2003) reúne informação mais detalhada relativa ao LITMOD. Coelho (2005) identificou algumas das capacidades e limitações deste modelo numérico, quando desenvolveu o modelo LTC.

O modelo LTC (*Long-Term Configuration*) foi desenvolvido na Universidade de Aveiro (Coelho, 2005), e posteriormente melhorado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Silva, 2010). O modelo avalia o comportamento da configuração da linha de costa e da morfologia da zona costeira ao longo do tempo (médio e longo prazo), tendo sido concebido para praias arenosas. O transporte longitudinal de sedimentos é considerado como a principal causa das variações morfológicas e depende das condições de agitação marítima, da variação do nível da água do mar, da existência de fontes/sumidouros de sedimentos, das características sedimentares e morfológicas da praia, das estruturas de defesa costeira existentes e das condições fronteira. Contrariamente ao modelo GENESIS, o LTC ajusta a forma do perfil transversal nos limites do perfil ativo, em função de considerações físicas. A secção 3.3 apresenta uma descrição mais detalhada do modelo LTC. Na secção 4.1 e no Capítulo 5 são descritos os resultados do presente trabalho relativamente à melhoria e desempenho do modelo LTC.

O LITPACK (*Littoral Processes and Coastline Kinetics*) é um modelo numérico inserido no grupo MIKE *Software*, desenvolvido pelo DHI (*Danish Hydraulic Institute*) e é constituído por cinco módulos principais (Thach *et al.*, 2007; DHI, 2009; Hendriyono *et al.*, 2015): LIST (modelo de transporte de sedimentos não-coesivos), LITDRIFT (modelo de transporte longitudinal e deriva litoral), LITLINE (modelo de evolução da linha de costa), LITPROF (modelo de evolução dos perfis transversais) e LITTREN (modelo de simulação do assoreamento/retenção de sedimentos em canais). O modelo LITPACK aplica uma abordagem totalmente teórica e determinista para estimar o transporte longitudinal, que tem como vantagem sobre as abordagens semi-empíricas, o facto da forma do perfil de praia estar implicitamente incluída na análise (Thomas e Frey, 2013). O LITPACK considera o efeito

de ondas regulares e irregulares, correntes de maré, vento e influência da fricção não uniforme dos fundos, bem como, o efeito da refração, empolamento e rebentação da onda (Szmytkiewicz *et al.*, 2000).

O UNIBEST (*Uniform Beach Sediment Transport*) foi desenvolvido na *Delft Hydraulics* e é composto por três modelos distintos (Green e King, 2003): UNIBEST-LT (transporte longitudinal), UNIBEST-CL (dinâmica costeira) e UNIBEST-TC (transporte transversal). O UNIBEST-CL+ corresponde à interface gráfica desenvolvida pela Deltares para simulação da dinâmica costeira, de utilização fácil e intuitiva, e capaz de simular uma grande variedade de fenómenos costeiros (Deltares, 2017). À semelhança do GENESIS, o UNIBEST-CL+ apresenta um modelo interno de propagação de ondas, baseado na abordagem de Battjes e Janssen (1978), não permitindo a interação com um modelo externo (Kramer, 2005; Thomas e Frey, 2013). O modelo UNIBEST já foi aplicado à costa portuguesa, por exemplo, em Henriques (2007).

Szmytkiewicz *et al.* (2000), Thomas e Frey (2013) e Townsend *et al.* (2014) são exemplos de trabalhos que apresentam e comparam os pressupostos e desempenho dos modelos UNIBEST, GENESIS e LITPACK. Szmytkiewicz *et al.* (2000) compararam o desempenho dos três modelos com dados de campo relativos à evolução da linha de costa de uma zona costeira na Polónia, com o objetivo de avaliar, não só o desempenho de cada um deles quando comparado com os dados de campo, mas também com o objetivo de avaliar o seu modo de utilização, sensibilidade e eficiência. Os autores concluíram que com os três modelos foram obtidos resultados satisfatórios, essencialmente numa análise a longo prazo da evolução da posição da linha de costa. No entanto, defendem que as análises e conclusões obtidas para cada um dos modelos apenas são válidas para o caso de estudo em particular e que não devem ser extrapoladas. Thomas e Frey (2013) comparam as valências entre os três modelos e retiraram como principais conclusões que o UNIBEST e o LITPACK incluem um método de cálculo do potencial de transporte sedimentar mais rigoroso, comparativamente ao GENESIS, e que o UNIBEST apresenta uma grelha curvilínea e não calcula a difração internamente. Townsend *et al.* (2014) aplicaram o LITPACK e o UNIBEST a casos genéricos e concluíram, por exemplo, que, na presença de um esporão, para as mesmas condições, o LITPACK apresenta substancialmente menos capacidade de retenção de

sedimentos. Mais considerações e conclusões relativas à aplicação dos três modelos podem ser consultadas nos três documentos referidos.

2.2. Pré-Dimensionamento

O pré-dimensionamento das estruturas de defesa costeira é baseado em formulações, essencialmente empíricas, onde o domínio dos parâmetros envolvidos no cálculo é fundamental para a otimização de resultados. O facto de existirem variadas formulações relacionadas com o pré-dimensionamento, aliado à necessidade crescente de agir no sentido da defesa dos litorais, torna necessário o desenvolvimento de ferramentas automáticas que permitam a implementação de diferentes soluções, com o intuito de obter resultados otimizados, de forma rápida e expedita. Assim, neste subcapítulo identificam-se algumas questões relativas ao pré-dimensionamento de estruturas, referindo algumas ferramentas numéricas já existentes (XD-Coast, BREAKWAT, CRESS e CLI).

2.2.1. Considerações genéricas

Para o dimensionamento de uma obra de defesa costeira, é conveniente uma correta caracterização das ações, a realização de um pré-dimensionamento, baseado em formulações empíricas, e a construção de modelos reduzidos ou a análise do comportamento de estruturas existentes em condições ambientais semelhantes, com o intuito de testar as soluções obtidas na fase de pré-dimensionamento (Figura 2.3).

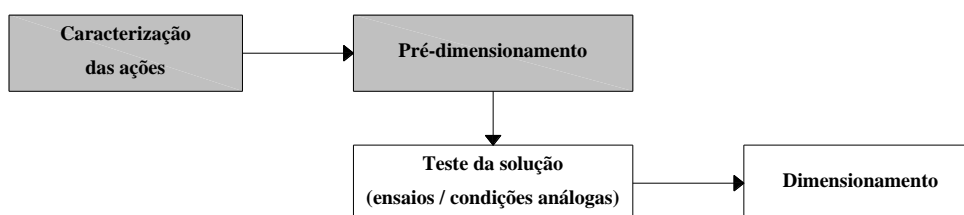


Figura 2.3: Faseamento de um projeto de obras costeiras (baseado em Pita, 1985 e Lima, 2011).

De acordo com Banyard (2002), os fenómenos provocados pelas ondas, marés e correntes traduzem praticamente a totalidade das solicitações a que as estruturas costeiras estão sujeitas durante o seu período de vida útil. Porém, a constituição geotécnica/geológica dos fundos e a sua dinâmica, bem como as técnicas construtivas e os equipamentos, são aspetos

que podem condicionar de uma forma crítica o projeto a nível da sua geometria e componentes estruturais. No entanto, a maior incerteza no pré-dimensionamento das estruturas reside na quantificação das ações, caracterizadas essencialmente pela altura de onda incidente. Cabe ao projetista definir qual o valor adotado para a altura de onda de projeto, aliando o conhecimento e regras ao bom senso, de modo a não subestimar o valor, colocando em risco a segurança da estrutura, nem sobrestimar, o que implicaria um acréscimo significativo do custo da obra. O valor recomendado para a altura de onda de projeto é um assunto muito complexo, não consensual e cujas considerações variam para cada caso específico, sendo conveniente o estudo de sensibilidade da solução à sua variação. A secção 4.2.2 resume algumas considerações teóricas relativas à definição da altura de onda de projeto.

Existem diversos métodos de pré-dimensionamento de estruturas costeiras, que consistem, basicamente, em diferentes formulações para a determinação do peso dos blocos do manto resistente, que deverá resistir às solicitações da estrutura. As formulações variam consoante as estruturas sejam não galgáveis, galgáveis ou submersas.

Além do peso unitário dos blocos do manto resistente das estruturas, existem outros aspetos essenciais para o dimensionamento da secção transversal das estruturas (largura de coroamento, espessura de camadas, etc.) e diferentes materiais e tipologias disponíveis, para os quais há uma vasta variedade de formulações empíricas e procedimentos a seguir. Assim, a consulta de manuais específicos da especialidade é indispensável, destacando-se em seguida as principais publicações a ter em consideração no estudo e dimensionamento de obras costeiras.

- ✓ *Shore Protection Manual* (SPM, 1984). Foi a primeira publicação da *United States Army Corps of Engineers*, em 1974, tendo sido atualizada posteriormente em 1984, e contém os princípios fundamentais da engenharia costeira.
- ✓ *Coastal Engineering Manual* (CEM). Com o passar do tempo, foram aprimorados os conceitos, ensaios experimentais, modelos numéricos, etc., que influenciam os processos costeiros, levando à necessidade de, na década de 1990, se proceder à atualização e melhoria do *Shore Protection Manual*. Surgiu assim o CEM, constituído por 6 partes, cada uma delas subdividida em vários capítulos e que reúne toda a informação relevante da área da engenharia costeira e portuária, tendo por objetivo fornecer orientações para aplicação de técnicas e

métodos para a maioria dos problemas costeiros. O Capítulo 5 da parte VI do CEM (*Fundamentals of Design*, Burcharth e Hughes, 2006) é direcionado para a fase de pré-dimensionamento de estruturas costeiras. No entanto, a consulta de outros módulos do CEM referentes ao dimensionamento de intervenções de defesa costeira é indispensável.

- ✓ *The Rock Manual* (CIRIA, 2007a). É um manual muito completo e com informação relevante acerca da utilização das rochas na engenharia estuarina, costeira e portuária. Além disso, contempla também a utilização de blocos pré-fabricados e reúne informação acerca dos principais conceitos aplicados nos estudos costeiros. O Capítulo 5 (*Physical Processes and Design Tools*) e o Capítulo 6 (*Design of Marine Structures*), respetivamente, CIRIA (2007b) e CIRIA (2007c), são os mais direcionados para a fase de pré-dimensionamento de estruturas costeiras.
- ✓ *Maritime Structures - Part7: Guide to design and construction of breakwaters*, da *British Standard Institution* (BSI, 1999). Este documento constitui um guia prático do processo de dimensionamento de uma obra, assemelhando-se, por isso, a um “Eurocódigo da Engenharia Costeira”, uma vez que destaca questões práticas ao invés de princípios teóricos.

Pilarczyk (2014) reuniu informação relativa aos documentos que definem as regras e práticas de dimensionamento em alguns países. De acordo com o autor, os Estados Unidos seguem as normas definidas no CEM e no *Rock Manual*. Na Europa, destaca-se o Reino Unido que segue as linhas definidas pela *British Standard Institution*, Espanha que segue as normas do documento *Recomendaciones de Obras Marítimas* (ROM) e a Alemanha que segue as regras definidas pelo *Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways*. Outros documentos como Fleming *et al.* (1998), Herbich (2000), French (2001), Reeve *et al.* (2004), etc., podem auxiliar a fase de projeto de intervenções de defesa costeira e serviram de base ao módulo de pré-dimensionamento desenvolvido neste trabalho.

2.2.2. Ferramentas de cálculo

Apresentam-se sucintamente alguns exemplos de ferramentas numéricas que auxiliam a fase inicial de um projeto de estruturas costeiras. De referir que o XD-Coast, desenvolvido por Lima (2011), representa a base para o módulo de pré-dimensionamento da ferramenta numérica que resulta deste trabalho.

O modelo XD-Coast (*Xpress Design of Coastal Structures*) é uma ferramenta expedita de pré-dimensionamento da secção transversal de obras de defesa costeira e portuária

(Lima, 2011). O XD-Coast permite o cálculo do peso unitário dos blocos a colocar no manto resistente de estruturas não galgáveis (formulações de Hudson, 1974, van der Meer, 1988a, van der Meer, 1988b e De Jong, 1996), galgáveis (van der Meer, 1991, Figura 2.4) e submersas (van der Meer, 1991) e a determinação das principais características da secção transversal (largura de coroamento, espessura das camadas e número de blocos por unidade de área). Devido à diversidade de parâmetros que influenciam o peso dos blocos, o modelo permite, para além do cálculo para situações isoladas, análises de sensibilidade dos resultados aos diferentes parâmetros envolvidos.

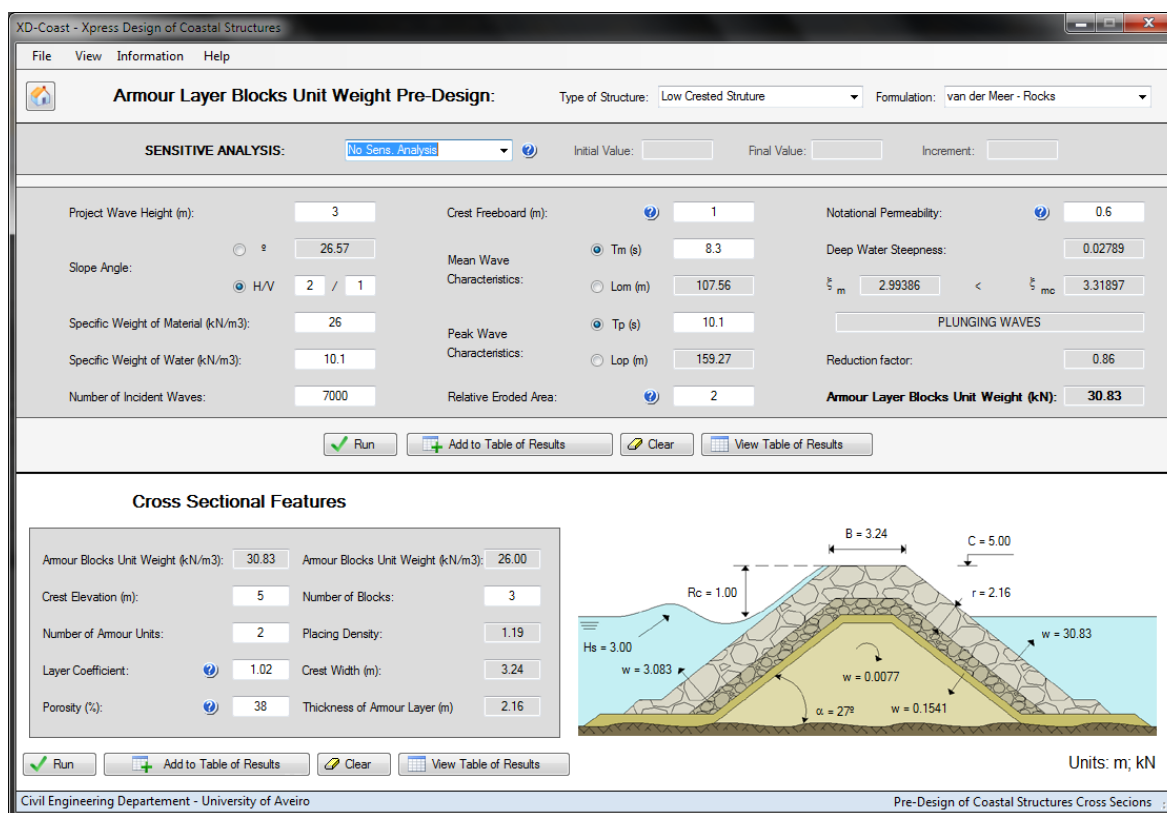


Figura 2.4: Exemplo de uma janela de cálculo do XD-Coast (Lima, 2011).

De acordo com Deltares (2016), o BREAKWAT é uma ferramenta de dimensionamento de estruturas costeiras, desenvolvido em 1980 pelo *WL-Delft Hydraulics*, direcionado a todos aqueles que pretendem aplicar os resultados da investigação desenvolvida no instituto, de forma rápida e eficiente. Existe uma vasta variedade de formulações desenvolvidas para o dimensionamento de estruturas costeiras, sendo que algumas delas estão contempladas no modelo BREAKWAT (NARCIS, 2016), que engloba vários tipos de estruturas (Figura 2.5): estruturas não galgáveis, galgáveis, submersas, estruturas com berma e parede vertical, etc.

O modelo CRESS (*Coastal and River Engineering Support System*) consiste num conjunto de sub-rotinas, cada uma das quais contendo uma formulação ou grupo de fórmulas, de aplicação importante na engenharia costeira e fluvial (Figura 2.6, à esquerda). Surgiu numa iniciativa entre o ministério das infraestruturas e ambiente holandês, em parceria com a Universidade de Delft (CRESS, 2016). O modelo traduz os conceitos e formulações descritos no *Rock Manual - The use of rock in hydraulic engineering* (CIRIA, 2007a) e está disponível *online*, não precisando por isso de instalação.

A CLI (*Concrete Layer Innovations*) é uma empresa que se dedica ao desenvolvimento e fabrico de blocos pré-fabricados de betão para aplicação no manto resistente de estruturas costeiras (Figura 2.6, à direita). Com o objetivo de auxiliar os cálculos preliminares de um projeto de obras costeiras, a CLI (2017) disponibiliza no seu *website* uma ferramenta de pré-dimensionamento dos blocos, baseada na formulação de Hudson (1974).

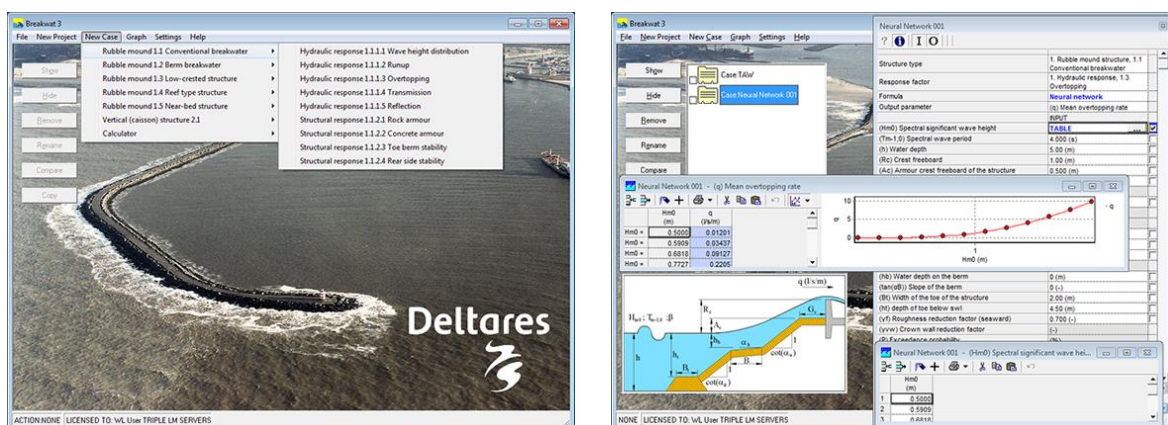


Figura 2.5: Exemplo de janelas de cálculo do BREAKWAT (Deltares, 2016).

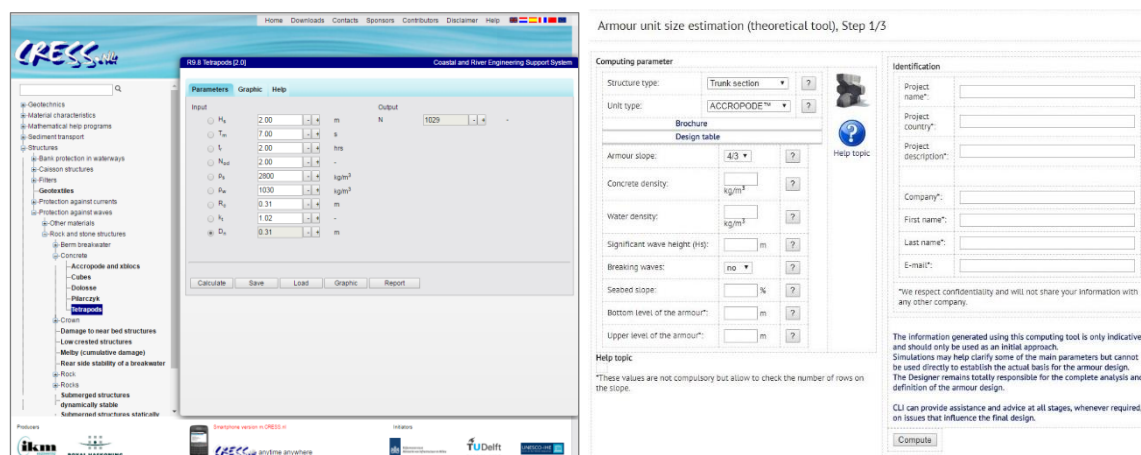


Figura 2.6: Exemplo de janela de cálculo do programa CRESS, à esquerda (CRESS, 2016), e da ferramenta CLI, à direita (CLI, 2017).

2.3. Custo-benefício

As intervenções de defesa costeira conduzem a custos de investimento e de manutenção elevados, o que leva por vezes à ponderação entre defender ou retirar a população das zonas de risco (Coelho, 2005). Assim, é de extrema importância uma análise ponderada de alternativas na fase de planeamento e de projeto de uma intervenção de defesa costeira. Como agravante, verifica-se que as estratégias de mitigação dos problemas da erosão costeira são, muitas das vezes, essencialmente reativas, não tendo por isso em conta a otimização das soluções a implementar e a análise entre os custos e os benefícios de cada cenário de intervenção (O’Riordan *et al.*, 2014). Na maioria das vezes, nas soluções de intervenção a implementar, não é suficiente analisar de forma isolada a eficácia da solução face à erosão, é também importante analisar as consequências económicas, sociais, culturais e ambientais, a curto, médio e longo prazo, tornando-se necessário quantificar todos os custos e todos os benefícios que lhes estão associadas (Santos *et al.*, 2001).

Nas últimas décadas tem surgido uma ligeira mudança de paradigma, deixando o foco de ser apenas a eficácia da solução de intervenção ao problema de erosão costeira subjacente, e passando a ser dada maior atenção à gestão das zonas costeiras, através de análises custo-eficácia e custo-benefício (Breil *et al.*, 2008). A análise custo-eficácia (ACE) tem por objetivo atingir a solução mais eficaz traduzida pelo menor custo possível (Taborda *et al.*, 2005), enquanto que a análise custo-benefício (ACB) tem em conta outros fatores além da eficácia da solução, tais como o impacto nas zonas adjacentes, o valor socioeconómico das zonas a proteger e das zonas que eventualmente serão prejudicadas com a intervenção, etc. (Turner *et al.*, 2007; Roebeling *et al.*, 2011, 2015; Alexandrakis *et al.*, 2015; Martino e Amos, 2015; Coelho *et al.*, 2016). A Tabela 2.2 resume as principais características das análises custo-eficácia e custo-benefício.

Uma análise custo-benefício permite avaliar o impacto económico líquido de um projeto ao longo do tempo, através da identificação e contabilização dos custos e benefícios. Para efetuar uma análise custo-benefício deve começar-se por identificar, quantificar e adicionar todos os fatores positivos (os benefícios), seguindo-se a identificação, quantificação e subtração de todos os fatores negativos (os custos) que advêm da realização de determinado projeto.

Tabela 2.2: Principais características, vantagens e limitações dos métodos de análise mais comuns na avaliação económica de opções de adaptação (baseado em Barata e Pinto, 2016).

Tipo de Análise	Características	Vantagens	Limitações
Custo-Eficácia (ACE)	<p>Permite calcular e comparar custos monetários com benefícios físicos de um projeto, opção ou medida.</p> <p>Usado para identificar o custo mais baixo para um determinado resultado, ou o maior benefício tendo em conta os recursos disponíveis.</p>	<p>Os benefícios físicos são mais fáceis de contabilizar do que os benefícios monetários.</p> <p>Análise dos benefícios em termos não-monetários.</p>	<p>Benefícios não comparáveis se expressos em diferentes unidades.</p> <p>Consideração de incerteza.</p>
Custo-Benefício (ACB)	<p>Permite calcular e comparar os custos e benefícios monetários de um projeto, opção ou medida.</p> <p>Uso de unidades monetárias ajustadas para o valor temporal do dinheiro (taxa de desconto ou atualização).</p>	<p>Bem conhecida e largamente utilizada.</p> <p>Tem a capacidade de priorizar objetivos.</p> <p>Comparabilidade de benefícios usando a mesma unidade de medida.</p>	<p>Dificuldade de avaliação monetária de questões económicas, sociais, culturais, ambientais, etc.</p> <p>Incerteza limitada aos riscos probabilísticos.</p> <p>Necessidade de informação exaustiva.</p>

Os custos totais associados a uma intervenção de defesa costeira englobam não só os custos de construção, como também os custos de manutenção periódica, e ambos dependem do tipo de intervenção a realizar (esporão, estrutura aderente, alimentação artificial, etc.) e variam consoante diversos fatores (materiais, secção transversal, localização, etc.) sendo essencial a recolha de dados de obras já existentes, para estimativa do custo representativo da intervenção ajustada ao local onde é realizada (consultar, por exemplo, Reis, 2010; Cruz, 2015; Cordeiro, 2016). Note-se que, além dos custos relacionados com a intervenção estrutural, devem ser tidos em conta custos resultantes do impacto social, cultural e ambiental da intervenção, bem como, todos os eventuais danos nas infraestruturas vizinhas.

A quantificação dos benefícios é determinada em função das áreas ganhas (diminuição da erosão costeira e conseqüente redução do recuo da posição da linha de costa resultante da implementação das medidas de intervenção, traduzida nas diferentes áreas da ocupação das zonas costeiras, entretanto não ‘perdidas’ para os processos de erosão, assim como a

diminuição de áreas inundadas) e perdas ao longo do período de tempo em análise e variam em função do valor atribuído ao território (que deve ter em conta questões ambientais, sociais, culturais, históricas, etc.). A metodologia de transferência de benefícios permite a adaptação qualitativa ou quantitativa dos recursos ambientais para valores económicos, de que são exemplo os trabalhos de Costanza *et al.* (1997), Bossard *et al.* (2000) e Martinez *et al.* (2007). A única medida que permite avaliar benefícios e custos na mesma unidade é a unidade monetária, sendo importante referir que para períodos diferentes é necessário atualizar os valores para um ano de referência (Zerbe e Dively, 1994).

Genericamente, a verificação da sustentabilidade económica de cada intervenção é feita a partir dos fluxos líquidos acumulados de benefícios e custos. Assim, para determinado espaço temporal, a viabilidade económica de cada cenário em análise é avaliada a partir do balanço entre o total de benefícios e o total de custos inerentes. O valor associado aos custos (construção e manutenção) e associado aos benefícios é um assunto ao qual deve ser dada alguma atenção, uma vez que depende de muitos fatores, variando ao longo do tempo e de local para local. Tendo em conta que as intervenções costeiras geralmente conduzem a investimentos muito avultados, além da verificação da sustentabilidade económica de cada intervenção, também se torna preponderante a realização de análises custo-benefício, que conduzam a soluções otimizadas.

Estudos preliminares de análises custo-benefício (ACB) já realizadas por Reis (2010) indicaram, na maioria das situações, que a melhor solução passa por intervir, defendendo as zonas de risco, enquanto Jorge (2010) conclui que a melhor solução é a retirada da população da zona de risco. Luis e Trigo-Teixeira (2003), Tabora *et al.* (2005), Hollings (2006) e Veloso-Gomes (2010) desenvolveram também metodologias de análise custo-benefício *versus* eficácia. Roebeling *et al.* (2011) aplicaram uma metodologia de análise custo-benefício à zona central da costa portuguesa, recorrendo ao modelo numérico LTC e à metodologia de Transferência de Benefícios (Brouwer, 2000) para avaliar o custo-benefício de diferentes cenários de intervenção de defesa costeira. Esta metodologia foi mais tarde aplicada por Cruz (2015) especificamente a estruturas longitudinais aderentes. No entanto, são ainda escassas as análises custo-benefício aplicadas às zonas costeiras.

Não se conhece a existência de ferramentas numéricas de análise custo-benefício de intervenções de defesa costeira, apenas metodologias teóricas baseadas em estudos

desenvolvidos por diversos autores. No entanto, a ferramenta DIVA (*Dynamic and Interactive Vulnerability Assessment*), parte integrante do projeto DINAS-COAST (*Dynamic and Interactive ASsessment of National, Regional and Global Vulnerability of COASTal Zones to Climate Change and Sea-Level Rise*), permite a realização de estudos económico-ambientais aplicados às zonas costeiras, auxiliando a escolha de estratégias de adaptação baseadas em diferentes cenários económicos (Hinkel, 2005; Klein e Hinkel, 2009). Esta metodologia já tem sido aplicada no âmbito de estudos relacionados com as alterações climáticas, nomeadamente por Costa *et al.* (2009).

Capítulo 3

MODELOS E FORMULAÇÕES DE BASE

3. MODELOS E FORMULAÇÕES DE BASE

O trabalho de investigação pretende contribuir para a proposta de soluções eficazes para combater os problemas de erosão através do desenvolvimento de uma ferramenta numérica de análise de intervenções de defesa costeira e, paralelamente, contribuindo também para a validação e melhoria da capacidade de simulação numérica da evolução da linha de costa a médio e longo prazo, através da análise e melhoria do desempenho de um modelo já existente (LTC, desenvolvido por Coelho, 2005).

Pretendeu-se que a ferramenta numérica desenvolvida neste trabalho reunisse a capacidade de avaliar o impacto da evolução da linha de costa, pré-dimensionar intervenções de defesa costeira e quantificar custos e benefícios, constituindo, desta forma, três módulos distintos que se interligam entre si. A componente de evolução da linha de costa teve como ponto de partida o modelo numérico LTC, o módulo de pré-dimensionamento teve por objetivo desenvolver e melhorar o modelo XD-Coast (desenvolvido por Lima, 2011) e por fim, com base nos resultados dos módulos anteriores e com base em abordagens de avaliação económica, surgiu o terceiro módulo, de estimativa de custos e benefícios.

A simulação numérica da evolução da morfologia costeira a médio prazo é difícil, existindo ainda muitas limitações, devidas à complexidade dos fenómenos e interação dos processos envolvidos, e à escassez de dados de campo que os caracterizem (Silva, 2010). Desta forma, procedeu-se à análise do modelo LTC através da comparação do desempenho com o modelo analítico de Pelnard-Considère (1956) e com o modelo numérico GENESIS, como contributo para uma melhoria da simulação numérica da evolução da morfologia costeira. Assim, neste capítulo descrevem-se os modelos e formulações que servem de base ao desenvolvimento dos objetivos do presente trabalho. No que respeita à evolução da morfologia costeira é apresentada, na secção 3.1, a formulação analítica de Pelnard-Considère (1956), na secção 3.2 é descrito o modelo GENESIS e apresentada a aplicação do qual é parte constituinte, NEMOS (*Nearshore Evolution MOdeling System*), e, na secção 3.3, é descrito o modelo LTC. Os três modelos referidos sustentam o módulo de evolução da linha de costa da ferramenta numérica (secção 4.1) e são a base do Capítulo 5, de análise do desempenho do modelo LTC.

Na secção 3.4 é descrito o *software* XD-Coast, que fundamenta o módulo de pré-dimensionamento (secção 4.2) e, por último, na secção 3.5, resumem-se as formulações que servem de base ao módulo de análise custo-benefício (secção 4.3). A Figura 3.1 resume, esquematicamente, os modelos e formulações de base do presente trabalho, interligando-os com as secções nas quais são apresentados, desenvolvidos e aplicados. A ferramenta numérica que resulta de todo o trabalho desenvolvido e que permite a análise do impacto de intervenções de defesa costeira, interligando os três módulos descritos foi designada de COAST – *Coastal Optimization ASsessment Tool*.

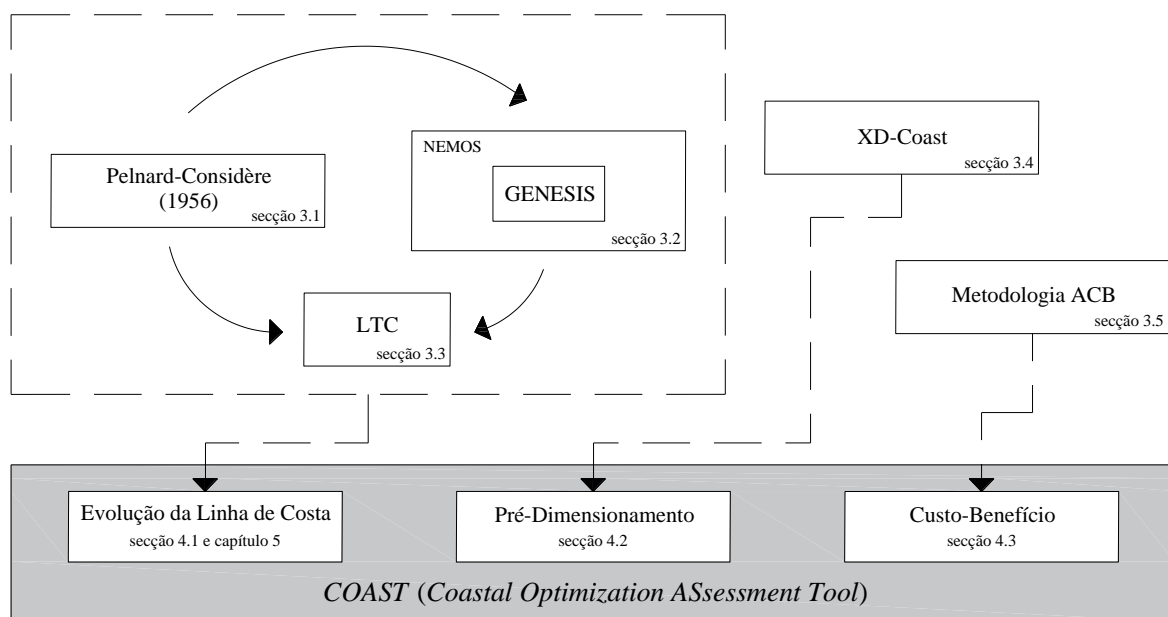


Figura 3.1: Organograma de modelos e formulações de base para o desenvolvimento da COAST – *Coastal Optimization ASsessment Tool*.

3.1. Pelnard-Considère (1956)

O modelo analítico de Pelnard-Considère (1956) foi o primeiro modelo analítico de evolução da linha de costa, baseado na equação diferencial da continuidade aplicada ao transporte longitudinal de sedimentos. Este modelo permite o cálculo da evolução da linha de costa em resposta à ação das ondas. O modelo prevê a existência de barreiras físicas impermeáveis, perpendiculares à costa, como esporões ou quebramares, permitindo a obtenção da evolução da linha de costa a barlamar da estrutura (Figura 3.2).

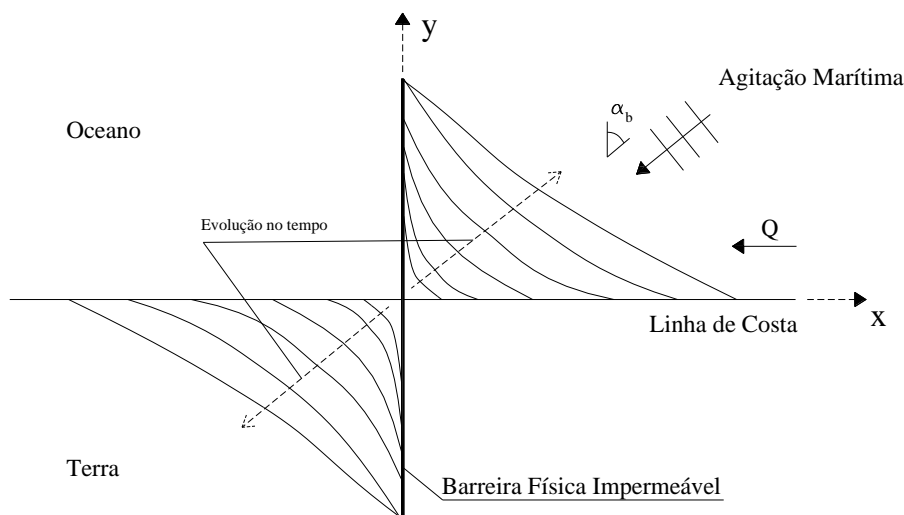


Figura 3.2: Evolução da posição da linha de costa ao longo do tempo, com base na formulação analítica de Pelnard-Considère, 1956 (baseado em Rosati *et al.*, 2002).

Nesta formulação, a construção da estrutura é assumida como instantânea. Com a teoria de Pelnard-Considère (1956), conhecidas as características sedimentares, as características da ondulação e o instante de tempo em que se pretende analisar a posição da linha de costa, é possível, a partir de uma determinada abcissa, o cálculo da ordenada correspondente à posição da linha de costa. De acordo com Bakker (1968), Pelnard-Considère (1956) assume a inexistência de correntes, uma direção constante da onda, ângulos de incidência da onda pequenos e uma relação linear entre o ângulo de incidência da onda e o transporte longitudinal de sedimentos.

A solução analítica de Pelnard-Considère (1956) propõe duas expressões para a determinação da posição da evolução da linha de costa (ordenada y) em função do tempo, t , Expressão 3.1, utilizada até que a linha de costa atinge a cabeça da estrutura perpendicular, e a Expressão 3.2, aplicada após esse instante de tempo. O instante de tempo referido, t_f , denomina-se por tempo de enchimento e pode ser estimado através da Expressão 3.3.

$$y(x, t) = 2\sqrt{\varepsilon t} \tan(\alpha_b) \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp \left[- \left(\frac{x}{2\sqrt{\varepsilon t}} \right)^2 \right] - \left(\frac{x}{2\sqrt{\varepsilon t}} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\varepsilon t}} \right) \right\}, \text{ para } t < t_f \quad (3.1)$$

$$y(x, t) = Y \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\varepsilon t_2}} \right), \text{ para } t > t_f \quad (3.2)$$

$$t_f = \frac{Y^2 \pi}{4\varepsilon(\tan \alpha_b)^2} \quad (3.3)$$

Nas expressões anteriores, Y representa o comprimento do esporão, α_b o ângulo da onda na rebentação, $t_2 = t - 0.383t_f$, ε o parâmetro de calibração (Expressão 3.4) e $erfc(x)$ representa a expressão matemática “função de erro complementar”.

$$\varepsilon = \frac{kH_b^2 C_{gb}}{8} \left(\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \right) \left(\frac{1}{1-n} \right) \left(\frac{1}{B + DoC} \right) \quad (3.4)$$

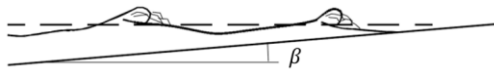
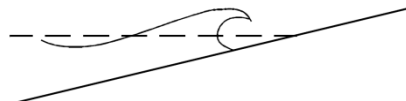

$$C_{gb} = \sqrt{gd_b} = \left(g \frac{H_b}{k_b} \right)^{0.5} \quad (3.5)$$

A análise das expressões anteriores permite verificar que o parâmetro de calibração (ε) tem em conta as propriedades dos sedimentos, as características da agitação marítima e os limites do perfil ativo. Assim, para a sua determinação é necessário conhecer o valor da altura de onda na rebentação, H_b , a celeridade da ondulação na rebentação, C_{gb} (que por sua vez depende do coeficiente de rebentação, k_b), a massa volúmica dos sedimentos e do fluido, respetivamente ρ_s e ρ , a porosidade dos sedimentos (n) e os limites do perfil ativo, altura da berma (B) e profundidade de fecho (DoC). Na expressão 3.5, k_b representa o coeficiente de rebentação (geralmente considerado 0.78, segundo a proposta de McCowan, 1981) e d_b a altura da coluna de água na linha de rebentação. O parâmetro de calibração depende ainda do coeficiente de transporte (k), cuja determinação é ambígua dada a panóplia de formulações que permitem a determinação deste coeficiente e dada a variabilidade espacial e temporal dos vários parâmetros de que depende: dimensões dos sedimentos e características da agitação (Schoonees e Theron, 1993, 1994; Wang *et al.*, 1998; Wang e Kraus, 1999).

As incertezas relativas ao coeficiente de transporte levam à consideração de vários valores e pressupostos por parte de diferentes autores. De acordo com Rosati *et al.* (2002), o *Shore Protection Manual* (SPM, 1984) estabelece o valor de 0.39 para o coeficiente de transporte, associado à utilização da altura de onda significativa (H_s). O mesmo manual estabelece ainda

o valor de 0.92 correspondente à altura de onda quadrática (H_{rms}). Ainda considerando a altura de onda quadrática, Komar e Inman (1970) estabeleceram o valor de 0.77 para o coeficiente de transporte. Kraus *et al.* (1982) recomendam uma diminuição do valor de 0.77 para 0.58, baseado nos resultados das suas experiências. Miller (1998) questionou os valores deduzidos anteriormente, afirmando que o valor de 0.39 não permite prever com precisão o transporte longitudinal em alturas de temporal, podendo este valor ser superior ou inferior. Wang e Kraus (1999) afirmam que o valor do coeficiente de transporte não deverá ser uma constante, mas que poderá variar de acordo com o tipo de rebentação das ondas (dependente do número de Iribarren, ξ), como já discutido previamente noutros estudos (Kamphuis e Readshaw, 1978; Vitale, 1981; Ozhan, 1982; Bodge e Dean, 1987; e Bodge e Kraus, 1991). O número de Iribarren é um parâmetro adimensional que permite estabelecer as gamas de ocorrência dos diferentes tipos de rebentação (Tabela 3.1). A determinação deste parâmetro segue a Expressão 3.6.

Tabela 3.1: Critério de classificação do tipo de rebentação das ondas (adaptado de Burcharth e Hughes, 2006).

TIPO DE REBENTAÇÃO	GAMA DE OCORRÊNCIAS	ESQUEMATIZAÇÃO
Progressiva	$\xi < 0.5$	
Mergulhante	$0.5 < \xi < 3.3$	
Oscilatória	$\xi > 3.3$	

$$\xi = \frac{\tan \beta}{s_0^{0.5}} \quad \text{ou} \quad \xi = \frac{\tan \beta}{\left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{0.5}} \quad (3.6)$$

Onde β traduz a inclinação da face da praia, s_0 a declividade da onda ao largo (Expressão 3.7) e H_0 e L_0 representam a altura e comprimento de onda ao largo, respetivamente. O comprimento de onda ao largo pode ser obtido através da Expressão 3.8 (T representa o período de onda).

$$s_0 = H_0/L_0 \quad (3.7)$$

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (3.8)$$

Schoonees e Theron (1993) realizaram ensaios laboratoriais e obtiveram, para uma amostra de 46 pontos, um valor de k de 0.41, correspondente a um diâmetro mediano dos sedimentos inferior a 1 mm. Por sua vez, Wang e Kraus (1999) obtiveram um intervalo de valores para k entre 0.04 e 0.54, com um valor médio de 0.2. Smith *et al.* (2003) consideram que os valores de k deverão ser calibrados com dados de campo, utilizando para esse efeito o transporte sólido longitudinal (dependente do tipo de rebentação), para cada situação de análise.

Rosati *et al.* (2002) citam diferentes autores e formulações para o cálculo do coeficiente de transporte, relacionando-o com o diâmetro mediano dos sedimentos, das quais se apresentam duas abordagens, Bailard (1981, 1984) e Valle *et al.* (1993), pelo interesse que este assunto representa na projeção de resultados da evolução da linha de costa ao longo do tempo.

Bailard (1981, 1984)

O autor definiu uma abordagem fisicamente realista, uma vez que se baseia no conceito de fluxo de energia, assumindo que parte do fluxo de energia criado pelas correntes longitudinais é consumido para transportar sedimentos, quer por arrastamento, quer por suspensão. Bailard (1981, 1984) calibrou um modelo de quantificação de caudal sólido transportado com base em 8 conjuntos de dados de campo e 2 de laboratório, desenvolvendo, com recurso aos resultados obtidos, a Expressão 3.9 para o cálculo do coeficiente de transporte. O valor de k é assim calculado em função da orientação das ondas na rebentação (α_b) e da relação entre a magnitude da velocidade orbital (u_{mb} , Expressão 3.10) e a velocidade de queda dos sedimentos (w_s). O parâmetro w_s pode, por exemplo, ser determinado pelas formulações de Hallermeier (1981), Rijn (1984) e/ou Soulsby (1997), que dependem essencialmente do parâmetro adimensional D^* (que por sua vez reflete a influência da dimensão dos sedimentos, d_{50} , da relação entre pesos específicos dos sedimentos e da água do mar, s , e do coeficiente de viscosidade cinemática da água do mar,

v , variável com a salinidade e temperatura da água). Propostas de cálculo da velocidade de queda dos sedimentos podem ser consultadas, por exemplo, em King e Galvin (2002).

$$k = 0.05 + 2.6 \sin(2\alpha_b)^2 + 0.007 \frac{u_{mb}}{w_s} \quad (3.9)$$

$$u_{mb} = \frac{k_b}{2} \sqrt{gd_b} \quad (3.10)$$

Valle et al. (1993)

A proposta de Valle *et al.* (1993) relaciona o valor do coeficiente de transporte sedimentar com o diâmetro mediano dos sedimentos (d_{50}), através da expressão empírica seguinte:

$$k = 1.4e^{-2.5d_{50}} \quad (3.11)$$

A análise da expressão permite verificar que o coeficiente de transporte sedimentar diminui com o aumento do diâmetro mediano dos sedimentos, tendendo para zero. De acordo com Rosati *et al.* (2002), esta relação foi obtida considerando um intervalo de valores para d_{50} entre 0.40 mm e 1.5 mm.

Guimarães (2014) realizou uma análise da sensibilidade das expressões analíticas de Pelnard-Considère (1956) a alguns dos parâmetros envolvidos na sua aplicação, destacando-se os resultados obtidos para a análise da influência do coeficiente de transporte sedimentar. O valor de k afeta o cálculo do coeficiente de calibração, ε (Expressão 3.4), que por sua vez influencia o valor do tempo de enchimento t_f (Expressão 3.3). Guimarães (2014) verificou que a forma de evolução da configuração da linha de costa ao longo do tempo resultante da aplicação da formulação de Pelnard-Considère (1956) é independente do coeficiente de transporte. De acordo com as análises realizadas, verificou que o coeficiente de transporte apenas afeta a rapidez com que a linha de costa atinge uma determinada posição, alterando, conseqüentemente, o tempo de enchimento. Os resultados da análise da influência do coeficiente de transporte do caso de estudo realizado por Guimarães (2014) estão representados na Figura 3.3. De referir que, nas condições do caso de estudo de Guimarães (2014) foi obtido o valor de $k = 0.183$ e $k = 0.401$, respetivamente para a formulação de Bailard (1981, 1984) e Valle *et al.* (1993). Pela análise da Figura 3.3 é

possível concluir que para determinado valor de k , quando o tempo considerado corresponde ao respetivo tempo de enchimento, a posição da linha de costa sobrepõe-se.

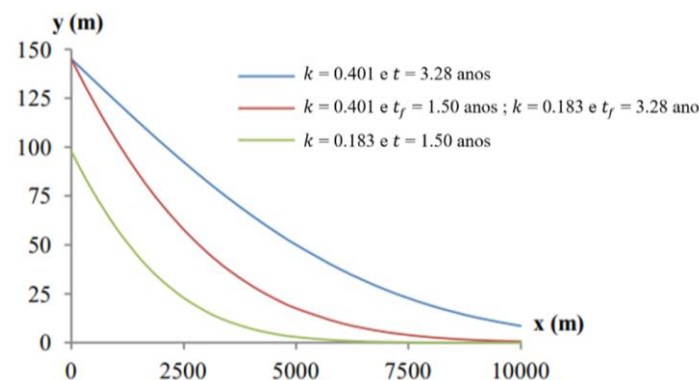


Figura 3.3: Influência do coeficiente de transporte na evolução da posição da linha de costa, segundo Pelnard-Considère, 1956 (Guimarães, 2014).

Importa, por fim, referir que as expressões consideradas na formulação de Pelnard-Considère (1956) permitem determinar a evolução da linha de costa a barlamar da estrutura, não existindo expressões que permitam conhecer a posição da linha de costa a sotamar da estrutura transversal, onde se observariam os efeitos da difração. Assim, assume-se que a posição da linha de costa a sotamar é antissimétrica comparativamente à configuração a barlamar (Rosati *et al.*, 2002).

A formulação analítica de Pelnard-Considère (1956) foi aplicada ao caso de estudo considerado no Capítulo 5 (secção 5.4) para comparação do desempenho do modelo numérico LTC e do modelo numérico GENESIS.

3.2. GENESIS

O modelo numérico GENESIS (*Generalized Model for Simulation Shoreline Change*) foi desenvolvido pelo *United States Army Corps of Engineers*, sendo que as primeiras publicações do modelo datam de 1987 (Hanson, 1987). O modelo assenta na teoria de “uma linha” e permite a simulação da evolução da linha de costa numa determinada região (Rosati *et al.*, 2002). De acordo com Hanson e Kraus (1989), o modelo é adequado para extensões de costa entre 1 km e 100 km e o tempo de simulação deve situar-se entre 1 mês e 100 meses. O volume de sedimentos em circulação é calculado em função da fórmula de

CERC, admitindo uma correção para o comportamento das ondas por difração na proximidade das estruturas (Young *et al.*, 1995; Hanson e Kraus, 2011).

A maior potencialidade do GENESIS é, segundo Hanson e Kraus (1991), a modelação da resposta da linha de costa a estruturas introduzidas ao longo do litoral, por variação temporal e espacial do transporte longitudinal de sedimentos. O transporte transversal à linha de costa não é simulado. O GENESIS permite também a simulação da transposição de areias na frente dos esporões ou através destes, quando considerada a permeabilidade da estrutura (Hanson, 1987, Hanson e Kraus, 1989).

Genericamente, o GENESIS permite determinar os avanços e recuos da posição linha de costa, mantendo a forma do perfil que se move perpendicularmente à costa. Assim, torna-se apenas necessário o conhecimento da posição de um único ponto do perfil para definir toda a secção perpendicular que lhe está associada (Larson *et al.*, 1987; Hanson, 1988).

A ação inerente ao transporte sólido longitudinal e conseqüente movimento da posição da linha de costa é a agitação marítima, definida na zona de rebentação. A transformação das características da onda desde o largo até à costa pode ser efetuada por um modelo interno e simples ou por um modelo externo que trabalha as batimetrias mais complexas (STWAVE, ver secção 3.2.1). O GENESIS permite mais que uma fonte de ondas a atuar em simultâneo, como é exemplo, a ondulação e a vaga gerada por ventos locais.

O STWAVE e o GENESIS são modelos numéricos que integram o conjunto de ferramentas da NEMOS. Este conjunto de modelos numéricos, que se interligam entre si, são enumerados e descritos na secção seguinte, 3.2.1, à exceção do modelo GENESIS que é descrito com mais detalhe nas secções 3.2.2 e 3.2.3.

3.2.1. Aplicação NEMOS

A aplicação NEMOS (*Nearshore Evolution MOdeling System*) é parte integrante da ferramenta numérica CEDAS (*Coastal Engineering Design & Analysis System*), desenvolvida pela *Veri-Tech* para análises de projetos de engenharia costeira (Veri-Tech, 2004). A NEMOS, incluída na secção *Beach*, disponibiliza uma série de modelos matemáticos que simulam a curto e longo prazo, a evolução da linha de costa.

Os principais modelos matemáticos disponibilizados são o STWAVE e o GENESIS. O STWAVE é responsável pela transformação do clima de agitação do largo até à costa e o GENESIS é responsável pela simulação da evolução da posição da linha de costa. No entanto, o processo de modelação no NEMOS requer a utilização de outros modelos matemáticos (Figura 3.4).

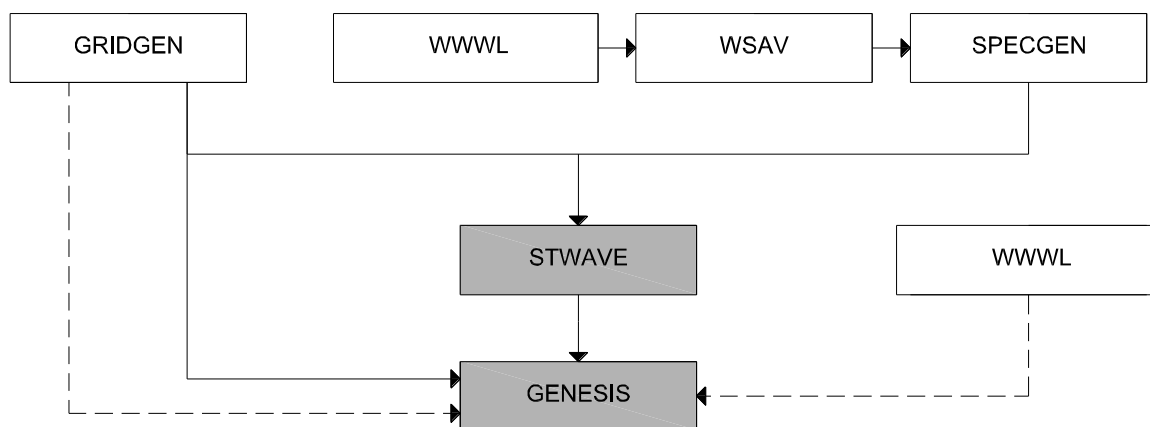


Figura 3.4: Interação entre os diferentes módulos da NEMOS.

De forma sumária, para propagar a onda desde o largo até à costa, o modelo STWAVE interage com 4 modelos distintos: o GRIDGEN, o WWWL, o WSAV e o SPECGEN. O *output* do modelo STWAVE serve de *input* ao modelo GENESIS, que necessita ainda dos *outputs* do modelo GRIDGEN e do clima de agitação a propagar, proveniente do WWWL.

Genericamente, e tendo por base o esquema da Figura 3.4, verifica-se que é possível a simulação da evolução da linha de costa não só tendo em conta o procedimento descrito anteriormente (GRIDGEN → WWWL → WSAV → SPECGEN → STWAVE → GENESIS), correspondente às linhas contínuas do organigrama, mas também sem que se recorra ao modelo externo STWAVE para a propagação da onda, sendo apenas necessários três modelos do NEMOS (GRIDGEN, WWWL e GENESIS) – linhas a tracejado no organigrama.

Modelo GRIDGEN

O GRIDGEN (*Grid Generator*) permite importar toda a informação da batimetria e topografia da área a modelar e a construção das grelhas de pontos das áreas de estudo

consideradas nos modelos STWAVE e GENESIS. Permite ainda a definição da localização das estações no domínio computacional, que funcionarão como pontos de registo dos dados de agitação ao longo da costa para o modelo de propagação de onda STWAVE, que posteriormente serão utilizados como dados de entrada para o modelo GENESIS, na simulação da evolução da linha de costa. A profundidade das estações é definida pelo utilizador, no entanto, é recomendado que seja superior à profundidade de fecho considerada no modelo de simulação de evolução da linha de costa (Hanson, 2015). A dimensão da grelha de pontos, bem como o espaçamento da malha e o azimute (que permite definir o eixo horizontal da grelha de pontos) são dados que o utilizador deve definir na preparação da grelha de pontos do domínio de cálculo.

Modelo WWWL

O modelo WWWL (*Waves, Wind and Water Levels*) é um editor que é utilizado para tratar registos de dados de agitação marítima (ondas, vento e níveis da superfície livre da água), Veri-Tech (2004). Funciona na forma de tabela de dados, onde é armazenada e editada a informação. O utilizador deve introduzir a informação relativa ao clima de agitação da simulação (altura de onda, período e direção) e ventos, caso existam, e ainda a profundidade da boia ondógrafo de registo dos dados. O output do modelo WWWL funciona como ponto de partida para o modelo WSAV.

Modelo WSAV

A aplicação WSAV (*Wave Station Analysis and Visualization*) permite efetuar uma análise estatística da série de dados representativa do clima de agitação, e a visualização dos resultados gerados, através de diagramas, histogramas ou rosas de ramos. O utilizador tem apenas de definir grupos para dividir os dados de agitação marítima e definir os intervalos de valores para os mesmos, sendo a análise estatística realizada internamente pelo modelo (Veri-Tech, 2004).

Modelo SPECGEN

O SPECGEN (*Spectro Generator*) é um aplicativo auxiliar, utilizado para importar, criar ou visualizar espectros energéticos direcionais que irão servir de *input* ao modelo STWAVE. A

análise espectral permite a caracterização da superfície livre da água do mar enquanto processo estocástico, possibilitando a descrição da distribuição de energia de um estado de agitação pelos períodos e direções das diferentes ondas (Sampaio, 2008). O espectro empírico utilizado pelo SPECGEN é o TMA, *Texel, Maarsen and Arsloe*. TMA representa uma variação do espectro de energia *Jonswap*, tendo em conta a influência da profundidade da coluna de água finita dada pela função *Kitaigorodoski* (Vincent *et al.*, 2006).

Modelo STWAVE

O STWAVE (*Steady-State Spectral Wave Model*) é um modelo de diferenças finitas, formulado numa grelha de células quadradas. A grelha do STWAVE funciona sobre um sistema de coordenadas local e está orientada para a costa, onde a sua origem é fixada na fronteira ao largo. Para operar este modelo é necessário um ficheiro que contém informação relativa ao espectro direcional de cada onda na fronteira oceânica. Recorrendo ao STWAVE, a agitação é depois propagada até às estações, onde é recolhida a informação que resulta do cálculo do valor da distribuição das alturas, dos períodos significativos, das direções predominantes e da distribuição espectral de energia das ondas. O objetivo da aplicação de modelos que procedem à transformação de ondas entre condições ao largo e condições próximo à costa é a de descrever quantitativamente a mudança dos parâmetros da onda, tais como a altura da onda, o período, e a direção de propagação da onda. O STWAVE inclui a simulação dos fenómenos de difração (simplificada), refração e empolamento das ondas por efeito da batimetria e da interação com correntes e geração de ondulação por ação do vento (Vincent *et al.*, 2006; Massey *et al.*, 2011).

3.2.2. Conceitos teóricos do GENESIS

O modelo GENESIS é um modelo numérico de simulação de evolução da linha de costa que assenta na teoria de “uma linha”, inicialmente formulada por Pelnard-Considère (1956), apresentando no entanto pressupostos singulares, dos quais se destacam os seguintes (Hanson e Kraus, 1989): 1) a forma do perfil de praia mantém-se constante, ou seja, o perfil de praia move-se paralelamente a si próprio, verificando-se que apenas um ponto é suficiente para caracterizar toda a secção transversal que lhe está associada (Figura 3.5); 2) as trocas sedimentares ocorrem entre dois limites bem definidos, a altura da berma de praia (B) e a

profundidade de fecho (DoC), sendo que estes dois limites definem o perfil ativo para o transporte longitudinal de sedimentos; e 3) o transporte sólido longitudinal é induzido pela ação das ondas e definido essencialmente pela altura e direção da onda na rebentação.

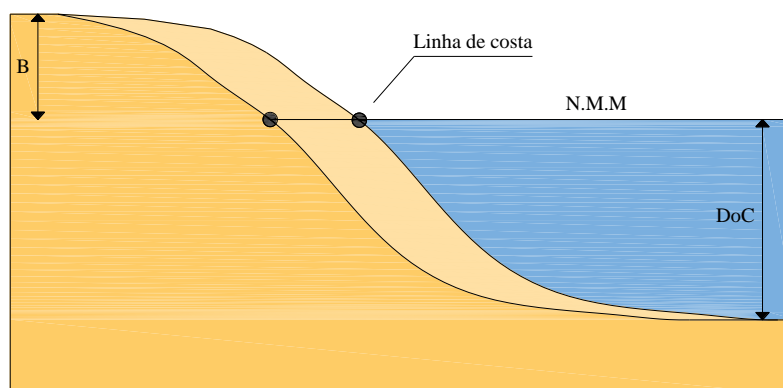


Figura 3.5: Evolução do perfil transversal no modelo GENESIS (baseado em Di Bona, 2013).

As equações de base do modelo assentam na teoria da formulação de “uma linha”, sucintamente descrita na secção 2.1.1 e o pressuposto de cálculo do balanço sedimentar segue o exposto na Figura 2.2 e Expressões 2.1 a 2.4. Assim, segundo Hanson (1988), no modelo numérico GENESIS, integrando a Expressão 2.3 em ordem ao tempo e ao longo de um trecho costeiro com extensão discreta (Δx), a variação de sedimentos no trecho (ΔV) representa uma variação Δy na posição da linha de costa (Equação 3.12).

$$\Delta y = \frac{\Delta V}{(DoC + B)\Delta x} \quad (3.12)$$

A variação do volume de sedimentos no trecho resulta do gradiente de transporte sólido longitudinal. O transporte longitudinal de sedimentos é calculado no GENESIS através da Expressão 3.13 (resultado em m^3/s):

$$Q = H_b^2 C_{gb} \left(a_1 \sin 2\alpha_b - a_2 \cos \alpha_b \frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad (3.13)$$

Onde H_b e α_b traduzem as características da onda na rebentação, respetivamente, altura e direção, C_{gb} representa a celeridade da onda (Expressão 3.5), H representa a altura de onda e a_1 e a_2 representam parâmetros adimensionais calculados através das Expressões 3.14 e 3.15.

$$a_1 = \frac{k_1}{16 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1 - n) (1.416)^{5/2}} \quad (3.14)$$

$$a_2 = \frac{k_2}{8 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1 - n) \tan \beta (1.416)^{7/2}} \quad (3.15)$$

k_1 e k_2 são coeficientes empíricos que funcionam como calibração do modelo (geralmente k_2 é adotado como sendo 0.5 a 1.0 vezes o valor de k_1), ρ_s é a densidade da areia (que no GENESIS toma o valor de 2 650 kg/m³), ρ é a densidade da água do mar (considerada no GENESIS igual a 1 030 kg/m³), n representa a porosidade (que toma o valor de 0.4) e $\tan \beta$ representa o declive médio dos fundos, desde a linha de costa até à profundidade de fecho. A constante 1.416, considerada nas expressões anteriores, tem a função de relacionar os valores de k_1 e k_2 com a altura de onda significativa (H_s) ao invés da altura de onda quadrática (H_{rms}).

A direção da onda na rebentação (Figura 3.6) é calculada através da aplicação da Lei de Snell (Expressão 3.16), válida para fundos regulares e paralelos, onde α_b e L_b representam a direção da onda e o comprimento da onda na rebentação e α_0 e L_0 traduzem as características da onda ao largo.

$$\frac{\sin \alpha_b}{L_b} = \frac{\sin \alpha_0}{L_0} \quad (3.16)$$

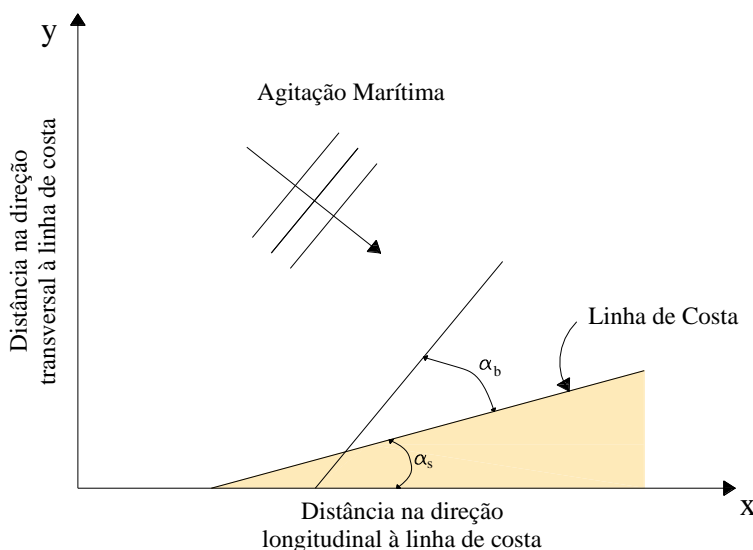


Figura 3.6: Definição dos ângulos que definem a orientação da linha de costa e da linha de rebentação no GENESIS (Hanson e Kraus, 1989).

O primeiro termo da Expressão 3.13 corresponde à formulação de CERC (*Coastal Engineering Research Center*), descrita no SPM (1984), e tem em conta o transporte longitudinal de sedimentos produzido através da obliquidade da ondas na rebentação. O segundo termo já não está relacionado com a fórmula de CERC e é utilizado para descrever o efeito do gradiente das ondas na rebentação. Este efeito foi introduzido por Ozasa e Brampton (1980).

Como referido, relativamente à propagação da onda, o GENESIS permite a utilização de um modelo externo, o STWAVE, em simultâneo com o modelo interno, ou em alternativa, permite a propagação das ondas unicamente através do modelo interno. O algoritmo deste modelo interno é semelhante ao considerado no modelo numérico LTC e pode ser consultado em Hanson e Kraus (1989). A Figura 3.7 demonstra a propagação da onda para as duas situações descritas (modelos interno e externo). Quando é apenas usado o modelo interno (Figura 3.7a) a onda é propagada desde o largo até à zona de rebentação considerando apenas os fenómenos de transformação da onda incorporados no GENESIS. Para batimetrias e climas de agitação mais complexos, pode ser considerado o modelo externo desde o largo até uma determinada linha de referência e após essa zona é utilizado o modelo interno para propagação da onda até à linha de rebentação (Figura 3.7b). Neste caso, a onda é propagada apenas no início da simulação e os valores são armazenados em estações (localizadas na linha de referência). A propagação da onda desde a linha de referência até à linha de rebentação, realizada pelo modelo interno, é executada em cada passo de tempo de cálculo.

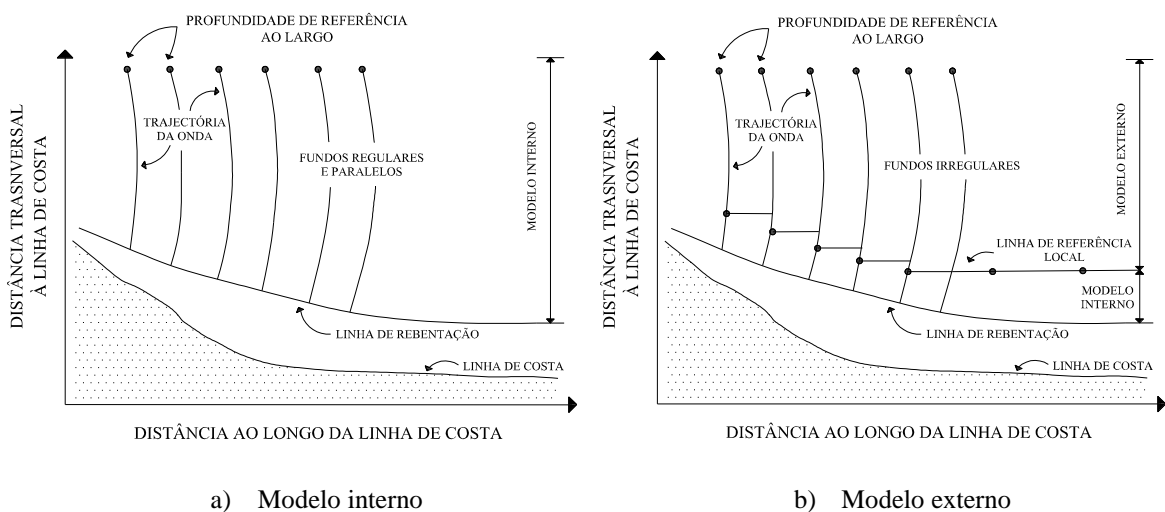


Figura 3.7: Propagação da onda no modelo GENESIS (Hanson e Kraus, 1989).

As questões relacionadas com os pressupostos admitidos na caracterização do processo de propagação da onda são relevantes na comparação do desempenho de modelos, nomeadamente na comparação entre o LTC e o GENESIS. Mais considerações relativas à propagação da onda no modelo interno, e outras considerações teóricas do GENESIS, podem ser consultadas Hanson e Kraus (1989).

3.2.3. Dados de entrada

A interface gráfica do modelo numérico GENESIS foi desenvolvida pelo USACE (*United States Army Corps of Engineers*) e é parte integrante da ferramenta de modelação NEMOS.

Para simular a posição da linha de costa no GENESIS são necessários os ficheiros resultantes da importação do domínio de cálculo e criação da grelha (GRIDGEN), o ficheiro de estações com as características da propagação do clima de agitação desde o largo até à costa, provenientes do modelo STWAVE (no caso de se pretender a utilização do modelo externo) e o ficheiro do clima de agitação atuante correspondente ao período que se pretende simular (proveniente do WWWL). De referir que o clima de agitação considerado para o período de simulação no GENESIS, pode não coincidir com o clima de agitação considerado no STWAVE. No entanto, caso se pretenda a utilização do modelo externo, o ficheiro das estações deve conter todas as características das ondas que se pretende propagar. O ficheiro resultante do STWAVE, com informação das características da agitação após a propagação, armazenadas nas estações, é importado para o GENESIS, que recorre ao modelo interno para propagar a onda desde as estações até à profundidade de rebentação.

Importados todos estes ficheiros, o GENESIS obriga a que seja definido o tempo da simulação, através da data inicial, data final e passo de tempo de cálculo a considerar na simulação. Definido o período de análise, importa caracterizar a simulação através do diâmetro mediano dos sedimentos (d_{50}), coeficientes empíricos de transporte (k_1 e k_2) e limites do perfil ativo, altura da berma (B) e profundidade de fecho (DoC). Posto isto, importa definir qual o modelo a utilizar para caracterizar a propagação da onda, apenas o modelo interno, ou o modelo interno e externo, e, por fim, definir as condições fronteira.

As condições fronteira traduzem os limites físicos do domínio de cálculo e funcionam também como calibração das simulações. É comum definir as condições fronteira através de

estruturas de defesa costeira. Estas podem ser representadas por esporões, quebramares, ou outras estruturas que “bloqueiem” por completo o transporte de sedimentos (*gated*); locais onde seja conhecido o transporte de sedimentos, geralmente em pontos onde se verifica que a linha de costa se mantém inalterada por longos períodos de tempo (*pinned beach*); ou locais onde se conhece exatamente o fluxo de transporte (*moving beach*).

A aplicação NEMOS e os conceitos teóricos em que se baseia o modelo numérico GENESIS apresentados nesta secção foram aplicados ao caso de estudo do Capítulo 5 para comparação de resultados entre o modelo GENESIS e os modelos LTC e Pelnard-Considère, 1956 (secção 5.3 e secção 5.4).

3.3. LTC

O LTC (*Long-Term Configuration*) é um modelo numérico de simulação da evolução da fisiografia costeira a médio e longo prazo para apoio à gestão e ao planeamento das zonas costeiras. Foi inicialmente desenvolvido na Universidade de Aveiro (UA), versão LTC-CC2005 (Coelho, 2005), e alvo de alterações na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), versão LTC-RS2010 (Silva, 2010) e na Universidade de Aveiro em 2012, versão LTC-CC2012. O presente trabalho dá continuidade ao desenvolvimento e análise do desempenho do modelo numérico, resultando na versão LTC-ML2017.

Neste capítulo procede-se a uma breve descrição dos pressupostos teóricos e estrutura computacional do modelo, referindo-se as mais-valias introduzidas desde a versão inicial, e apresentando-se trabalhos onde o LTC foi aplicado, a fim de se identificarem o tipo de análises que o modelo possibilita, bem como lacunas e aspetos a melhorar.

3.3.1. Descrição do LTC

Dada a importância económica e social das zonas costeiras, é cada vez mais importante, mediante determinados cenários, possuir capacidade de avaliar a evolução dos sistemas costeiros e o impacto de diferentes estratégias de intervenção costeira. O modelo LTC foi elaborado com o objetivo de contribuir para uma melhor compreensão da capacidade de

previsão da evolução da posição da linha de costa ao longo do tempo. Pressupõe o estabelecimento de cenários naturais e antropogénicos, permitindo a sua avaliação a médio e longo prazo, podendo também ser utilizado como ferramenta complementar na análise de situações de vulnerabilidade e risco à ação do mar e na escolha de soluções de engenharia para controlo da erosão. O modelo LTC possibilita a projeção de diferentes cenários de evolução da linha de costa permitindo apoiar o processo de planeamento e gestão do território costeiro.

O LTC foi concebido para aplicação a praias arenosas, onde o principal processo que controla a evolução da linha de costa é o gradiente no transporte longitudinal de sedimentos. Este depende das condições de agitação marítima, do nível da superfície da água do mar, da existência de fontes/sumidouros de sedimentos, das características sedimentares e morfológicas da praia, das estruturas de defesa costeira existentes e das condições fronteira impostas na área modelada. Pode ser entendido como uma combinação de um modelo de evolução de linha de costa clássico de “uma linha” (Hanson e Kraus, 1989) com um modelo de evolução de perfil transversal, considerando apenas aspetos geométricos do perfil. O modelo assume que cada onda atua individualmente durante um determinado período de tempo, o passo de tempo computacional, procedendo à sua transformação desde o largo até à rebentação (Coelho, 2005; Coelho e Veloso-Gomes, 2005a).

Para cada onda é estimado o transporte sólido longitudinal induzido, fazendo-se um balanço sedimentar, em cada trecho elementar da praia, através da equação de continuidade, e avaliando qual o volume de sedimentos em erosão ou acreção. O volume calculado é distribuído pelo perfil transversal ativo, definido entre o limite de espraiamento máximo da onda (R_u) e a profundidade de fecho (DoC). Verifica-se uma subida (acreção) ou descida (erosão) uniforme de todos os pontos do perfil ativo, sendo efetuadas correções a essas variações junto aos limites emerso e submerso do perfil. Nestes limites, a variação do perfil é controlada pelas inclinações mínimas, definidas pelo utilizador para o perfil submerso e para o perfil emerso, e pela estabilidade dos taludes criados, função do ângulo de repouso dos sedimentos. Esta técnica permite ao utilizador testar diversos parâmetros de controlo da distribuição sedimentar ao longo do perfil transversal e conseqüentemente da sua evolução ao longo do tempo.

3.3.1.1. Formulação teórica

Neste subcapítulo expõem-se os principais conceitos teóricos que servem de base ao funcionamento do modelo LTC, nomeadamente os pressupostos relativos aos fenómenos de transformação da onda, transporte longitudinal de sedimentos (estimativa da taxa potencial de sedimentos transportados), balanço de massa e consequente evolução do perfil transversal (alteração de cotas dos pontos da grelha que representam a área modelada).

Transformação da onda

As características ao largo de cada uma das ondas consideradas na simulação são conhecidas procedendo-se à sua transformação até à rebentação, considerando os fenómenos da refração, empolamento e difração junto às estruturas costeiras. Para tal, admite-se que estas características ao largo são idênticas em toda a extensão longitudinal do sector costeiro modelado, e recorre-se à teoria linear da onda (Dean e Dalrymple, 1994). O procedimento utilizado consiste na estimativa da profundidade para a qual ocorre a rebentação, d_b , e dos parâmetros caracterizadores das ondas na rebentação, altura de onda (H_b) e direcção de incidência da onda (α_b), a partir dos parâmetros caracterizadores ao largo, altura de onda (H_0) e direcção de proveniência, ou rumo (α_0).

No pressuposto inicial de que a altura de onda na rebentação é aproximadamente igual à altura de onda ao largo, começa-se por calcular a profundidade para a qual ocorre a rebentação, d_b , através do critério do índice de profundidade de rebentação, Expressão 3.17 (considerando $k_b = 0.78$). A profundidade de rebentação estimada desta forma será idêntica em toda a extensão longitudinal do sector costeiro em estudo, mas a localização da linha de rebentação será variável em planta, em função da topo-hidrografia.

$$k_b = \frac{H_b}{d_b} \quad (3.17)$$

Admitindo que ao longo da propagação da onda as linhas batimétricas são regulares e paralelas à linha de rebentação pode calcular-se o ângulo de incidência da onda na rebentação (α_b) por aplicação da Lei de *Snell* (ver Equação 3.16). O comprimento de onda na rebentação, L_b , é calculado através da Equação 3.18 (L_0 foi definido pela Expressão 3.8 e

depende do valor do período de onda, T). No modelo LTC o período de onda é obtido em função da altura de onda ao largo, através da Expressão 3.19.

$$L_b = L_0 \tanh \frac{2\pi d_b}{L_b} \quad (3.18)$$

$$T = 1.21H_0 + 6.92 \quad (3.19)$$

A altura de onda na rebentação pode ser estimada através da expressão seguinte:

$$H_b = K_r K_s H_0 \quad (3.20)$$

Onde K_r representa o coeficiente de refração e K_s o coeficiente de empolamento. O coeficiente de refração na rebentação depende da direção de incidência de onda, ao largo e na rebentação, e pode ser estimado pela Expressão 3.21. O coeficiente de empolamento depende da profundidade e do comprimento de onda na rebentação e pode ser obtido através da Expressão 3.22.

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha_b}} \quad (3.21)$$

$$K_s = \frac{\cosh \frac{2\pi d_b}{L_b}}{\sqrt{\sinh \frac{2\pi d_b}{L_b} \cosh \frac{2\pi d_b}{L_b} + \frac{2\pi d_b}{L_b}}} \quad (3.22)$$

Quando na sua propagação em direção à costa, a onda encontra um obstáculo, como um esporão ou um quebramar, é considerado o fenómeno da difração (caracterizado pelo coeficiente de difração, K_d), que consiste na transmissão lateral de energia e atenuação da altura de onda segundo a sua direção de incidência (Figura 3.8). Na versão inicial do modelo LTC, Coelho (2005) incorporou um método para o cálculo do coeficiente de difração em regiões abrigadas por estruturas costeiras, baseando-se nos resultados do ábaco apresentado por Sorensen *et al.* (2003). O autor generalizou matematicamente o ábaco, para uma onda com um comprimento de onda incidente, L , com uma direção de incidência definida através do ângulo θ_1 , definindo o coeficiente de difração num ponto $P(x, y)$, que se encontra a uma distância r da extremidade do quebramar semi-infinito, segundo uma direção que faz um ângulo θ_2 com a direção do ponto de difração, pela seguinte equação:

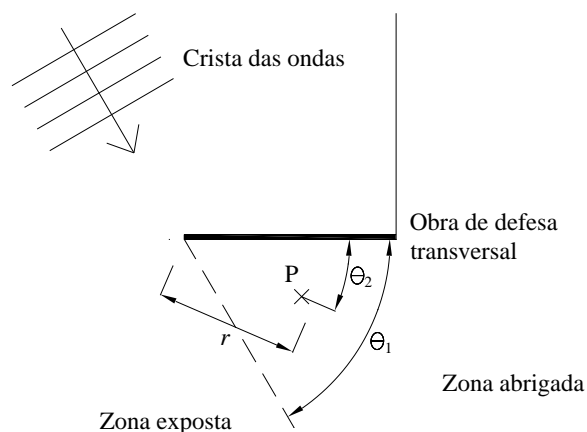


Figura 3.8: Caracterização da difração na zona abrigada de uma obra de defesa perpendicular à linha de costa (Coelho, 2005).

$$K_d = C_1 + \left(\frac{e^{-2\frac{r}{L}} + 0.01\frac{r}{L} + 0.2}{1.2} \right) C_2 \quad (3.23)$$

Onde, $C_1 = \left(1 - \frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta_1}\right)^2$ e $C_2 = 1 - C_1$.

Desta forma, a Expressão 3.20 pode ser modificada de forma a incluir o efeito da difração na presença de estruturas costeiras (considerando $K_d = 1$ no caso de não existirem estruturas) sendo a altura de onda na rebentação obtida através da expressão seguinte:

$$H_b = K_d K_s K_r H_0 \quad (3.24)$$

Importa ainda referir que, na avaliação da propagação da onda, o LTC não tem em conta os efeitos do atrito no fundo e da eventual reflexão em estruturas costeiras.

Transporte longitudinal de sedimentos

O transporte longitudinal de sedimentos é um processo costeiro que controla a morfologia da praia determinando em grande parte se esta se encontra em situação de erosão, acreção ou em equilíbrio, uma vez que grandes quantidades de sedimentos são movimentadas ao longo da costa. O fenómeno é essencialmente devido a correntes longitudinais induzidas pelas ondas (corrente de deriva litoral) quando estas se aproximam da praia segundo uma direção oblíqua.

O modelo LTC inclui duas formulações para a estimativa da taxa de transporte longitudinal de sedimentos (Q): a expressão de CERC (SPM, 1984) e uma expressão desenvolvida por Kamphuis *et al.* (1986), com base num estudo em modelo físico com fundos móveis.

No modelo LTC, o utilizador pode escolher uma das duas formulações disponíveis (CERC, SPM, 1984 ou Kamphuis *et al.*, 1986) para, a partir dos valores encontrados para as características de onda na rebentação, das propriedades da água e dos sedimentos e da topo-hidrografia, fazer uma estimativa da taxa potencial de transporte longitudinal (Q), ao longo do sector costeiro modelado. A taxa de transporte sedimentar efetiva é em geral inferior à taxa potencial estimada, sendo limitada pela disponibilidade sedimentar ao longo do sector costeiro.

A expressão de CERC (SPM, 1984) é representada pela Expressão 3.25 (resultado em m^3/s), onde k representa um coeficiente empírico de transporte, ρ a massa volúmica da água, ρ_s a massa volúmica da areia, g a aceleração da gravidade, n a porosidade da areia, k_b o índice de profundidade de rebentação, H_b a altura de onda na rebentação e α_b o ângulo de incidência da onda na rebentação.

$$Q = k \frac{\rho \sqrt{g/k_b}}{16(\rho_s - \rho)(1 - n)} H_b^{5/2} \sin(2\alpha_b) \quad (3.25)$$

Kamphuis *et al.* (1986) desenvolveram uma outra expressão para determinação da taxa de transporte de massa submersa, relacionando-o com a declividade das ondas, o declive de praia que causa a rebentação, $\tan \beta$, o diâmetro mediano dos sedimentos, d_{50} , e o ângulo de incidência da onda na rebentação (α_b). Mais tarde, baseado em séries de estudos laboratoriais e reavaliação dos dados de campo, Kamphuis (1991) modificou a expressão desenvolvida, adicionando a influência do período de pico das ondas (T_p), Expressão 3.26, sendo o resultado expresso em kg/s . A transformação para volumes obriga à divisão por $(\rho_s - \rho)(1 - n)$, resultando a taxa de transporte longitudinal de sedimentos em m^3/s (Bayram *et al.*, 2007).

$$Q_m = 2.27 H_b^2 T_p^{1.5} (\tan \beta)^{0.75} d_{50}^{-0.25} \sin^{0.6}(2\alpha_b) \quad (3.26)$$

Balço de massa e evoluço do perfil transversal

A formulaço de base do modelo LTC consiste no balço de volumes, pelo que se considera a equaço da continuidade dos volumes de areia envolvidos no processo de transporte

longitudinal. Seguindo os modelos existentes (Hanson e Kraus, 1989; Vicente e Clímaco, 2003), admite-se que a variação do volume de areia, ao longo de um comprimento infinitesimal da linha de costa é igual à variação de caudal sólido em transporte nesse comprimento, adicionada ou subtraída de eventuais caudais sólidos exteriores (fontes aluvionares, alimentações artificiais, dragagens, extrações de areias, etc.) distribuídas por esse comprimento infinitesimal, num intervalo de tempo infinitesimal, dt (ver Expressão 2.1, equação de continuidade apresentada na descrição da formulação de “uma linha”, e Figura 2.2).

Discretizando o tempo em intervalos Δt , a análise ao longo da linha de costa para trechos de comprimento Δx , permite relacionar a variação de volume de sedimentos com a variação no tempo dos caudais sólidos em transporte:

$$\Delta V = (Q_i - Q_{i-1} + Q_{ext})\Delta t = (\Delta Q + Q_{ext})\Delta t \quad (3.27)$$

Considera-se que $Q_{ext} = q_{ext}\Delta x$ e que a variação do volume de areia (ΔV) no comprimento Δx é distribuída uniformemente em toda a largura ativa do perfil transversal, representando uma variação na cota dos pontos do perfil igual a Δz . Assim, a Equação 3.28 permite o cálculo da alteração no perfil transversal representativo do trecho Δx , por variação do volume de areia ΔV (W representa a largura ativa do perfil transversal, definida entre a profundidade de fecho, DoC , e o limite de espraiamento da onda, R_u). A variação do caudal sólido em transporte (ΔQ) no comprimento Δx resulta do gradiente de caudais sólidos, induzindo diferenças entre os volumes que entram e que saem do trecho de comprimento Δx , em cada intervalo de tempo Δt (Q_i e Q_{i-1} representam os caudais de entrada e/ou saída).

$$\Delta z = \frac{\Delta V}{W\Delta x} \quad (3.28)$$

Para a estimativa da profundidade de fecho, o modelo LTC tem disponíveis duas formulações: Hallermeier, 1978 (Expressão 3.29) e Birkemeier, 1985 (Expressão 3.30), que dependem ambas da altura de onda ao largo (H_0) e do período da onda (T). As formulações referidas foram adaptadas e aplicadas diretamente onda a onda para o cálculo da profundidade de fecho, uma vez que o modelo assume que cada onda, caracterizada pelos parâmetros altura de onda, período de onda, e rumo, atua durante um determinado período de tempo (passo de tempo computacional).

$$DoC = 2.28H_0 - 68.5 \left(\frac{H_0^2}{gT^2} \right) \quad (3.29)$$

$$DoC = 1.75H_0 - 57.9 \left(\frac{H_0^2}{gT^2} \right) \quad (3.30)$$

O limite de espraiamento da onda é calculado a partir da formulação de Ruggiero *et al.* (2001), que depende do declive da face da praia, $\tan \beta$, e das características da onda ao largo (Expressão 3.31).

$$R_u = 0.27(\tan \beta H_0 L_0)^{1/2} \quad (3.31)$$

3.3.1.2. Estrutura computacional

Apresentados os principais conceitos teóricos que sustentam o funcionamento do modelo LTC, descreve-se agora, sucintamente, a estrutura computacional do programa (desenvolvido em envolvido em linguagem de programação Fortran. O esquema da Figura 3.9 representa, de forma simplificada, a estrutura computacional do modelo LTC e a interligação entre as diferentes sub-rotinas que compõem o código.

A topo-hidrografia, definida através de uma malha regular de pontos, deve ser fornecida no início da execução do modelo, sendo atualizada a cada passo de tempo computacional. É efetuada a propagação das ondas sobre a batimetria real, sendo estimadas as características da onda na rebentação. São calculadas as taxas de transporte sólido longitudinal no domínio computacional e o balanço dos volumes de sedimentos em transporte para cada trecho de costa, sendo, depois disso, efetuada a atualização das cotas do fundo e calculada a nova topo-hidrografia. Para facilitar alterações e potenciar alternativas em métodos de cálculo, o programa é composto por sub-rotinas relativamente diferenciadas e de pequena extensão, aumentando a simplicidade e compreensão de cada uma delas. O programa principal recorre a estas sub-rotinas ao longo do processo de cálculo automático. De referir que, o organigrama diz respeito à versão inicial do modelo (versão LTC-CC2005), não contemplando por isso as alterações realizadas desde então.

3.3.2. Evolução do LTC

O presente subcapítulo tem por objetivo descrever as versões que surgiram no sentido de colmatar as lacunas e limitações da versão inicial do modelo, algumas delas identificadas

em Coelho (2005) e outras detetadas com a sua utilização. Assim, descrevem-se em seguida as duas versões que surgiram após o desenvolvimento da versão inicial do modelo, versão LTC-RS2010 e versão LTC-CC2012. Com o desenvolvimento do presente trabalho será posteriormente apresentada a versão LTC-ML2017.

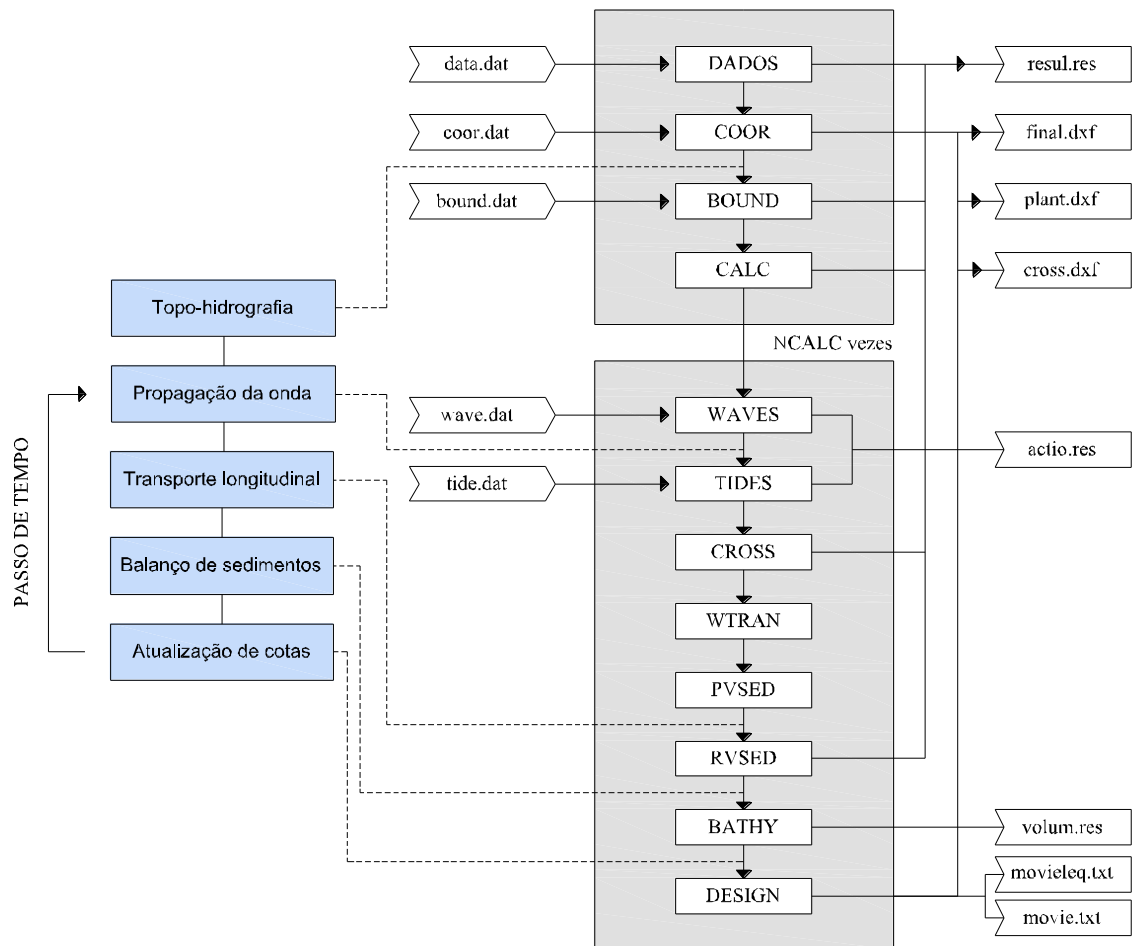


Figura 3.9: Estrutura computacional do modelo LTC (baseado em Coelho, 2005 e Silva, 2010).

3.3.2.1. Versão LTC-RS2010

Um dos principais objetivos do trabalho desenvolvido por Silva (2010) consistiu na avaliação do desempenho e aperfeiçoamento do modelo LTC, com vista à colmatação de algumas das limitações já identificadas por Coelho (2005), bem como lacunas encontradas aquando da utilização do modelo.

Silva (2010) realizou uma série de testes genéricos, com o objetivo de demonstrar as potencialidades e limitações do modelo, bem como a sensibilidade do seu desempenho à

variação dos diversos parâmetros intervenientes na sua formulação. A análise dos resultados destes testes permitiu uma otimização do desempenho do modelo, através de modificações pontuais do código. Descrevem-se em seguida, as alterações concretizadas por Silva (2010) que originaram a versão LTC-RS2010.

Implementação de um método alternativo para o cálculo da difração

O fenómeno da difração era considerado pelo modelo, através de um método expedito baseado num ábaco. Silva (2010) procurou outras soluções para avaliação da difração e respetivo impacto na evolução da linha de costa, tendo incorporado no modelo LTC o método, também expedito, de Kraus (1984), como alternativa ao existente para a estimativa dos coeficientes de difração junto a obstáculos. O modelo LTC passou assim a dispor de um método adicional para o cálculo da difração (Kraus, 1984), devendo a seleção do método ser efetuada pelo utilizador (informação mais detalhada pode ser consultada em Silva (2010)).

Definição de um critério de estabilidade numérica

Em determinados cenários de simulação, Silva (2010) identificou problemas de estabilidade numérica no modelo LTC. Desta forma, analisou a adequabilidade de incorporação de um critério de estabilidade numérica, implementando uma nova sub-rotina de cálculo que permite a escolha do passo de tempo que garante que o critério de estabilidade numérica é respeitado. O critério de estabilidade numérica foi também utilizado para a repetição de simulações com geração aleatória de condições de agitação marítima, em que tinha sido observada uma elevada variabilidade topo-hidrográfica ao longo do sector modelado. Quando considerado o critério de estabilidade, os resultados modificaram-se, observando-se a atenuação no tempo do efeito de recuo e variabilidade da posição da linha de costa ao longo do sector modelado.

O critério de estabilidade numérica, que resulta normalmente em passos de tempo computacional da ordem de horas, pode ser obtido através da condição seguinte (Kamphuis, 2000):

$$\frac{Q}{(DoC + R_u)\alpha_b} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} < \frac{1}{2} \quad (3.32)$$

Silva (2010) efetuou testes numéricos com o intuito de tentar encontrar um valor de referência para a definição do parâmetro crítico de instabilidade. Com base nos resultados obtidos, implementou uma nova sub-rotina de cálculo, que dá a conhecer ao utilizador o passo de tempo crítico, determinado em função das características da agitação marítima na rebentação, da altura do perfil ativo e da resolução da malha segundo a direção longitudinal (Expressão 3.32), permitindo-lhe, na posse desta informação, seleccionar um novo passo de tempo de cálculo para a simulação, que é assim reiniciada.

Definição da profundidade de fecho

Na versão inicial do modelo LTC, a profundidade de fecho era calculada através da expressão de Hallermeier (Expressão 3.29) ou, em alternativa, de Birkmeier (Expressão 3.30). O modelo assume que cada onda, caracterizada pelos parâmetros altura de onda significativa, período associado à altura de onda significativa e rumo, atua durante um determinado intervalo de tempo (passo de tempo computacional). As formulações referidas são aplicadas diretamente onda a onda. Desta forma, se a onda considerada durante a simulação é constante, a profundidade de fecho, DoC , é também constante e o limite de espraçamento, R_u , varia em função do declive da praia junto à linha de água. No caso de um clima de agitação marítima variável ou simulado por geração aleatória de ondas, para cada onda gerada é estimada uma DoC . Neste caso, a DoC varia a cada passo de tempo computacional, em função da altura de onda significativa e do período da onda gerada. Silva (2010), através da realização de testes com ondas regulares, verificou que este procedimento de cálculo provocava alguma instabilidade na morfologia, visto que a largura do perfil ativo se pode torna insuficiente para acomodar o volume de sedimentos em transporte.

Atendendo ao descrito, Silva (2010) implementou no modelo a possibilidade de se considerar uma DoC que permanece constante no decurso dos cálculos ao longo do tempo de simulação, estimada através da formulação original de Hallermeier (Expressão 3.29), para valores conhecidos da altura de onda extrema que é excedida 12 horas/ano, $H_{s,0.137}$, e do período de onda significativo médio ($\overline{T_s}$). Silva (2010) realizou diversas simulações, testando vários cenários, e verificou que a utilização de uma definição da DoC dependente da onda que é excedida 12 horas/ano permite que a redistribuição dos volumes sedimentares ao longo dos perfis se faça de uma forma mais suave, reduzindo as instabilidades numéricas que

ocorriam na representação da linha de costa, como consequência das instabilidades morfológicas do perfil ativo. Nas simulações com recurso ao modelo LTC, o utilizador passa assim a poder optar por utilizar uma *DoC* constante, definida em função da altura de onda excedida 12 horas/ano.

Controlo de obras de defesa perpendiculares à linha de costa

A aplicação do modelo para simulação de cenários em sectores onde existem estruturas de defesa costeira transversais (esporões) veio mostrar que, para situações em que o limite de espraiamento da onda ultrapassasse a cabeça das estruturas, o modelo não identificaria a obra, permitindo o avanço da erosão. Assim, Silva (2010) modificou a condição numérica que identifica a presença de estrutura de defesa, para que se mantivesse o controlo da posição, mesmo quando o limite de espraiamento não se situa na cabeça da obra.

Desenvolvimento de um novo ficheiro de resultados

Silva (2010) implementou, nesta versão do LTC, a possibilidade de guardar num ficheiro de texto (“*bathy.dat*”), a batimetria obtida no final de uma simulação. Esta funcionalidade já estava disponível na versão anterior do modelo, no entanto os resultados apenas eram exportados para ficheiros em formato “.*dxg*”. Esta nova funcionalidade facilita a introdução dos dados batimétricos relativos a um *output* da simulação, como *input* da simulação seguinte (através do ficheiro “*coord.dat*”).

3.3.2.2. Versão LTC-CC2012

Com o objetivo de continuar a melhorar o desempenho do modelo LTC e colmatar algumas das lacunas identificadas com a sua utilização, a versão LTC-RS2010 também foi alvo de alterações, originando assim a versão LTC-CC2012.

Alteração das opções de consideração do clima de agitação

A versão LTC-CC2012 contempla duas novas hipóteses de consideração da agitação, passando a ser possível a geração aleatória de uma sequência de agitação sistematicamente igual, representativa de um ano de agitação, com base nas percentagens de ocorrência em diferentes classes de altura e direção da onda, e a leitura de um clima de agitação específico, através do ficheiro “*wave.dat*”.

Alteração das opções para consideração do efeito da difração

Em função do interesse do utilizador, na nova versão é possível a não consideração dos efeitos da difração nos esporões e estruturas longitudinais aderentes.

Correção no cálculo de volumes de transporte sólido

Na versão LTC-CC2012 foi corrigido o cálculo dos volumes reais disponíveis para transporte numa situação genérica, em que num determinado instante de tempo o perfil estivesse a perder sedimentos simultaneamente para norte e para sul, sem ter capacidade de alimentar realmente esse transporte. Desta forma, o transporte para cada sentido passou a ser proporcional ao volume de sedimentos realmente disponíveis.

Atenuação do efeito erosivo a sotamar de um esporão

Na nova versão do LTC foi introduzida a opção de atenuar o efeito erosivo na zona a sotamar dos esporões. Esta opção permite distribuir numa maior largura a sotamar (ao longo de uma extensão de linha de costa definida pelo utilizador através do número de pontos de grelha), os sedimentos que passam à frente do esporão. Desta forma, a largura do perfil ativo é modificada, por alteração do ponto que define a profundidade de fecho do perfil ativo a sotamar. Nestes casos, a profundidade de fecho avança no sentido das maiores profundidades, aumentando a largura do perfil ativo a sotamar do esporão, permitindo distribuir o défice sedimentar que tipicamente aí ocorre, por uma maior largura do perfil transversal, diminuindo por isso o impacto do efeito erosivo nessa zona (porque o mesmo volume em défice, distribuído numa maior largura, provoca menores variações de cotas e menores impactos na posição da linha de costa). De referir que, por opção do utilizador, o cálculo pode ser efetuado de forma exatamente igual à versão anterior, ou seja, não considerando a opção de atenuação do efeito de erosão a sotamar do esporão.

Verificação da variação das cotas do terreno

Foi incorporada, na nova versão do modelo, uma verificação das cotas do terreno, ao longo da direção longitudinal, para toda a largura ativa da área modelada. Esta verificação corresponde a um filtro que elimina grandes variações de cotas do terreno, ao longo da direção longitudinal à costa. A variação máxima é definida pelo utilizador através do valor introduzido para o ângulo de inclinação longitudinal do terreno.

A verificação é realizada para todos os passos de cálculo ao longo do tempo, após a variação das cotas do terreno por efeito dos balanços de volumes de sedimentos em transporte. Esta funcionalidade tem como objetivo reduzir algumas das instabilidades que se verificavam no traçado da linha de costa. Apesar de ser assegurada a equação da continuidade, estes ajustes de cotas não são contabilizados nos volumes de sedimentos em transporte.

Para que seja possível esta verificação, o utilizador deverá introduzir um novo parâmetro correspondente ao ângulo de atrito a considerar para os sedimentos do fundo, na direção longitudinal (ϕ_L). Este valor pode ser igual ao que é considerado na evolução dos perfis transversais ou pode tomar outro valor. Apesar das características dos sedimentos serem iguais na direção transversal e longitudinal, fará mais sentido que a nova variável seja inferior ao ângulo de atrito transversal, já que as correntes longitudinais atenuam a variação das cotas ao longo dos perfis longitudinais. O comportamento da versão anterior mantém-se quando o utilizador considera nula a nova variável, não sendo, dessa forma, efetuada qualquer verificação ou filtragem de cotas na direção longitudinal.

Controlo da evolução do perfil transversal

Foi introduzida uma nova opção de controlo da evolução do perfil transversal ao longo da simulação. Esta modalidade de controlo da evolução dos perfis transversais permite a existência de inclinações negativas ao longo do perfil transversal (Figura 3.10), o que permitirá uma mais fácil futura inclusão de uma opção para quebra-mares destacados. Foi também assegurado o controlo da evolução do perfil, em situações de dragagens (consideradas no modelo como operações de alimentação artificial de areias, simuladas com a introdução de volumes negativos de sedimentos).

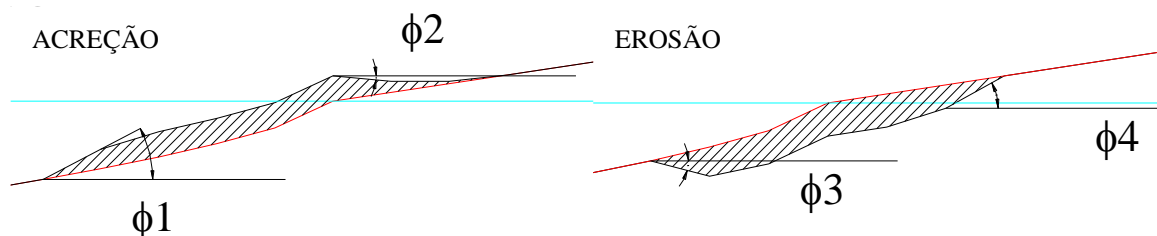


Figura 3.10: Representação dos ângulos máximos do terreno com a horizontal, submersos e emersos, em situação de acreção e erosão.

3.3.3. Aplicação do LTC

O modelo LTC, desde o seu desenvolvimento, tem vindo a ser utilizado em diversos estudos e projetos, dando origem a inúmeras publicações, nomeadamente, artigos científicos e dissertações de mestrado e doutoramento (Figura 3.11). Desta forma, neste subcapítulo procedeu-se ao levantamento de todos os trabalhos onde o modelo numérico LTC foi utilizado, no sentido de identificar o tipo de análises que já foram efetuadas e potenciais problemas detetados na sua aplicação.

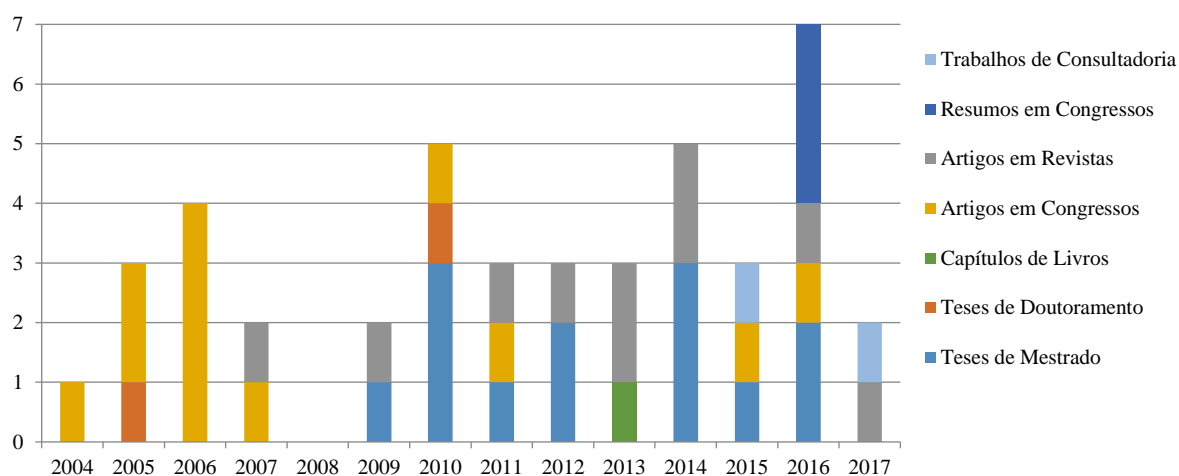


Figura 3.11: Número de publicações onde se descrevem aplicações do modelo numérico LTC.

Na generalidade dos trabalhos, o modelo LTC foi aplicado à costa noroeste portuguesa, na maioria das vezes, a sul do porto de Aveiro (trechos Barra - Costa Nova - Vagueira - Areão - Mira), em trabalhos desenvolvidos por Coelho *et al.* (2004, 2006a, 2006b, 2006c, 2009, 2010), Coelho e Veloso-Gomes (2005a, 2005b), Silva *et al.* (2007a, 2011), Carpinteiro (2009), Pereira (2010), Reis (2010), Rodrigues (2010), Alves (2012), Coelho e Pereira (2013), Pereira e Coelho (2013), Pereira *et al.* (2013), Baptista *et al.* (2014), Bertucco (2014), Dias *et al.* (2014), Guimarães (2014), Guimarães *et al.* (2016) e Roebeling *et al.* (2016). O modelo foi também aplicado à parte norte do distrito de Aveiro, nos trechos Esmoriz - Furadouro - S. Jacinto (Coelho e Pereira, 2013; Pereira *et al.*, 2013; Dias *et al.*, 2014 e Cruz, 2015) e à zona a norte e a sul do quebramar portuário da Figueira da Foz, respetivamente, Pereira *et al.* (2016) e Coelho *et al.* (2006c). Os trabalhos desenvolvidos por Silva *et al.* (2007b), Almeida (2011), Roebeling *et al.* (2011) e Ferreira (2016) foram aplicados a toda a costa noroeste portuguesa e os trabalhos de Coelho *et al.* (2006d, 2013),

Oliveira (2012), Bertuccio (2014), Rodeia (2014), Guimarães *et al.* (2015) e Bastos (2016) traduzem análises aplicadas a casos de estudo hipotéticos. Lima e Coelho (2017) resume informação relativa aos conceitos e particularidades do modelo LTC, sem o aplicar a qualquer caso de estudo.

A classificação da vulnerabilidade de uma determinada zona e a construção de mapas de risco foram objetivos dos trabalhos desenvolvidos por Coelho e Veloso-Gomes (2005b), Coelho *et al.* (2006a e 2006b), Pereira (2010), Pereira e Coelho (2013) e Dias *et al.* (2014). As consequências na evolução da linha de costa provocadas pelas alterações climáticas, nomeadamente a subida do nível do mar e alterações da agitação marítima, foram alvo de estudo nos trabalhos desenvolvidos por Coelho *et al.* (2009), Pereira (2010), Coelho e Pereira (2013), Pereira e Coelho (2013) e Dias *et al.* (2014). Bastos (2016) utilizou o LTC para perceber o impacto de diferentes climas de agitação na posição da linha costa, verificando se vários cenários de agitação equivalente produziam o mesmo efeito em termos de evolução da linha de costa. Coelho *et al.* (2006c) recorreram ao modelo LTC para análise dos riscos da erosão acentuada que se verifica a sotamar dos quebramares portuários de Aveiro e da Figueira da Foz e Silva *et al.* (2007a) desenvolveram um estudo de previsão da evolução do comportamento do sistema praia-duna no litoral de Aveiro, uma vez que o acentuado recuo da linha de costa nesta zona faz antecipar a rutura do sistema dunar. Ainda no sentido de compreender as causas e o impacto da erosão acentuada que se verifica na costa noroeste portuguesa, Silva *et al.* (2007b) utilizaram o modelo LTC para sustentar a discussão entre a importância relativa das causas da erosão.

Coelho *et al.* (2006d) aplicaram o modelo a um caso de estudo hipotético, com o objetivo de simular cada uma das intervenções de defesa disponíveis pela modelação com o LTC: entrada de sedimentos no sistema através de um ponto fixo (simulando o efeito de fonte sedimentar de um rio); alimentações artificiais de praia; esporões e campos de esporões; estruturas longitudinais aderentes; e o efeito combinado das opções anteriores. A aplicação do modelo LTC ao estudo de alimentações artificiais de praia foi também realizada nos trabalhos desenvolvidos por Carpinteiro (2009), Coelho *et al.* (2010) e Rodrigues (2010), que simularam a transposição de areias da praia de S. Jacinto para as praias localizadas a sul e estudaram a gestão de sedimentos no trecho costeiro a sul do quebramar portuário. Ferreira (2016) incidiu o seu estudo na análise do impacto que as alimentações artificiais de praia

provocam na evolução da linha de costa em planta, na geometria dos perfis transversais e nas variações de altimetria da região modelado, analisando, com recurso ao modelo LTC, como ocorre a distribuição espacial e temporal dos sedimentos ao longo da costa, após uma alimentação artificial.

Reis (2010), Almeida (2011), Roebeling *et al.* (2011), Alves (2012), Oliveira (2012), Cruz (2015) e Roebeling *et al.* (2016) desenvolveram análises custo-benefício e análises económico-ambientais da implantação de obras de defesa costeira e utilizaram o modelo numérico LTC para quantificação das áreas de erosão e acreção ao longo do tempo (benefícios). Alves (2012), Oliveira (2012) e Roebeling *et al.* (2016) incidiram o estudo na análise de esporões, Cruz (2015) em estruturas longitudinais aderentes e Reis (2010) e Roebeling *et al.* (2011) analisaram, para além dos dois tipos de intervenção anteriores, alimentações artificiais de praia.

O modelo LTC foi também aplicado por vários autores para análise do impacto da construção de um esporão na hidrodinâmica e na evolução da linha de costa. Bertucco (2014) analisou o efeito da difração a sotamar de estruturas transversais na evolução da linha de costa e Rodeia (2014) analisou a evolução da linha de costa a barlar da estrutura. Ainda relativamente à análise de esporões, nos trabalhos desenvolvidos por Silva *et al.* (2011), Guimarães (2014) e Guimarães *et al.* (2016) os resultados da aplicação do modelo LTC foram comparados/validados com os resultados obtidos em modelo físico, com o objetivo de melhorar o desempenho do modelo numérico. Nos dois últimos trabalhos referidos, os resultados do modelo numérico foram ainda comparados com o modelo analítico de Pelnard-Considère (1956).

Pereira *et al.* (2013), Baptista *et al.* (2014), Bertucco (2014), Dias *et al.* (2014) e Pereira *et al.*, (2016) recorreram à utilização do modelo LTC em simultâneo como o modelo GENESIS, com o objetivo de comparar o desempenho de ambos os modelos e validar os resultados do modelo LTC. Ainda relativamente à comparação dos dois modelos, Coelho *et al.* (2013) analisaram a influência da definição da largura ativa. Os pressupostos de definição dos limites da largura ativa diferem para ambos os modelos, desencadeando diferenças nos resultados e consequentemente na posição da linha de costa (Coelho *et al.*, 2013).

Nos trabalhos desenvolvidos por Bertucco (2014), Guimarães (2014), Cruz (2015) e Guimarães *et al.* (2015) foram ainda desenvolvidas análises de sensibilidade a determinados

parâmetros do modelo LTC. No primeiro trabalho foram analisados o passo de tempo de cálculo, a variação da largura do perfil ativo a sotamar e os ângulos de atrito dos sedimentos. Guimarães (2014) e Guimarães *et al.* (2015) analisaram a variação da largura do perfil ativo a sotamar, os ângulos de atrito dos sedimentos, a batimetria inicial e as fórmulas de cálculo do transporte sedimentar. Por último, em Cruz (2015), foram feitos testes de sensibilidade à variação da agitação marítima (constante e variável), ao parâmetro empírico k e ao passo de tempo de cálculo da simulação.

Outros trabalhos de aplicação do LTC tiveram por objetivo apresentar o modelo (Coelho *et al.*, 2004; Coelho e Veloso-Gomes, 2005b) e a sua validação, comparando o desempenho com outros modelos e com dados de campo (Baptista *et al.*, 2014). Na avaliação de todos os trabalhos verifica-se a aplicação em horizontes temporais de simulação que variam entre os 10 e os 100 anos, em trechos costeiros com uma extensão máxima de 35 km (não sendo recomendável a simulação de trechos mais extensos).

O modelo LTC foi também aplicado em trabalhos de consultadoria, nomeadamente no estudo da dinâmica sedimentar na embocadura da Barra do Porto da Figueira da Foz (APFF, 2015) e na elaboração do estudo de cenários de dragagens e locais de deposição de sedimentos na embocadura da Barra do Porto da Figueira da Foz (APFF, 2017).

Na abordagem feita aos trabalhos de aplicação do LTC foram detetados alguns problemas no funcionamento e identificadas sugestões de melhoria. Guimarães (2014) detetou problemas na utilização da nova opção de controlo da evolução do perfil transversal (versão CC-2012) e Rodeia (2014) registou a ocorrência de instabilidades numéricas quando consideradas alturas de onda superiores a 6 metros nas simulações do caso de estudo. Coelho e Veloso-Gomes (2005a) sugerem melhorias no modelo ao nível da caracterização da granulometria das areias, da validade do pressuposto do cálculo da profundidade de fecho, da influência da variação da agitação marítima no cálculo do transporte sedimentar, na avaliação da inclinação da praia e do impacto de se considerar constante a distribuição transversal dos sedimentos em transporte.

O modelo numérico LTC tem já um vasto leque de aplicações, essencialmente direcionadas para a costa noroeste portuguesa, e permite a sustentação de inúmeras análises e estudos das zonas costeiras, uma vez que traduz o comportamento da morfologia e evolução da linha de costa, para vários cenários futuros naturais e de intervenção antrópica.

3.4. XD-Coast

O XD-Coast (*Xpress Design of COAstal STructures*) é uma ferramenta de cálculo automático, desenvolvida por Lima (2011), com o objetivo principal de pré-dimensionar a secção transversal de estruturas costeiras.

3.4.1. Descrição do XD-Coast

O XD-Coast surgiu face à necessidade de otimização do pré-dimensionamento da secção transversal de estruturas costeiras, uma vez que este se baseia em formulações essencialmente empíricas, onde o domínio da influência dos parâmetros envolvidos se torna essencial. Foi assim concebido com o intuito de facilitar a comparação de várias soluções estruturais possíveis para a secção transversal das estruturas costeiras, permitindo, de forma rápida e expedita, tomadas de decisão sustentadas, e facilitando a compreensão da influência, nos resultados finais, dos diferentes parâmetros envolvidos nos cálculos. Os resultados do programa facilitam também a estimativa de custos da intervenção de defesa costeira, através da contabilização do volume de material envolvido em cada solução.

A linguagem de programação adotada no desenvolvimento do XD-Coast foi a linguagem C#, uma linguagem de programação orientada a objetos (POO) e constituída por um amplo conjunto de ferramentas de desenvolvimento da *Microsoft*, especialmente desenhadas para operar sobre a plataforma *framework .NET* - o *Microsoft Visual Studio 2010* (Liberty e MacDonald, 2006; Watson *et al.*, 2010; Loureiro, 2011).

Devido à diversidade de parâmetros que influenciam a peso dos blocos a colocar no manto resistente e devido à dependência dos resultados consoante o tipo de obra e formulação em causa, o XD-Coast permite, para além do cálculo para situações isoladas, análises de sensibilidade dos resultados aos diferentes parâmetros envolvidos, facilitando assim uma rápida comparação das diversas formulações e dos resultados de cada formulação em função das diversas variáveis. O organigrama da Figura 3.12 permite uma melhor compreensão do conteúdo e organização das funcionalidades do programa desenvolvido. Pode considerar-se que o XD-Coast está dividido em duas partes: na primeira parte é determinado o peso unitário dos blocos a colocar no manto resistente, e na segunda parte, recorrendo aos resultados obtidos na primeira, determina-se as restantes características da secção transversal.

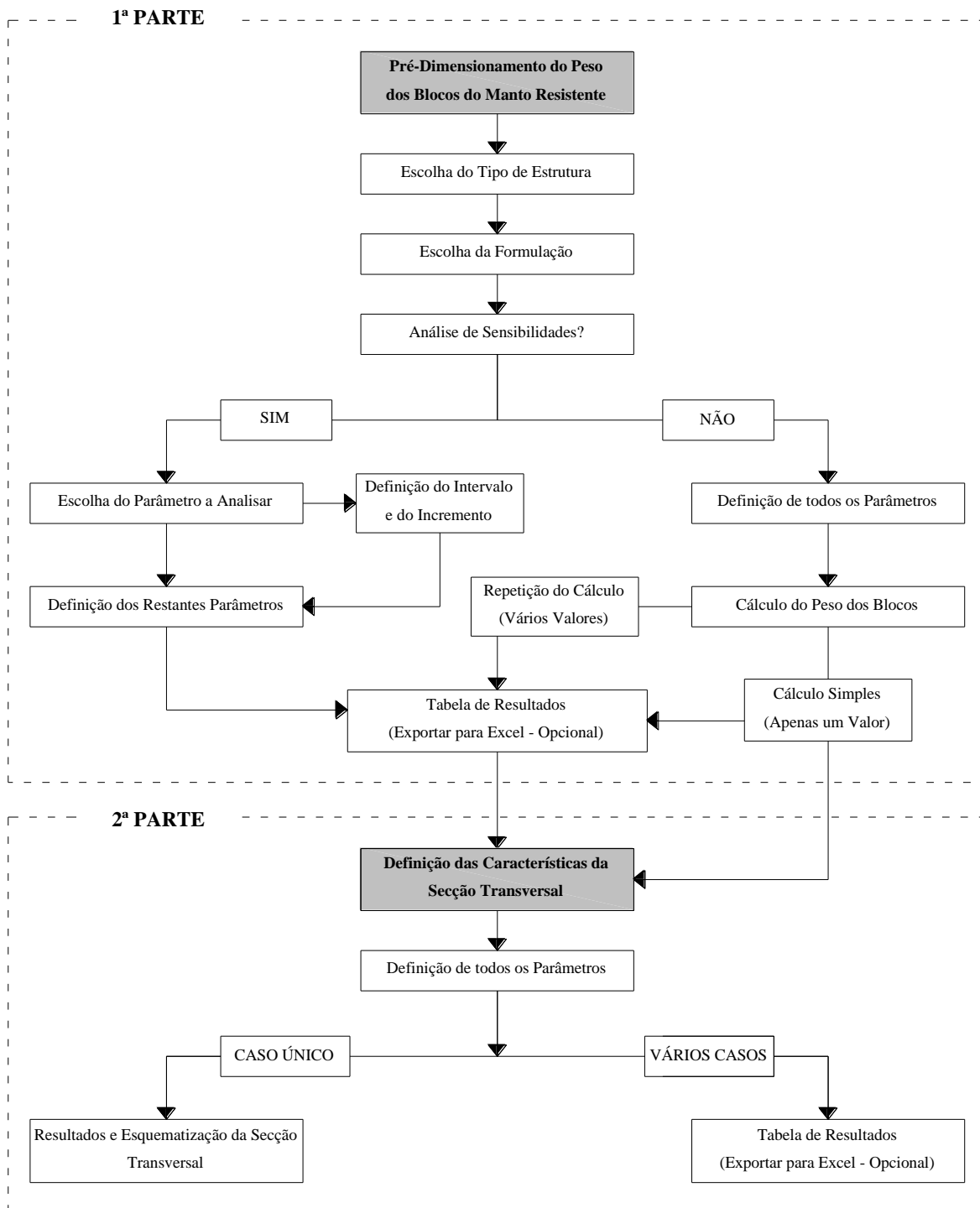


Figura 3.12: Organograma do modelo XD-Coast.

Para o cálculo do peso dos blocos a colocar no manto resistente o programa tem disponíveis cinco formulações distintas, correspondentes a três tipos de obras diferentes (não galgável, galgável e submersa). De acordo com Fleming *et al.* (1998), as formulações mais comuns para o pré-dimensionamento do peso dos blocos do manto resistente são as de Hudson e de

van der Meer. Por este motivo, foram as formulações apresentadas por estes autores as contempladas no programa para o cálculo do peso unitário dos blocos. No programa desenvolvido adotou-se a nomenclatura indicada na Tabela 3.2 para as diferentes formulações. As referências indicadas na tabela foram consultadas em Fleming *et al.* (1998), Burcharth e Hughes (2006) e em CIRIA (2007b).

Tabela 3.2: Nomenclatura adotada para as formulações do manto resistente.

TIPO DE ESTRUTURA	NOMENCLATURA ADOTADA	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA
	Hudson (genérica)	Hudson (1974)
Não galgável	van der Meer (enrocamento)	van der Meer (1988a)
	van der Meer e Jong (tetrápodos)	van der Meer (1988b) e De Jong (1996)
Galgável	van der Meer (enrocamento)	van der Meer (1991)
Submersa	van der Meer (enrocamento)	van der Meer (1991)

3.4.2. Formulações do XD-Coast

Descrevem-se, nesta secção, resumidamente, os conceitos teóricos relativos a cada uma das formulações de pré-dimensionamento do peso dos blocos do manto resistente incluídas no programa XD-Coast, organizadas por tipo de obra: não galgável, galgável e submersa. Por fim, apresentam-se as formulações relativas às restantes características da secção transversal.

Estruturas não galgáveis são estruturas com cotas de coroamento suficientemente elevadas, para as quais apenas ocorre galgamento quando sujeitas a condições de temporal muito severas. A ação das ondas sobre os taludes das estruturas não galgáveis é mais prejudicial comparativamente aos restantes tipos de obra, o que implica a necessidade de pesos maiores para os blocos do manto resistente. Para as estruturas não galgáveis são apresentadas três formulações distintas: Hudson (genérica), van der Meer (enrocamento) e van der Meer e Jong (tetrápodos).

Hudson (genérica)

A formulação de Hudson permite o cálculo do peso unitário dos blocos do manto resistente de estruturas não galgáveis e considera uma abordagem simplista da agitação marítima

(carácter regular). De acordo com Fleming *et al.* (1998), Burcharth e Hughes (2006) e CIRIA (2007b), entre outros, para o caso de estruturas em enrocamento, a formulação de Hudson traduz-se pelas seguintes expressões:

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = (K_D \cot \alpha)^{1/3} \quad \text{ou} \quad M_{50} = \frac{\rho_s H^3}{K_D \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)^3 \cot \alpha} \quad (3.33)$$

Onde H representa a altura de onda incidente de projecto, D_{n50} corresponde ao comprimento da aresta de um cubo de volume equivalente ao bloco, Δ é a densidade relativa ($\Delta = \rho_s / \rho - 1$), ρ_s e ρ são a massa volúmica do material e da água respetivamente, K_D representa o coeficiente de estabilidade, α a inclinação do talude, e M_{50} pode relacionar-se com D_{50} pela expressão seguinte:

$$M_{50} = \rho_s D_{n50}^3 \quad (3.34)$$

Considerando W o peso unitário dos blocos constituintes do manto resistente (Expressão 3.35), γ_s e γ o peso volúmico do material e o peso volúmico da água, respetivamente, obtém-se a Expressão 3.36.

$$W = M_{50} g \quad (3.35)$$

$$W = \frac{\gamma_s H^3}{K_D \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right)^3 \cot \alpha} \quad (3.36)$$

Apesar de ser amplamente utilizada e do elevado interesse nas aplicações práticas, a formulação de Hudson possui algumas limitações devido à não inclusão de alguns parâmetros hidrodinâmicos, considerados influentes na estabilidade da estrutura (período de onda, declividade da onda, duração do temporal, etc., apesar de serem considerados implicitamente no coeficiente de estabilidade, K_D). O facto de apenas considerar núcleos permeáveis e estruturas onde não são admissíveis galgamentos, associado às incertezas relativas aos efeitos de escala aquando dos ensaios para a determinação do coeficiente de estabilidade, são outras das limitações associadas a esta formulação (Fleming *et al.*, 1998).

Van der Meer (enrocamento)

A formulação de van der Meer surgiu com o principal objetivo de suprimir algumas das principais lacunas da formulação de Hudson. Assim, segundo Fleming *et al.* (1998) e Taveira-Pinto e Neves (2003), esta proposta considera o carácter irregular da agitação

marítima, diferentes valores para a permeabilidade do núcleo e camadas inferiores, diferentes níveis de dano admissíveis para a estrutura e diferentes condições de rebentação da onda (oscilatória/mergulhante).

Para o caso de estruturas não galgáveis, com mantos resistentes constituídos por duas camadas de enrocamento e considerando ondas com rebentação oscilatória e ondas com rebentação mergulhante, são propostas, respetivamente, as Expressões 3.37 e 3.38 (Burcharth e Hughes, 2006; CIRIA, 2007b). Para van der Meer (1988a), a classificação do tipo de rebentação depende do valor do número de Iribarren médio (ξ_m , ver Expressão 3.6, quando considerada a declividade média ao largo, s_{om} , ver Expressão 3.7) e crítico (ξ_c , Expressão 3.39). O autor considera rebentação do tipo oscilatório quando $\xi_m > \xi_c$ e rebentação do tipo mergulhante quando $\xi_m < \xi_c$.

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = 1.0 S^{0.2} P^{-0.13} N_z^{-0.1} (\cot \alpha)^{0.5} \xi_m^P \quad (3.37)$$

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = 6.2 S^{0.2} P^{0.18} N_z^{-0.1} \xi_m^{-0.5} \quad (3.38)$$

$$\xi_c = (6.2 P^{0.31} (\tan \alpha)^{0.5})^{1/(P+0.5)} \quad (3.39)$$

O valor de S representa a área erodida relativa ou nível de dano, que depende da inclinação do talude e do nível de danos pretendido para a estrutura. O valor de P corresponde ao factor de permeabilidade e N_z ao valor do número de ondas (dependente da duração do temporal e do período da onda, T). Conhecido o valor do D_{n50} , o peso unitário dos blocos do manto resistente (W) obtém-se recorrendo às Expressões 3.34 e 3.35.

Van der Meer e Jong (tetrápodos)

De acordo com Taveira-Pinto e Neves (2003), as formulações sugeridas por van der Meer para mantos com blocos de betão tiveram como base o dimensionamento proposto para mantos de enrocamento. Apresentam-se de seguida formulações relacionadas com a utilização de tetrápodos.

Segundo Taveira-Pinto e Neves (2003), Burcharth e Hughes (2006) e CIRIA (2007b), van der Meer (1988b) propõe a seguinte expressão para mantos com duas camadas de tetrápodos:

$$\frac{H}{\Delta D_n} = \left(3.75 \left(\frac{N_{od}}{\sqrt{N_z}} \right)^{0.5} + 0.85 \right) s_{om}^{-0.2} \quad (3.40)$$

Onde D_n representa o valor do diâmetro nominal do bloco e N_{od} representa o número de blocos deslocados do manto resistente, numa camada de espessura D_n , ou seja, representa o nível de dano associado à estrutura. A expressão anterior é válida apenas quando considerados taludes com inclinação $H/V = 3/2$ ($\approx 34^\circ$), permeabilidades de 0.4 e número de Iribarren médio (ξ_m) compreendido entre 3 e 6. CIRIA (2007b) afirma que a Expressão 3.40 só é válida para o caso de ondas com rebentação do tipo oscilatória, ou seja, segundo van der Meer (1988a), quando $\xi_m > \xi_c$ (definidos pela Expressão 3.6 e 3.39, respetivamente).

De acordo com CIRIA (2007b), De Jong (1996) propõe uma nova formulação, baseada na anterior, válida, no entanto, para ondas com rebentação mergulhante (Expressão 3.41).

$$\frac{H}{\Delta D_n} = \left(8.6 \left(\frac{N_{od}}{\sqrt{N_z}} \right)^{0.5} + 3.94 \right) s_{om}^{-0.2} \quad (3.41)$$

Em ambas as expressões, o valor do peso unitário dos blocos do manto resistente (W), obtém-se a partir do valor de D_{n50} , através das Expressões 3.34 e 3.35.

Estruturas galgáveis são estruturas para as quais é admitido galgamento, isto é, para determinada altura de onda incidente, a altura de espraiamento correspondente pode atingir valores superiores ao coroamento da estrutura. Para o pré-dimensionamento de estruturas galgáveis descreve-se a formulação proposta por van der Meer, para enrocamento.

Van der Meer (enrocamento)

De acordo com Burcharth e Hughes (2006) e CIRIA (2007b), van der Meer (1991) propõe, para as estruturas galgáveis, que o valor do diâmetro dos blocos a colocar no manto resistente ($D_{n50,Galgável}$) resulte do valor do diâmetro obtido considerando a estrutura não galgável (através das Expressões 3.37 e 3.38), afetado de uma fator de redução f_i (Expressões 3.42 e 3.43). Conhecido o valor de D_{n50} da estrutura galgável, o valor correspondente ao peso unitário dos blocos obtém-se através das Expressões 3.34 e 3.35.

$$D_{n50,Galgável} = f_i D_{n50,Não\ Galgável} \quad (3.42)$$

$$f_i = \left(1.25 - 4.8 \frac{R_c}{H} \sqrt{\frac{s_{op}}{2\pi}} \right)^{-1} \quad (3.43)$$

Na Expressão 3.43, s_{op} representa a declividade da onda de pico (Expressão 3.7, com características ao largo de pico). O valor de L_{op} relaciona-se com o período de onda de pico (T_p), através da Expressão 3.8 (considerando valores de pico nestas relações). O valor de R_c corresponde à altura de galgamento, ou seja, representa o desnível entre o coroamento da estrutura e o nível médio da superfície da água do mar, NMM (Figura 3.13). A Expressão 3.43 apenas é válida no caso de se verificar a condição da Expressão 3.44, de onde se deduz que $0.8 < f_i < 1.0$.

$$0 < \frac{R_c}{H} \sqrt{\frac{s_{op}}{2\pi}} < 0.052 \quad (3.44)$$

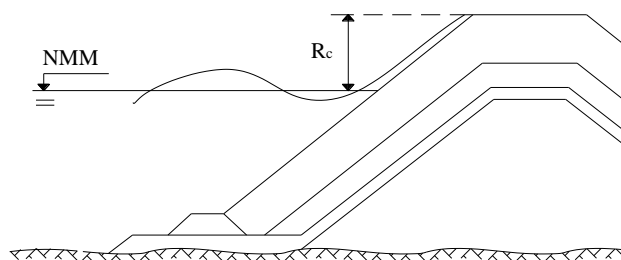


Figura 3.13: Representação da altura de galgamento (Burcharth e Hughes, 2006).

Estruturas submersas são estruturas para as quais a cota de coroamento se encontra abaixo do nível médio das águas. Relativamente a este tipo de estruturas é descrita a formulação de van der Meer para enrocamento (resultados de ensaios com ondas irregulares e taludes com inclinação $H/V = 2/1$), proposta por van der Meer (1991).

Van der Meer (enrocamento)

No caso de estruturas submersas, de acordo com Taveira-Pinto e Neves (2003) e Burcharth e Hughes (2006), van der Meer (1991) propõe que, para taludes com inclinação $H/V = 2/1$ ($\approx 27^\circ$) e considerando o carácter irregular da agitação, se utilize a expressão seguinte para o cálculo do peso unitário dos blocos a colocar no manto resistente:

$$\frac{h'_c}{d} = (2.1 + 0.1S) \exp(-0.14N_s^*) \quad (3.45)$$

Onde h'_c e d correspondem, respetivamente, à altura total da obra submersa e à profundidade local (Figura 3.14), e N_s^* representa o número de estabilidade espectral (Expressão 3.46).

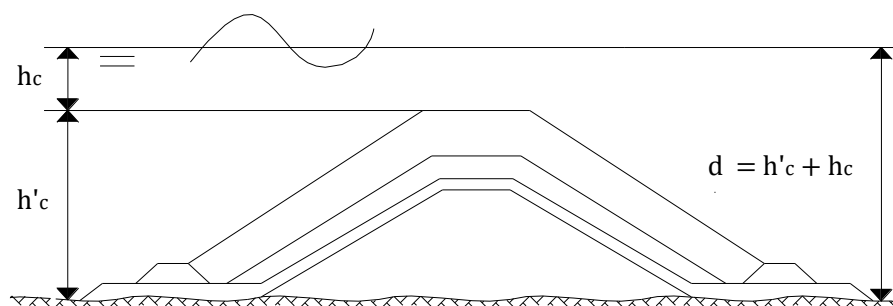


Figura 3.14: Representação da altura da obra submersa.

$$N_s^* = \frac{H}{\Delta D_{n50}} s_p^{-1/3} \quad (3.46)$$

O parâmetro s_p representa a declividade de pico (ver Expressão 3.7, para valores de pico), que depende da altura de onda (H) e do comprimento de onda local (L_p). O valor de L_p obtém-se a partir do valor do comprimento de onda de pico ao largo (L_{op}), que por sua vez depende do valor do período de pico (T_p). Conhecido o valor do D_{n50} , o peso unitário dos blocos do manto resistente (W) obtém-se recorrendo às Expressões 3.34 e 3.35.

Descrevem-se, por fim, as formulações relativas à determinação dos diferentes parâmetros considerados para a secção transversal no XD-Coast. De referir que, cada um dos parâmetros (Figura 3.15) depende do valor obtido para o peso unitário dos blocos do manto resistente (1ª parte do organigrama da Figura 3.12) e ainda do peso volúmico do material.

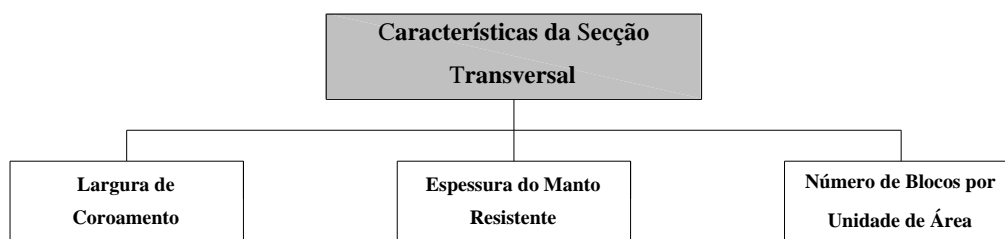


Figura 3.15: Parâmetros considerados para a avaliação das características da secção transversal.

O XD-Coast calcula ainda, internamente, o peso unitário dos blocos a colocar nas subcamadas, filtros e núcleo (Figura 3.16), de acordo com as relações apresentadas na Tabela 3.3 (baseadas em Burcharth e Hughes, 2006).

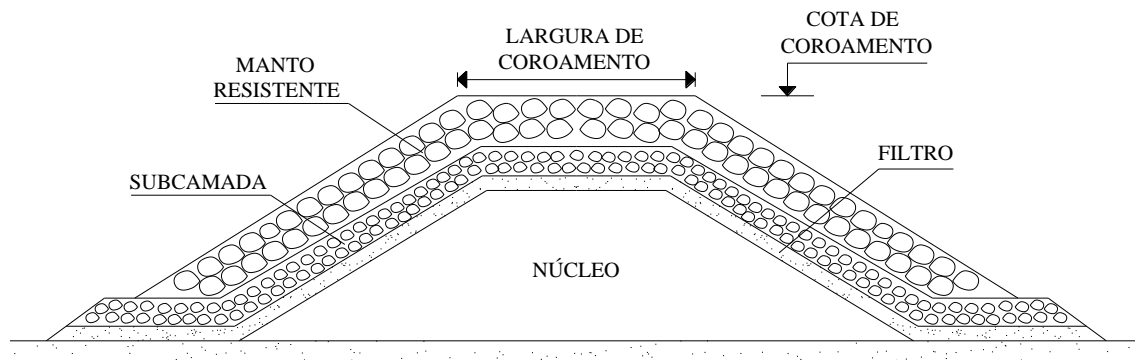


Figura 3.16: Seção transversal-tipo de estruturas em talude (Burcharth e Hughes, 2006).

Tabela 3.3: Peso unitário dos blocos a colocar nas diferentes camadas da seção transversal.

CAMADA	PESO UNITÁRIO DOS BLOCOS
Manto resistente	W
Subcamada	W/10
Filtros	W/200
Núcleo	W/4000

Largura de coroamento

A largura de coroamento (B) depende, segundo Burcharth e Hughes (2006), do número de blocos colocados na berma, n_b (recomenda-se um mínimo de três blocos), do peso unitário dos blocos do manto resistente, W , do peso volúmico do material, γ_s , e do coeficiente empírico, k_Δ , de acordo com a seguinte expressão:

$$B = n_b k_\Delta \left(\frac{W}{\gamma_s} \right)^{1/3} \quad (3.47)$$

De referir que, o funcionamento e circulação dos equipamentos de construção e reparação das estruturas podem ser condicionantes para o valor da largura de coroamento, sendo recomendável um valor superior a seis metros (Pita, 1986).

Espessura do manto resistente

De acordo com Burcharth e Hughes (2006), a espessura do manto resistente (r) depende do número de camadas de blocos constituintes (n), do peso unitário dos blocos do manto

resistente (W), do peso volúmico do material (γ_s) e do coeficiente empírico, k_Δ (referido anteriormente). A Expressão 3.48 traduz a espessura do manto resistente:

$$r = n k_\Delta \left(\frac{W}{\gamma_s} \right)^{1/3} \quad (3.48)$$

Número de blocos por unidade de área

Segundo Burcharth e Hughes (2006), o número de blocos por unidade de área (N_a/A), obtém-se através da Expressão 3.49 e depende, para além dos parâmetros referidos para a espessura do manto resistente, da porosidade, P' (expressa em %), função do tipo de bloco considerado.

$$\frac{N_a}{A} = n k_\Delta \left(1 - \frac{P'}{100} \right) \left(\frac{\gamma_s}{W} \right)^{2/3} \quad (3.49)$$

As expressões e considerações descritas apenas são válidas numa fase de pré-dimensionamento, uma vez que, são baseadas em métodos empíricos, possuindo assim, algumas limitações. As considerações teóricas inerentes ao programa XD-Coast, bem como a descrição das suas funcionalidades, foram apresentadas de forma resumida, podendo ser consultadas com mais detalhe em Lima (2011) e Lima *et al.* (2011, 2013).

3.5. Custo-Benefício

A metodologia de custo-benefício que se implementou no presente trabalho já foi aplicada por Roebeling *et al.* (2011) à zona central da costa portuguesa, recorrendo ao modelo numérico LTC e à metodologia de Transferência de Benefícios (Brouwer, 2000) para avaliar o custo-benefício de diferentes cenários de intervenção de defesa costeira.

Como em qualquer metodologia de análise custo-benefício, a única medida que permite avaliar benefícios e custos na mesma unidade é a unidade monetária, sendo importante referir que para períodos de tempo diferentes é necessário atualizar os valores para um ano de referência. Assim, todos os valores monetários (V) devem ser convertidos em valores atualizados (VA) aplicando uma taxa de desconto ou atualização (r), Expressão 3.50 (Zerbe e Dively, 1994), considerando um determinado período, t (ano em análise).

$$VA_t = \frac{V_t}{(1+r)^t} \quad (3.50)$$

Os valores nominais e atuais de custos designam-se por VC e VAC , respetivamente e, analogamente, os valores nominais e atuais de benefícios designam-se por VB e VAB . A verificação da sustentabilidade económica de cada intervenção é feita a partir dos fluxos líquidos acumulados de benefícios e custos. Assim, a viabilidade económica de cada cenário em análise num determinado período de tempo (t) é avaliada a partir do valor atual líquido (VAL) e do rácio benefício-custo (RBC), Expressão 3.51 e Expressão 3.52, respetivamente.

$$VAL_t = \sum_{i=0}^t VAB_i - \sum_{i=0}^t VAC_i = \sum_{i=0}^t \frac{VB_i}{(1+r)^i} - \sum_{i=0}^t \frac{VC_i}{(1+r)^i} \quad (3.51)$$

$$RBC_t = \frac{\sum_{i=0}^t VAB_i}{\sum_{i=0}^t VAC_i} = \frac{\sum_{i=0}^t \frac{VB_i}{(1+r)^i}}{\sum_{i=0}^t \frac{VC_i}{(1+r)^i}} \quad (3.52)$$

O VAL representa o balanço acumulado entre os benefícios e os custos atuais. Assim, assume valores positivos sempre que a intervenção é economicamente viável, existindo uma predominância dos benefícios em relação aos custos atuais. O RBC de um projeto representa a relação entre o somatório dos valores atuais de benefícios e de custos, sendo a intervenção rentável em termos económicos quando o RBC é superior a 1 (Roebeling *et al.*, 2011, 2012).

De referir que os custos totais (VC) associados a uma intervenção de defesa costeira englobam os custos de construção, custos de manutenção periódica e os custos inerentes a eventuais impactos económicos, sociais, culturais e ambientais. Tanto os custos iniciais de construção como os custos de manutenção dependem do tipo de intervenção a realizar (esporão, estrutura aderente, alimentação artificial, etc.) e variam consoante diversos fatores (materiais, secção transversal, localização, etc.) sendo essencial a recolha de dados de obras já existentes, para fundamentar a estimativa do custo correspondente.

A quantificação de benefícios (VB), pode ser realizada com recurso a modelos de evolução da linha de costa, através da quantificação das áreas de território “ainda não perdido”

(AANP), que representa a mais-valia introduzida pela intervenção de defesa costeira, quando comparada com um cenário de não intervenção (Roebeling *et al.*, 2011, 2012). Mesmo que o território continue em erosão, o facto de se adiar no tempo a perda de território permite a obtenção de um benefício que interessa quantificar. Desta forma, definem-se como benefícios positivos, as áreas de acreção e as áreas “ainda não perdidas”, e como benefícios negativos, as áreas que resultem em erosão por efeito da própria intervenção.

Note-se que, o valor associado aos custos (construção e manutenção) e associado aos benefícios é um assunto relevante, uma vez que depende de diversos fatores, variando ao longo do tempo e de local para local. A ferramenta desenvolvida vem facilitar a análise de sensibilidade dos valores atribuídos a custos e benefícios, mas a introdução dos valores que os representam é da inteira responsabilidade do utilizador, que os deve definir tendo em conta, simultaneamente, aspetos económicos, sociais, culturais e ambientais.

3.6. Notas Finais

O presente capítulo teve por objetivo a descrição dos modelos e formulações que servem de base ao desenvolvimento da ferramenta numérica de análise de estruturas de defesa costeira e à análise de desempenho do modelo numérico LTC, principais objetivos do presente trabalho de doutoramento.

A formulação analítica de Pelnard-Considère (1956), descrita na secção 3.1, foi aplicada ao caso de estudo em análise no Capítulo 5, de forma a permitir uma comparação com resultados decorrentes de simulações com os modelos numéricos (secção 5.4). Os resultados obtidos com o modelo numérico de evolução da linha de costa GENESIS, apresentado na secção 3.2, foram também utilizados de forma a avaliar o desempenho do modelo numérico LTC. Estes dois modelos, apesar de terem os mesmos princípios base, a teoria de “uma linha” (secção 2.1.1), apresentam pressupostos distintos, os quais foram também analisados no Capítulo 5 (secção 5.3.1).

Apresentados os modelos de evolução da linha de costa em análise neste trabalho (Pelnard-Considère, 1956, secção 3.1, GENESIS, secção 3.2 e LTC, secção 3.3), foi descrito o modelo XD-Coast (secção 3.4), ponto de partida para o módulo de pré-dimensionamento

da nova ferramenta numérica (secção 4.2). Por fim, a secção 3.5 resumiu a metodologia considerada na avaliação da componente de custo-benefício (secção 4.3).

Para finalizar a apresentação dos modelos de base ao desenvolvimento deste trabalho, são resumidas, na secção 3.6.1, as principais mais-valias e lacunas identificadas para os modelos GENESIS, LTC e XD-Coast, e apresentadas propostas de melhoria, traduzidas na sua inclusão na nova ferramenta numérica (secção 3.6.2).

3.6.1. Resumo das potencialidades e lacunas dos modelos

Modelo numérico GENESIS

O GENESIS, modelo numérico de evolução da linha de costa baseado na teoria de “uma linha”, é mundialmente utilizado, contando já com mais de 1000 licenças de utilização (Hanson, 2015), sendo o simulador oficial de evolução da linha de costa do *United States Army Corps of Engineers*. Esta ampla utilização é em parte consequência das diversas potencialidades do modelo numérico, das quais se destacam as seguintes: 1) interface gráfica disponível para o utilizador; 2) possibilidade de utilização de um modelo externo de propagação do clima de agitação (STWAVE), permitindo assim a obtenção de resultados mais precisos no caso de consideração de batimetrias e climas de agitação mais complexos; 3) possibilidade de consideração de diferentes intervenções de defesa costeira: esporões, quebramares, estruturas longitudinais aderentes, quebramares destacados e alimentações artificiais de praia; 4) possibilidade de consideração de estruturas de defesa compostas, como é o caso de estruturas em T ou em Y; 5) incorporação do efeito da difração nas imediações das estruturas de defesa costeira; 6) possibilidade de simulação para diferentes escalas geográficas (1 a 300 km) e temporais (1 a 30 anos); e 7) consideração do efeito da transmissão de ondas através de quebramares destacados.

No entanto, apesar da sua utilização generalizada, o modelo numérico tem identificadas algumas limitações, tais como: 1) apenas deve ser aplicado quando o transporte sedimentar longitudinal é o mecanismo de transporte preponderante, caso contrário a sua utilização fica comprometida, uma vez que o transporte transversal não é tido em conta; 2) o transporte longitudinal é devido unicamente à ação das ondas e correntes induzidas pelas ondas e varia

consoante o ângulo de incidência das mesmas; 3) a forma do perfil mantém-se inalterada ao longo do tempo e este move-se apenas paralelamente a si próprio; 4) assume que o perfil não sofre qualquer alteração para lá da profundidade de fecho (*DoC*); e 5) utiliza um valor único da profundidade de fecho para toda a costa (na proximidade de grandes estruturas, como esporões, o clima de agitação pode ser mais calmo e conseqüentemente a profundidade de fecho ser menor, Coelho, 2005).

Modelo numérico LTC

O modelo numérico LTC é também um modelo de simulação de evolução da linha de costa, baseado na teoria de “uma linha”, mais recente quando comparado com o modelo numérico GENESIS, e, apesar de já apresentar um vasto leque de aplicações, distancia-se ainda do grau de utilização do modelo GENESIS.

Os pressupostos de base são os mesmos do modelo GENESIS, no entanto, o LTC diferencia-se dos restantes modelos de “uma linha” por permitir ajustar a topografia/batimetria em cada passo de cálculo. Assim, no modelo LTC procede-se ao ajuste do perfil ativo com as zonas adjacentes, pelo que, a variação da posição da linha de costa além de depender do balanço sedimentar, depende também da batimetria e topografia associada a cada perfil transversal.

A principal limitação à utilização do modelo LTC prende-se com o facto de não ter interface gráfica para o utilizador, o que dificulta a entrada de dados e limita a visualização de resultados. Os trabalhos desenvolvidos por Coelho (2005) e Silva (2010) resumem outras lacunas do modelo LTC: 1) o transporte transversal não é simulado; 2) o cálculo da difração é feito por dois métodos expeditos, correspondendo a aproximações; 3) os esporões são forçosamente considerados barreiras impermeáveis, admitindo que retêm a totalidade dos sedimentos, permitindo a passagem de sedimentos apenas à frente da obra; 4) o período de onda é função da altura de onda (Expressão 3.19), não sendo possível considerar a sua distribuição em frequência; 5) a propagação da onda desde o largo até à costa é feita de forma simplista, não havendo a possibilidade de interligação com modelos externos de cálculo rigoroso; e 6) não permite a simulação de quebra-mares destacados nem estruturas não retilíneas.

Constata-se, portanto, que apesar do elevado potencial que possui, o modelo numérico LTC tem ainda algumas lacunas e carece também de maior validação e análise de desempenho, continuando assim em constante desenvolvimento, e sendo por isso assunto do presente trabalho de doutoramento.

Software XD-Coast

O XD-Coast é um programa que permite o pré-dimensionamento da secção transversal de estruturas costeiras e apresenta como principal mais-valia o facto de ser rápido e expedito e possibilitar a realização de análises de sensibilidade, permitindo desta forma uma rápida comparação entre várias soluções. Possui uma interface gráfica de fácil utilização e permite a exportação das tabelas de resultados para programas de cálculo que facilitam a análise de resultados.

Como principais limitações destaca-se o facto do número reduzido de formulações que contempla, quando comparado com a panóplia de formulações empíricas existentes na bibliografia, e a consideração simplista das ações (altura de onda introduzida pelo utilizador). No entanto, há uma diversidade de funcionalidades e opções que podem ainda ser incorporadas no modelo, de forma a auxiliar de forma mais eficaz a fase de pré-dimensionamento da secção transversal das estruturas costeiras.

3.6.2. Propostas de melhoria

Como referido, neste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta numérica de análise de estruturas costeiras, que engloba as componentes já existentes de simulação da evolução da linha de costa (LTC) e pré-dimensionamento (XD-Coast) e uma nova funcionalidade, para análise custo-benefício.

No que diz respeito à simulação da evolução da linha de costa pretendeu-se colmatar algumas das lacunas já identificadas no modelo numérico LTC e acrescentar funcionalidades, sendo o principal objetivo centrado no desenvolvimento de uma interface gráfica e na análise do desempenho do modelo (através de comparação com o modelo analítico de Pelnard-Considère, 1956, e com o modelo numérico GENESIS).

Relativamente ao modelo XD-Coast, constata-se que apesar de existirem diversas ferramentas numéricas de pré-dimensionamento da secção transversal no mercado, o desenvolvimento e melhoria deste modelo apresenta-se como uma mais-valia para o módulo de pré-dimensionamento da ferramenta de análise de estruturas costeiras, uma vez que, sendo o código acessível, é possível incorporar novas formulações (bem como desenvolvimentos nas já existentes), novas funcionalidades e ainda a possibilidade de quantificar os custos associados a cada solução, através da quantificação de volumes de materiais associados às intervenções.

Conclui-se assim que, o desenvolvimento e melhoria dos modelos LTC e XD-Coast facilita a quantificação de custos e de benefícios das intervenções, servindo de base ao módulo de custo-benefício que se incorporou na nova ferramenta.

Capítulo 4

FERRAMENTA NUMÉRICA COAST

4. FERRAMENTA NUMÉRICA COAST

O principal objetivo do presente trabalho de investigação consistiu no desenvolvimento de uma ferramenta numérica de análise de intervenções de defesa costeira, capaz de auxiliar as entidades responsáveis pela gestão do litoral na procura de soluções otimizadas, ajudando à tomada de decisões fundamentadas. Foi objetivo que a ferramenta numérica reunisse a capacidade de avaliar o impacto da evolução da linha de costa, pré-dimensionar intervenções de defesa costeira e quantificar custos e benefícios, constituindo, desta forma, três módulos distintos que se interligam entre si (Figura 4.1).



Figura 4.1: Janela inicial da COAST – *Coastal Optimization ASsessment Tool*.

A análise do impacto das intervenções de defesa costeira para mitigação dos problemas de erosão costeira contempla três fases distintas, correspondentes a cada um dos três módulos que compõem a ferramenta numérica. No entanto, quer o módulo de evolução da linha de costa, quer o módulo de pré-dimensionamento podem ser utilizados de forma isolada, caso o utilizador assim pretenda. A utilização do terceiro módulo, relativo à análise custo-benefício, implica a utilização sequencial do módulo de evolução da linha de costa e do módulo de pré-dimensionamento de estruturas costeiras.

Neste capítulo procede-se à apresentação da ferramenta numérica desenvolvida, descrevendo as funcionalidades dos módulos e algumas das janelas que os compõem. Cada módulo corresponde a uma secção distinta, secção 4.1 relativa ao módulo de evolução da

linha de costa, secção 4.2 para o módulo de pré-dimensionamento e, por fim, secção 4.3 para o módulo de custos e benefícios.

4.1. Módulo de evolução da linha de costa

O desenvolvimento do modelo numérico LTC traduz o módulo de evolução da linha de costa, parte integrante da ferramenta de análise de intervenções de defesa costeira, COAST. A melhoria e o aperfeiçoamento do modelo dividem-se em duas fases diferentes, que se interligam entre si (Figura 4.2): o desenvolvimento de uma interface gráfica, de pré e pós-processamento, em *Microsoft Visual C#* (designada neste trabalho por LTC-C#) e a melhoria do algoritmo de evolução de linha da costa já existente, desenvolvido em linguagem Fortran (LTC-Fortran), dando origem à versão LTC-ML2017. A secção 4.1.1 descreve o modo como foi desenvolvida a interface gráfica para o modelo numérico LTC, enquanto que na secção 4.1.2 é apresentada a interface desenvolvida. Na secção 4.1.3 são descritas as principais alterações realizadas no algoritmo da versão atual do LTC, o LTC-ML2017.

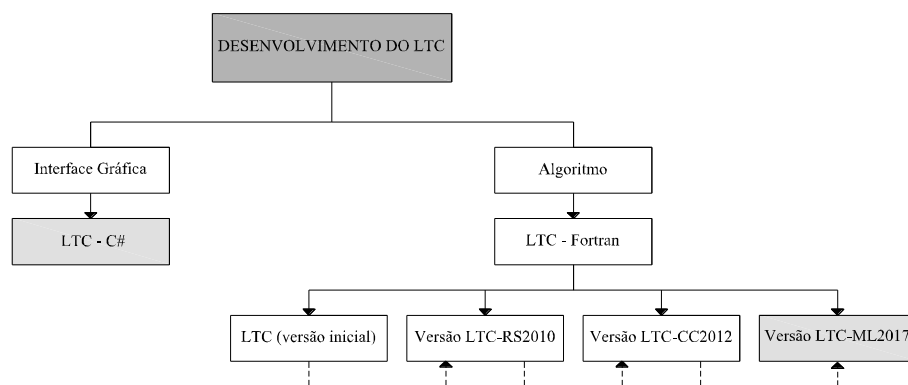


Figura 4.2: Desenvolvimento do modelo numérico LTC.

4.1.1. Interface gráfica para o LTC

O presente subcapítulo descreve as considerações relativas ao desenvolvimento da interface gráfica, apresentando sucintamente a linguagem de programação utilizada e descrevendo a interação entre o novo programa de pré e pós-processamento e o algoritmo já existente.

4.1.1.1. Linguagem de programação

A linguagem de programação adotada para o desenvolvimento da interface gráfica foi a linguagem C#, constituída por um amplo conjunto de ferramentas de desenvolvimento da *Microsoft*, especialmente desenhadas para operar sobre a plataforma *framework* .NET - o *Microsoft Visual Studio* 2010.

A linguagem C# foi desenvolvida em 2001 e consiste numa evolução das linguagens C e C++, tendo, no entanto, muitas influências de Java. É uma linguagem de programação recente, contendo por isso, muitos dos melhores recursos de outras linguagens já existentes (Liberty e MacDonald, 2006). Apresenta algumas vantagens, relativamente a outras linguagens que usam a plataforma .NET, pelo facto de ter sido criada com o objetivo de usar esta plataforma, enquanto outras tiveram que ser adaptadas (Watson *et al.*, 2010).

O C# é uma linguagem de programação orientada a objetos (POO). A utilização da tecnologia POO na linguagem C#, devido à sua versatilidade e redução do tempo de execução, reflete-se no aumento da produtividade dos programadores, justificando-se assim a sua utilização no presente trabalho. Para uma melhor compreensão dos conceitos relacionados com a POO pode consultar-se Liberty e MacDonald (2006), Watson *et al.* (2010) e Loureiro (2011).

4.1.1.2. Relação entre a interface gráfica e o algoritmo existente

O novo programa de pré e pós-processamento, em linguagem de programação C# (LTC-C#) interage diretamente com o executável da versão desenvolvida em Fortran (LTC-Fortran). A Figura 4.3 mostra a sequência de ações que decorre entre a leitura dos dados e a apresentação dos resultados. O utilizador introduz todos os dados necessários no LTC-C# de pré-processamento. Internamente, os dados são lidos e transcritos para ficheiros “.dat” (enumerados na Figura 3.9), compatíveis com o executável Fortran. Estes ficheiros são gerados numa pasta temporária, onde é executado o LTC-Fortran e, conseqüentemente, originados todos os ficheiros de resultados (ficheiros “.res” enumerados na Figura 3.9). Toda a informação presente nos ficheiros de resultados da pasta temporária é importada para o LTC-C#, ficando os resultados visíveis ao utilizador (interface gráfica de pós-processamento). Os três ficheiros de resultados “.dxf”, ficam acessíveis ao utilizador, mas, tal como todos os outros, são substituídos a cada nova execução do programa.

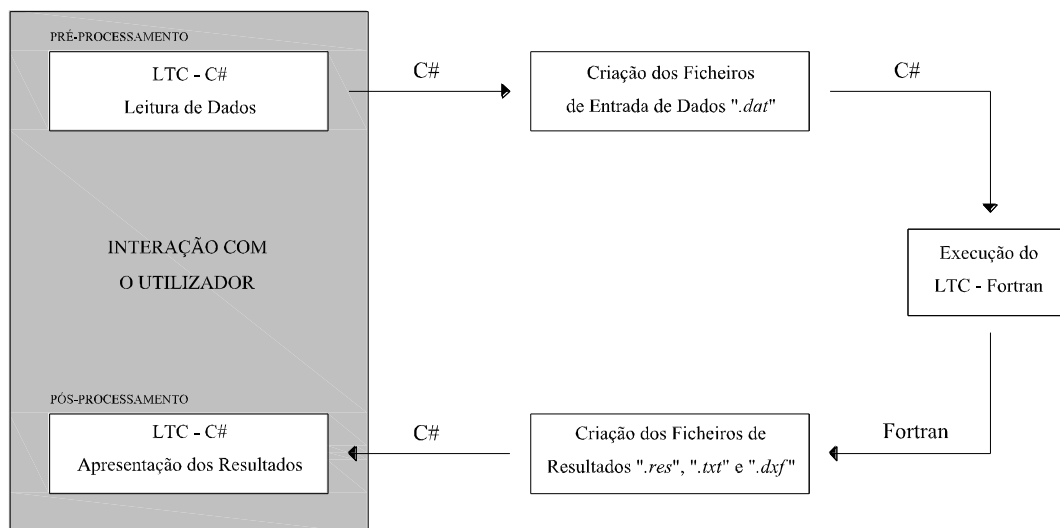


Figura 4.3: Esquematisação da interação entre LTC-C# e LTC-Fortran.

Ao longo do contínuo desenvolvimento desta ferramenta, todas as modificações ao cálculo da evolução da linha de costa devem ser concretizadas em linguagem Fortran e todas as alterações de carácter visual devem ser realizadas em linguagem C#.

4.1.2. Apresentação da interface

Nesta secção apresenta-se a interface gráfica desenvolvida, mostrando algumas janelas do módulo de evolução da linha de costa (nova versão do LTC) e descrevendo o seu modo de funcionamento e principais potencialidades. A janela de trabalho da interface (Figura 4.4) tem a particularidade de permitir visualizar sempre a zona de estudo, à medida que são alternadas as restantes secções de entrada de dados, com o objetivo de auxiliar o utilizador na definição de todas as variáveis intervenientes nas simulações em estudo.

A janela principal do programa pode considerar-se dividida em duas zonas principais: zona 1, dedicada à introdução de dados por parte do utilizador, que varia consoante a opção escolhida na barra de menus à esquerda, e a zona 2, relativa à representação do domínio de cálculo, que se mantém visível em permanência (Figura 4.4).

A introdução de dados por parte do utilizador é descrita na secção 4.1.2.1. Alguns parâmetros característicos da água e dos sedimentos, bem como escolhas de formulações foram conduzidos para janelas adicionais (descritas na secção 4.1.2.2), preenchidas por defeito, que o utilizador só altera caso considere pertinente para a sua simulação (através da barra de

menus). As principais funcionalidades da área de desenho são descritas na secção 4.1.2.3. Os resultados da simulação (secção 4.1.2.4) são apresentados numa janela de informação (zona 1) e na área de desenho (zona 2).

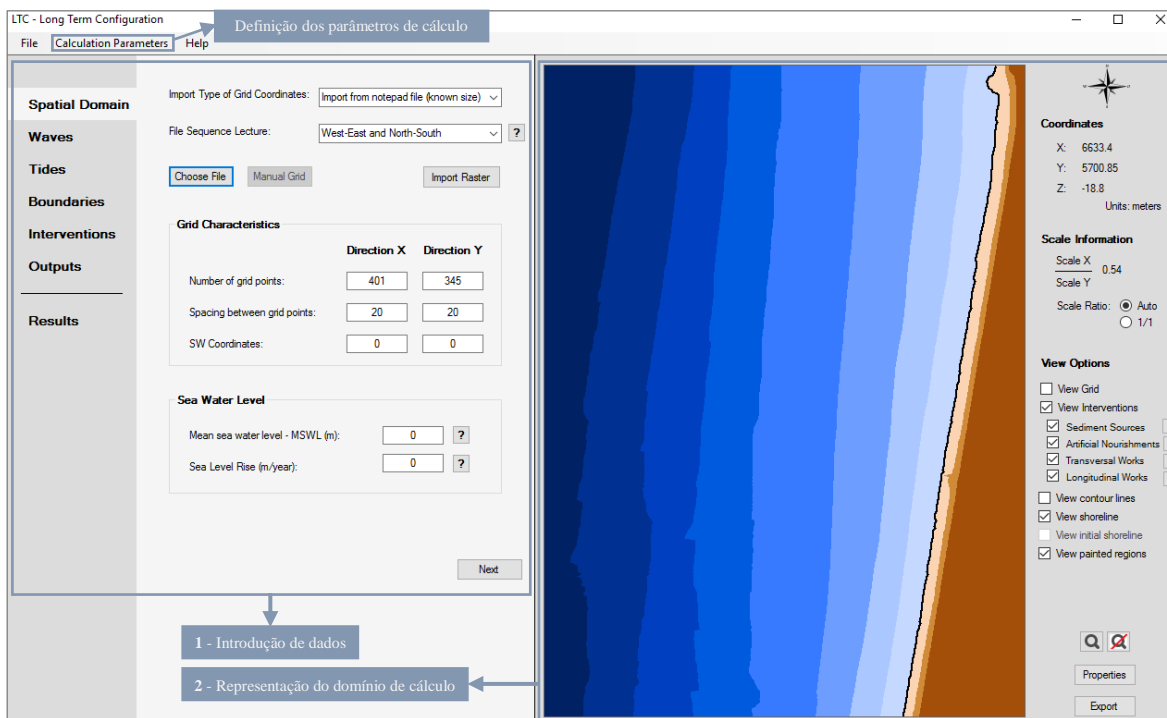


Figura 4.4: Janela principal do módulo de evolução da linha de costa.

4.1.2.1. Definição dos dados da simulação

Na versão original do LTC, a introdução de dados era realizada através do preenchimento de cinco ficheiros de dados: dados gerais (“*data.dat*”), dados de altimetria (“*coord.dat*”), condições fronteira e intervenções de defesa (“*bound.dat*”), ondas (“*wave.dat*”) e marés (“*tide.dat*”). Na interface gráfica, a introdução de dados divide-se em seis grupos fundamentais, cujo preenchimento não é necessariamente sequencial: 1) definição das características do domínio de cálculo; 2) definição do regime de ondas; 3) definição do regime de marés; 4) escolha das condições fronteira; 5) definição das intervenções de defesa costeira; e 6) características da simulação e dados de saída, sendo que, alguns dos parâmetros do ficheiro “*data.dat*” foram remetidos para janelas adicionais (secção 4.1.2.2). Após a simulação, fica disponível uma nova janela, para visualização dos resultados. Nos pontos seguintes apresenta-se cada uma das janelas correspondentes aos grupos fundamentais e descreve-se o respetivo modo de funcionamento.

1 - Definição do domínio de cálculo (“*Spatial Domain*”)

Na janela “*Spatial Domain*” (Figura 4.5) são definidos todos os parâmetros relativos à zona de estudo: definição da batimetria/topografia, definição da sequência de leitura dos dados, número de pontos da malha, espaçamento e coordenadas do ponto de origem (limite sudoeste). Para que seja possível a determinação imediata da posição da linha de costa, o utilizador deve indicar ainda nesta janela a posição do nível médio da água do mar. Por fim, deve ser indicada a taxa de variação anual da subida do nível médio do mar por efeito de alterações climáticas.

	Direction X	Direction Y
Number of grid points:	401	345
Spacing between grid points:	20	20
SW Coordinates:	0	0

Mean sea water level - MSLW (m):	2
Sea Level Rise (m/year):	0

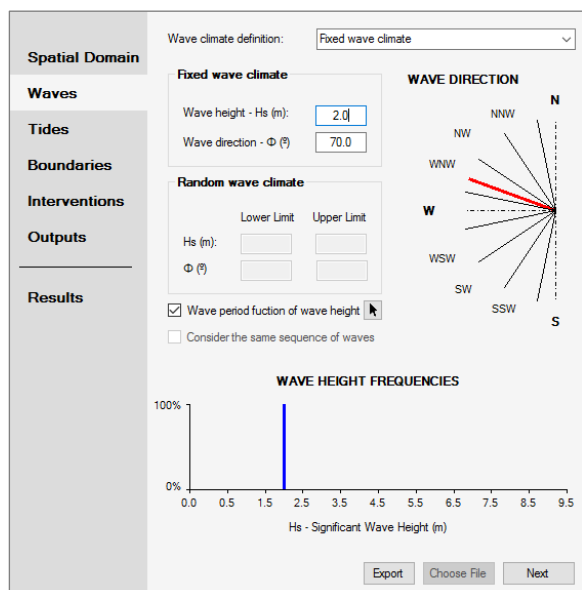
Figura 4.5: Janela de definição do domínio de cálculo (“*Spatial Domain*”).

Relativamente à introdução da batimetria/topografia do domínio de cálculo, o utilizador tem à escolha cinco hipóteses distintas: importar os dados de um ficheiro Excel[®], com dimensão conhecida ou não (na primeira opção o utilizador deve indicar previamente o número de ponto da grelha, na segunda opção, estes valores são automaticamente determinados pelo programa); importar os dados de um ficheiro de texto, com dimensão conhecida ou não (da mesma forma, na primeira opção o utilizador deve indicar previamente a dimensão); e por fim o utilizador pode introduzir a malha de pontos manualmente. Ao escolher esta última opção o utilizador deve clicar em “*Manual Grid*”, para que surja uma tabela com a dimensão da malha escolhida. Ainda nesta janela o utilizador tem como opção importar uma imagem com uma representação do domínio de cálculo, que fica carregada e é visualizada quando o utilizador pretender (ver exemplo na Figura 4.17).

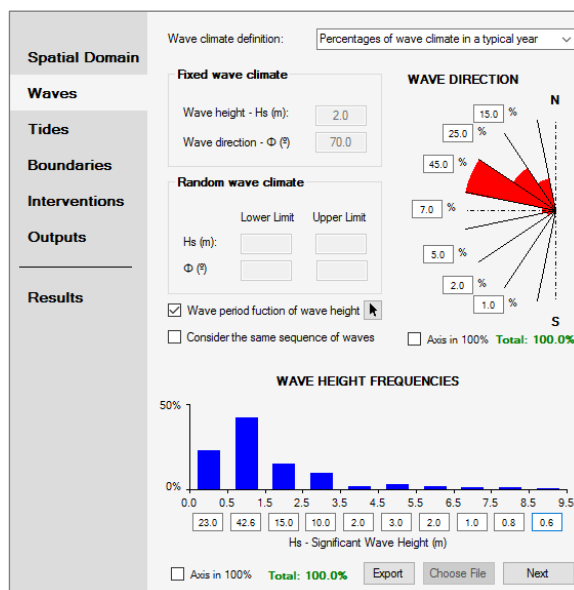
2 - Definição do regime de ondas (“Waves”)

A Figura 4.6 mostra as opções disponíveis para a introdução das características das ondas. O utilizador pode escolher uma entre cinco opções disponíveis (em “*Wave climate definition*”). A primeira opção (Figura 4.6a) considera um clima de ondas fixo. O utilizador define a altura de onda e direção de onda, características que serão constantes ao longo de todo o cálculo. As segunda e terceira opções permitem a geração de uma sequência aleatória de agitação (Figura 4.6b), com base nas percentagens de ocorrência em diferentes classes representativas de um ano típico de agitação. O utilizador deve preencher o valor das percentagens em cada classe da rosa de rumos (direção da onda) e em cada classe do histograma (altura de onda). As respetivas percentagens são automaticamente representadas na rosa de rumos e no histograma de alturas de onda e o valor total indicado sob cada um dos gráficos, por forma a auxiliar o utilizador. Com base nesta opção, o utilizador pode definir uma sequência de agitação sistematicamente igual, representativa de um ano típico de agitação, mantendo as percentagens de ocorrência, ao ativar a caixa de seleção “*Consider the same sequence wave*” (se não se considerar esta opção, em cada simulação a frequência de ocorrência é a mesma, mas as características de cada onda e a sua sequência são alteradas, pelo que o clima de agitação é diferente). Na quarta opção o utilizador define um limite máximo e mínimo para a direção e altura da onda, ficando esse limite automaticamente representado nos gráficos respetivos (Figura 4.6c) e gerando-se um clima de ondas aleatório, que respeita os limites definidos. A última opção permite a importação de um ficheiro de ondas que pode ser um ficheiro de Excel[®] ou um ficheiro de texto. Este ficheiro deve ter um número de registos correspondente ao número de vezes que é efetuado o cálculo (tempo de simulação). Quando o ficheiro é importado, a rosa de rumos e o histograma de alturas de onda são automaticamente preenchidos com os dados do ficheiro (Figura 4.6d).

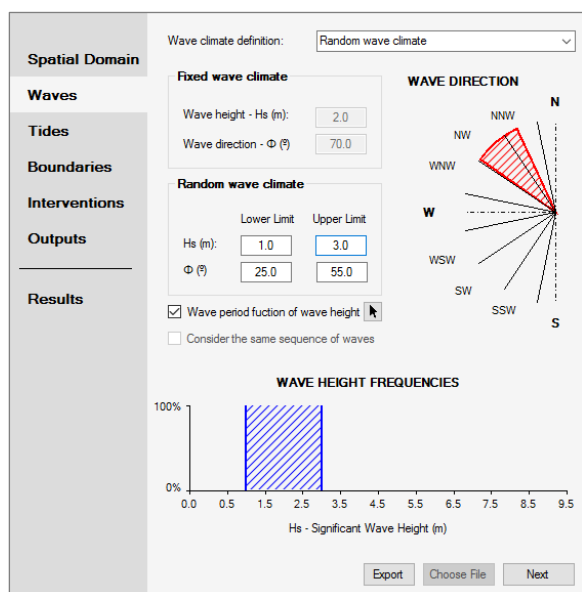
Por defeito, a caixa de seleção “*Wave period function of wave height*” está selecionada, o que significa que o período de onda é determinado em função do valor da altura de onda, qualquer que seja a opção escolhida (através da Expressão 3.19). No futuro pretende-se permitir que o utilizador possa inserir diretamente o valor do período de onda (através do botão que ficará disponível quando a caixa de seleção não está ativa).



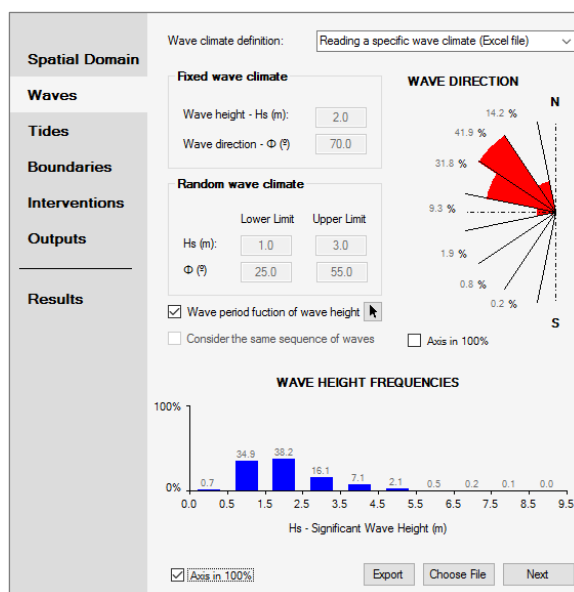
a) Clima de agitação fixo



b) Clima aleatório, com base em percentagens de ocorrência



c) Clima aleatório com base em intervalo de valores



d) Leitura de um clima de agitação específico (ficheiro)

Figura 4.6: Janela de definição do regime de ondas (“Waves”).

3 - Definição do regime de marés (“Tides”)

A introdução dos dados para a caracterização do regime de marés divide-se na definição da maré astronómica e na definição da maré meteorológica.

Para a maré astronómica, o utilizador pode optar por considerar que o nível da água do mar se mantém fixo (valor definido na janela “Spatial Domain”) ou que este é variável, devendo

para isso definir a amplitude máxima para marés vivas e marés mortas (Figura 4.7a e Figura 4.7b, respetivamente).

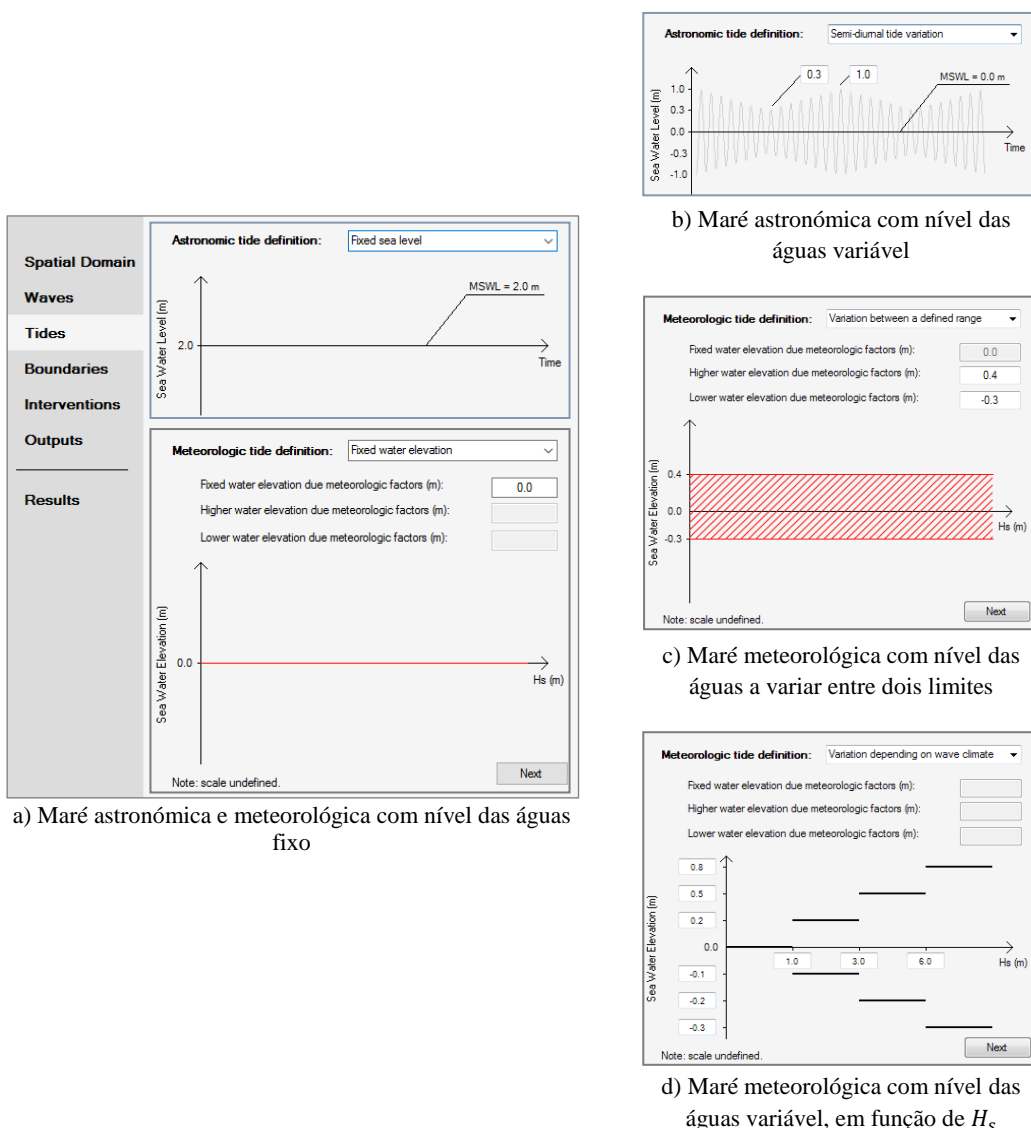


Figura 4.7: Janela de definição do regime de marés (“Tides”).

Para a definição da maré meteorológica, o utilizador tem três opções: 1) nível da água do mar mantém-se fixo ao longo do cálculo, devendo para isso indicar o valor do desnível da água do mar por efeito das altas ou baixas pressões meteorológicas (Figura 4.7a); 2) nível da água a variar aleatoriamente entre dois limites, que devem ser definidos pelo utilizador (Figura 4.7c); 3) nível da água do mar varia aleatoriamente entre limites previamente definidos, mas respeitando uma correspondência com as alturas de onda verificadas no mesmo instante de cálculo (Figura 4.7d).

4 - Definição das condições fronteira (“Boundaries”)

No que diz respeito às condições fronteira, a introdução dos dados divide-se na definição dos volumes de sedimentos na fronteira norte e na fronteira sul da área a modelar (Figura 4.8). Relativamente à fronteira norte, o utilizador pode escolher uma de três opções: 1) volume fixo de sedimentos a entrar ou a sair da secção que define a fronteira; 2) taxa fixa de erosão ou acreção na secção (o utilizador deve definir o valor da variação do volume, que será assumido constante ao longo das diversas iterações do cálculo); 3) extrapolação das condições na vizinhança da fronteira, baseado na média dos volumes em transporte nas três secções adjacentes à fronteira norte (o utilizador pode ainda adicionar/subtrair um volume à média dos volumes em transporte nas secções adjacentes, devendo para isso definir esse valor). Para a fronteira sul, o utilizador dispõe igualmente de três opções, em tudo idênticas às opções correspondentes à fronteira norte.

The image shows a software interface for defining boundary conditions. It features a sidebar on the left with a menu containing 'Spatial Domain', 'Waves', 'Tides', 'Boundaries', 'Interventions', 'Outputs', and 'Results'. The 'Boundaries' menu item is highlighted. The main area is titled 'Boundaries' and is split into two panels: 'Northern Boundary' and 'Southern Boundary'. Each panel has three radio button options: 'Constant volume added/extracted in the border:', 'Fixed erosion/accretion volume rate:', and 'Extrapolation of nearby conditions:'. The 'Constant volume' option is selected in both panels. Next to the 'Constant volume' options are input fields containing the number '0' and a question mark icon. There are also question mark icons next to the other two options in each panel. A 'Next' button is located at the bottom right of the interface.

Figura 4.8: Janela de definição das condições fronteira (“Boundaries”).

5 - Definição das intervenções de defesa costeira (“Interventions”)

O modelo LTC permite a introdução de quatro tipos de intervenções de defesa costeira diferentes: fontes aluvionares pontuais (também permite simular intervenções similares a transposição de areias em embocaduras ou canais portuários), alimentações artificiais de areias, obras de defesa perpendiculares à linha de costa, como esporões ou quebramares, e

obras de defesa longitudinal aderente. Para introduzir uma nova intervenção de defesa costeira, o utilizador deve clicar no “*Edit*” correspondente a cada um dos vários tipos, sendo direcionado para uma tabela característica de cada uma das intervenções. Cada uma das tabelas terá o número de colunas correspondente às variáveis necessárias para a caracterização de cada intervenção e o número de linhas corresponderá ao número de intervenções introduzidas. Após o preenchimento dos dados necessários, cada uma das intervenções será automaticamente representada na janela do domínio de cálculo.

Importa referir que, ao introduzir uma nova intervenção de defesa costeira, o utilizador deverá atribuir-lhe uma designação na respetiva coluna da tabela de dados, uma vez que nos restantes módulos da ferramenta COAST (o módulo de pré-dimensionamento e o módulo de custo-benefício), a intervenção será apresentada com a nomenclatura atribuída pelo utilizador. No caso das obras transversais à linha de costa e nas estruturas longitudinais aderentes, o utilizador terá ainda uma coluna (com uma lista de seleção) relativa ao tipo de intervenção: (1) existente, (2) nova, (3) prolongamento da existente (aumento do comprimento), ou (4) reforço da existente (aumento da cota de coroamento). Estas informações são importantes, uma vez que, nos módulos seguintes, cada intervenção terá um ficheiro associado à designação definida pelo utilizador e o processo de cálculo e opções disponíveis serão variáveis consoante o tipo de intervenção.

O utilizador poderá visualizar um esquema de cada tipo de intervenção (alternando os separadores), facilitando assim a introdução dos parâmetros necessários (Figura 4.9). No caso das fontes aluvionares pontuais (Figura 4.9a), o utilizador deve indicar a posição do perfil transversal onde se processa essa alimentação e o respetivo volume por unidade de tempo. Relativamente à alimentação artificial de sedimentos (Figura 4.9b), o utilizador deve indicar sete parâmetros distintos, relacionados com a área abrangida, período de alimentação e o volume introduzido. O esquema da Figura 4.9c indica alguns dos parâmetros necessários para a introdução de uma obra perpendicular à linha de costa (permitindo a definição da localização no domínio de cálculo) e, por fim, na Figura 4.9d representa-se o esquema que permite definir a localização de uma estrutura longitudinal aderente.

O utilizador poderá ainda introduzir as intervenções de defesa de costeira com o cursor diretamente na área de desenho, devendo para isso recorrer ao botão junto de cada intervenção na barra lateral da área de desenho (junto às caixas de seleção para visualização

de cada intervenção). De referir que, neste caso, apenas são preenchidos os dados relativos às dimensões e localização da obra, devendo o utilizador preencher as restantes características da intervenção no separador respetivo.

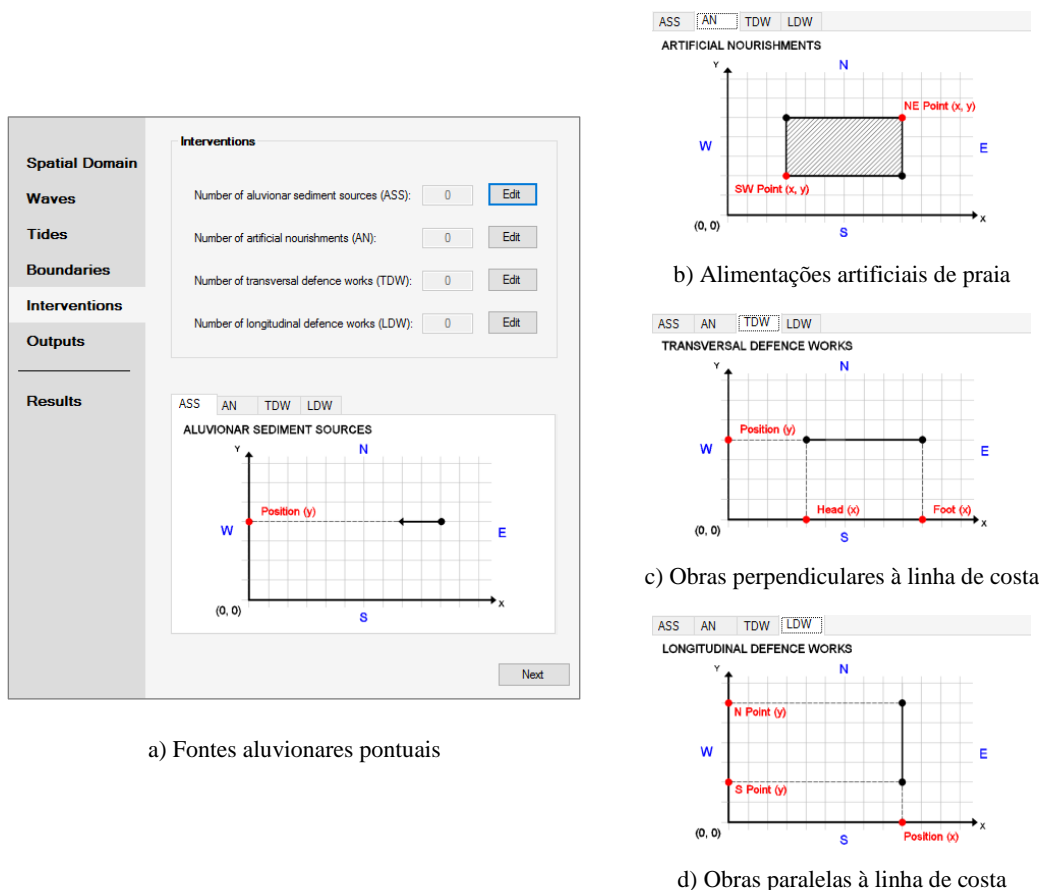


Figura 4.9: Janela de definição das intervenções de defesa costeira (“Interventions”).

6 - Definição das características da simulação e dados de saída (“Outputs”)

A janela “Outputs” (Figura 4.10) permite ao utilizador definir as características da simulação e saídas gráficas. É também nesta janela, que o utilizador tem a possibilidade de iniciar o cálculo (botão “Run”) e onde pode aceder facilmente a cada uma das janelas de parâmetros (descritas na secção seguinte), devendo verificar quais as formulações que foram escolhidas para o cálculo.

No que diz respeito às características da simulação e saídas gráficas, o utilizador deve definir o intervalo de tempo de cálculo (*time step*), correspondente ao número de horas em que se assume o mesmo regime de ondas e marés, o número de vezes que é efetuado o cálculo (este

valor multiplicado pelo anterior exprime o tempo total de simulação), o espaço de tempo entre saídas gráficas, o espaçamento pretendido entre perfis transversais na saída gráfica e a indicação de qual o primeiro perfil a ser representado. Importa referir que as saídas gráficas relativas à batimetria e topografia do terreno geram um elevado número de valores que podem sobrecarregar a simulação e apresentação de resultados.

The screenshot shows the 'Outputs Definition' window of the COAST software. On the left is a vertical navigation menu with the following items: Spatial Domain, Waves, Tides, Boundaries, Interventions, Outputs (highlighted), and Results. The main area is divided into two sections:

- Outputs Definition:** Contains six input fields, each with a numerical value and a help icon (?):
 - Number of hours with the same wave regime: 1
 - Number of calculations: 8760
 - Time space between outputs results: 876
 - Time space between bathymetry/topography results: 43680
 - Space between crossshore profiles represented: 20
 - First cross profile to be represented graphically: 1
- Parameters:** Lists several parameter categories, each with an 'Edit' link:
 - General Parameters
 - Slope Angle Parameters
 - Closure Depth Method: Hallemeier (function of Hs)
 - Runup Method: Ruggiero (function of Hs)
 - Potencial Volume Calculation: CERC
 - Diffraction Method: Coelho

A 'Run' button is located at the bottom right of the main area.

Figura 4.10: Janela de definição das características da simulação e dados de saída (“*Outputs*”).

Após a introdução de todos os dados necessários à simulação, o botão “*Run*” ficará disponível e, ao correr a simulação, é aberta automaticamente a linha de comandos, podendo o utilizador acompanhar o seu desenvolvimento. Enquanto a simulação está a decorrer, o programa não permite qualquer alteração dos dados nem a visualização das janelas.

4.1.2.2. Parâmetros de cálculo

Relativamente aos parâmetros de cálculo e escolhas de formulações, na interface desenvolvida estes são preenchidos por defeito e o utilizador apenas necessita de aceder às respetivas janelas no caso de pretender a sua alteração. Foram desenvolvidas três janelas que o utilizador pode aceder através da janela principal, clicando em “*Calculation Parameters*”:

- janela de parâmetros gerais (“*General Parameters*”),
- janela de escolha de formulações (“*Formulations*”) e
- janelas de definição de ângulos (“*Slope Angles*”).

“General Parameters” é relativa às características da água do mar e dos sedimentos, definição da aceleração da gravidade e do coeficiente de transporte k da fórmula de CERC (Figura 4.11).

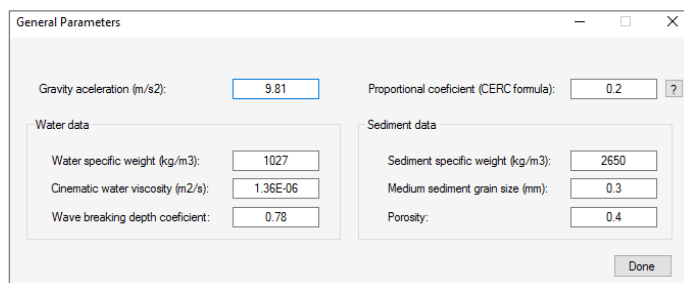


Figura 4.11: Janela correspondente à definição dos parâmetros gerais.

Existem diversas propostas para a definição do parâmetro do coeficiente de transporte, k , tendo-se por isso desenvolvido uma janela de cálculo, acessível a partir da janela de parâmetros gerais, que pretende auxiliar o utilizador na escolha do valor deste parâmetro (Figura 4.12). São propostas seis opções de valores existentes na bibliografia e apresentadas duas formulações empíricas para o cálculo de k : Bailard (1981, 1984), Expressão 3.9, e Valle *et al.*, (1993), Expressão 3.11. Na primeira formulação o utilizador deve definir o valor da direção da onda na rebentação (α_b), da profundidade de rebentação (d_b) e da velocidade de queda dos sedimentos (w_s). De referir que, os parâmetros da onda na rebentação são estimados pelo utilizador e não calculados internamente, tendo em conta que o parâmetro, k , sendo um parâmetro de calibração, deve ser constante ao longo do tempo de simulação e da extensão do litoral em estudo.

A janela “Formulations” (Figura 4.13), também acessível ao utilizador através da barra de menus “Calculation Parameters”, diz respeito à definição das formulações que serão consideradas no cálculo. O utilizador pode alterar a escolha da expressão considerada para o cálculo da profundidade de fecho (DOC) e da expressão para o cálculo do potencial de transporte sedimentar (Q). Pode ainda definir se os valores da profundidade de fecho e do espraiamento da onda (R_u) são ou não constantes ao longo da simulação e o método utilizado para o cálculo da difração.

“Slope Angles” é a terceira janela disponível em “Calculation Parameters” e diz respeito à definição do tipo de controlo de evolução do perfil transversal e à definição dos ângulos máximos para cada uma das opções (Figura 4.14). Note-se que os ângulos ϕ_1 a ϕ_4 da “Opção 1” correspondem aos ângulos representados na Figura 3.10.

Figura 4.12: Janela correspondente à estimativa do coeficiente de transporte, k .

Figura 4.13: Janela correspondente à escolha das formulações utilizadas no cálculo.

4.1.2.3. Área de desenho

Após a introdução do domínio de cálculo por parte do utilizador, a linha de costa e as curvas de nível são automaticamente definidas na área de desenho, considerando igual espaçamento entre o limite mínimo e máximo das cotas do terreno. No entanto, como é possível verificar na Figura 4.15, quer a profundidade de cada limite batimétrico/topográfico, quer a cor associada a cada intervalo, quer o número de curvas pretendidas (considerando um limite máximo de sete curvas de nível para a zona submersa e quatro para a zona emersa), pode ser alterado pelo utilizador através do botão “*Properties*”. Ainda nesta janela é possível alterar as propriedades relativas à linha de costa (inicial e final), linha da profundidade de fecho,

linha de rebentação, linha do espraiamento da onda e envolvente da largura ativa (limites extremos do perfil ativo ao longo de toda a simulação). De referir que, além da linha de costa e curvas de nível iniciais, as restantes opções só são visíveis na área de desenho após a realização da simulação. Na zona de representação do domínio de cálculo da janela principal (zona 2 da Figura 4.4) está também disponível o botão “Export” que permite que o utilizador possa guardar a representação gráfica da zona de estudo como ficheiro de imagem.

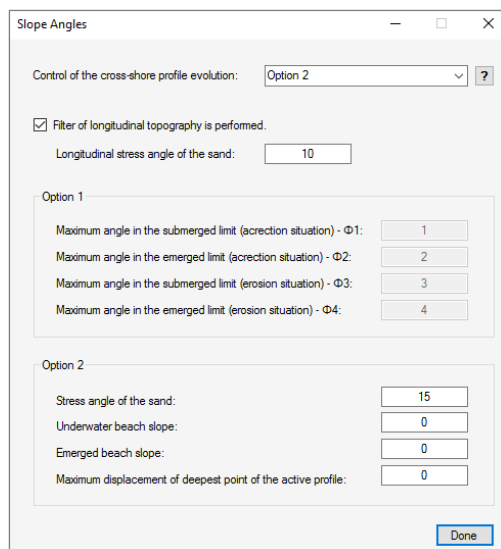


Figura 4.14: Janela correspondente à definição dos ângulos mínimos e máximos admissíveis para os taludes dos perfis transversais.

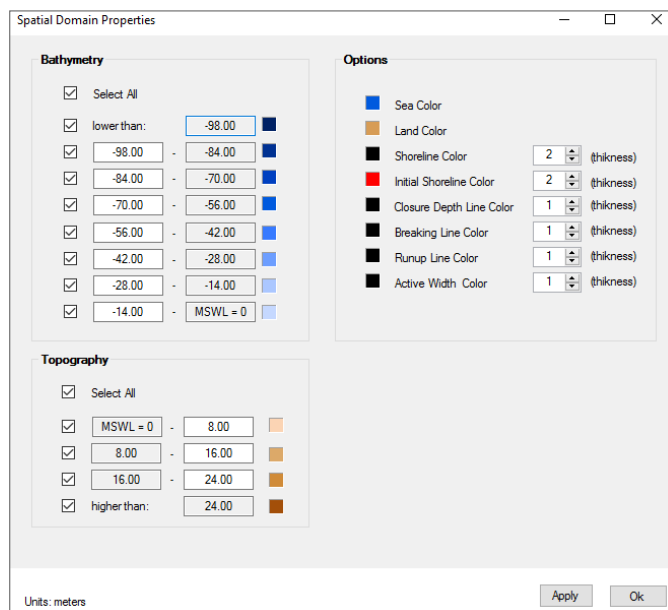


Figura 4.15: Janela de propriedades relativas às curvas de nível e linhas de referência.

Quando o utilizador move o cursor sobre a zona de estudo, é possível ver instantaneamente, na zona “Coordinates”, as coordenadas correspondentes à posição do cursor (X, Y e Z). As coordenadas X e Y são obtidas diretamente a partir dos pontos da grelha e a coordenada Z é calculada por interpolação bi-linear das cotas dos quatro pontos da grelha mais próximos. O algoritmo utilizado segue a Figura 4.16, onde a determinação da cota de cada ponto genérico da zona de estudo (P_i) é realizada com base na cota dos quatro pontos da grelha mais próximos (P_1, P_2, P_3 e P_4), de acordo com as Expressões 4.1 a 4.5.

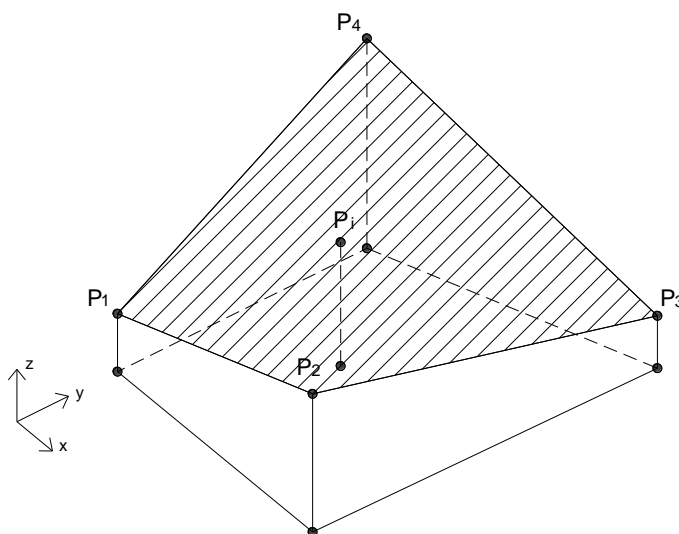


Figura 4.16: Esquemática do conceito para a interpolação bi-linear das cotas do terreno.

$$z_i = N_1(x, y) z_1 + N_2(x, y) z_2 + N_3(x, y) z_3 + N_4(x, y) z_4 \quad (4.1)$$

Onde z_1, z_2, z_3 e z_4 representam as cotas dos pontos P_1, P_2, P_3 e P_4 , respetivamente, e $N_1(x, y), N_2(x, y), N_3(x, y)$ e $N_4(x, y)$ são funções de forma obtidas por:

$$N_1(x, y) = \frac{x_i - x_2}{x_1 - x_2} \frac{y_i - y_4}{y_1 - y_4} \quad (4.2)$$

$$N_2(x, y) = \frac{x_i - x_1}{x_2 - x_1} \frac{y_i - y_3}{y_2 - y_3} \quad (4.3)$$

$$N_3(x, y) = \frac{x_i - x_4}{x_3 - x_4} \frac{y_i - y_2}{y_3 - y_2} \quad (4.4)$$

$$N_4(x, y) = \frac{x_i - x_3}{x_4 - x_3} \frac{y_i - y_1}{y_4 - y_1} \quad (4.5)$$

O utilizador pode ainda definir se pretende visualizar o domínio de cálculo à escala, ou distorcer a escala horizontal, tirando proveito da dimensão máxima da janela (e, neste caso, verificar a escala a que se encontra o domínio de cálculo) na zona “*Scale Information*”. Relativamente às opções de visualização da zona de estudo, é possível ao utilizador ver/ocultar a grelha de pontos, as intervenções de defesa costeira (ou visualizar especificamente apenas um ou vários tipos de intervenções), as curvas de nível e a linha de costa (inicial ou relativa ao instante de tempo de cálculo pretendido, no caso da simulação já ter sido realizada). Opcionalmente, o utilizador pode visualizar uma fotografia/imagem do domínio de cálculo (Figura 4.17), que automaticamente fica como fundo da área de trabalho. A caixa de seleção “*view painted regions*” não deve estar selecionada quando o utilizador pretende ver uma imagem importada do domínio de cálculo.

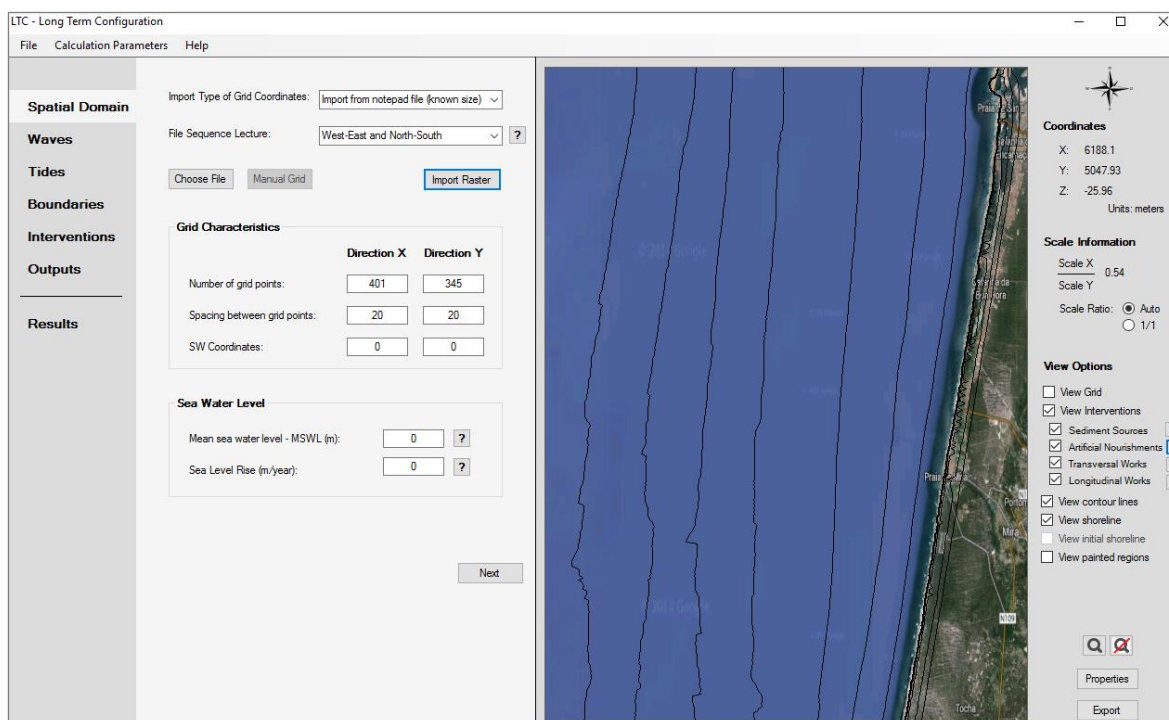


Figura 4.17: Janela com fotografia/imagem do domínio de cálculo.

A janela principal do programa é ajustada automaticamente ao tamanho de ecrã, mantendo fixas todas as zonas de entrada de dados e opções e variando a zona que representa o domínio de cálculo, com o objetivo do utilizador tirar o maior proveito da representação gráfica da simulação. Para questões de maior pormenor ou para facilitar a introdução de intervenções de defesa costeira, por exemplo, o utilizador tem disponível a ferramenta zoom (🔍).

4.1.2.4. Resultados da simulação

Os resultados de cada simulação do modelo LTC são apresentados na interface gráfica, numa única janela (“*Results*”, Figura 4.18). Esta janela contém informação sobre os resultados da evolução da batimetria/topografia do domínio de cálculo, evolução da posição da linha de costa, características da onda na rebentação, perfis transversais e acesso aos ficheiros de AutoCAD® e Excel®.

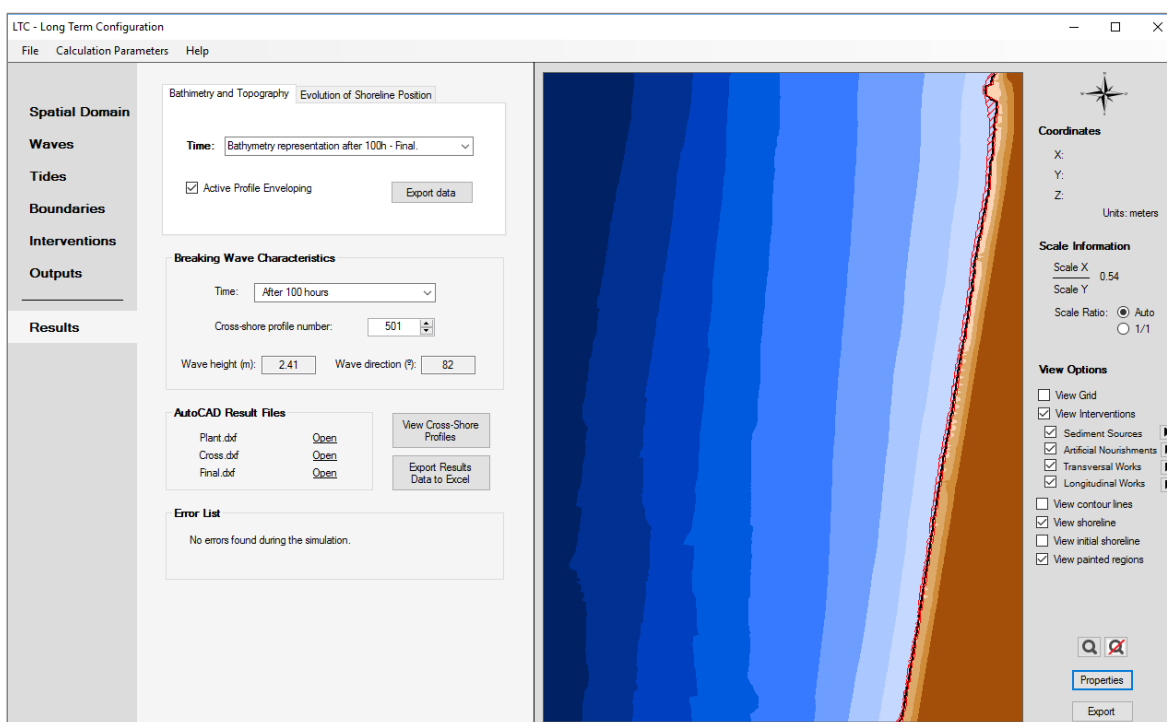


Figura 4.18: Janela de apresentação de resultados da simulação (“*Results*”).

No separador “*Bathymetry and Topography*” (Figura 4.18) é possível seleccionar o instante de cálculo correspondente ao resultado a visualizar. Para cada um dos instantes de tempo definidos na janela de entrada de dados “*Outputs*” (em “*Time space between bathymetry/topography*”) é visível, na área de desenho, a batimetria e topografia do domínio de cálculo. Todas as opções de visualização disponíveis na área de desenho ficam ativas para cada uma das saídas de resultados. O utilizador tem ainda a possibilidade de ver representada a envolvente da largura ativa ao longo de toda a extensão do domínio de cálculo, permitindo identificar os limites máximos obtidos durante a simulação para a profundidade de fecho e para o espraçamento da onda. Por fim, o utilizador pode exportar para um ficheiro de dados (Excel® ou ficheiro de texto) os valores das cotas do terreno obtidas nos instantes de tempo

representados. Esta função possibilita que este ficheiro funcione como dado de entrada do domínio de cálculo de uma qualquer simulação futura.

Em relação à evolução da linha de costa (Figura 4.19), o utilizador pode visualizar a posição da linha de costa para os instantes definidos na janela “*Outputs*” e pode ainda, para cada um desses instantes, ver/ocultar a linha que define o limite da profundidade de fecho, a linha que define a profundidade de rebentação e a linha que define o limite de espraio da onda. Tal como na opção anterior, o utilizador pode ver em simultâneo o limite da envolvente do perfil ativo. É ainda possível visualizar uma animação com a evolução da posição da linha de costa ao longo do tempo.

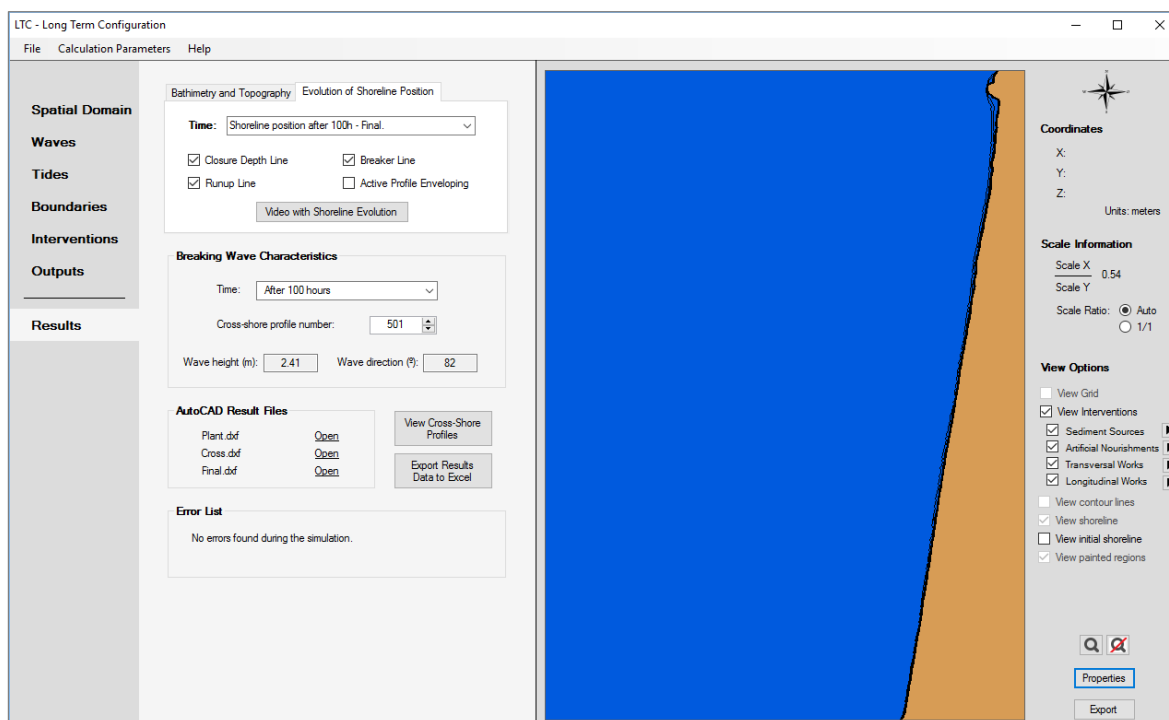


Figura 4.19: Janela de resultados relativamente à evolução da linha de costa.

Relativamente às características da onda na rebentação, o utilizador pode visualizar os resultados obtidos para a altura e a direção da onda, para cada um dos perfis e instantes de cálculo definidos na janela “*Outputs*”. O utilizador tem disponíveis duas caixas de seleção para escolher o perfil e instante pretendido. No entanto, após cada simulação, é gerado um ficheiro Excel® de resultados de alguns parâmetros considerados importantes, para cada perfil transversal nos instantes definidos para as saídas de resultados, que o utilizador pode

aceder através da janela de resultados. Este ficheiro (Figura 4.20) contém 13 livros que correspondem ao valor da altura de onda na rebentação, direção da onda na rebentação, posição da linha de rebentação, orientação da linha de rebentação, posição da linha de costa, posição da linha da profundidade de fecho e posição da linha do limite de espraçamento da onda, largura da envolvente ativa do perfil transversal, potencial de transporte sedimentar, volume efetivo de sedimentos em transporte, deslocamento vertical dos pontos do perfil transversal e informação relativa às áreas de acreção e erosão entre perfis consecutivos.

Time (hours)	876	1752	2628	3504	4380	5256	6132	7008	7884	8760
501	83.37821	83.37821	83.37821	83.37821	83.38133	83.38892	83.39785	83.41347	83.43222	83.56411
500	83.37821	83.37821	83.37821	83.37821	83.38267	83.39026	83.40008	83.41838	83.43892	83.57754
499	83.37821	83.37821	83.37821	83.37821	83.38357	83.39249	83.40454	83.42284	83.44607	83.59321
498	83.37821	83.37821	83.37821	83.37821	83.38535	83.39428	83.409	83.4282	83.45411	83.60844
497	83.37821	83.37821	83.37821	83.37866	83.38624	83.39651	83.41258	83.43535	83.4617	83.62456
496	83.37821	83.37821	83.37821	83.37955	83.38847	83.39829	83.41793	83.44249	83.47198	83.64159
495	83.37821	83.37821	83.37821	83.38089	83.38981	83.40231	83.42284	83.45009	83.48181	83.65952
494	83.37821	83.37821	83.37821	83.38267	83.39204	83.40722	83.42954	83.45858	83.49254	83.67835
493	83.37821	83.37821	83.37821	83.38357	83.39338	83.41124	83.43713	83.46841	83.50551	83.69718
492	83.37821	83.37821	83.37821	83.38535	83.39517	83.41615	83.44428	83.47869	83.51803	83.71826
491	83.37821	83.37821	83.37821	83.38624	83.39918	83.42151	83.45232	83.48986	83.53234	83.73935
490	83.37821	83.37821	83.37866	83.38947	83.4032	83.4282	83.46215	83.50327	83.54845	83.76269
489	83.37821	83.37821	83.38	83.38981	83.40767	83.43624	83.47288	83.51624	83.56411	83.78604
488	83.37821	83.37821	83.38133	83.39204	83.41213	83.44339	83.4845	83.53234	83.58291	83.81029
487	83.37821	83.37821	83.38267	83.39383	83.41749	83.45366	83.49835	83.548	83.60217	83.83635
486	83.37821	83.37821	83.38357	83.3974	83.42508	83.46349	83.51177	83.5668	83.62322	83.86242
485	83.37821	83.37821	83.38535	83.40186	83.43222	83.47511	83.52742	83.5856	83.64473	83.88895
484	83.37821	83.37821	83.38714	83.40588	83.43981	83.48807	83.54532	83.60709	83.66938	83.91774
483	83.37821	83.37821	83.38892	83.41079	83.45053	83.50238	83.56366	83.62949	83.69539	83.94609
482	83.37821	83.37866	83.39071	83.41749	83.46081	83.51803	83.58515	83.65414	83.7223	83.97579
481	83.37821	83.38	83.39294	83.42463	83.47377	83.53682	83.60754	83.68059	83.75192	84.00686
480	83.37821	83.38133	83.39695	83.43222	83.48718	83.55606	83.63173	83.70929	83.78335	84.04065
479	83.37821	83.38312	83.40186	83.44249	83.50327	83.57709	83.65817	83.73935	83.81569	84.0758
478	83.37821	83.38401	83.40633	83.45322	83.52116	83.60127	83.68776	83.77167	83.84984	84.11187
477	83.37821	83.38624	83.41258	83.46573	83.5404	83.6277	83.71961	83.80625	83.88715	84.1475
476	83.37821	83.38758	83.41972	83.48003	83.56187	83.65638	83.75282	83.84399	83.92494	84.1872

Figura 4.20: Janela Excel® de resultados da simulação no módulo de evolução da linha de costa.

Os resultados relativos aos perfis transversais são gerados numa janela independente (Figura 4.21), acessível de igual forma a partir da janela “Results”. Nesta janela o utilizador tem a possibilidade de visualizar os resultados relativos ao perfil transversal correspondente à seleção realizada de acordo com o número do perfil transversal e instante de tempo escolhido (disponíveis consoante as opções definidas na janela “Outputs”). Para cada perfil transversal representado, o utilizador pode identificar os limites do perfil, o valor da profundidade de fecho, o valor da profundidade de rebentação e a cota correspondente ao espraçamento da onda. Em função do perfil e instante escolhido, o utilizador pode ainda, de forma interativa, visualizar uma animação com a evolução do perfil ao longo do tempo ou a variação dos perfis ao longo da linha de costa, num determinado instante.

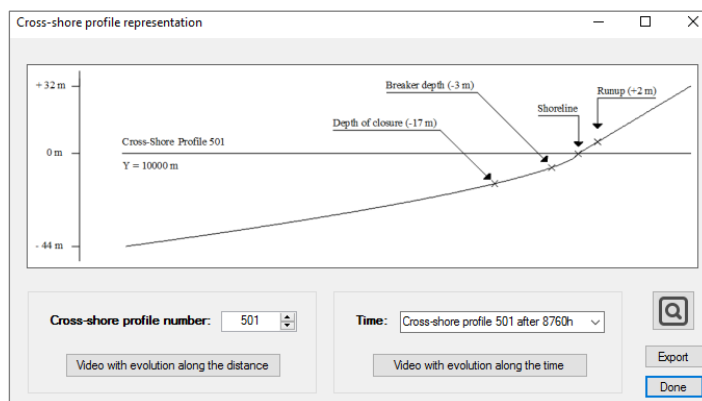


Figura 4.21: Representação dos resultados relativos aos perfis transversais.

Por fim, é possível aceder aos três ficheiros AutoCAD® gerados na simulação: “*plant.dxf*”, “*cross.dxf*” e “*final.dxf*”. Estes ficheiros mantêm a representação que foi definida na versão inicial do LTC. No caso de ocorrer algum erro durante a simulação, as opções descritas anteriormente ficam indisponíveis e a mensagem de erro correspondente é mostrada no campo “*error list*”.

Terminada a simulação, o utilizador poderá guardar os dados e resultados correspondentes, através da barra de menus “*File*” → “*Save shoreline evolution simulation*”. O ficheiro correspondente à simulação tem extensão “*simulation_name.ltc*” e armazena toda a informação relativa à simulação da linha de costa (batimetria e topografia iniciais, regime de ondas e marés, intervenções de defesa costeira, condições fronteira, evolução da linha de costa, áreas de erosão e acreção anuais, batimetria e topografia ao longo do tempo de simulação, etc.). Caso o utilizador pretenda o pré-dimensionamento das obras de defesa costeira (no caso de existirem) e quantificação do respetivo volume de material e/ou a realização de uma análise custo-benefício, o ficheiro “*simulation_name.ltc*” funcionará como *input* dos dois restantes módulos da ferramenta COAST.

4.1.3. Alterações no algoritmo: versão LTC-ML2017

Com o objetivo de melhorar o desempenho do modelo LTC e permitir a interação do algoritmo com a nova interface foram realizadas, no âmbito do presente trabalho, alterações no algoritmo da versão LTC-CC2012, dando origem à versão LTC-ML2017. De seguida descrevem-se as alterações introduzidas no modelo.

Criação de novos ficheiros de saídas de resultados

Como referido na secção 4.1.1.2, o novo programa desenvolvido em C# interage diretamente com os ficheiros *output* originados após a execução do algoritmo Fortran. Assim, foram realizadas alterações no código, de forma a serem criados novos ficheiros de resultados (*.txt*), compatíveis com as necessidades de leitura do novo programa, mas com informação idêntica aos ficheiros já existentes.

As mais-valias de visualização de resultados na nova interface e a necessidade de compreender melhor o comportamento de determinados parâmetros ao longo da simulação, motivaram a criação de novos ficheiros de resultados, além dos já existentes. Um dos principais objetivos passou pela compreensão das características da onda na rebentação, uma vez que determinam a capacidade de transporte sedimentar longitudinal e consequente evolução da linha de costa. Assim, foram gerados quatro novos ficheiros de resultados: “*abreak.txt*”, relativo à descrição da direção da onda na rebentação; “*hbreak.txt*”, que traduz a altura da onda na rebentação; “*xbreak.txt*”, que representa a coordenada do ponto de rebentação da onda e “*xabreak.txt*”, que traduz o ângulo entre a linha de rebentação e a linha de costa.

Ainda no sentido de compreender melhor o processo de evolução da linha de costa, foram gerados ficheiros onde é descrita informação relativa à posição da linha de costa (“*shor.txt*”), profundidade de fecho e espraiamento da onda (“*xdoc.txt*” e “*xrunup.txt*”), envolvente da largura ativa do perfil transversal (“*apw.txt*”), potencial de sedimentos em transporte (“*pvsf*”), volume de sedimentos que efetivamente atravessa uma determinada secção (“*ql.txt*”) e o deslocamento vertical efetivo de cada ponto do perfil transversal (“*dql.txt*”), correspondente ao valor de Δz .

Para possibilitar a realização da análise custo-benefício no terceiro módulo da ferramenta COAST foram gerados ficheiros de resultados com informação relativa às áreas de acreção e erosão ao longo da simulação (“*aa.txt*” e “*ea.txt*”). O ficheiro “*error.txt*” foi gerado para permitir que o utilizador visualize na interface gráfica as mensagens de erro ocorridas durante a execução do programa Fortran.

Alteração das opções do código (COD) correspondente à definição da grelha de pontos do domínio de cálculo

Até à versão LTC-CC2012, eram consideradas quatro hipóteses para o código que permite definir a sequência de leitura nas coordenadas dos pontos da grelha que define o domínio de cálculo, no ficheiro “*coor.dat*” (ficheiro correspondente à batimetria e topografia da zona de estudo). Na nova versão, foram introduzidas quatro novas hipóteses para o código COD, que complementam as quatro já existentes.

Definição da profundidade de fecho e do espraçamento da onda

Como já referido, o modelo numérico LTC calcula internamente o valor da profundidade de fecho e do espraçamento da onda em função das características da onda atuante em cada passo de cálculo. Na versão LTC-RS2010, Silva (2010) introduziu no modelo a possibilidade de considerar a *DoC* constante ao longo do tempo, calculada em função da onda significativa que é excedida 12 horas/ano, $H_{s,0.137}$, e do período de onda significativo médio ($\overline{T_s}$).

Nesta versão do modelo (LTC-ML2017), foi implementada a possibilidade do utilizador definir o valor da profundidade de fecho e do espraçamento da onda, independentemente das características da onda atuante. Nesta opção, os valores definidos pelo utilizador mantêm-se constantes ao longo de toda a simulação. No ficheiro “*data.dat*”, a variável HSC (já existente) toma o valor da profundidade de fecho e foi incluída uma nova variável, BERM, que toma o valor definido pelo utilizador para o espraçamento da onda.

Ainda no que diz respeito à definição da profundidade de fecho e do espraçamento da onda, foi modificado o código relativo à escolha da formulação a adotar para o cálculo interno de ambos os parâmetros, de forma a prever a possibilidade de incluir novas formulações. Para a profundidade de fecho o código é definido pela variável TCD (já existente, mas agora com mais opções) e foi acrescentada a variável TR, para definir o código relativo à formulação que permite a estimativa do espraçamento da onda.

Saídas intermédias de resultados de batimetria e topografia

Na versão anterior apenas era possível aceder à batimetria e topografia da zona de estudo correspondente ao final da simulação. Com a nova interface, tornou-se possível a

representação da zona de estudo, podendo ter interesse ao utilizador visualizar resultados intermédios. Assim, foi introduzida a variável BATH, que à semelhança da variável SPAC (já existente), determina o intervalo de tempo entre saídas de resultados para a representação da batimetria e topografia do terreno. Os valores correspondentes são guardados num novo ficheiro de resultados, “*bathy3.txt*”.

Cálculo da direção da onda na rebentação

No modelo LTC, a direção da onda na rebentação é determinada através da aplicação da Lei de *Snell*, considerando como referência, para a definição da orientação da batimetria, a linha de rebentação. No entanto, este pressuposto pode gerar problemas, quando num cenário de simulação se está na presença de alimentações artificiais de sedimentos que, em função da localização definida, não intersectem a linha de rebentação. Nesse caso, a orientação da linha de rebentação não seria alterada e, conseqüentemente, as intervenções de alimentação não seriam detetadas durante a simulação. Desta forma, nesta versão incluiu-se a hipótese de consideração da linha de costa, como referência utilizada na definição da orientação da batimetria, podendo o utilizador escolher a opção a utilizar.

4.2. Módulo de pré-dimensionamento

A melhoria e aperfeiçoamento do XD-Coast, inicialmente desenvolvido em Lima (2011), traduz o módulo de pré-dimensionamento, parte integrante da ferramenta final de análise de intervenções de defesa costeira, COAST. O principal objetivo deste módulo consiste no pré-dimensionamento da secção transversal de uma estrutura costeira e, tendo por base dados provenientes do módulo de evolução da linha de costa, na determinação do volume de material envolvido na implantação da solução.

Na versão inicial do modelo XD-Coast, a altura de onda de projeto (de definição transversal a todas as formulações de cálculo do peso dos blocos do manto resistente das estruturas) e o coeficiente de estabilidade (parâmetro necessário à aplicação da formulação de Hudson, 1974) eram diretamente introduzidos pelo utilizador através de um único valor. Com o processo de aperfeiçoamento do XD-Coast, e na sequência do acompanhamento de alguns trabalhos de mestrado, e de contactos estabelecidos com a empresa Consulmar[®], foram incorporadas nesta ferramenta novas funcionalidades e conteúdos.

A integração do XD-Coast na ferramenta COAST permitiu o cruzamento de dados batimétricos, topográficos e do clima de agitação, que facilitam a consideração de informações pertinentes ao utilizador, que desta forma pode, em simultâneo, ter em conta o local de implantação da estrutura e questões relacionadas com o pré-dimensionamento da secção transversal. Para que seja possível a realização de análises custo-benefício das soluções de intervenção costeira foi também necessário incluir no programa algoritmos, que permitam a estimativa dos volumes de material envolvido na construção das estruturas.

Todas as alterações realizadas no XD-Coast são descritas nesta secção. Assim, a secção inicia-se com a apresentação da interface da nova versão do XD-Coast (secção 4.2.1), descrição dos pressupostos e alterações introduzidas, relacionadas com a altura de onda de projeto (secção 4.2.2), descrição das considerações e funcionalidades relativas ao coeficiente de estabilidade (secção 4.2.3) e, por fim, descrição do algoritmo de estimativa dos volumes de materiais envolvidos na construção das estruturas de defesa costeira (secção 4.2.4).

4.2.1. Interface do XD-Coast

A integração do XD-Coast no módulo de pré-dimensionamento da COAST pressupõe alterações relativamente à interface da versão inicial, incluindo a incorporação de novas funcionalidades oferecidas ao utilizador. Os conceitos e formulações de base do modelo XD-Coast foram já descritos nas secções 3.4.1 e 3.4.2, sendo agora apresentadas algumas das janelas da interface do modelo, que surgiram face às alterações realizadas no decorrer do trabalho. De referir, que são apenas apresentadas as janelas principais do XD-Coast que foram alvo de alterações ou incorporações de elementos em relação à versão inicial, sendo que a descrição completa da versão inicial do programa, bem como o seu modo de funcionamento, pode ser consultada em Lima (2011).

Na janela de boas-vindas do módulo de pré-dimensionamento (Figura 4.22), o utilizador pode escolher a opção “*isolated pre-design*”, que permite apenas o pré-dimensionamento da secção, à semelhança da versão inicial do XD-Coast, ou pode seleccionar a opção “*integrated pre-design*” que permite a interligação entre os três módulos da COAST.

Ao seleccionar a segunda opção, surge ao utilizador uma caixa de diálogo que permite a importação do ficheiro “*simulation_name.ltc*”, resultado do módulo de simulação da linha

de costa. Desta forma, o utilizador importa as características da zona de estudo (batimetria, topografia, clima de agitação, etc.) e as características das obras de defesa costeira que foram utilizadas na simulação da linha de costa (extensão em planta, localização, etc.). Após a importação do ficheiro, surge ao utilizador a janela da Figura 4.23, com a listagem das estruturas costeiras definidas no módulo de simulação da linha de costa (a identificação de cada uma das obras corresponde ao nome atribuído pelo utilizador na tabela de dados, referida na secção 4.1.2.1). Note-se que, o módulo de projeção da evolução da linha de costa tem previstos quatro tipos diferentes de intervenções de defesa costeira (fontes aluvionares de sedimentos, alimentações artificiais de praia, obras transversais à linha de costa e estruturas longitudinais aderentes), mas, após a importação do ficheiro “*simulation_name.ltc*”, apenas ficam acessíveis ao módulo de pré-dimensionamento os últimos dois tipos de intervenção.

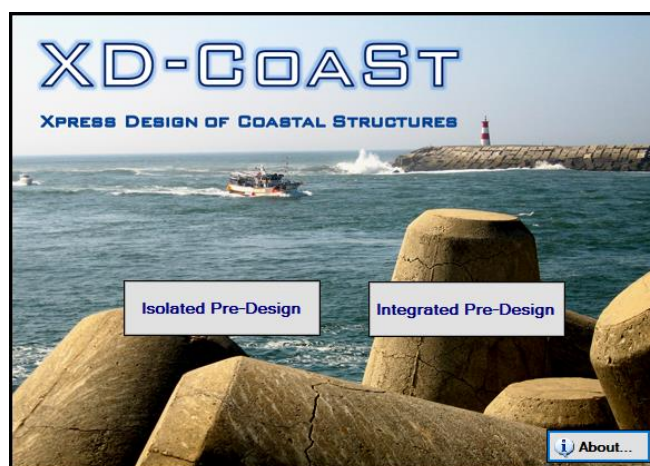


Figura 4.22: Janela de boas-vindas do programa de cálculo XD-Coast.

O pré-dimensionamento da secção transversal da estrutura, quer se trate de uma obra perpendicular à linha de costa, quer seja uma estrutura longitudinal aderente, inicia-se com a escolha do tipo de obra (não galgável, galgável ou submerso) e escolha da formulação a aplicar no cálculo (Figura 4.24). O utilizador define a formulação pretendida através das caixas de seleção ou diretamente através do organigrama. Importa ainda referir que, no caso das estruturas perpendiculares à linha de costa, o utilizador pré-dimensiona a secção mais desfavorável correspondente à máxima profundidade, isto é, a cabeça da estrutura. No caso das estruturas longitudinais aderentes, considera-se que a secção transversal apresenta características constantes ao longo de toda a sua extensão e em termos de geometria, assume-se características semelhantes a metade da secção transversal-tipo.

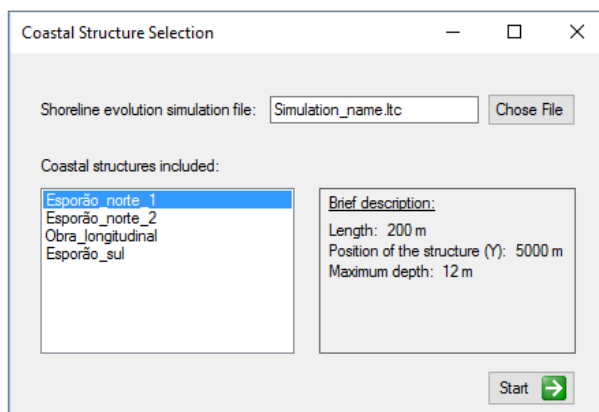


Figura 4.23: Janela de seleção da estrutura costeira a pré-dimensionar.

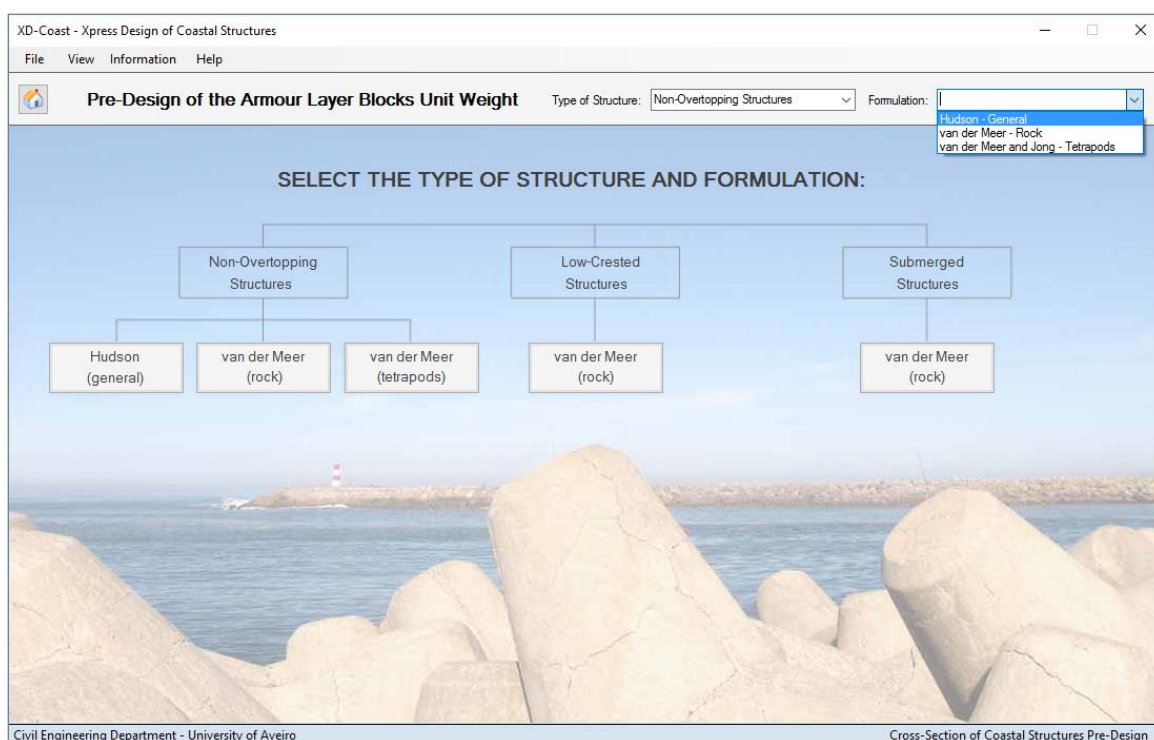


Figura 4.24: Janela de escolha das formulações no módulo de pré-dimensionamento.

Apresentam-se em seguida as janelas correspondentes a cada uma das formulações, disponíveis ao utilizador para o cálculo dos blocos resistentes da estrutura organizadas por tipo de obra (não galgável, galgável e submersa), e por fim, as formulações relativas ao cálculo das restantes características da secção transversal.

Manto resistente de estruturas não galgáveis

As estruturas não galgáveis são estruturas com cotas de coroamento suficientemente elevadas, para as quais apenas ocorre galgamento quando sujeitas a condições de temporal

muito severas. Quer as estruturas transversais à linha de costa, como os esporões ou quebramares, quer as estruturas longitudinais aderentes, podem ser consideradas estruturas não galgáveis, sendo que o XD-Coast tem disponíveis três formulações de cálculo para estes casos: Hudson (genérica), van der Meer (enrocamento) e van der Meer e Jong (tetrápodos).

A Figura 4.25 representa a janela de cálculo associada à formulação de Hudson. De referir que, o XD-Coast permite que a incógnita a determinar seja qualquer uma das variáveis incluídas na formulação de Hudson. Esta funcionalidade revela-se útil, por exemplo, no caso de se definir um valor para o peso unitário dos blocos, sendo possível a determinação do valor máximo da altura da onda incidente admissível para as condições estipuladas. O utilizador tem disponíveis botões de ajuda relativos à introdução da altura de onda de projeto (secção 4.2.2) e do coeficiente de estabilidade (secção 4.2.3). O valor do peso específico da água é automaticamente preenchido, em função do valor definido no módulo de evolução da linha de costa.

Figura 4.25: Janela correspondente à formulação de Hudson (estruturas não galgáveis).

Na Figura 4.26 está representada a janela de cálculo correspondente à formulação de van der Meer para enrocamento do programa XD-Coast. O programa apresenta valores de referência

para o coeficiente de permeabilidade e para o valor da área erodida relativa, acessíveis através dos botões de ajuda. Foi incorporado um novo botão de ajuda reativo à definição da altura de onda de projeto (secção 4.2.2) e outro que permite o acesso ao valor máximo, mínimo e médio do período de onda do clima de agitação definido no módulo de evolução da linha de costa. O valor do peso volúmico da água é preenchido por defeito em função do módulo de evolução da linha de costa.

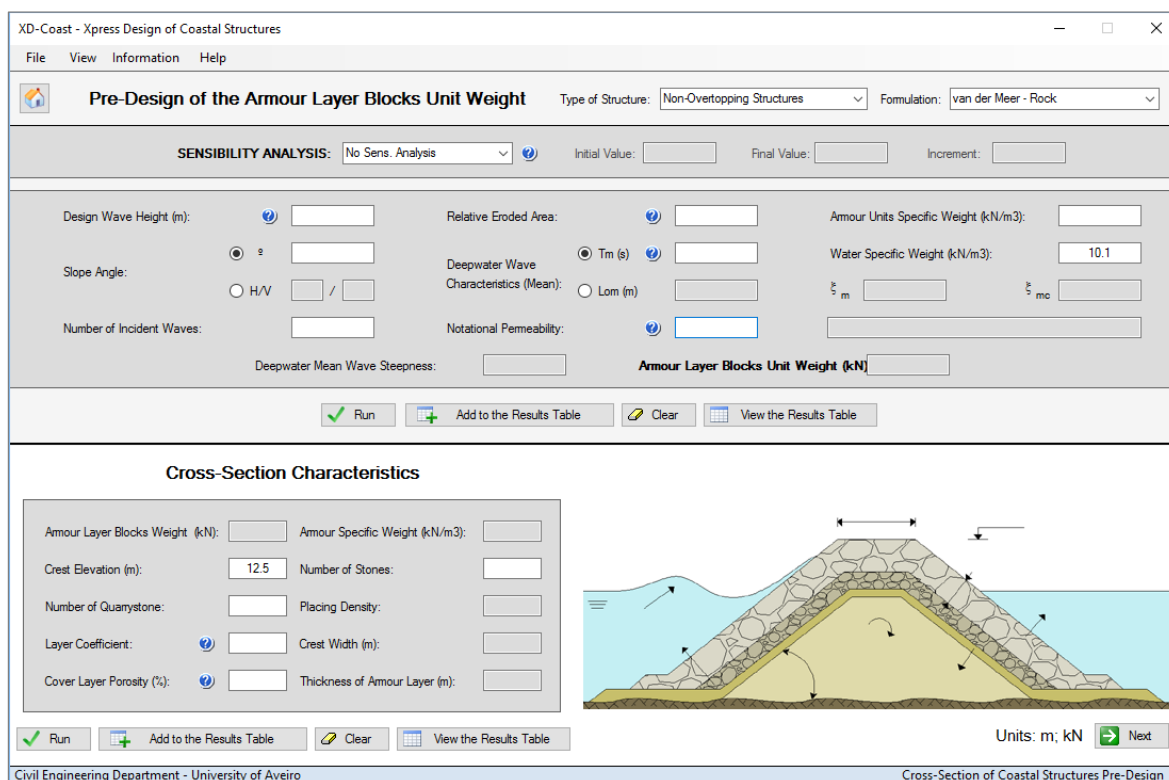


Figura 4.26: Janela correspondente à formulação de van der Meer para enrocamento (estruturas não galgáveis).

A Figura 4.27 diz respeito à formulação de van der Meer e Jong para tetrápodos. Para esta formulação, o programa dispõe de valores de referência para o nível de dano. Tal como nas duas formulações anteriores foi incorporado um botão de ajuda para a definição da altura de onda de projeto (secção 4.2.2), e ainda um botão de acesso aos valores de referência do período de onda.

Manto resistente de estruturas galgáveis

As estruturas galgáveis são aquelas para as quais é admitido galgamento, isto é, para determinada altura de onda incidente, a altura de espraio correspondente pode atingir

valores superiores ao coroamento da estrutura. Os dois tipos de estruturas costeiras do módulo de evolução de linha de costa podem ser considerados galgáveis, no entanto, o utilizador deve ter em atenção que as estruturas longitudinais aderentes, regra geral, são concebidas para proteger zonas marginais, devendo, por isso, ser tido em conta esse aspeto.

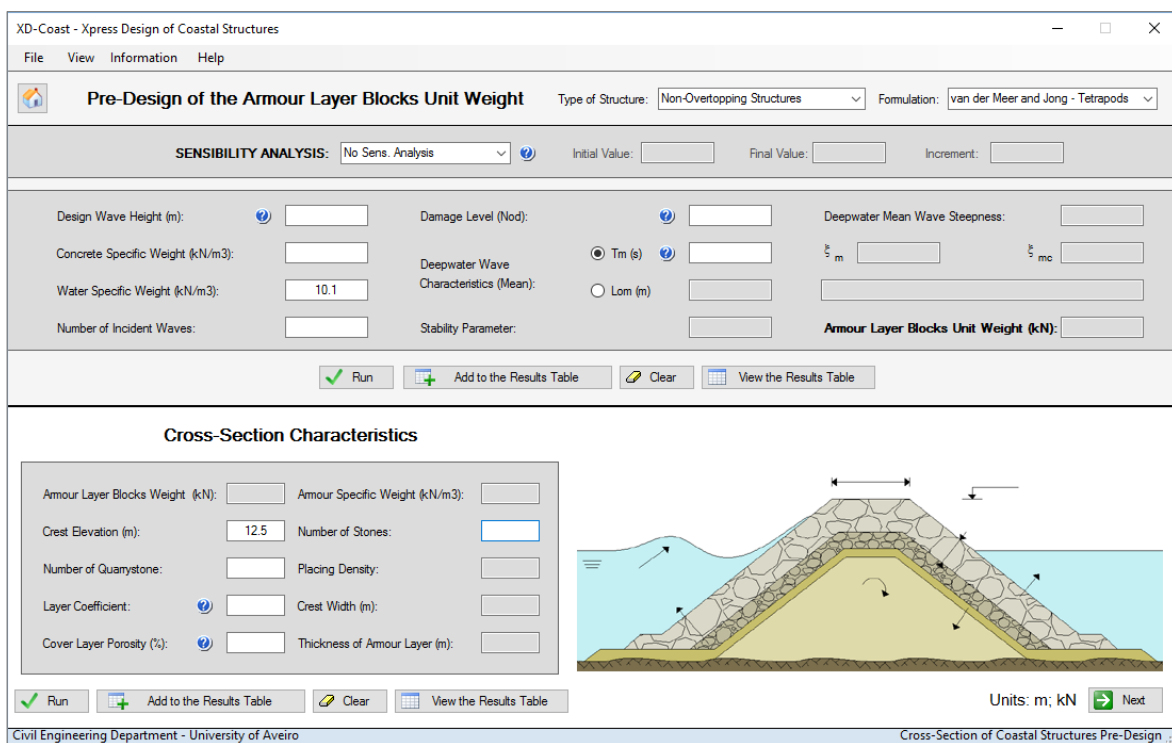


Figura 4.27: Janela correspondente à formulação de van der Meer e Jong para tetrápodos (estruturas não galgáveis).

Para este tipo de estruturas, o módulo de pré-dimensionamento tem disponível a formulação de van der Meer para enrocamento (Figura 4.28). Nesta janela, existem botões de ajuda que remetem para valores de referência da permeabilidade e área erodida relativa, e para esclarecimento sobre a definição da altura de galgamento (Figura 3.13). Foram ainda incorporados botões de ajuda para a definição da altura de onda de projeto (secção 4.2.2) e valores de referência para o período médio do clima de agitação introduzido no módulo de evolução da linha de costa.

Manto resistente de estruturas submersas

Estruturas submersas são estruturas para as quais a cota de coroamento se encontra abaixo do nível médio das águas. Os esporões, quebramares e estruturas longitudinais aderentes não

são considerados estruturas submersas, apesar de poderem conter partes que se encontram efetivamente abaixo do nível das águas. No entanto, tendo em conta que qualquer um dos módulos da COAST está em contínuo desenvolvimento, manteve-se a opção de estruturas submersas no módulo de pré-dimensionamento, na eventualidade de puderem ser incorporados, por exemplo, quebramares destacados (submersos).

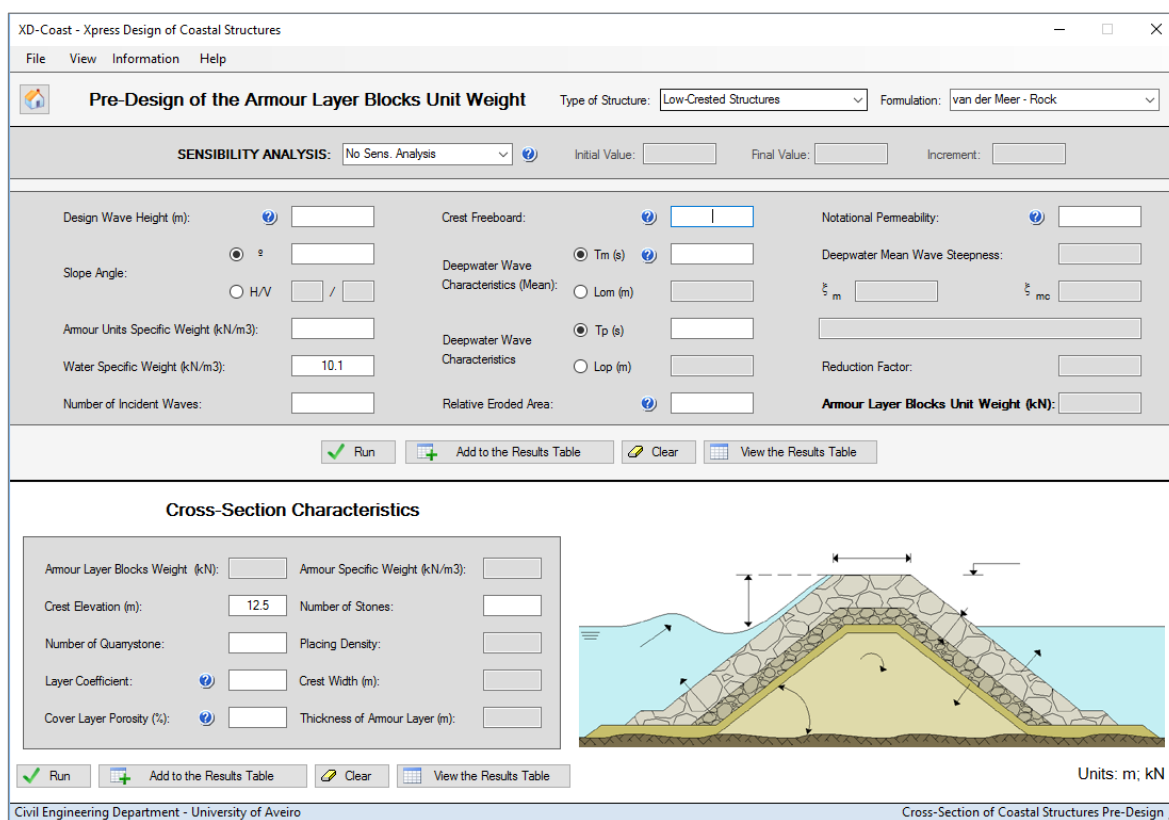


Figura 4.28: Janela correspondente à formulação de van der Meer para enrocamento (estruturas galgáveis).

O XD-Coast tem prevista uma fórmula para o pré-dimensionamento da secção transversal de estruturas submersas, formulação de van der Meer para enrocamento (Figura 4.29). A janela contém botões de ajuda para valores típicos da área erodida relativa e definição da altura submersa (ver Figura 3.14), sendo que, foi ainda acrescentado o botão de acesso às considerações relativas à definição da altura de onda de projeto (secção 4.2.2). O valor do peso específico da água é considerado igual ao valor definido pelo utilizador no módulo de evolução da linha de costa.

Figura 4.29: Janela correspondente à formulação de van der Meer para enrocamento (estruturas submersas).

Secção transversal

Além da estimativa do peso dos blocos a considerar no manto resistente das estruturas costeiras, o XD-Coast permite o pré-dimensionamento das restantes características da secção transversal, nomeadamente, da largura de coroamento, da espessura do manto resistente (e camadas subjacentes) e o número de blocos por unidade de área. O cálculo destes parâmetros manteve-se como na versão inicial do XD-Coast, mas, considera-se agora a possibilidade do utilizador alterar o valor do peso unitário dos blocos obtido no pré-dimensionamento, e ainda, o facto da cota de coroamento da estrutura ser preenchida por defeito, tendo em conta os dados provenientes do módulo de evolução da linha de costa (no entanto, este valor pode ser modificado, caso o utilizador pretenda). O valor do peso volúmico do material mantém-se igual ao considerado no cálculo do peso unitário dos blocos.

A janela correspondente às características da secção transversal é comum a qualquer uma das formulações escolhidas para o cálculo do peso unitário dos blocos (Figura 4.30). Uma vez preenchidos todos os dados de entrada necessários, os resultados são automaticamente

apresentados na área de desenho, Figura 4.31 (que varia de acordo com o tipo de obra considerado).

Cross-Section Characteristics

Armour Layer Blocks Weight (kN):	<input type="text" value="10.00"/>	Armour Specific Weight (kN/m ³):	<input type="text" value="26.00"/>
Crest Elevation (m):	<input type="text" value="12.5"/>	Number of Stones:	<input type="text"/>
Number of Quarrystone:	<input type="text"/>	Placing Density:	<input type="text"/>
Layer Coefficient:	<input type="text" value="1"/>	Crest Width (m):	<input type="text"/>
Cover Layer Porosity (%):	<input type="text" value="1"/>	Thickness of Armour Layer (m):	<input type="text"/>

Figura 4.30: Janela de cálculo relativa às características da secção transversal, comum a todas as formulações.

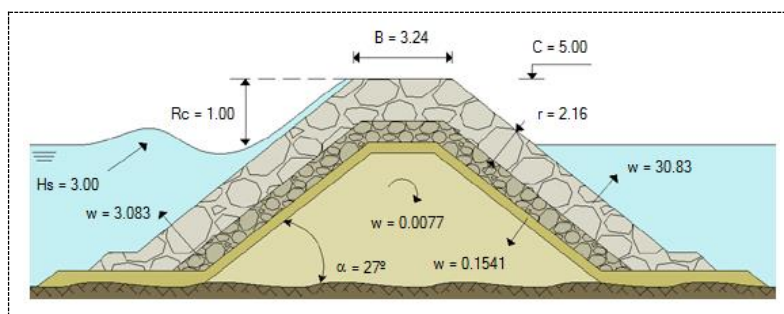


Figura 4.31: Área de desenho da secção transversal (estrutura galgável).

O modelo inclui seis tabelas de resultados, cinco das quais referentes à determinação do peso unitário dos blocos para cada uma das formulações incluídas (1ª parte do organigrama da Figura 3.12), e a sexta, referente às características da secção transversal (2ª parte do mesmo organigrama), que corresponde a todas as formulações de cálculo. A Figura 4.32 traduz um exemplo de uma tabela de resultados, para a formulação de Hudson, quando considerada uma análise de sensibilidade, obtendo-se diferentes soluções para o peso dos blocos.

Nesta secção foram apresentadas as principais janelas que compõem o novo módulo de pré-dimensionamento, que resultaram de alterações concebidas no programa XD-Coast. No entanto, foram ainda realizadas outras alterações e considerações no XD-Coast, de forma a melhorar o seu desempenho e a permitir a sua integração na COAST, apresentadas nas secções seguintes.

Hudson (General) - Non-Overtopping Structures							
	Design Wave Height (m)	Slope Angle (°)	Slope Angle (H/V)	Amour Units Specific Weight (kN/m ³)	Water Specific Weight (kN/m ³)	Stability Coefficient	Amour Layer Blocks Unit Weight (kN)
1	1	26.57	2 / 1	26	10.1	3.5	0.952
2	2	26.57	2 / 1	26	10.1	3.5	7.616
3	3	26.57	2 / 1	26	10.1	3.5	25.7
4	4	26.57	2 / 1	26	10.1	3.5	60.93
5	5	26.57	2 / 1	26	10.1	3.5	119
6	6	26.57	2 / 1	26	10.1	3.5	205.6
7	7	26.57	2 / 1	26	10.1	3.5	326.5
8	8	26.57	2 / 1	26	10.1	3.5	487.4
9	9	26.57	2 / 1	26	10.1	3.5	694
10	10	26.57	2 / 1	26	10.1	3.5	952

Delete Row 1 Clear Table Export to Excel OK

Figura 4.32: Exemplo de uma tabela de resultados do XD-Coast (formulação de Hudson).

4.2.2. Definição da altura de onda de projeto

A definição da altura de onda de projeto é talvez a decisão mais preponderante na fase de conceção de uma estrutura de defesa costeira, uma vez que, uma subavaliação deste parâmetro pode resultar num maior risco para a estrutura e uma sobreavaliação resulta num aumento significativo do custo da obra. Das várias ações que podem incidir sobre uma estrutura de defesa costeira, nomeadamente a agitação marítima, as marés e correntes, os sismos e *tsunamis*, a altura de onda (que caracteriza a agitação marítima) é, dada a capacidade energética acumulada no oceano, a que mais afeta a estabilidade das estruturas, podendo levar à queda, deslocamento ou rotura dos blocos que a constituem e, conseqüentemente, à rotura das estruturas. A questão que se impõe aos projetistas é qual o valor da altura de onda de projeto (H) que deve ser considerado. Vários autores se têm debruçado sobre este assunto, procurando um “parâmetro equivalente”, isto é, uma altura de onda de uma agitação regular, determinada a partir dos registos da agitação marítima (irregular) do local, que cause os mesmos danos na estrutura que esta última (Taveira-Pinto e Neves, 2003).

É usual considerar como altura de onda de projeto a altura de onda significativa (H_s - média do terço mais elevado das alturas de onda que foram registadas durante o período de observação) do temporal mais violento que se prevê vir a atingir a estrutura durante a sua vida útil (Pita, 1986). Assim, o conhecimento dos valores extremos das alturas de onda, isto

é, a determinação do regime de extremos, é um aspeto fundamental no dimensionamento das estruturas marítimas. A partir da distribuição das alturas de onda significativas máximas anuais e das alturas de onda máximas anuais é possível calcular (por extrapolação) as alturas de onda para determinado período de retorno. A definição da altura de onda de projeto está associada a um determinado período de retorno, a um determinado nível de risco e a uma dada probabilidade de excedência (Taveira-Pinto e Neves, 2003).

Durante muitos anos, considerou-se que a altura de onda significativa, seria a que melhor caracterizava um estado de agitação real, produzindo a mesma ação sobre as obras costeiras que uma onda regular (Taveira-Pinto e Neves, 2003). Por sua vez, Pita (1978), refere que o parâmetro equivalente para um clima de agitação real se situa num valor intermédio entre a altura máxima e a altura significativa (semelhante à “média do décimo mais alto das ondas incidentes”, $H_{1/10}$). Por outro lado, o SPM (1975) recomenda a utilização do valor de $H_{1/10}$ ou a altura de onda significativa, H_s , conforme se trate de uma estrutura semirrígida ou flexível, respetivamente.

A definição da altura de onda de projeto é um assunto de tal forma controverso que até mesmo os regulamentos vigentes nos diferentes países diferem no valor aconselhado. A título de exemplo, no Japão, recomenda-se o uso da altura de onda significativa para um período de retorno de 50 anos, estimada a partir de dados meteorológicos recolhidos durante pelo menos 30 anos. Já o SPM (1984) aconselha um valor mais conservativo para a altura de onda de projeto, igual a $H_{1/10}$. No Reino Unido, as indicações de BSI (1999) apontam para o intervalo compreendido entre H_s e $H_{1/10}$, mas referem que caso ocorra rebentação das ondas correspondentes a $H_{1/10}$ antes destas atingirem a estrutura, deve ser considerada como altura de onda de projeto a altura de onda na rebentação, H_b . Burcharth (1994) refere que tem sido considerada para a altura de onda de projeto, a altura de onda significativa correspondente a um determinado período de retorno (geralmente de 50 ou 100 anos). Losada e López (2000) sugerem a consideração da altura $H_{1/20}$ como altura de onda de projeto.

As considerações relativas à estimativa da altura de onda de projeto também devem ter em conta a formulação considerada no pré-dimensionamento do peso unitário dos blocos do manto resistente. Por exemplo, CIRIA (2007b) recomenda que para a formulação de Hudson

(1974) deve ser considerada como altura de projeto H_s ou $H_{1/10}$ (sendo que o valor do coeficiente de estabilidade irá variar consoante a onda escolhida, ver secção 4.2.3). Para a formulação de van der Meer (1988b) é recomendado que se considere H_s . Existem outras condicionantes que o utilizador deve ter em atenção na definição da altura de onda para a formulação de van der Meer (1988b): esta formulação é válida, segundo CIRIA (2007b), para águas profundas, devendo ser verificada a condição $d > 3H_{toe}$ (sendo H_{toe} a altura de onda na base da estrutura); no caso do utilizador pretender aplicar a formulação de van der Meer (1988b) em águas pouco profundas, CIRIA (2007b) recomenda que a altura de onda de projeto H_s seja substituída por $H_{2\%}/1.4$ ($H_{2\%}$ é a altura de onda excedida em 2% do total de registos). De referir que, o XD-Coast tem disponíveis alguns alertas ao utilizador quando os limites indicados na bibliografia não são verificados.

Conclui-se que existem várias propostas para definir o valor que melhor representa a altura de onda de projeto associada a uma determinada intervenção de defesa costeira. Vários fatores poderão condicionar a estimativa do valor da altura de onda, como a batimetria do local (influência dos fundos), nível de dano permitido para a estrutura, custos previstos para a construção e manutenção, etc. Assim, cabe ao projetista a tarefa de escolher o valor mais indicado para cada caso específico, de forma sensata, e com base na sua sensibilidade e experiência.

No módulo de pré-dimensionamento a altura de onda de projeto é um parâmetro de entrada, ficando a decisão do valor a considerar do lado do utilizador. O botão de ajuda disponível em cada uma das formulações remete o utilizador para uma janela de informação que resume as principais considerações teóricas referidas nesta secção.

4.2.3. Definição do coeficiente de estabilidade

A formulação de Hudson (1974) é uma das formulações mais amplamente utilizada para o cálculo do peso unitário dos blocos do manto resistente de estruturas galgáveis, apesar de considerar uma abordagem simplista da agitação marítima (carácter regular). Como já referido, uma das principais limitações desta formulação está relacionada com a forma como é incluído o efeito de alguns parâmetros hidrodinâmicos, considerados influentes na estabilidade da estrutura. De facto, o efeito destes parâmetros pode ser considerado

implicitamente através do coeficiente de estabilidade, K_D , parâmetro do qual depende de forma significativa, o valor do peso unitário dos blocos. Por este motivo, foi recolhida informação da bibliografia relativamente aos valores recomendados para o coeficiente de estabilidade, e de que forma é que os efeitos não contemplados pela formulação de Hudson (1974) podem ser tidos em conta no valor do coeficiente de estabilidade. Desta forma, reúnem-se nesta secção, valores característicos para o coeficiente de estabilidade, tendo em conta vários cenários, e sintetiza-se a informação recolhida numa nova janela que pretende auxiliar o utilizador da COAST, na escolha do valor a considerar nos seus cálculos.

4.2.3.1. Generalidades

O valor do coeficiente de estabilidade (K_D) é genericamente função de vários parâmetros, como o material constituinte, interligação dos blocos, número de camadas do manto resistente, localização do perfil transversal da obra em estudo, inclinação do talude, percentagem permitida de blocos deslocados, etc. (Taveira-Pinto e Neves, 2003).

Silva (2014) realizou um estudo acerca de alguns dos parâmetros e fatores de que depende o coeficiente de estabilidade, recolhendo informação acerca da influência de cada um deles. A interligação entre os diferentes blocos afeta a estabilidade do manto das estruturas e consequentemente influencia o valor do coeficiente de estabilidade. A interligação entre os blocos está diretamente relacionada com a inclinação do talude, com a forma dos blocos, com o arranjo entre os diferentes blocos e com a rugosidade. O tipo de rebentação da onda na estrutura afeta também a estabilidade da estrutura. De acordo com McConnell *et al.* (2004), o impacto das forças de ondas com rebentação induzida é claramente superior ao efeito provocado por ondas sem rebentação e influencia o valor associado ao coeficiente de estabilidade. A inclinação dos fundos junto ao talude da estrutura influencia o valor do coeficiente de estabilidade, sendo que a CLI (2017) considera este valor como parâmetro de entrada no cálculo do peso unitário dos blocos a colocar no manto resistente, na ferramenta de cálculo automático que disponibiliza. O nível de dano admissível para a estrutura, que pode ser considerado como inexistente, inicial, intermédio ou rotura, afeta também o valor considerado para o coeficiente de estabilidade.

Como exposto na secção 4.2.2, tendo em conta a metodologia adotada para a estimativa da altura de onda, existem várias representações para o respetivo valor de projeto e,

consequentemente diferentes propostas para o valor do coeficiente de estabilidade. A influência do ângulo de incidência da onda na estrutura foi estudada por diferentes autores, com diferentes abordagens, resumidas também em Silva (2014). A permeabilidade do manto resistente, o número de camadas constituintes e a parte da estrutura considerada (cabeça ou tronco) também fazem variar o valor do coeficiente de estabilidade. Por fim, e de acordo com Yoo (2010), a estabilidade do manto resistente é fortemente dependente do período de onda, pelo que, considerando a formulação de Hudson (1974), o parâmetro K_D deve ser afetado deste parâmetro.

Em geral, os valores de K_D são obtidos com base em resultados de ensaios experimentais, considerando o carácter regular da agitação marítima e admitindo que não há galgamentos CIRIA (2007b). Segundo Fleming *et al.* (1998), os primeiros ensaios foram realizados para quebra-mares de secção transversal permeável, e utilizando uma série de alturas de onda e períodos regulares, determinados para o regime de agitação que mais afetasse a estabilidade da estrutura.

4.2.3.2. Valores recomendados

Ao longo dos anos têm surgido várias propostas para o coeficiente de estabilidade, com destaque para os valores apresentados pelo *Shore Protection Manual*. Em 1977 foi sugerida uma gama de valores para o coeficiente K_D e recomendada a utilização de uma altura de onda correspondente à média do terço mais alto das alturas de onda de um determinado registo (H_s), SPM (1977). Posteriormente, o SPM (1984) sugeriu um valor mais conservativo para a altura de onda incidente (média do décimo mais alto, $H_{1/10}$), e valores mais baixos para o coeficiente de estabilidade. A Tabela 4.1 e Tabela 4.2 apresentam, respetivamente, os valores de coeficientes de estabilidade sugeridos para o tronco e para a cabeça da estrutura. Apesar destes valores se virem a revelar muito conservativos, não foram sugeridas alterações nas publicações posteriores deste manual. De referir que os valores apresentados na Tabela 4.1 e Tabela 4.2 têm condições e campos de aplicabilidade específicos, pelo que o utilizador não deve aplicá-los sem antes consultar a referida literatura.

Para os blocos pré-fabricados, a *British Standard Institution* (BSI, 1999) estabelece valores para o coeficiente de estabilidade compreendidos entre 6 e 8 para Tetrápodos e cubos Antifer e valores que variam entre 10 e 12 para Dolos, Acrópodes e Stabit. A empresa *Concrete*

Layer Innovations (CLI, 2017) propõe também valores para o coeficiente de estabilidade dos blocos que desenvolve, variando entre 15.0 e 16.0 para o tronco e entre 11.5 e 13.0 para a zona da cabeça (considerando uma camada única de manto resistente). Yalciner *et al.* (1999) definem valores para cubos Antifer a variar entre 4.0 e 9.0 no tronco e entre 3.5 e 7.5 na cabeça das estruturas (os valores variam em função da inclinação do talude e é considerado um arranjo dos blocos irregular). Yoo (2010) estabelece um coeficiente de estabilidade igual para a cabeça e o tronco das estruturas com manto resistente composto por Sealock ($K_D = 10.0$). No *Rock Manual* (CIRIA, 2007a) são indicados valores para Tetrápodos, Tribar, Cubos, Akmon, cubos Antifer e Stabit, que variam entre 6.5 e 12.0 no tronco e 4.5 e 8.5 na zona da cabeça.

Tabela 4.1: Coeficientes de estabilidade para a zona do tronco das estruturas (SPM, 1977, 1984).

Forma do bloco	Camadas	Arranjo dos blocos	SPM (1977)		SPM (1984)	
			Com rebentação	Sem rebentação	Com rebentação	Sem rebentação
Enrocamento						
Arredondado suave	2	Aleatório	2.1	2.4	1.2	2.4
Arredondado suave	>3	Aleatório	2.8	3.2	1.6	3.2
Arestas rugosas	1	Aleatório	-	2.9	-	2.9
Arestas rugosas	2	Aleatório	3.5	4.0	2.0	4.0
Arestas rugosas	>3	Aleatório	3.9	4.5	2.2	4.5
Arestas rugosas	2	Especial	4.8	5.5	5.8	7.0
Paralelepípedo	2	Especial	-	-	7.0 - 20.0	8.5 - 24.0
Blocos pré-fabricados						
Tetrápodo e Quadripóde	2	Aleatório	7.2	8.3	7.0	8.0
Tribar	2	Aleatório	9.0	10.4	9.0	10.0
Dolos	2	Aleatório	22.0	25.0	15.8	31.8
Cubos modificados	2	Aleatório	6.8	7.8	6.5	7.5
Hexopodo	2	Aleatório	8.2	9.5	8.0	9.5
Toskane	2	Aleatório	-	-	11.0	22.0
Tribar	1	Uniforme	12.0	15.0	12.0	15.0

4.2.3.3. Janela de auxílio à definição do coeficiente de estabilidade

Com base na informação recolhida na bibliografia para os valores do coeficiente de estabilidade foram organizadas tabelas de dados e construída uma nova janela de auxílio ao utilizador do XD-Coast. Os valores foram divididos consoante a zona da estrutura, cabeça ou tronco, e quanto ao material constituinte dos blocos a colocar no manto resistente das estruturas: blocos de enrocamento ou blocos pré-fabricados. Tendo em conta estes quatro

grupos foram organizados os valores recolhidos para o coeficiente de estabilidade, definindo, sempre que possível, as características que o influenciam: forma do bloco, número de camadas constituintes, arranjo dos blocos, inclinação do talude, tipo de onda considerado, nível de dano e características da rebentação.

Tabela 4.2: Coeficientes de estabilidade para a zona da cabeça das estruturas (SPM, 1977, 1984).

Forma do bloco	Camadas	Arranjo dos blocos	SPM (1977)		SPM (1984)		Inclinação $\cot \theta$
			Com rebentação	Sem rebentação	Com rebentação	Sem rebentação	
Enrocamento							
Arredondado suave	2	Aleatório	1.7	1.9	1.1	1.9	1.5 a 3.0
Arredondado suave	>3	Aleatório	2.1	2.3	1.4	2.3	*
Arestas rugosas	1	Aleatório	-	2.3	-	2.3	*
			2.9	3.2	1.9	3.2	1.5
Arestas rugosas	2	Aleatório	2.5	2.8	1.6	2.8	2.0
			2.0	2.3	1.3	2.3	3.0
Arestas rugosas	>3	Aleatório	3.7	4.2	2.1	4.2	*
Arestas rugosas	2	Especial	3.5	4.5	5.3	6.4	*
Blocos pré-fabricados							
Tetrápodo e Quadripóde	2	Aleatório	5.9	6.6	5.0	6.0	1.5
			5.5	6.1	4.5	5.5	2.0
			3.7	4.1	3.5	4.0	3.0
			8.3	9.0	8.3	9.0	1.5
Tribar	2	Aleatório	7.8	8.5	7.8	8.5	2.0
			7.0	7.7	6.0	6.5	3.0
Dolos	2	Aleatório	15.0	16.5	8.0	16.0	2.0
			13.5	15.0	7.0	14.0	3.0
Cubos modificados	2	Aleatório	-	5.0	-	5.0	*
Hexopodo	2	Aleatório	5.0	7.0	5.0	7.0	*
Tribar	1	Uniforme	7.5	9.5	7.5	9.5	*

* consultar SPM (1977) e SPM (1984).

Tendo definida a zona em análise da estrutura (cabeça ou tronco) e o tipo de material, o utilizador pode consultar, na nova janela desenvolvida, os valores propostos por diferentes autores para o coeficiente de estabilidade correspondente às várias formas de blocos disponíveis para o material em questão. Esta organização de apresentação de alternativas ao utilizador permite comparar de forma rápida o valor do coeficiente de estabilidade para as diferentes formas e condições, e ainda, acrescentar no futuro outros potenciais estudos que venham a ser referidos na bibliografia. O utilizador pode ainda optar pela visualização direta do peso unitário dos blocos, em detrimento do valor de K_D (isto se já tiver definidos

previamente os restantes parâmetros da formulação de Hudson, 1974), de forma a facilmente identificar a influência do valor de K_D no peso final unitário dos blocos do manto resistente.

A Figura 4.33 mostra a janela desenvolvida considerando blocos pré-fabricados de betão, na zona do tronco da estrutura, de acordo com os valores sugeridos pelo SPM (1977), com a opção de visualização direta do valor do coeficiente de estabilidade. Para a mesma zona da estrutura e tipo de material, o utilizador pode ainda consultar os valores sugeridos em SPM (1984), Yalciner *et al.* (1999), BSI (1999), CIRIA (2007b), DMC (2014), Paape e Walther (2011), Yoo (2010) e CLI (2017). De referir que os autores enumerados não propõem valores para todos os tipos de blocos.

Armour Unit Shape	Number of layers	Placement	Slope (cot x)	Design Wave	Damage Level	Breaking Waves	Non-Breaking Waves
Tetrapod	2	Random	1.5 - 5.0	H_s	0 - 5%	7.2	8.3
Quadripod	2	Random	1.5 - 5.0	H_s	0 - 5%	7.2	8.3
Tribar	2	Random	1.5 - 5.0	H_s	0 - 5%	9.0	10.4
Dolos	2	Random	1.5 - 5.0	H_s	0 - 5%	22.0	25.0
Modified Cube	2	Random	1.5 - 5.0	H_s	0 - 5%	6.8	7.8
Hexapod	2	Random	1.5 - 5.0	H_s	0 - 5%	8.2	9.5
Toskane	2	Random	1.5 - 5.0	H_s	0 - 5%	-	-
Tribar	1	Unifom	1.5 - 5.0	H_s	0 - 5%	12.0	15.0
Accropode	-	-	-	-	-	-	-
Accropode II	-	-	-	-	-	-	-
CORE-LOC	-	-	-	-	-	-	-
ECOPODE	-	-	-	-	-	-	-
XBlock	-	-	-	-	-	-	-
Akmon	-	-	-	-	-	-	-
Sealock	-	-	-	-	-	-	-
Antifer	-	-	-	-	-	-	-
Stabit	-	-	-	-	-	-	-

Figura 4.33: Janela de auxílio à definição do valor de K_D (blocos pré-fabricados).

A Figura 4.34 mostra a janela desenvolvida para o valor do coeficiente de estabilidade considerando blocos de enrocamento, para a mesma zona (tronco) e de acordo com a mesma referência da literatura (SPM, 1977). Para o caso do enrocamento e considerando a zona do tronco da estrutura, o utilizador pode ainda consultar os valores sugeridos em (SPM, 1984).

Stability Coefficient

View options: Stability coefficient values, Armour layer blocks unit weight (kN)

Localization: Trunk, Head

Material: Rock armour units, Reference: SPM 1977

Armour Unit Shape	Number of layers	Placement	Slope (cot x)	Design Wave	Damage Level	Breaking Waves	Non-Breaking Waves
Smooth. Rounded	2	Random	1.5 - 5.0	H_s	0 - 5%	2.1	2.4
					5 - 10%	-	3.0
					10 - 15%	-	3.6
	> 3			0 - 5%	2.8	3.2	
Rough Angular	1	Random	1.5 - 5.0	H_s	0 - 5%	-	2.9
	2				0 - 5%	3.5	4.0
					5 - 10%	-	4.9
					10 - 15%	-	6.6
	> 3						0 - 5%
2	Special			4.8	5.5		
Parallelepiped	2	Special	-	-	-	-	-

Done

Figura 4.34: Janela de auxílio à definição do valor de K_D (blocos de enrocamento).

Uma breve análise dos valores de K_D da Figura 4.33, recomendados pelo SPM (1977), demonstra variações de cerca de 250% (extremos de K_D de 6.8 e 25.0) entre as diferentes forma dos blocos, considerando o mesmo material, zona da estrutura, arranjo dos blocos, inclinação do talude, altura de onda de projeto e nível de dano. Para o caso do enrocamento (Figura 4.34), as variações, para características idênticas, são inferiores (extremos de K_D de 2.1 e 5.5, ou seja, variações de 160%). Estas diferenças revelam a importância da definição do K_D , com natural implicação no resultado do pré-dimensionamento da estrutura.

4.2.3.4. Síntese

A variabilidade de valores sugerida na bibliografia para o coeficiente de estabilidade é muito vasta e depende de inúmeros fatores, devendo por isso o projetista decidir o valor a considerar de forma sensata e tendo por base a comparação com os resultados de outras formulações e ensaios em modelo reduzido.

A escolha do valor do coeficiente de estabilidade pode também ser dependente do valor escolhido pelo utilizador para a altura de onda de projeto. Por exemplo, de acordo com o *Shore Protection Manual* (SPM), considerando a altura de onda significativa H_s devem ser adaptados os valores do coeficiente de estabilidade propostos em SPM (1977), e considerando a altura de onda $H_{1/10}$, já devem ser escolhidos os valores recomendados pelo SPM (1984). Segundo Fleming *et al.* (1998), para a cabeça das estruturas devem ser considerados valores mais baixos de K_D , devido ao facto de se tratar de um ponto singular, mais desfavorável à ação das ondas, podendo estar sujeita, em muitos casos, a elevados níveis energéticos de agitação. Estas e outras particularidades devem ser tidas em conta na escolha do coeficiente de estabilidade a considerar na formulação de Hudson (1974), tornando-se por isso essencial o conhecimento, por parte do utilizador, dos parâmetros de que depende o K_D e dos valores recomendados na bibliografia para cada situação específica.

Em resumo, a janela auxiliar desenvolvida para o XD-Coast, tem por objetivo fornecer ao utilizador o máximo de informação possível acerca dos valores do coeficiente de estabilidade para a aplicação da fórmula de Hudson (1974) recomendados na bibliografia, tendo em conta as características da estrutura em estudo, de forma a auxiliar e sustentar o valor escolhido para o K_D , o qual influencia o valor final do peso unitário a colocar no manto resistente das estruturas.

4.2.4. Contabilização do volume de material

O módulo de pré-dimensionamento culmina com a estimativa do volume de material necessário à construção da estrutura pré-dimensionada. Esta funcionalidade é consequência da versão integrada dos três módulos da COAST, uma vez que a estimativa de volumes requer informação do módulo de evolução da linha de costa (configuração da obra em planta e a batimetria e topografia do terreno) e informação do módulo de pré-dimensionamento (configuração da secção transversal com definição da geometria e espessura das diferentes camadas de materiais). O resultado do cálculo de volumes de material é útil e necessário para o módulo de custo-benefício, uma vez que permitirá a estimativa dos custos associados a cada uma das estruturas.

O volume de material estimado para cada camada da estrutura é um dado fornecido ao utilizador numa nova janela que surge após o cálculo do peso unitário dos blocos e que

permite que o utilizador ajuste as dimensões obtidas para a largura de coroamento, cota de coroamento e espessura das camadas. Nesta janela (Figura 4.35, para obras perpendiculares à linha de costa e Figura 4.36, para estruturas longitudinais aderentes), a secção é desenhada à escala para que o utilizador tenha uma melhor perceção da secção definida. Note-se que, no caso de estar a ser realizada uma análise de sensibilidades, é neste passo que o utilizador deve escolher os parâmetros finais da formulação a considerar para o cálculo do peso unitário dos blocos. Ainda na mesma janela, o utilizador deverá guardar os dados que caracterizam a estrutura, que serão um *input* do módulo de custo-benefício (ficheiro “*structure_name.xdc*”).

Cross-section data (trunk)

Armour layer blocks weight (kN):	10.0
Underlayer blocks weight (kN):	1.0
Filter blocks weight (kN):	0.05
Core blocks weight (kN):	0.003
Armour layer thickness (m):	3.0
Underlayer thickness (m):	1.5
Filter thickness (m):	0.5

Cross-section data (head)

Consider trunk characteristics

Grid points along the trunk: 2

Armour layer blocks weight (kN):	40.0	Armour layer (%):	50
Underlayer blocks weight (kN):	4.0	Underlayer (%):	15
Filter blocks weight (kN):	0.2	Filter (%):	5
Core blocks weight (kN):	0.01	Core (%):	30

Dimensions (m): r1: 5 r2: 23 h: 12.77

Structure Volume

	Trunk (80%)	Head (20%)
Armour layer (m3)	41 325	9 153
Underlayer (m3)	13 167	2 746
Filter (m3)	3 437	915
Core (m3)	16 540	5 492
Structure Volume (m3)	74 470	18 306

Structure Volume (m3) 92 776

Crest Width (m): 10

Quota (related to MSL) = 7.87 m

d = 4.63 m

1.5 / 1.0

Crest Elevation (m): 12.5

Save

Figura 4.35: Janela final do módulo de pré-dimensionamento relativa a obras perpendiculares à linha de costa.

No caso do pré-dimensionamento das obras perpendiculares à linha de costa, é necessária especial atenção com a zona da cabeça das estruturas, motivo pela qual a janela da Figura 4.35 menciona esta particularidade. A cabeça dos esporões ou quebramares representa um ponto particularmente sensível das estruturas, uma vez que está submetido a condições de agitação mais severas, quando comparado com a zona do tronco das estruturas, pelo que, é recomendado na bibliografia que sejam considerados pesos unitários dos blocos do manto resistente mais elevados. Assim, no módulo de pré-dimensionamento é dada a hipótese ao

utilizador, caso pretenda, de considerar um valor distinto para o peso unitário dos blocos a colocar no manto resistente da zona da cabeça das estruturas. Por simplificação, o volume de material das camadas subjacentes não é calculado em função das respetivas espessuras, mas sim, função das percentagens do volume total de material utilizado na estrutura, impostas pelo utilizador. O utilizador pode ainda considerar que a zona da cabeça se estende ao longo do prolongamento da obra transversal, definindo o número de pontos da grelha pretendidos (nesse caso o cálculo do volume das respetivas camadas é realizado de forma similar à zona do tronco).

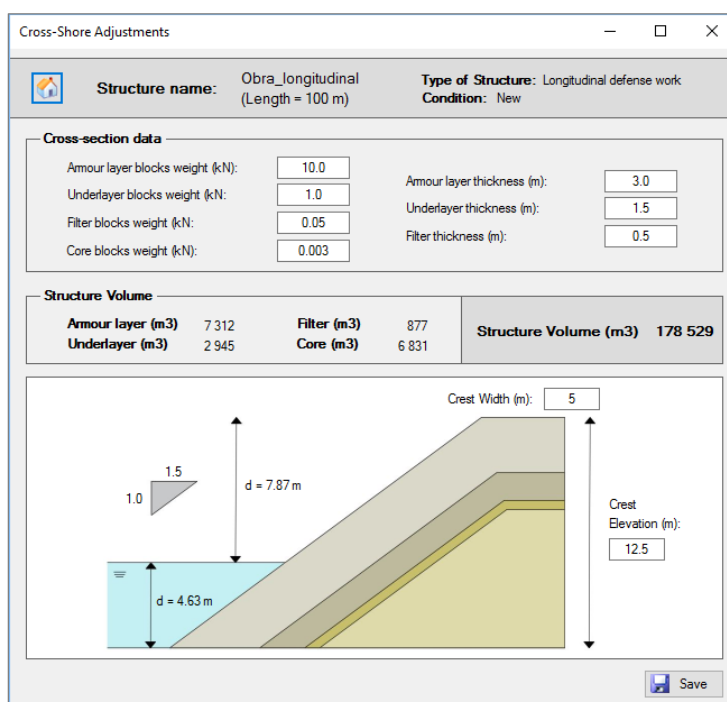


Figura 4.36: Janela final do módulo de pré-dimensionamento relativa a estruturas longitudinais aderentes.

O dimensionamento da cabeça das obras perpendiculares à linha de costa exige particularidades que não vão ser mencionadas nem tidas em conta neste trabalho, sendo apenas considerada uma estimativa do seu volume e sendo dada a possibilidade ao utilizador de considerar diferentes valores para o peso unitário do manto resistente e respetivas subcamadas e filtros. Considerações relativas ao raio da cabeça em planta, inclinação do talude frontal, configuração em planta, etc., deste elemento particular das obras perpendiculares à linha de costa, podem ser consultadas em Jensen (1984), BSI (1999), Burcharth e Hughes (2006) e CIRIA (2007c).

O volume de material associado à implementação das estruturas, quer sejam esporões, quebramares ou estruturas longitudinais aderentes, é estimado partindo da secção transversal pré-dimensionada pelo utilizador (que corresponde à secção com maior profundidade, no caso das estruturas perpendiculares à linha de costa). Tendo por base as dimensões presentes na Figura 4.37, a área de cada camada é calculada com recurso às Expressões 4.6 a 4.13 (considerando uma relação de taludes $H/V = T/1$).

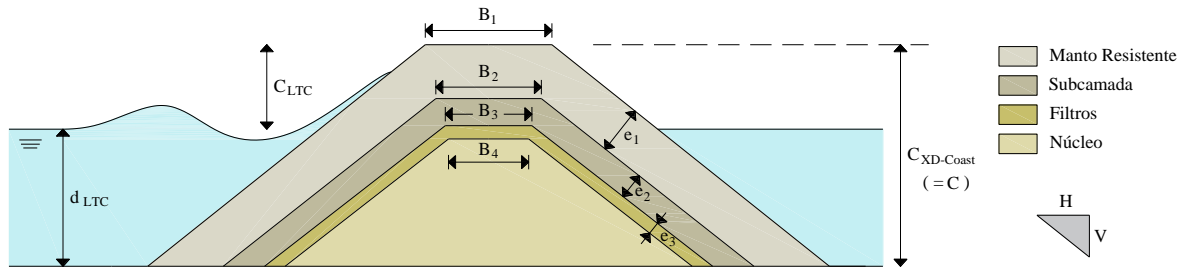


Figura 4.37: Dimensões para estimativa da área da secção transversal.

$$A_1 = B_1 C + T C^2 \quad (4.6)$$

$$A_2 = B_2 (C - e_1) + T (C - e_1)^2 \quad \text{se } C > e_1 \quad (4.7)$$

$$A_3 = B_3 (C - e_1 - e_2) + T (C - e_1 - e_2)^2 \quad \text{se } C > e_1 + e_2 \quad (4.8)$$

$$A_4 = B_4 (C - e_1 - e_2 - e_3) + T (C - e_1 - e_2 - e_3)^2 \quad \text{se } C > e_1 + e_2 + e_3 \quad (4.9)$$

A área relativa a cada uma das camadas obtém-se a partir das relações seguintes:

$$A_{\text{manto resistente}} = A_1 - A_2 \quad (4.10)$$

$$A_{\text{subcamada}} = A_2 - A_3 \quad (4.11)$$

$$A_{\text{filtro}} = A_3 - A_4 \quad (4.12)$$

$$A_{\text{núcleo}} = A_4 \quad (4.13)$$

Partindo da secção pré-dimensionada, e tendo em conta as expressões anteriores, o programa calcula a área da secção transversal correspondente a cada um dos pontos da grelha que definem a estrutura em planta, mantendo constante a forma da secção transversal e alterando a altura da estrutura (que depende do valor de d_{LTC} , proveniente do módulo de evolução da

linha de costa). A Figura 4.38 mostra um esquema, correspondente a uma obra perpendicular à linha de costa, sendo que a estimativa do volume total de material, V_{total} , é obtida através da soma da estimativa do volume de material correspondente à zona do tronco da estrutura (V_{tronco} , Expressão 4.14) e da estimativa do volume de material correspondente à zona da cabeça ($V_{cabeça}$, Expressão 4.15). O volume de material associado à cabeça da estrutura é estimado considerando metade do volume do tronco de um cone, com raio menor, r_1 , raio maior, r_2 , e altura correspondente à profundidade máxima (h), e considerando que neste caso em particular, a cabeça se prolonga dois pontos da grelha ao longo da extensão da estrutura. As dimensões são definidas pelo utilizador: r_1 , em função da largura de coroamento; r_2 , função da altura de coroamento da estrutura e da inclinação do talude; e h , função do coroamento da estrutura e da profundidade local.

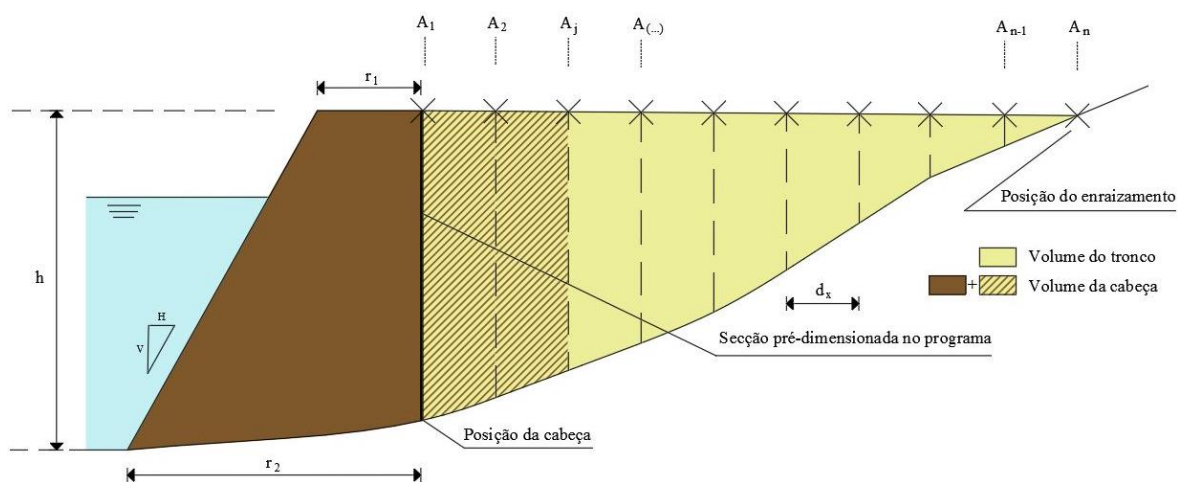


Figura 4.38: Simplificação do corte longitudinal da estrutura para estimativa do volume.

$$V_{tronco} = \sum_{j=k}^{n-1} \frac{A_j + A_{j+1}}{2} d_x \quad (4.14)$$

$$V_{cabeça} = \frac{1/3 \pi h (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)}{2} + \sum_{j=2}^k \frac{A_{j-1} + A_j}{2} d_x \quad (4.15)$$

Onde A_j representa a área da secção transversal correspondente a cada um dos n pontos que definem a estrutura em planta, espaçados de uma distância d_x . Importa referir, que o algoritmo implementado no programa para as obras perpendiculares à linha de costa considera a cota de coroamento das estruturas constante ao longo da sua extensão, não contemplando por isso estruturas mergulhantes (estruturas cuja cota de coroamento varia ao

longo do perfil de praia). O algoritmo considerado para estimar o volume de uma estrutura longitudinal aderente é semelhante ao apresentado anteriormente, no entanto, numa abordagem simplificada considera-se $A_j = A_j/2$ e $V_{total} = V_{tronco}$ (considerando $k = 1$).

4.3. Módulo de análise custo-benefício

Análises custo-benefício permitem avaliar o impacto económico de um projeto ao longo do tempo e permitem comparar soluções, através da identificação e contabilização dos custos e benefícios inerentes a cada solução (Roebeling *et al.*, 2011). Assim, foi desenvolvido na ferramenta numérica COAST o módulo de custo-benefício que, partindo dos resultados obtidos, quer no módulo de evolução da linha costa, quer no módulo de pré-dimensionamento, permite a estimativa dos custos e dos benefícios envolvidos nas soluções simuladas em cada cenário de intervenções de defesa costeira.

Contrariamente aos restantes dois módulos, que podem ser utilizados de forma isolada, a aplicação do módulo de custo-benefício só é possível tendo por base os resultados obtidos no módulo de evolução da linha de costa, para estimativa dos benefícios, e no módulo de pré-dimensionamento de estruturas de defesa costeira, para estimativa de custos. A análise custo-benefício aplicada neste módulo permite a obtenção do valor atual líquido (*VAL*, Expressão 3.51) de diferentes cenários de intervenção para mitigação da erosão costeira, e a comparação direta de resultados entre vários cenários simulados, permitindo também o cálculo do rácio benefício-custo (*RBC*, Expressão 3.52), para a avaliação da viabilidade económica de cada solução.

Nesta secção são apresentadas algumas considerações relativas à estimativa dos custos (construção da obra, secção 4.3.1.1, e respetiva manutenção, secção 4.3.1.2) e dos benefícios de diferentes cenários de intervenção (secção 4.3.2), sendo apresentados alguns valores consultados na bibliografia, ajustados à realidade da costa Portuguesa. Na secção 4.3.3 é apresentado o módulo correspondente à nova interface de análise custo-benefício.

4.3.1. Quantificação de custos

Em geral, as obras costeiras estão associadas a investimentos avultados, pelo que as possibilidades de escolha da intervenção a efetuar devem ser bem avaliadas antes de

qualquer tomada de decisão. Às diferentes alternativas de intervenção de defesa podem associar-se diferentes níveis de eficácia funcional, robustez estrutural, impactos sedimentares e morfológicos na envolvente, impactos paisagísticos, dificuldades construtivas, necessidades de manutenção e custo (Coelho, 2005). A avaliação do custo de uma obra de defesa costeira envolve diversos aspetos, não só relacionados com o tipo de defesa, mas também, com o local de implantação da obra, função a que se destina, conjuntura económica, disponibilidade de materiais, a própria dimensão da intervenção, etc. As dimensões e a profundidade em que terão de ser implantadas as obras podem levar a trabalhos de mais difícil execução, e logo elevar os custos. Os custos dependem também dos materiais utilizados, da frequência de manutenção e do grau de exposição a que estão sujeitas as obras (Reis, 2010).

Em relação a Portugal continental, o relatório apresentado pelo GTL (2014) demonstra a magnitude dos custos associados às intervenções de defesa costeira. Entre 1995 e 2014 foram investidos 196 milhões de euros em estratégias de adaptação à erosão costeira (valores de 2014). No que diz respeito à distribuição dos investimentos por tipologia, verifica-se que 52% envolve obras permanentes e fixas (defesas aderentes, esporões e obras destacadas), 38% respeita a intervenções designadas por ligeiras (alimentação artificial e reforço de diques arenosos ou dunas) e 8% intervenções em arribas (GTL, 2014). Tendo ainda em consideração o investimento entre 1995 e 2014, dos quais 167 milhões corresponderam a estratégias de proteção costeira em zonas baixas arenosas, o GTL (2014) concluiu que o investimento anual efetuado tenha sido de cerca de 8.35 milhões de euros (embora se verifique uma tendência crescente do investimento, sendo superior a 25 milhões de euros em 2014).

Importa ainda referir que numa avaliação de custos, os custos podem ser divididos em diretos, custos diretamente relacionados com a implementação da intervenção, e indiretos, que podem surgir de forma transversal à aplicação da solução escolhida. Na ferramenta COAST, a estimativa dos custos a considerar na análise custo-benefício engloba os custos de construção e os custos de manutenção da estrutura ao longo do período de análise (tempo de simulação da evolução da linha de costa), sendo que, na estimativa dos valores unitários, devem ser tidos em conta os custos diretos e indiretos (custos associados à degradação de pavimentos rodoviários durante a construção, limitações temporárias de usos no litoral, ou outros, são exemplos de custos indiretos que devem ser contabilizados pelo utilizador).

Realça-se que, na quantificação dos custos, o utilizador deve ter em conta, simultaneamente, aspetos económicos, sociais, culturais, ambientais, etc., pelo que deve proceder com precaução, devido à elevada incerteza associada à sua estimativa.

4.3.1.1. Custos de construção

Genericamente o custo de construção de uma intervenção de defesa costeira engloba todos os custos inerentes à sua implantação, tais como, custo do projeto (associados não só à conceção do projeto em si, mas a toda a fase de estudo e decisão do tipo de intervenção a executar), custos de matéria-prima, custos de transporte, custos de execução, etc. A determinação do custo associado à intervenção implica o conhecimento da sua tipologia, geometria (transversal e em planta), para que assim possam ser contabilizados, de forma aproximada, os volumes de materiais envolvidos. Importa também, o bom conhecimento de diferentes características da zona de implantação da obra, em termos geológicos, batimétricos e topográficos, bem como de agitação marítima e marés, uma vez que, condições adversas podem condicionar a obra e elevar o custo dos trabalhos.

Os esporões, os quebramares e as estruturas longitudinais aderentes, são consideradas obras permanentes e fixas e estão geralmente associados a grandes volumes de material, sendo que os dois primeiros, pelo facto de puderem atingir maiores profundidades, estão associados a maiores custos de implantação. As alimentações artificiais (realizadas na praia, duna ou deriva litoral), consoante o volume de material que representem, extensão e frequência no tempo, podem também corresponder a valores avultados de custos. As fontes aluvionares podem no modelo ser entendidas como formas de simulação de sistemas de transposição de areias, pelo que representam um custo de intervenção inicial elevado e custos de operação ao longo do tempo.

Reis (2010) resumiu informação concreta de preços globais de algumas intervenções de defesa costeira, com o objetivo de estimar um preço unitário para cada tipo de proteção, obtendo, por exemplo, um preço unitário para as alimentações de praia de cerca de 4.6 €/m³. Para o caso das alimentações artificiais de praia, os custos vão depender essencialmente da dimensão do projeto, da distância da fonte sedimentar ao local de depósito e do número de viagens entre os locais de dragagem e de deposição, do tipo de material a utilizar, da amplitude das marés, etc. (Linham e Nicholls, 2010). Almeida (2011) recolheu estudos

económicos que avaliam casos de alimentação artificial, estabelecendo relações custo/volume, obtendo valores unitários compreendidos entre os 4 €/m³ e os 6 €/m³ (com base em estudos realizados pelo INAG (Instituto da Água) e Teixeira *et al.* (1998).

Roebeling *et al.* (2011) estimaram o custo por metro linear do esporão em 10 000 €/m, da estrutura longitudinal aderente em 8 000 €/m e da alimentação artificial de praia em 6 €/m³ (valores atualizados para o ano 2000). Cruz *et al.* (2015) realizaram análises custo-benefício de estruturas longitudinais aderentes e, com base em dados apresentados por Carpinteiro (2009) e Almeida (2011), estimaram o custo unitário do enrocamento granítico em 50 €/m³ e o volume unitário de areia em 5 €/m³. Cordeiro (2016), com o objetivo de fundamentar a escolha de diferentes estratégias costeiras, recolheu informação de custos junto de determinadas autarquias portuguesas, obtendo valores globais para algumas alimentações artificiais e reforço de intervenções na orla costeira, constatando a diversidade de valores que podem ser encontrados, dependendo do local, dimensão e tipo de intervenção.

Os custos indiretos de construção estão associados à perturbação do estilo/qualidade de vida da população local após a implementação da obra e ao longo de toda a sua vida útil. Por exemplo, a construção de estruturas longitudinais aderentes de elevada altura provoca a perda de visibilidade e conseqüentemente altera o valor recreativo dos passeios e esplanadas locais (Cordeiro, 2016). As obras de defesa costeira não introduzem sedimentos no sistema costeiro, pelo que o défice sedimentar conduz à perda de areal e do valor recreativo do litoral potenciando perdas no turismo e comércio local. Os esporões, ao anteciparem a erosão a sotamar, levam ainda à perda de território, que pode também provocar a perda de habitats. Estes são exemplos de alguns aspetos que devem ser ponderados no momento de decisão, e que por isso, o utilizador deve ter em conta na introdução dos valores unitários de custos e benefícios na COAST.

Foram referidos alguns exemplos de custos de construção de esporões, estruturas longitudinais aderentes e alimentações artificiais de praias realizadas ao longo do litoral Português, com base em dados da bibliografia. Informação mais completa e detalhada pode ser encontrada em Fontão (2008), Carpinteiro (2009), Reis (2010), Almeida (2011), Roebeling *et al.* (2011, 2015, 2016), Alves (2012), Oliveira (2012), Cruz *et al.* (2015) e Cordeiro (2016), ou através do contacto direto com empreiteiros ou entidades responsáveis pela realização das intervenções.

4.3.1.2. Custos de manutenção

A manutenção de obras de defesa costeira é um assunto que assume particular interesse e ao qual deve ser dada especial atenção, visto que, pode acarretar custos significativos, comparativamente aos custos associados à construção da estrutura. Os custos de manutenção são todos os custos associados diretamente à estratégia de mitigação da erosão costeira e a toda a sua vida útil, para que as funções para as quais foram projetadas sejam mantidas no tempo. Segundo o GTL (2014), e com base em dados puramente empíricos, os custos correlacionados às manutenções programadas de dez em dez anos correspondem a valores na ordem dos 30% do investimento inicial na obra e em caso de intervenções de emergência ou intervenções que não sejam assentes numa política de manutenção periódica e programada os custos de manutenção podem atingir uma média de 75% do investimento inicial.

O galgamento de estruturas longitudinais aderentes, por exemplo, pode desencadear escoamentos no tardo da obra que podem levar ao desmoronamento da estrutura. As correntes que se geram junto às fundações das estruturas podem, a longo prazo, desencadear processos de instabilidade estrutural, tornando-se assim indispensável uma revisão periódica das estruturas. Como boa prática, pode sugerir-se que seja garantida uma intervenção ligeira nas estruturas de dois em dois anos e uma intervenção profunda após períodos de doze anos (Veloso-Gomes e Taveira-Pinto, 1999).

Como exemplo de custos de manutenção, referem-se também os custos de monitorização, que deverão estar associados a todas as estratégias. A monitorização das obras de defesa costeira é um processo de extrema importância, uma vez que a maior parte dos conhecimentos utilizados no dimensionamento deste tipo de estruturas se baseia na experiência adquirida em construções anteriores, através da observação do seu comportamento em serviço. Por outro lado, a observação das estruturas existentes, também pode permitir prever e planear eventuais obras de manutenção, evitando assim, que a estrutura atinja um nível de degradação tal, que a reparação se torne difícil e de elevado custo.

Na monitorização e processo de manutenção das estruturas é particularmente importante a observação dos danos associados ao manto resistente, isto porque, a sua degradação tem

influência direta na degradação das camadas inferiores, o que pode levar à rotura da estrutura. Assim, deve recolher-se informação relativa à queda de blocos (número e localização), degradação dos blocos e níveis de assentamento. Quando a estrutura está assente em fundos de areia poderão ocorrer erosões que provoquem assentamentos na estrutura, justificando-se a inspeção periódica das zonas dos fundos (Pita, 1985).

O dimensionamento de uma obra de defesa costeira que garanta, por exemplo, que o galgamento da estrutura nunca vá ocorrer, implicaria custos de construção demasiado avultados. Assim sendo, é necessário ter em conta que em determinadas situações de temporal as estruturas podem ser galgadas, o que pode provocar danos a nível estrutural. Segundo Cruz (2015), os impactos dos galgamentos em termos de danos no edificado e perdas de bens materiais nas zonas urbanas inundadas são geralmente menosprezados e de difícil contabilização (envolvendo os custos de reabilitação ou manutenção, custos de limpeza da via pública e reparação de infraestruturas e custos devido aos danos em bens privados e edificado).

Cruz *et al.* (2015) e Roebeling *et al.* (2015) seguiram um procedimento que permite uma estimativa do valor de dano, partindo das Expressões 4.16 e 4.17 (Oliveri e Santoro, 2000), onde a percentagem relativa de dano (D_i) é estimada a partir das curvas DDF (*depth-damage functions*), baseadas em Davis e Skaggs (1992). Cruz (2015) aplicou as referidas expressões estimando a área inundada ($A_{in} = 0.68$ ha) e a altura de água ($h_i = 5$ cm) e considerou os parâmetros α_i e β_i , respetivamente, 38.7 e -8.7 para edifícios e 51.4 e -10.8 para os bens materiais (de acordo com Roebeling *et al.*, 2015). Com estes dados, e estimando o valor associado ao terreno, v_i , Cruz (2015) obteve um valor médio de danos por inundações (C_g) para a zona de estudo (Furadouro, Portugal) de 210 000 €/ano, considerando a frequência de galgamentos do local.

$$C_g = \sum v_i D_i A_{in} \quad (4.16)$$

$$D_i = \alpha_i h_i - \beta_i h_i^2 \quad (4.17)$$

O número de galgamentos que ocorre numa estrutura pode ser estimado conhecendo o clima de agitação e as características da obra. Genericamente, o fenómeno de galgamento ocorre quando a cota de espraiamento de uma onda é superior à cota de coroamento da estrutura. A

cota de espraçamento depende da declividade de onda, do nível da superfície da água do mar, da batimetria de fundo e da porosidade, rugosidade, permeabilidade e inclinação do manto resistente da obra de defesa costeira. Teixeira (2014) fez uma análise e categorização exaustiva de 60 formulações distintas para estimativa da cota de espraçamento, das quais 23 são aplicáveis a estruturas costeiras. Obteve, por regressão linear a Expressão 4.18, onde a altura de espraçamento máxima ($R_{u,máx}$) é dependente da altura de onda e do número de Iribarren (Expressão 3.6, função da inclinação do manto resistente da estrutura).

$$R_{u,máx} = 0.41H_s\xi \quad (4.18)$$

Conhecido o clima de agitação ao largo, é possível estimar a altura de onda incidente (H_i) junto da estrutura e a altura de espraçamento máximo ($R_{u,máx}$) e comparar com o valor da cota de coroamento, concluindo se se verifica ou não galgamento da estrutura. Extrapolando a metodologia de Cruz (2015) e tirando partido da ferramenta COAST (que permite o acesso aos dados do clima de agitação - módulo de evolução da linha de costa; e o conhecimento do desnível entre o coroamento da estrutura e o nível da superfície do mar - módulo de pré-dimensionamento), é possível estimar o número de galgamentos que ocorrem nas estruturas simuladas e assim prever os custos de manutenção que daí advêm. Os valores resultantes do processo descrito representam estimativas, baseadas em expressões empíricas, pelo que, os resultados devem ser avaliados de forma crítica pelo utilizador.

Tal como nos custos de construção, apresentam-se de seguida valores da literatura relativos a episódios de manutenção e reabilitação de intervenções de defesa costeira em Portugal. Com base nos resultados de Fontão (2008) e de SETH (2010), Reis (2010) resumiu informação relativa a custos de intervenção de obras de defesa costeira, nomeadamente, esporões (com custos por metro linear de aproximadamente 1 500 €/m e 2 000 €/m, respetivamente, na zona do Furadouro e Costa da Caparica), estruturas longitudinais aderentes (com valores por metro linear similares aos observados para os esporões e relativos às mesmas zonas de intervenção) e quebramares (com um caso de estudo na praia da Vitória, nos Açores, com valores por metro linear de aproximadamente 9 300 €/m). Roebeling *et al.* (2011) estimaram o valor dos custos de manutenção de esporões em 2 000 €/m e das estruturas longitudinais aderentes em 1 800 €/m (considerando os valores atualizados para o ano 2000 e uma frequência de manutenção de 3 em 3 anos). Cruz (2015) estabeleceu valores

de referência para as obras de manutenção devido à ocorrência de galgamentos, representativos das praias de Esmoriz, Cortegaça e Furadouro (130 €/m/ano, 370 €/m/ano e 500 €/m/ano, respetivamente). De referir que não são associados custos de manutenção às alimentações artificiais de praia, uma vez que se considera que uma nova deposição corresponde a uma nova intervenção.

Como conclusão, verifica-se que a definição dos custos de construção e manutenção está associada a elevadas incertezas, pelo que os valores recolhidos da bibliografia não devem ser extrapolados, e podem ser considerados pelo utilizador de forma meramente indicativa. Em qualquer aplicação concreta, o utilizador deverá recolher informação específica do local da intervenção.

4.3.2. Quantificação de benefícios

Os benefícios de uma intervenção de defesa costeira correspondem às áreas de território (ganhas ou perdidas por efeito da intervenção) afetadas do seu valor económico. A área ganha, ou não perdida, representa a área que é recuperada ao avanço do mar com a solução implementada. Para a realização de análises custo-benefício, as áreas resultantes de cada cenário de simulação são convertidas num valor monetário, possibilitando assim uma comparação com os custos associados às intervenções de defesa costeira.

A atribuição de um valor económico ao território deve ter em conta os vários ecossistemas que existem e os benefícios que estes podem trazer ao longo do tempo (quantificados anualmente). Na interface entre o meio terrestre e o meio marinho, a zona costeira é particularmente rica em biodiversidade, quer ao nível específico, quer ao nível dos ecossistemas (Reis, 2010), pelo que esta zona revela frequentemente um elevado valor paisagístico, resultado da conjugação de características geomorfológicas, ecológicas e de ocupação humana do seu território.

Tendo por base uma abordagem de transferência de benefícios, baseada em Costanza *et al.* (1997), Reis (2010) obteve uma estimativa do valor associado aos ecossistemas/utilizações das zonas costeiras, em €/ha/ano. A título de exemplo, os valores inferiores estão associados a espaços agrícolas e florestais (respetivamente, 259 €/ha/ano e 337 €/ha/ano), enquanto que, às zonas húmidas, lagos ou rios e zonas costeiras com pouca vegetação estão associados

valores significativamente superiores (respetivamente, 11 139 €/ha/ano, 9 475 €/ha/ano e 21 830 €/ha/ano). Nos estudos realizados por Roebeling *et al.* (2011, 2012), foram definidos cinco tipos de ecossistemas para a área de estudo (costa noroeste portuguesa) e respetivos valores (atualizados para o ano de 2010): praias e dunas (29 755 €/ha/ano), floresta (459 €/ha/ano), agrícola (688 €/ha/ano), aquáticos (31 787 €/ha/ano) e urbanos (619 525 €/ha/ano). Ainda relativamente ao valor do território das zonas edificadas, Fontão (2008) estimou o valor para a zona de Esmoriz, Cortegaça e Furadouro, sendo o valor máximo estimado de 1 448 €/m²/ano, para o Furadouro.

Importa ainda referir que, ao atribuir um valor ao território, além da quantificação dos benefícios que, quer o território, quer os ecossistemas que o compõem, podem trazer de forma aparente, é importante uma análise da evolução da ocupação do território ao longo do tempo, isto porque, muitas das vezes é possível prever, quer a valorização, quer a desvalorização, de determinada zona ao longo de um determinado horizonte temporal (por exemplo, bairros despovoados que podem originar complexos habitacionais/turísticos, etc.).

Na interface do módulo de custo-benefício desenvolvida (e apresentada na secção seguinte), os valores do território são um dado introduzido pelo utilizador, em €/m²/ano, aos quais pode, ou não, estar associado uma taxa de evolução ao longo do tempo (positiva ou negativa), caso o utilizador pretenda. Serão contabilizados benefícios positivos, no caso da intervenção gerar áreas de acreção, e/ou benefícios negativos, nas situações em que se criam também áreas de erosão, sendo que o utilizador pode considerar diferentes valores para uma e outra situação. Refira-se que a atribuição de valores para o território é uma questão chave nos resultados que possam vir a ser obtidos, pelo que devem ser sustentados e fundamentados, numa aplicação concreta, com recolha de informação junto das câmaras municipais, seguradoras, imobiliárias, etc.

4.3.3. Interface do módulo de custo-benefício

Na ferramenta COAST, o módulo de custo-benefício não funciona de forma isolada, pelo que, a primeira interação com o utilizador, após a janela da Figura 4.1, é a janela de diálogo que permite importar o ficheiro *output* do módulo de evolução da linha de costa, ficheiro “*simulation_name.ltc*”. A importação deste ficheiro é fundamental e indispensável à utilização do módulo de custo-benefício, uma vez que contém os dados relativos à evolução

da linha de costa, traduzindo as áreas de acreção (benefícios positivos da simulação) e as áreas de erosão (encaradas na análise como benefícios negativos) ao fim de cada ano de simulação, e ainda, a informação relativa às intervenções de defesa costeira consideradas na simulação (que podem ou não existir).

Após a importação do ficheiro, a primeira janela do módulo de custo-benefício (Figura 4.39) deixa em aberto ao utilizador a opção de realizar apenas um balanço económico do cenário importado, isto é, a opção de apenas quantificar, ao longo de toda a simulação, os custos associados à construção e à manutenção das intervenções de defesa costeira previstas e de quantificar os benefícios associados às áreas ganhas e perdidas, sem que seja feita uma comparação com outro qualquer cenário. Neste caso, as áreas de território ganhas e perdidas são calculadas comparando a linha de costa do horizonte temporal, com a linha costa correspondente ao ano 0 (linha de costa inicial).

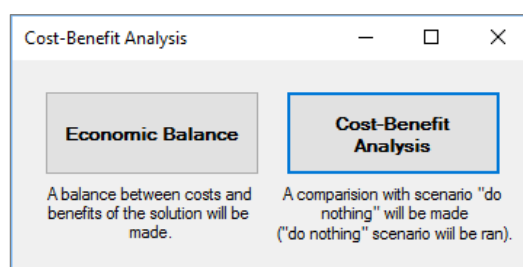


Figura 4.39: Janela de opção de escolha do tipo de análise custo-benefício.

Caso o utilizador decida realizar a análise custo-benefício, a simulação importada será comparada com o cenário de “não intervenção”, isto é, o cenário que equivale apenas à manutenção das obras já existentes no domínio de cálculo. Escolhida esta opção, é iniciada de imediato a simulação deste cenário, ficando visível ao utilizador a linha de comandos do módulo de evolução da linha de costa. Os resultados obtidos para a evolução da linha de costa ao longo do tempo, bem como o cálculo das áreas de erosão e de acreção anuais, são armazenados no módulo de custo-benefício. Assim, os benefícios do cenário em análise são calculados por comparação da posição da linha de costa num determinado instante de tempo, com a posição da linha de costa do cenário de “não intervenção” obtida para o mesmo instante. Esta opção, apesar de permitir uma comparação entre soluções, é mais morosa, uma vez que implica que sejam executadas as simulações de dois cenários distintos (cenário de “não intervenção” e cenário da intervenção em estudo).

Definido o tipo de análise a realizar no módulo de custo-benefício, surge ao utilizador a janela inicial (Figura 4.40), com a identificação da simulação, horizonte temporal e respetiva representação da batimetria e topografia do domínio de cálculo. É a partir desta janela que são definidos todos os parâmetros necessários para a quantificação dos benefícios e dos custos associados ao cenário em estudo. Relativamente aos benefícios, são apresentados os resultados do total de área de acreção e erosão (dependendo da opção escolhida para a análise, o referencial da linha de costa para avaliação das áreas difere entre a linha de costa no instante 0 ou a linha de costa do cenário de “não intervenção” no instante em estudo). No caso de ser considerado o mesmo valor para o território conquistado em situação de acreção, ou perdido em situação de erosão (através da respetiva caixa de seleção), o utilizador necessita apenas de definir os parâmetros uma única vez.

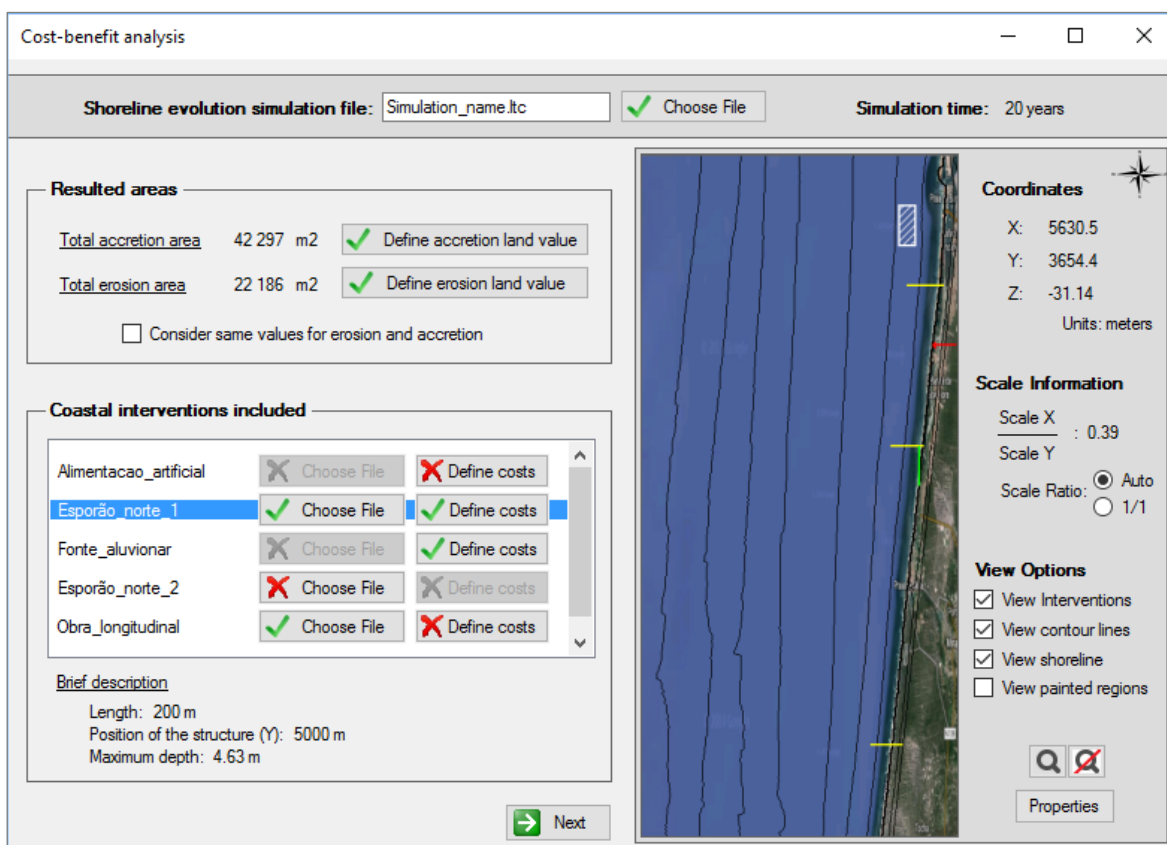


Figura 4.40: Janela principal do módulo de custo-benefício.

No que diz respeito às intervenções de defesa, é apresentada uma listagem das intervenções incluídas na simulação, para as quais o utilizador necessita de definir todos os parâmetros necessários à quantificação dos respetivos custos (construção e manutenção). No caso de

obras perpendiculares à linha de costa e longitudinais aderentes (novas, prolongamento das existentes, ou aumento da cota de coroamento), o utilizador, para além de definir os parâmetros necessários à quantificação dos custos, tem ainda de importar o respetivo ficheiro com informação acerca do volume de material envolvido (ficheiro “*structure_name.xdc*”).

Para o cálculo do valor associado aos benefícios, o utilizador recorre primeiramente ao botão “*Define accretion/erosion land value*” e acede à janela da Figura 4.41, que lhe permite a criação de diferentes zonas (quantas o utilizador pretender). Posto isto, o utilizador associa um valor monetário anual por área de território (Figura 4.42). Nesta janela o utilizador define os limites da zona (perpendicularmente à linha de costa), através do número da grelha ou da distância ao ponto de origem. Define ainda, o valor associado à respetiva zona (€/m²/ano) e a eventual taxa de evolução prevista para o valor do terreno, caso se trate de uma zona onde se preveja variação deste parâmetro ao longo do tempo (positiva ou negativa). Caso o utilizador considere diferentes valores de terreno para a mesma faixa (divisão ao longo da direção perpendicular à linha de costa) deverá desativar a caixa de seleção “*Same land value along cross-shore*” (ativa por defeito) e definir os parâmetros através do respetivo botão (que remete o utilizador para a janela da Figura 4.43).

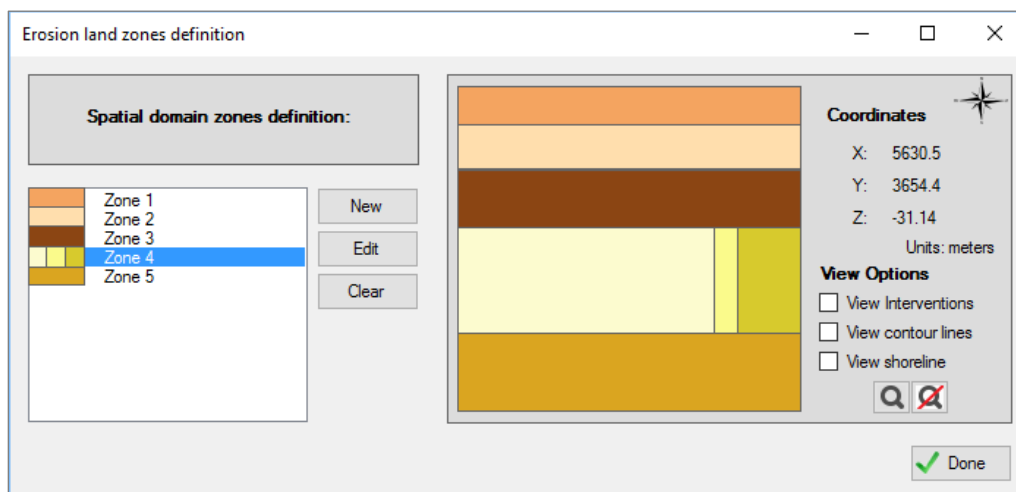


Figura 4.41: Divisão do domínio de cálculo para definição do valor do terreno (ao longo da linha de costa).

Na janela da Figura 4.43, o utilizador define o número de zonas de diferente valor pretendidas ao longo da faixa perpendicular à linha de costa. Para cada uma das zonas, através da janela da Figura 4.44, o utilizador define o valor monetário (€/m²/ano) de cada uma das zonas e respetiva taxa de valorização do território, caso se aplique.

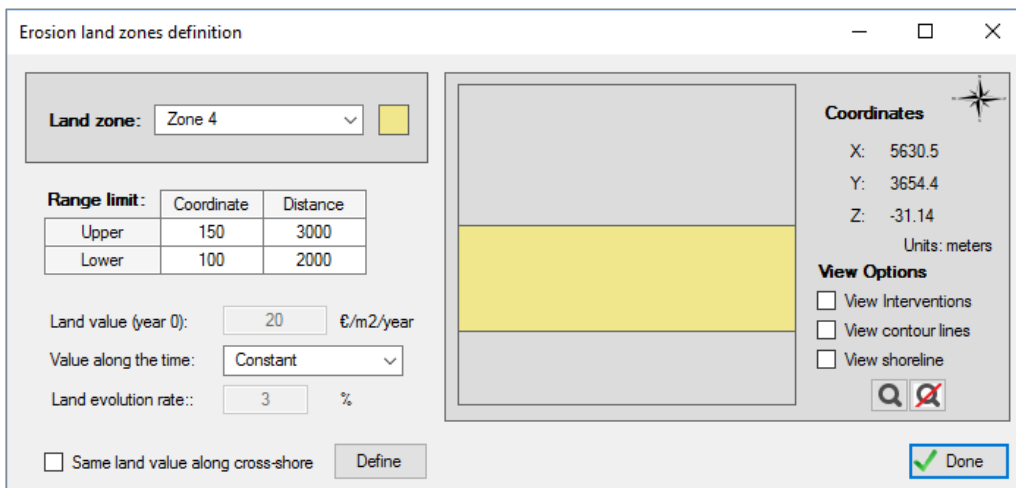


Figura 4.42: Definição dos parâmetros associados a cada uma das faixas perpendiculares.

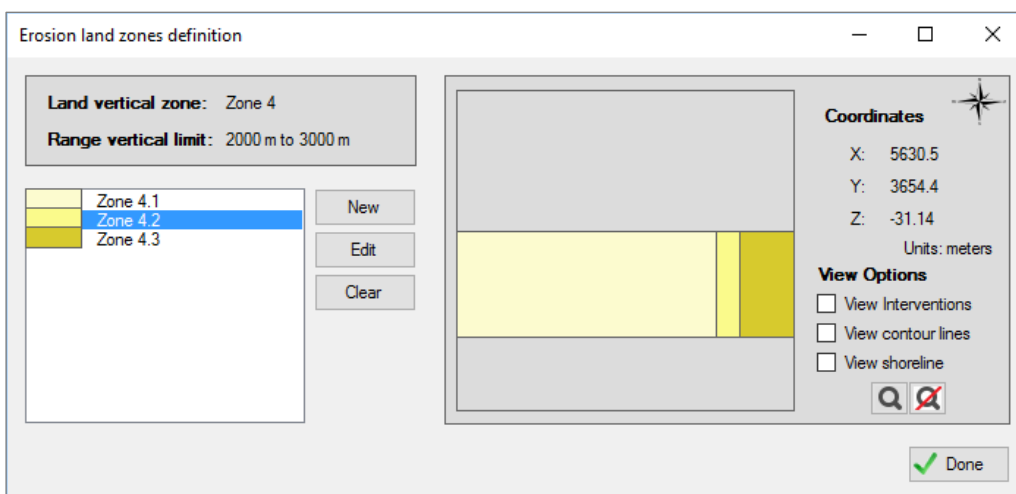


Figura 4.43: Definição de zonas do domínio de cálculo ao longo da faixa perpendicular.

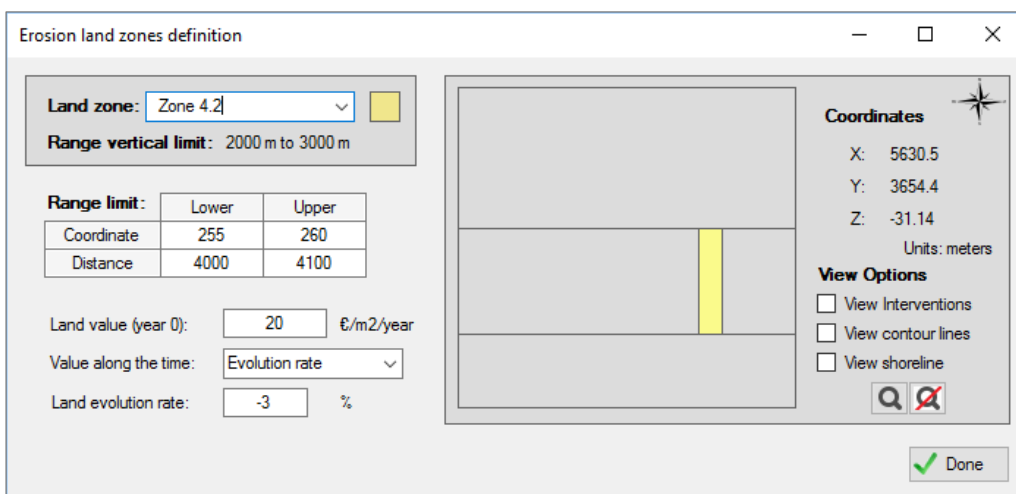
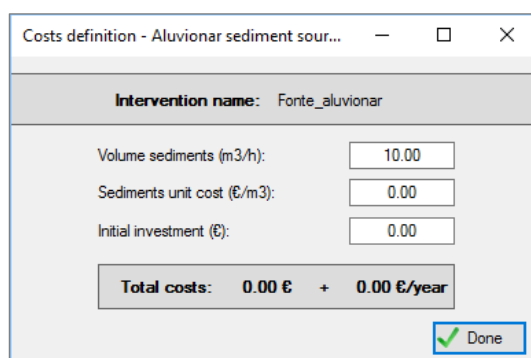


Figura 4.44: Definição dos parâmetros associados a cada uma das faixas paralelas à linha de costa (ao longo da faixa perpendicular à linha de costa).

Para o cálculo do valor dos custos associados a cada uma das intervenções consideradas na simulação, o utilizador, após a importação dos respetivos ficheiros (“*structure_name.xdc*”, quando necessários), acede às janelas relativas à definição dos parâmetros que determinam o custo de construção e manutenção de cada uma das intervenções, através do botão “*Define costs*”. As janelas correspondentes diferem consoante o tipo de intervenção em análise.

Para o caso de fontes aluvionares de sedimentos (Figura 4.45), é apresentado ao utilizador o valor do volume de sedimentos (m^3/h) definido no módulo de evolução da linha de costa (este valor pode ser ajustado, sendo que a alteração apenas terá impacto no valor total dos custos). O utilizador deve definir o valor monetário do material (€/m^3) e ao valor total associado ao material (expresso em €/ano) é acrescido o valor necessário ao investimento inicial (também definido pelo utilizador). Note-se que na opção relativa às fontes aluvionares, o módulo de evolução da linha de costa assume as mesmas características da intervenção ao longo de todo o período de simulação.



Intervention name: Fonte_aluvionar	
Volume sediments (m3/h):	10.00
Sediments unit cost (€/m3):	0.00
Initial investment (€):	0.00
Total costs: 0.00 € + 0.00 €/year	
<input type="button" value="Done"/>	

Figura 4.45: Definição dos custos associados a fontes aluvionares de sedimentos.

Os parâmetros necessários à determinação dos custos associados às alimentações artificiais de praia (Figura 4.46) são semelhantes aos considerados para as fontes aluvionares de sedimentos. No entanto, neste caso não é calculado um valor anual, mas sim um valor único, uma vez que a alimentação artificial traduz uma intervenção pontual no tempo, não obrigando a custos de primeiro investimento.

Para as obras perpendiculares à linha de costa (Figura 4.47), o utilizador deve definir os custos associados à construção e respetiva manutenção ao longo do tempo (no caso das obras já existentes, que não sofrem alterações, apenas é considerada a sua manutenção).

Relativamente aos custos de construção, o utilizador define o preço unitário de cada um dos materiais considerado para o tronco e para a cabeça das estruturas, para cada uma das camadas constituintes: manto resistente, subcamada, filtros e núcleo. O valor do custo total de construção é calculado tendo em conta o preço definido (€/m³) e o volume de material associado a cada uma das camadas (resultados que provêm do módulo de pré-dimensionamento, mas que podem ser ajustados pelo utilizador), e outros eventuais custos que possam ser considerados (transporte, custos associados à fase de projeto, etc.).

Costs definition - Artificial nourishments

Intervention name: Alimentacao_artificial

Sand total volume (m3):

Sand unit cost (€/m3):

Other costs (transport, etc.) (€/m3):

Total costs: 6 000 000.00 €

Figura 4.46: Definição dos custos associados a alimentações artificiais de praia.

Costs definition - Transversal defense works

Structure name: Esporao_norte_1 (Length = 200 m) **Type of Structure:** Transversal defense work **Condition:** New

Construction costs

Trunk	Blocks Unit Weight (kN)	Volume (m3)	Unit cost (€/m3)	Total cost (€)
Armour layer material	10.0	47 050	20.00	941 000.00
Underlayer material	1.0	15 462	15.00	154 620.00
Filter material	0.05	4 118	10.00	61 770.00
Core material	0.003	21 674	5.00	108 370.00
				1 322 480.00

Head	Blocks Unit Weight (kN)	Volume (m3)	Unit cost (€/m3)	Total cost (€)
Armour layer material	40.0	1 337	80.00	106 960.00
Underlayer material	4.0	401	60.00	24 060.00
Filter material	0.2	134	40.00	5 360.00
Core material	0.01	802	20.00	16 040.00
				152 420.00

Other construction costs (€):

Construction costs: 1 474 900.00 €

Maintenance costs

Trunk

Frequency of maintenance (years):

Maintenance cost:

Fixed value (€): Percent (%):

Head

Frequency of maintenance (years):

Maintenance cost:

Fixed value (€): Percent (%):

Overtopping unit cost (€):

Overtopping events (per year):

Other maintenance costs (€/year):

Maintenance costs: 63 224.80 €/year

Figura 4.47: Definição dos custos associados a obras perpendiculares à linha de costa.

Para a determinação dos custos de manutenção, o utilizador deve primeiramente definir a frequência e o custo associado a cada episódio de manutenção (que podem ser diferentes para a zona do tronco e da cabeça das estruturas). O valor do custo de cada manutenção pode ser definido por um valor unitário ou em função de uma determinada percentagem do custo de construção da estrutura. Os custos de manutenção incluem também os gastos inerentes aos episódios de galgamento, caso ocorram. O número de galgamentos anual é estimado e apresentado ao utilizador (com base no algoritmo e procedimento expostos na secção 4.3.1.2). No entanto, o utilizador pode alterar o valor proposto pelo programa. O total de custos de manutenção (anual) resulta assim da soma dos custos associados à frequência de manutenção definida, dos custos relativos aos episódios de galgamentos e ainda de outros eventuais custos anuais previstos pelo utilizador.

Relativamente às estruturas longitudinais aderentes, os parâmetros a definir para estimar os custos de construção e manutenção das estruturas são em tudo semelhantes aos apresentados para as obras perpendiculares à linha de costa, sem que sejam consideradas as parcelas relativas à cabeça das estruturas (Figura 4.48). De referir, no entanto, que os custos de manutenção inerentes aos episódios de galgamento têm especial impacto no caso das estruturas longitudinais aderentes (ao contrário dos esporões), uma vez que estão, regra geral, associados a perdas de bens e inundações em infraestruturas e edificado.

Costs definition - Longitudinal defense works

Structure name: *Obra_longitudinal* (Length = 100 m) Type of Structure: Longitudinal defense work Condition: New

	Blocks Unit Weight (kN)	Volume (m3)	Unit cost (£/m3)	Total cost (£)
Armour layer material	10.0	7 316	20.00	146 320.00
Underlayer material	1.0	2 945	15.00	44 175.00
Filter material	0.05	877	10.00	8 770.00
Core material	0.003	6 831	5.00	34 155.00
				233 420.00

Other construction costs (£):

Construction costs: 233 420.00 £

Maintenance costs

Frequency of maintenance (years):

Maintenance cost:

Fixed value (£): Percent (%):

Overtopping unit cost (£):

Overtopping events (per year):

Other maintenance costs (£/year):

Maintenance costs: 2 334.20 £/year

Done

Figura 4.48: Definição dos custos associados a estruturas longitudinais aderentes.

Definidos todos os parâmetros relativos à contabilização dos benefícios e dos custos associados ao cenário simulado, o utilizador pode aceder à janela final do módulo de custo-benefício (Figura 4.49), onde deve definir o valor a considerar para a taxa de desconto ou atualização (r). Nesta janela são apresentados os totais de custos e benefícios ao longo do tempo, bem como o valor de VAL (valor atual líquido, Expressão 3.51) e de RBC (rácio benefício-custo, Expressão 3.52) para o número de anos de análise definidos (que pode ser igual ou inferior ao tempo total da simulação). Note-se que, a análise custo-benefício é realizada anualmente, e o utilizador pode visualizar os resultados respetivos ao ano pretendido (através da caixa de seleção). De referir ainda que, dependendo do tempo de análise definido pelo utilizador, podem ou não ser consideradas todas as intervenções de defesa costeira definidas previamente, uma vez que, no caso das alimentações artificiais de praia, é definido o ano em que são efetuadas.

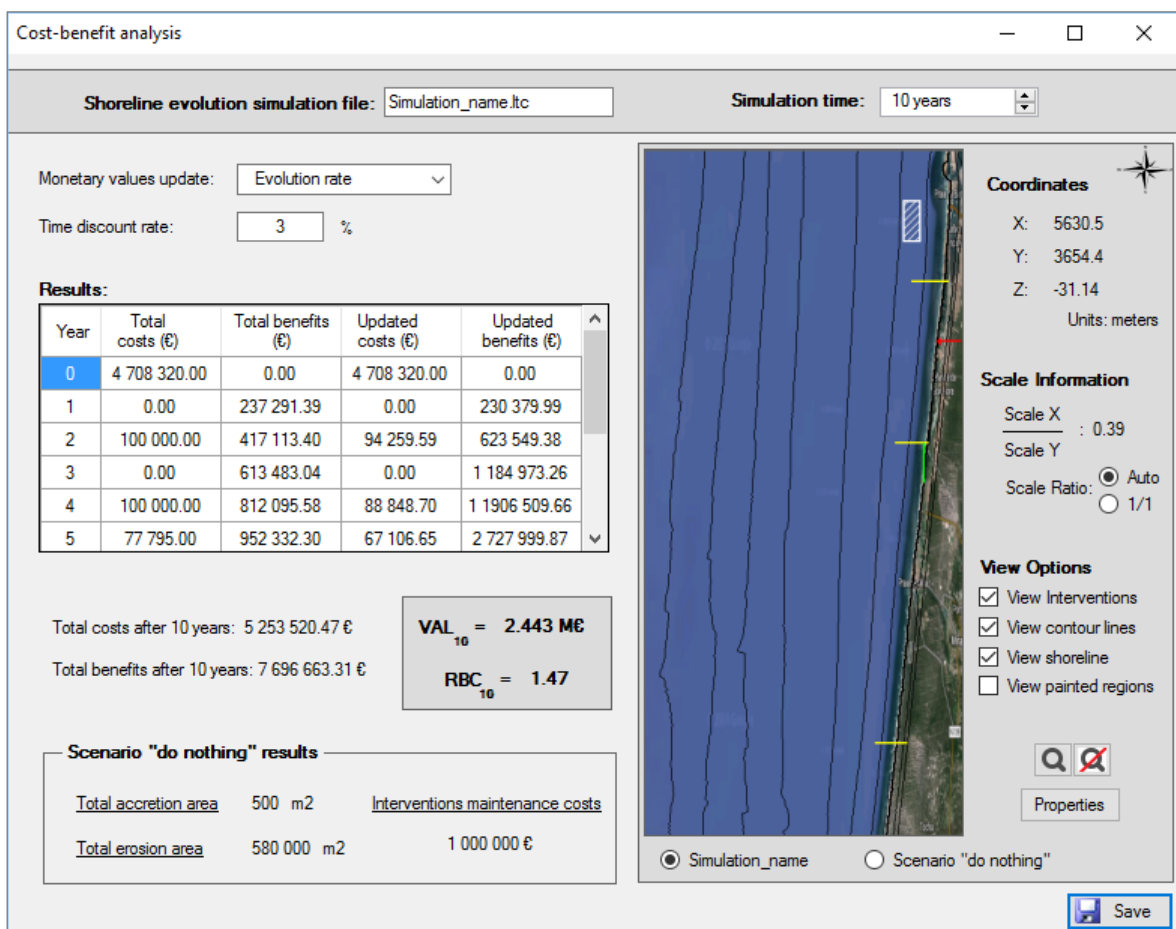


Figura 4.49: Janela final do módulo de custo-benefício.

Ainda nesta janela, o utilizador tem acesso à posição da linha de costa para o instante de análise considerado, tanto para a simulação em estudo, como para o cenário de “não intervenção” (caso este esteja a ser considerado na análise custo-benefício). Neste caso, fica também disponível ao utilizador o total de área de acreção e erosão correspondente ao cenário de “não intervenção” (para o mesmo horizonte de tempo), bem como o valor despendido na manutenção das obras existentes.

4.4. Notas finais

Neste capítulo foi apresentada a ferramenta numérica desenvolvida para análise otimizada do impacto de intervenções de defesa costeira, a COAST, principal objetivo deste trabalho. A COAST, *Coastal Optimization ASsessment Tool*, é composta por três módulos: projeção da evolução da linha de costa, pré-dimensionamento de estruturas costeiras e análise custo-benefício, sendo cada um deles descrito e apresentado, respetivamente, nas secções 4.1, 4.2 e 4.3. Esta apresentação acaba também por corresponder a um breve manual do utilizador, permitindo demonstrar algumas das principais valências permitidas por cada um dos módulos desenvolvidos. Destaque para o facto de, quer o módulo de evolução da linha de costa, quer o módulo de pré-dimensionamento poderem ser utilizados de forma isolada, caso o utilizador assim pretenda, mas, a análise custo-benefício implicar a utilização sequencial dos outros dois módulos.

O desenvolvimento do módulo de evolução da linha de costa corresponde à interface gráfica desenvolvida para o modelo numérico LTC, em linguagem de programação C#, e às alterações realizadas no algoritmo, que resultaram na versão LTC-ML2017. As alterações introduzidas no algoritmo de cálculo correspondem à criação de novos ficheiros de saídas de resultados, inclusão de novas opções para definir a sequência de leitura das coordenadas dos pontos da grelha que definem o domínio de cálculo, possibilidade de definição da profundidade de fecho e do espraiamento da onda através de um valor fixo (independente das características do clima de agitação), inclusão da possibilidade de saídas intermédias de resultados de batimetria e topografia e alteração do referencial para o cálculo da orientação da onda na rebentação.

O módulo de pré-dimensionamento resultou da melhoria e do aperfeiçoamento da ferramenta XD-Coast. A integração na ferramenta numérica COAST desencadeou alterações no XD-Coast que permitem o cruzamento e conjugação de dados provenientes do módulo de evolução da linha de costa. Foi incorporado um algoritmo (e respetiva janela) de estimativa da contabilização do volume de material das estruturas e desenvolvidas duas novas janelas de auxílio ao utilizador na definição da altura de onda de projeto e na escolha do coeficiente de estabilidade a considerar na formulação de Hudson (1974). Importa referir que, algumas das melhorias e alterações introduzidas na ferramenta XD-Coast são transversais à versão isolada e integrada, enquanto outras, apenas dizem respeito à versão integrada.

O módulo de custo-benefício recorre aos resultados dos outros dois módulos para quantificação das áreas de acreção e erosão (módulo de evolução da linha de costa) e quantificação dos volumes de material envolvido nas estruturas de defesa costeira (módulo de pré-dimensionamento), e permite a realização de dois tipos de análise: um balanço económico ou uma análise custo-benefício. No primeiro caso é realizado apenas um balanço económico da solução, que se traduz numa quantificação dos custos associados à construção e à manutenção das intervenções de defesa costeira previstas e na quantificação dos benefícios associados às áreas ganhas e perdidas. Na segunda opção, a análise custo-benefício é realizada por comparação com o cenário de “não intervenção”. A obtenção dos índices económicos do cenário em análise, *VAL* e *RBC* só é realizada depois do utilizador definir todos os parâmetros necessários à quantificação do valor associado aos custos das intervenções e ao valor do território do domínio de cálculo (que devem resultar numa análise conjunta e ponderada de fatores económicos, sociais, culturais, ambientais, etc.).

A COAST tem como objetivo principal a análise de diferentes cenários e a otimização de soluções, uma vez que são inúmeras as possibilidades e considerações que podem ser tidas em conta no projeto de intervenções de defesa costeira, para mitigação do problema da erosão costeira. Assim, com vista a demonstrar a aplicabilidade da ferramenta e os resultados que podem ser obtidos com a sua utilização, são apresentados, no Capítulo 6, exemplos concretos de intervenções simuladas com a COAST.

Capítulo 5

MODELAÇÃO DE EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA

5. MODELAÇÃO DE EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA

O modelo numérico LTC tem já um vasto campo de aplicação (secção 3.3.3). No entanto, o desenvolvimento da nova interface e as alterações realizadas no algoritmo (secção 4.1) permitiram uma análise mais pormenorizada a diversos parâmetros intervenientes no cálculo e a visualização de aspetos até então difíceis de detetar no decorrer das simulações. Desta forma, tornou-se conveniente e mais acessível realizar o estudo do desempenho do modelo, com vista a um melhor entendimento dos comportamentos observados e a uma consequente melhoria dos resultados. Por outro lado, e apesar de já realizados alguns estudos de comparação do LTC com o modelo numérico GENESIS (enumerados na secção 3.3.3), as alterações introduzidas no algoritmo permitiram também comparar aspetos e parâmetros não viáveis anteriormente. Assim, o presente capítulo, tendo por base um caso de estudo hipotético (secção 5.1), pretende avaliar o desempenho do modelo numérico LTC (secção 5.2), comparando também os resultados com o modelo GENESIS (secção 5.3). Uma vez que ambos os modelos numéricos têm por base o modelo analítico de Pelnard-Considère (1956), as análises culminam na aplicação deste modelo ao caso de estudo, e comparação dos resultados com os obtidos com o modelo LTC e com o modelo GENESIS (secção 5.4).

5.1. Caso de estudo

De forma a ser possível um maior controlo dos fenómenos envolvidos na modelação numérica da evolução da linha de costa, foi definido um caso de estudo hipotético, com batimetria e topografia regulares (Figura 5.1). O domínio de cálculo é caracterizado por uma malha de 401 pontos, espaçados de 20 m, na direção perpendicular à linha de costa e 501 pontos, também espaçados de 20 m, na direção paralela à linha de costa, resultando numa área modelada de 8 000 x 10 000 m². A batimetria da região foi gerada de acordo com o perfil de equilíbrio de *Dean*, Expressão 5.1 (Bruun, 1954; Dean, 1977).

$$h = Ax^m \quad (5.1)$$

$$A = 2.25 \sqrt[3]{w_s^2/g} \quad (5.2)$$

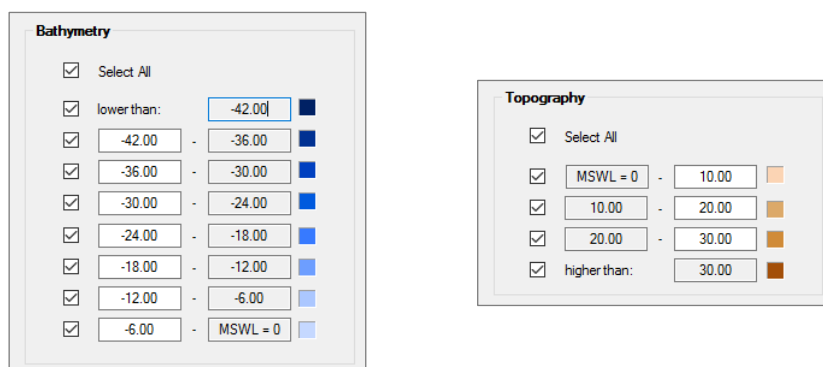
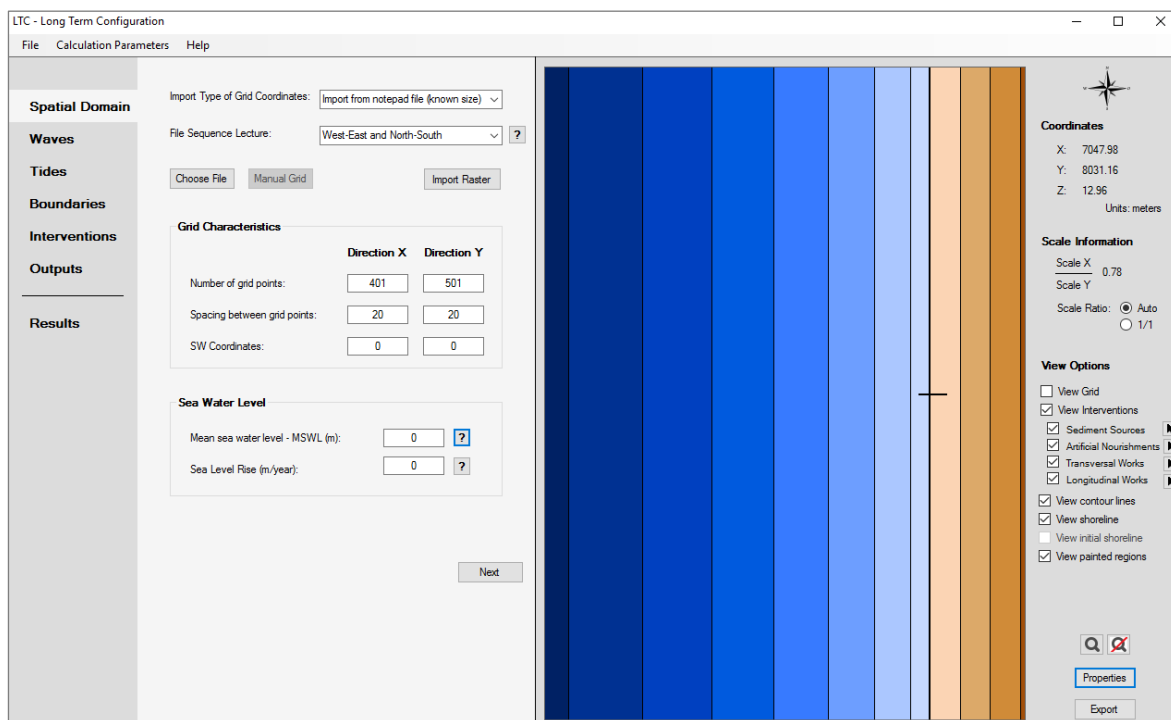


Figura 5.1: Representação do caso de estudo no módulo de evolução da linha de costa.

A Expressão 5.1 é uma expressão genérica para a geometria do perfil de equilíbrio, que representa a profundidade do perfil de praia (h) em função da distância à linha de costa (x). O parâmetro A pode ser definido pela Expressão 5.2, onde w_s representa a velocidade de queda dos sedimentos e g a aceleração da gravidade. Para o caso de estudo foi considerado $A = 0.127$. O parâmetro m pode variar consoante o tipo de dissipação de energia da praia em análise. De acordo com o exposto em Cowell *et al.* (1999), autores como Bruun, Dean, etc., apontam para $m = 2/3$ em praias intermédias (generalidade da costa Oeste portuguesa, Coelho, 2005), valor que foi assumido no presente caso de estudo. A cota zero (0.0 m) foi considerada como nível de referência para a superfície da água do mar e foi mantida constante ao longo de todo o tempo de simulação. Acima desta cota, considerou-se um

declive constante de 2%. A forma do perfil transversal definida resulta, no domínio de cálculo, numa profundidade máxima de aproximadamente 44 m e um talude emerso que atinge os 32 m de altura, como visível na Figura 5.1.

Considerou-se a introdução de um esporão com 200 m de comprimento localizado a meio do desenvolvimento longitudinal do domínio de cálculo (a 5000 metros das fronteiras), provocando uma situação de acreção persistente e avanço da linha de costa a barlamar. Não foi considerada a opção do modelo LTC que prevê a atenuação do efeito erosivo a sotamar do esporão (ver secção 3.3.2.2) e considerou-se uma cota de coroamento da estrutura de 10 m acima do nível de referência.

Para facilitar a análise dos resultados da simulação dos fenómenos da propagação da agitação marítima, considerou-se cada onda a atuar isoladamente, com características constantes ao longo de todo o período de simulação. Efetuou-se o estudo de 24 ondas diferentes, com alturas a variar entre 1 m e 8 m e conjugadas com direcções de propagação de 10, 20 e 30° com a perpendicular à linha de costa (características ao largo). Como referido, foi admitido que o nível de referência para a superfície da água do mar se mantém constante, desprezando assim o efeito das marés. De referir que apenas foram analisados os resultados das 24 ondas para o instante inicial (parte da secção 5.3.4). Os restantes resultados analisados correspondem à onda de características $H_0 = 2$ m e $\alpha_0 = 20^\circ$ (à exceção da secção 5.4.1 que compara os resultados obtidos para esta onda com os resultados obtidos para a onda com $H_0 = 8$ m e $\alpha_0 = 30^\circ$).

O cálculo do volume de sedimentos em transporte foi realizado através da formulação de CERC (SPM, 1984), Expressão 3.25, que depende essencialmente da altura da onda na rebentação, H_b , e do ângulo de incidência da onda na rebentação, α_b . O valor de k , coeficiente de transporte, foi definido de forma a ser cumprido o critério de estabilidade (ver secção 3.3.2.1) para todas as 24 ondas em análise, tomando assim o valor de 0.0126. Relativamente aos restantes parâmetros, a massa volúmica da água, ρ , foi considerada 1030 kg/m³, a massa volúmica dos sedimentos, $\rho_s = 2650$ kg/m³, a aceleração da gravidade, $g = 9.81$ m/s², a porosidade da areia, $n = 0.4$, e o índice de profundidade de rebentação, k_b , foi considerado 0.78.

Relativamente à definição dos limites do perfil ativo, optou-se pela consideração de um valor fixo para a profundidade de fecho e para o valor do espraiamento da onda (nova funcionalidade do algoritmo de evolução da linha de costa, secção 4.1.3), sendo condicionante a onda de 8 m de altura ($DoC = 16.62$ m e $R_u = 2.24$ m, obtidos através das Expressões 3.29 e 3.31, respetivamente). Assim, considerou-se um valor de 17 m para a profundidade de fecho e de 3 m para o espraiamento da onda, totalizando uma altura ativa de 20 m. O intervalo de tempo de cálculo considerado nas simulações foi de uma hora.

Foi objetivo que as simulações decorressem até ser atingida a situação de equilíbrio pelo que se considerou um horizonte temporal extremamente longo (500 anos) e foram consideradas fixas as fronteiras norte e sul da grelha modelada.

5.2. Desempenho do LTC

As análises apresentadas nesta secção consideraram um clima de agitação constante ao longo de toda a simulação, caracterizado por uma altura de onda de 2 m e um ângulo de 20° com a perpendicular à linha de costa (características ao largo). Estas análises tiveram por objetivo avaliar o desempenho do modelo numérico LTC, numa situação persistente de acreção, ao longo do tempo e em função da distância ao esporão, tendo por base o caso de estudo descrito na secção anterior.

5.2.1. Resultados

Foram gerados resultados que permitem a avaliação da evolução das características da agitação marítima, da dinâmica sedimentar e da morfologia ao longo do tempo e em função da distância ao esporão.

Agitação marítima

A orientação da onda na rebentação é determinada através da aplicação da Lei de *Snell*, tendo-se considerado como referência para a definição da orientação da batimetria, a linha de rebentação. Por sua vez, a orientação da linha de rebentação é determinada considerando a coordenada de dois perfis transversais consecutivos. Conhecidas a orientação da onda e a profundidade na rebentação, a altura de onda na rebentação é estimada através da aplicação de dois coeficientes: empolamento e refração (e difração, quando na presença de estruturas).

Foi avaliado o comportamento da altura e da orientação da onda na rebentação ao longo do tempo e em função da distância ao esporão, com influência direta no cálculo do potencial de transporte sedimentar, num horizonte temporal de 500 anos. Numa análise global, os resultados obtidos permitiram retirar conclusões similares para alturas e orientações (Figura 5.2). Verifica-se que, apenas há alterações dos valores dentro de um determinado intervalo de tempo, definido por dois instantes, o instante em que se faz sentir o impacto do esporão na posição da linha de costa e o instante de estabilização da posição da linha de costa. O primeiro instante corresponde ao momento a partir do qual o valor da altura ou orientação da onda difere do valor de referência, consequência do efeito da acumulação de sedimentos a barlar do esporão. O segundo corresponde ao momento a partir do qual o valor de qualquer dos parâmetros se mantém inalterável no tempo.

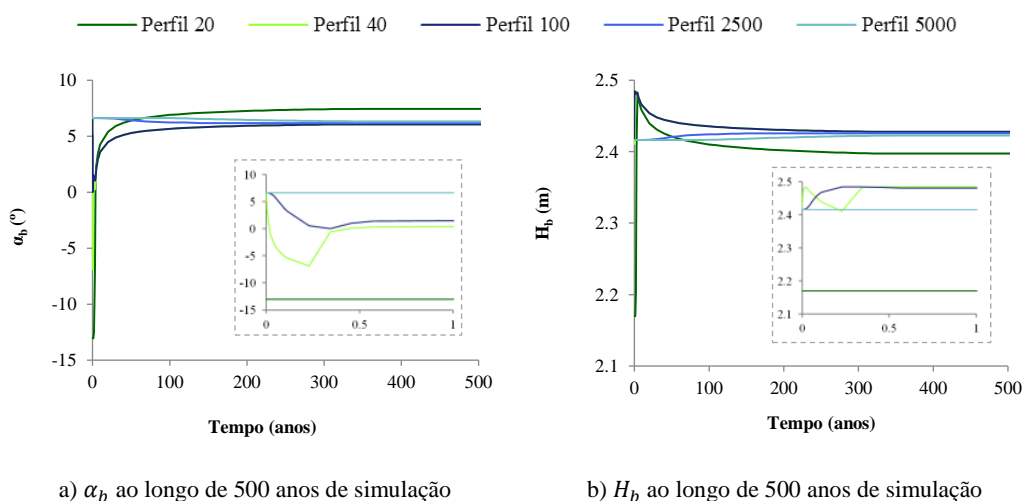


Figura 5.2: Evolução da agitação marítima ao longo do tempo.

O valor de referência corresponde ao valor da altura de onda ou da respetiva orientação enquanto não se fez sentir o efeito do esporão e do seu enchimento no evoluir da linha de costa. Assim, o valor de referência para a orientação da onda na rebentação corresponde a 6.62° (após os 20° serem refratados até à rebentação) e para a altura de onda na rebentação corresponde a 2.42 m (consequência da refração e empolamento), o que resulta, pela formulação de CERC, num valor do potencial de transporte sedimentar de cerca de $22.15 \text{ m}^3/\text{s}$ (aproximadamente $194\,000 \text{ m}^3/\text{ano}$).

Para os dois parâmetros em análise, verificaram-se os mesmos instantes de impacto do esporão e de estabilização. O instante de impacto do esporão varia consoante a distância ao

esporão, verificando-se que imediatamente a barlar occur logo no primeiro instante de tempo e para o perfil mais afastado (a 5000 metros) ocorre após cerca de 100 anos de simulação. O instante de estabilização é o mesmo qualquer que seja o perfil em análise, ou seja, verifica-se que a partir de cerca de 340 anos de simulação, os valores se mantêm inalteráveis no tempo.

A título de exemplo apresentam-se alguns gráficos dos resultados obtidos (Figura 5.2). Foi verificado um comportamento mais irregular imediatamente a barlar do esporão, pelo que são representados os comportamentos registados em 3 perfis próximos do esporão, um perfil localizado a meia distância e o perfil mais afastado do esporão (perfis distam 20, 40, 100, 2500 e 5000 metros do esporão).

A Figura 5.3a representa com maior pormenor a variação da direção da onda na rebentação ao longo do tempo (em 10 anos de simulação) e a Figura 5.3b detalha esse comportamento ao longo da distância ao esporão. Até ao quarto ano de simulação, verifica-se um comportamento muito irregular dos perfis próximos do esporão, uma vez que a zona está muito dinâmica devido à presença do esporão. Depois deste instante, a variação da direção da onda na rebentação torna-se mais ténue, e o perfil imediatamente a barlar do esporão passa a acompanhar o comportamento dos perfis adjacentes. Uma vez que a direção da onda na rebentação influencia diretamente a estimativa da altura da onda na rebentação, esta variável apresenta um comportamento semelhante.

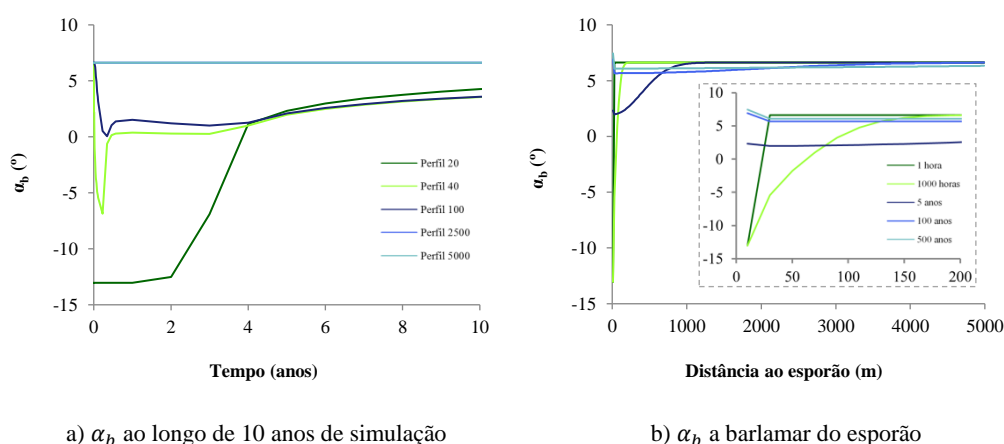


Figura 5.3: Pormenor do comportamento de α_b ao longo do tempo e em função da distância ao esporão.

Dinâmica sedimentar

O cálculo do potencial de transporte sedimentar (Q) através da formulação de CERC (Expressão 3.25) depende diretamente da orientação e da altura da onda na rebentação. Uma vez conhecido o valor de Q , para cada trecho ao longo do litoral é contabilizado qual o volume real em transporte em cada iteração do cálculo (Q_l) em função da efetiva disponibilidade de sedimentos. Para cada secção e em cada instante é realizado um balanço de volumes, por comparação de volumes que entram e saem da secção e conseqüentemente é avaliado se o trecho e respetivo perfil transversal está em situação de erosão ou acreção. A eventual diferença de volumes é distribuída uniformemente pela área ativa do perfil, definindo o deslocamento vertical efetivo de cada ponto da grelha que representa o perfil (Δz).

Para os mesmos perfis analisados anteriormente, à exceção do perfil mais afastado do esporão que foi substituído pelo perfil contíguo (por apresentar valores nulos, resultantes da condição de fronteira fixa), representa-se na Figura 5.4, o comportamento ao longo do tempo dos parâmetros Q , Q_l e Δz . Verifica-se um comportamento semelhante ao da agitação marítima, isto é, os valores de Q , Q_l e Δz variam dentro dum intervalo de tempo, definido pelo instante a partir do qual se faz sentir o efeito do esporão no perfil (varia consoante a distância do perfil ao esporão e aumenta com o aumento dessa mesma distância) e o instante de estabilização, a partir do qual os valores se mantêm inalteráveis (cerca de 340 anos, independentemente da distância do perfil ao esporão). O perfil imediatamente a barlar do esporão apresenta igualmente um comportamento singular e regista o maior valor de Δz , logo no primeiro instante de cálculo (1.6 mm).

Morfologia

Uma vez determinado o valor de Δz , que corresponde ao deslocamento efetivo de cada um dos pontos da grelha que definem o perfil, e feito o ajuste nas extremidades do perfil ativo, fica conhecida a nova posição de cada um dos pontos do perfil e, conseqüentemente a posição da linha de costa. Tendo em conta os resultados obtidos para os parâmetros analisados anteriormente, seria expectável que a posição da linha de costa estabilizasse ao fim de cerca de 340 anos. No entanto, com base nos resultados da Figura 5.5a, consta-te que tal não se verifica, mantendo-se dinâmica até aos 500 anos de simulação. Analisando os

resultados em função da distância ao esporão (Figura 5.5b), é possível notar algumas instabilidades na posição da linha de costa. A simulação foi prolongada e verifica-se que as instabilidades se propagam no tempo (Figura 5.5c).

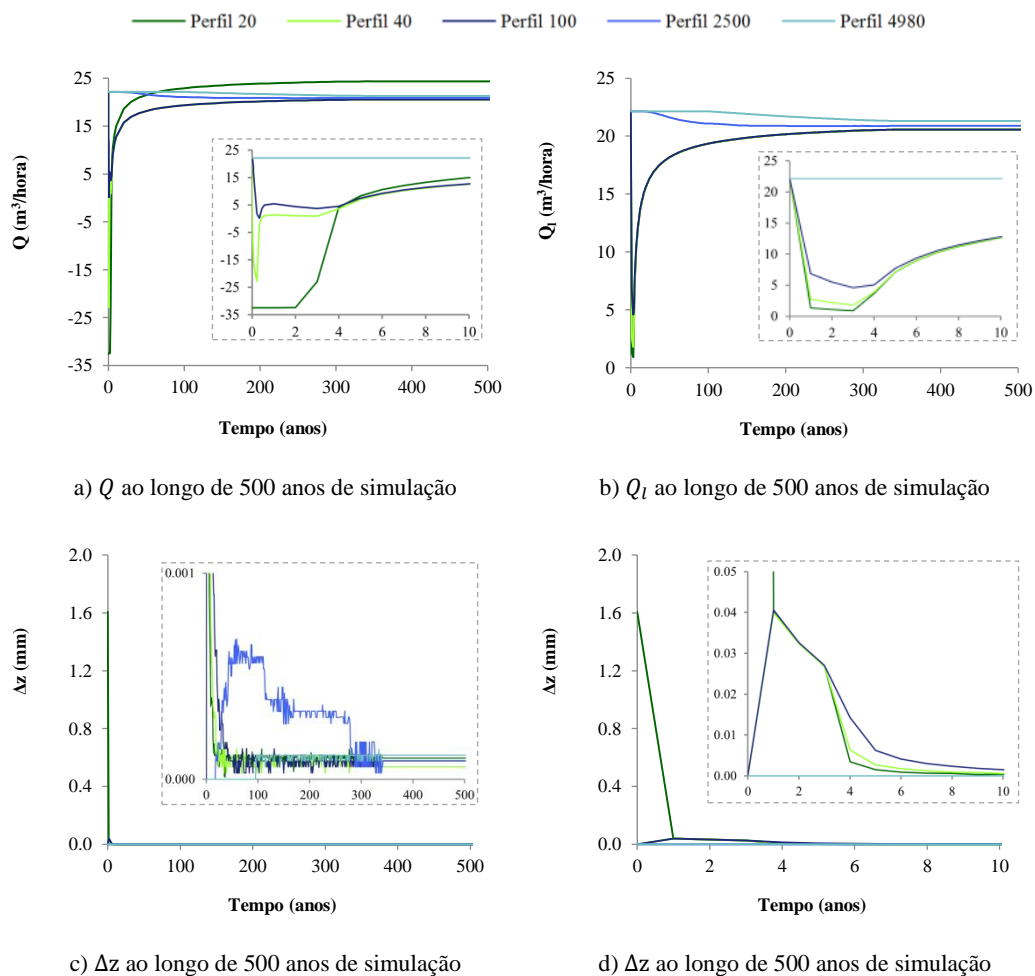


Figura 5.4: Evolução de parâmetros que caracterizam a dinâmica sedimentar ao longo do tempo.

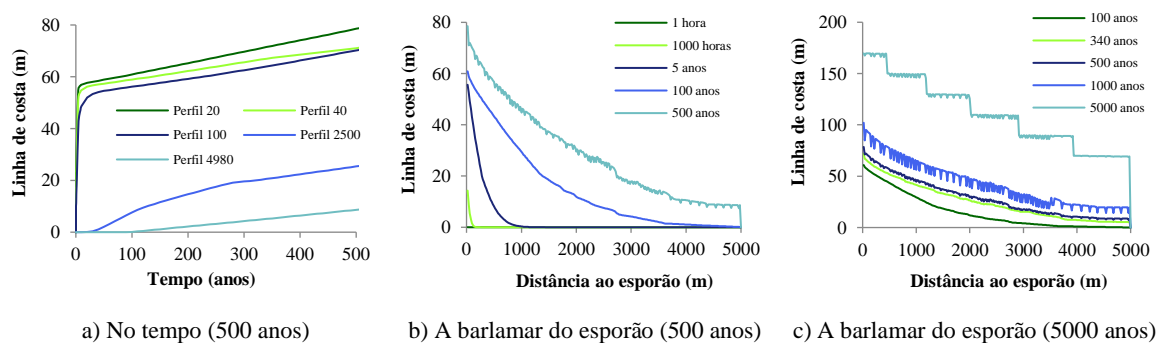


Figura 5.5: Evolução da linha de costa ao longo do tempo e da distância ao esporão.

Ainda relativamente à evolução da morfologia, representam-se na Figura 5.6a, a posição da linha que define a profundidade de fecho, a linha de rebentação da onda, a posição da linha de costa e a linha que define o limite do espraio da onda em função da distância ao esporão no início da simulação e após os 500 anos. Na Figura 5.6b e Figura 5.6c, representam-se, respetivamente, a posição da profundidade de fecho e do espraio da onda, em função da distância ao esporão, para diferentes instantes de tempo. Verifica-se que a posição da profundidade de fecho ao fim de 100 anos de simulação é coincidente com a posição aos 500 anos, contrariamente ao que acontece com a linha de espraio da onda, concluindo-se que o resultado dos dois parâmetros não estabiliza no mesmo instante de tempo.

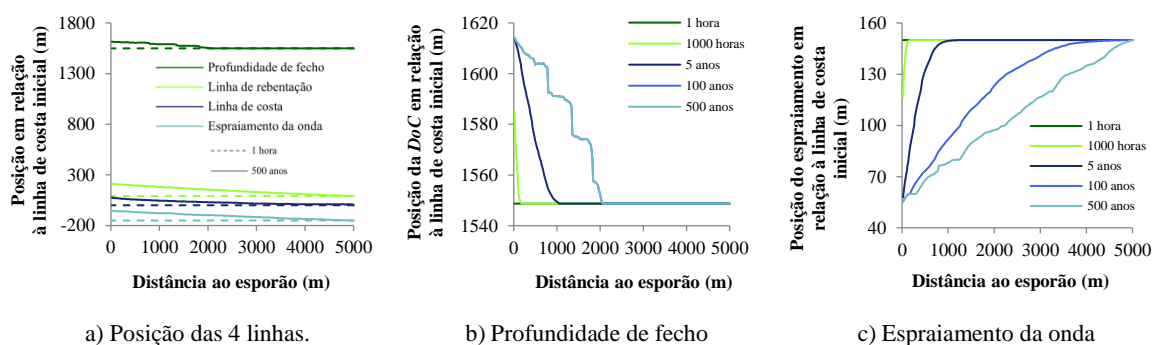


Figura 5.6: Evolução da posição da profundidade de fecho, profundidade de rebentação, linha de costa e espraio da onda, em função da distância ao esporão.

5.2.2. Síntese

Avaliada a evolução de diferentes parâmetros ao longo do tempo e em função da distância ao esporão: agitação marítima (altura e orientação da onda); dinâmica sedimentar (caudal sólido potencial e real e variação altimétrica do perfil) e morfologia (DoC , profundidade de rebentação, linha de costa e limite de espraio), é possível retirar algumas conclusões e prever a necessidade de uma análise futura mais detalhada de determinados aspetos, com vista à melhoria do desempenho do modelo numérico LTC.

À exceção da morfologia, verificou-se que os restantes parâmetros analisados variam dentro de um determinado intervalo de tempo, definido pelo instante de impacto do esporão (variável consoante a distância ao esporão) e pelo instante de estabilização (constante ao longo de toda a extensão do litoral). O conhecimento destes valores revela-se importante,

uma vez que permite identificar até onde se faz sentir o efeito do esporão a curto prazo e a longo prazo, e quando se deixa de fazer sentir o seu efeito.

Foi verificado um comportamento específico no perfil imediatamente a barlamar do esporão, registado ao longo do tempo em todos os parâmetros, sendo que todos dependem do valor da direção da onda na rebentação. O ângulo de referência do trecho imediatamente a barlamar do esporão é definido tendo em conta a posição da cabeça do esporão, pressuposto que pode ser questionável e que tem impacto nos resultados da simulação na proximidade do esporão. É importante avaliar a consequência nos resultados da consideração de um pressuposto diferente de definição deste ângulo.

A análise do comportamento dos parâmetros relativos à agitação marítima e dinâmica sedimentar permite concluir que as instabilidades numéricas que se verificam na posição da linha de costa não se devem ao algoritmo de balanço sedimentar do modelo, uma vez que os parâmetros estabilizam ao fim de cerca de 340 anos. No entanto, a forma dos perfis transversais resultantes da simulação pressupõe eventuais problemas na distribuição dos sedimentos no perfil em situação de acreção persistente. Foi ainda considerada a nova opção de controlo da evolução do perfil transversal (ver secção 3.3.2.2), mas não houve alterações nos resultados, pelo que o processo de distribuição de sedimentos em situação de acreção persistente deve ser revisto.

5.3. Comparação com o modelo GENESIS

A presente secção tem por objetivo comparar os resultados obtidos com o modelo LTC e com o GENESIS. Os dois modelos numéricos, apesar de terem os mesmos princípios de base, apresentam algumas diferenças de pressupostos (secção 5.3.1). Assim, esta secção inicia-se com a identificação das diferenças entre os dois modelos numéricos (5.3.1.1) e com a descrição de um estudo teórico da influência da definição da largura do perfil ativo, independente do caso de estudo em análise neste capítulo (5.3.1.2).

Posto isto, importa perceber quais os efeitos destas diferenças de pressupostos nas características da onda na rebentação e, conseqüentemente, na evolução da linha de costa, numa situação de acreção persistente, provocada pela introdução de um esporão. Assim, são descritas as condições de calibração adotadas para os dois modelos numéricos (secção 5.3.2),

apresentada, resumidamente, a modelação do caso de estudo no NEMOS (secção 5.3.3), e por fim, os principais resultados (5.3.4) e uma síntese das principais conclusões (5.3.5).

5.3.1. Diferenças entre modelos

O LTC e o GENESIS são ambos modelos numéricos que permitem a projeção da evolução da posição da linha de costa a médio e longo prazo, que têm por base a teoria de “uma linha”, inicialmente preconizada por Pelnard-Considère (1956). No entanto, estes modelos apresentam diferenças de pressupostos e desempenho, que se resumem na secção 5.3.1.1. Na secção 5.3.1.2 são descritas algumas análises teóricas de uma das principais diferenças de pressupostos dos modelos.

5.3.1.1. Diferenças genéricas

A Figura 5.7 representa uma das principais diferenças entre o modelo LTC e os modelos de “uma linha”, onde qualquer ponto do perfil ativo é suficiente para caracterizar a alteração da posição da linha de costa. No modelo LTC é feita a variação uniforme das cotas dos pontos situados no perfil ativo, mas procede-se ao ajuste do perfil ativo com as zonas adjacentes, pelo que, a variação da posição da linha de costa além de depender de Δz , depende também da batimetria e topografia associada a cada perfil transversal.

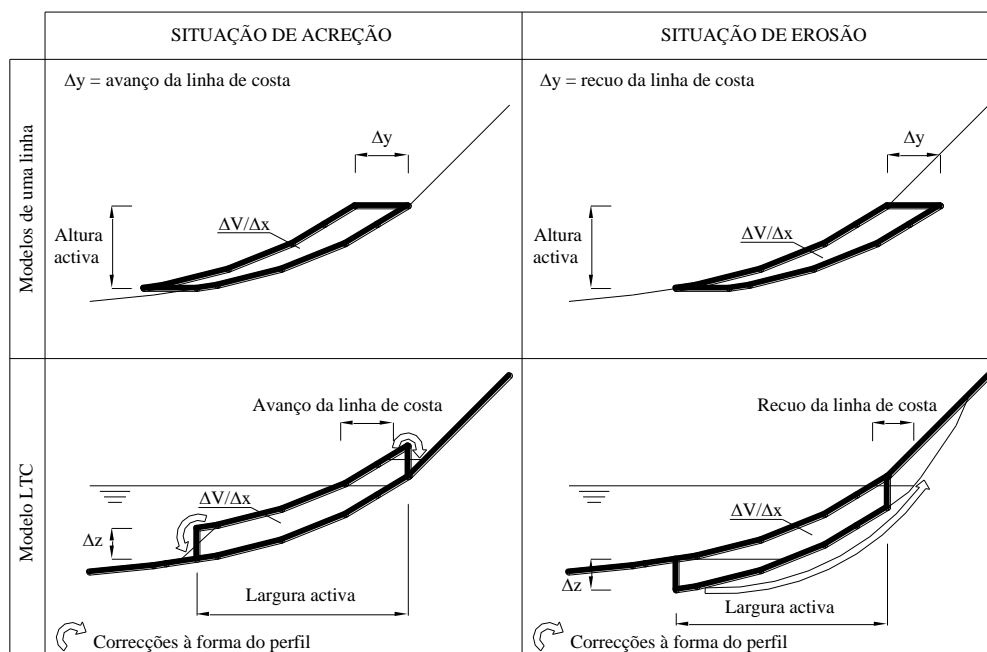


Figura 5.7: Representação esquemática da formulação de base nos modelos de “uma linha” e no modelo LTC (Coelho, 2005).

Em situação de acreção, quando o talude de cálculo tem uma inclinação superior ao ângulo de atrito que caracteriza as areias, é considerado o deslizamento das areias para zonas mais profundas. Na zona emersa, a acumulação de sedimentos prolonga a praia na horizontal, ou com um declive definido pelo utilizador. Em situações de erosão, para evitar a escavação continuada na zona da largura ativa, o volume que aprofundaria o perfil é na prática subtraído da zona mais alta do mesmo. Nesta zona, caso existam taludes de cálculo com inclinação superior ao ângulo de atrito das areias, dá-se também o deslizamento, com consequente correção das formas do perfil (Figura 5.7). Em qualquer das situações citadas, na correção da forma do perfil, é mantida a variação de volume, pelo que se respeita sempre a equação de continuidade dos volumes. Note-se que o intervalo de tempo Δt a considerar para cada iteração do cálculo não deve ser muito grande para que não resultem variações de volume elevadas que possam introduzir instabilidade numérica no cálculo (Coelho *et al.*, 2013).

A definição da largura do perfil ativo, isto é, a zona do perfil transversal onde se verificam trocas sedimentares, apresenta também diferenças de pressupostos para cada um dos modelos numéricos. A influência destas diferenças no desempenho dos modelos foi testada em termos teóricos e resume-se na secção 5.3.1.2.

Outra diferença entre os dois modelos numéricos de simulação de evolução da linha de costa relaciona-se com a propagação do clima de agitação desde o largo até à linha de rebentação. O GENESIS dispõe de um modelo interno de propagação da onda mais simplista, que deve ser considerado na presença de uma batimetria regular (ver Figura 3.7a). O algoritmo deste modelo interno é semelhante ao considerado no modelo numérico LTC e pode ser consultado em Hanson e Kraus (1989). Além do modelo interno, o GENESIS permite a possibilidade de propagar a onda desde o largo até próximo da costa através de um modelo externo, o STWAVE, recomendado para climas de agitação e batimetrias mais complexas (ver Figura 3.7b).

5.3.1.2. Influência da definição da largura do perfil ativo

No GENESIS a largura ativa (de facto traduzida pela altura ativa) é definida pela altura da berma (B) e pela profundidade de fecho, DoC (ambas constantes ao longo de toda a simulação). No modelo LTC, a largura ativa é definida pelo espraiamento da onda (R_u) e pela profundidade de fecho, podendo ambas ser definidas em função do valor da onda

atuante em cada instante de tempo. Assim, verifica-se que, no modelo LTC, a largura ativa pode ser variável em função do clima de agitação e da batimetria.

No modelo numérico GENESIS, a variação de sedimentos numa largura infinitesimal (Δx , Figura 2.2) representa uma variação Δy na posição da linha de costa (Equação 3.12, Figura 5.8 à esquerda). No LTC, a mesma variação de volume é traduzida por uma variação vertical Δz (Equação 3.28, Figura 5.8 à direita) de todos os pontos do perfil. Estas considerações têm impacto na evolução da linha de costa ao longo do tempo. No GENESIS, o impacto na linha de costa é proporcional à altura ativa ($B + DoC$), enquanto no LTC esta evolução é mais complexa, uma vez que a topografia e a batimetria mudam em cada passo de tempo (sendo essas diferenças propagadas no tempo). Por exemplo, ao ser alterada a topografia do terreno é modificada a inclinação e, conseqüentemente, o valor do espriamento da onda será diferente, alterando a dimensão da largura ativa do perfil transversal.

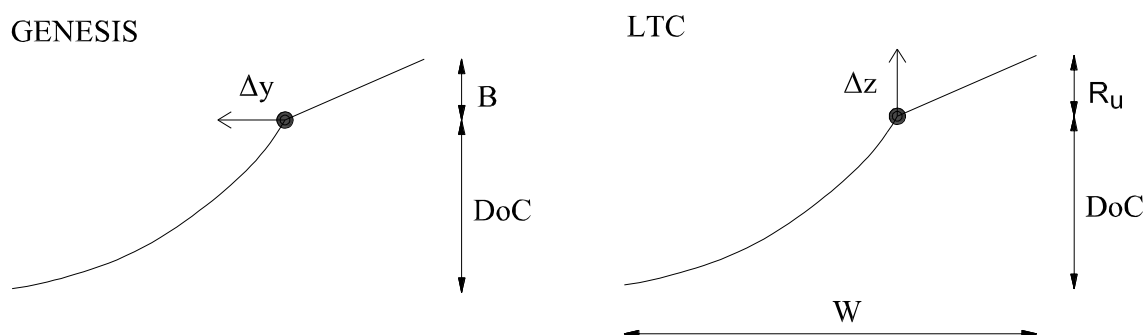


Figura 5.8: Representação de Δy e Δz no perfil transversal, para os modelos GENESIS e LTC.

Foram efetuados alguns testes genéricos com o objetivo de avaliar a influência das diferenças de pressupostos entre ambos os modelos. Por forma a analisar a influência da forma do perfil transversal, foram considerados quatro perfis transversais-tipo. A batimetria foi obtida com base no perfil de equilíbrio de *Dean* (Expressão 5.1) e para a topografia foi assumido um declive constante do terreno. Para o perfil transversal 1 e 2 considerou-se o parâmetro $A = 0.125$ e $m = 2/3$ e para o perfil transversal 3 e 4 considerou-se respetivamente $A = 0.173$ e $m = 2/3$. Acima do nível médio do mar admitiu-se uma inclinação constante de 3% para o perfil 1 e 3 e de 6% para o perfil 2 e 4. Foram consideradas ondas com diferentes alturas significativas entre 2 e 7 metros (características resumidas na Tabela 5.1). O período de onda foi calculado com base na Expressão 3.19, o comprimento de onda foi baseado na teoria da

onda linear (Expressão 3.8), a profundidade de fecho determinada a partir das formulações de Hallermeier, DoC_H , e Birkmeier, DoC_B (Expressões 3.29 e 3.30, respetivamente), e o espraçamento da onda determinado a partir da Expressão 3.31, considerando constante a inclinação do talude (3 e 6%, de acordo com a forma do perfil transversal).

Tabela 5.1: Características das ondas analisadas, para avaliação do impacto das diferenças entre o LTC e o GENESIS.

H_s (m)	T_{H_s} (s)	L_0 (m)	DoC_H (m)	DoC_B (m)	R_u (m)	
					i = 3%	i = 6%
2	9.3	136.2	4.2	3.2	0.8	1.1
3	10.6	173.8	6.3	4.8	1.1	1.5
4	11.8	215.9	8.3	6.3	1.4	1.9
5	13.0	262.6	10.4	7.9	1.7	2.4
6	14.2	313.9	12.4	9.4	2.0	2.9
7	15.4	369.8	14.5	11.0	2.4	3.4

No GENESIS, o valor de Δy depende diretamente da profundidade de fecho e da altura da berma e ambos são constantes ao longo da simulação. A influência destes dois parâmetros na variação de Δy é analisada na Figura 5.9, considerando um intervalo de valores para a profundidade de fecho entre 11 e 14.5 metros (valores que correspondem, aproximadamente, ao resultado da aplicação das formulações de Hallermeier e Birkmeier para uma onda de 7 metros) e uma altura de berma compreendida entre 4 e 9 metros. Tendo em conta os pressupostos base do GENESIS, a forma do perfil transversal não interfere nos resultados, não sendo por isso considerada.

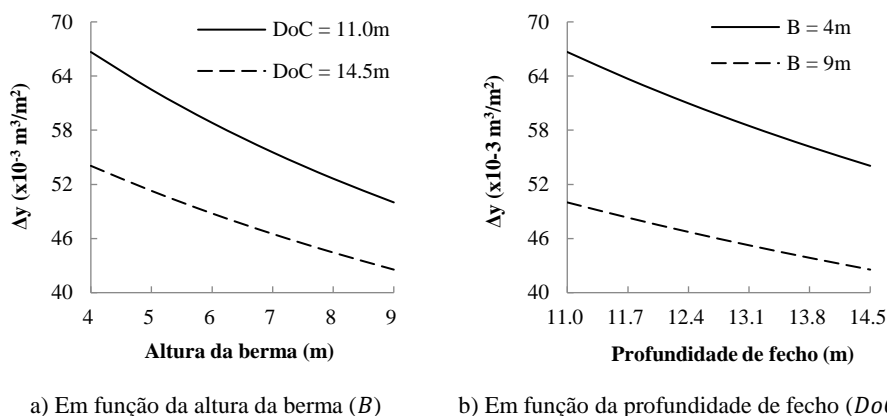


Figura 5.9: Variação na linha de costa (Δy) correspondente a um comprimento infinitesimal (Δx).

No LTC, o valor do gradiente sedimentar, neste caso correspondente a uma translação vertical (Δz), depende da largura do perfil ativo, que por sua vez é determinada pela distância horizontal entre o espraiamento da onda e a profundidade de fecho. Assim, tendo em conta os pressupostos do LTC, verifica-se que o valor de Δz vai depender da forma do perfil transversal. Foi determinado o valor de Δz em função da altura de onda, para quatro situações distintas: (1) e (2) considerando um valor fixo para a profundidade de fecho, respetivamente de 11 e 14.5 metros; (3) e (4) considerando um valor da profundidade de fecho variável. Uma vez que a forma do perfil tem influência nos resultados, a análise foi feita para os quatro perfis transversais em estudo (Figura 5.10).

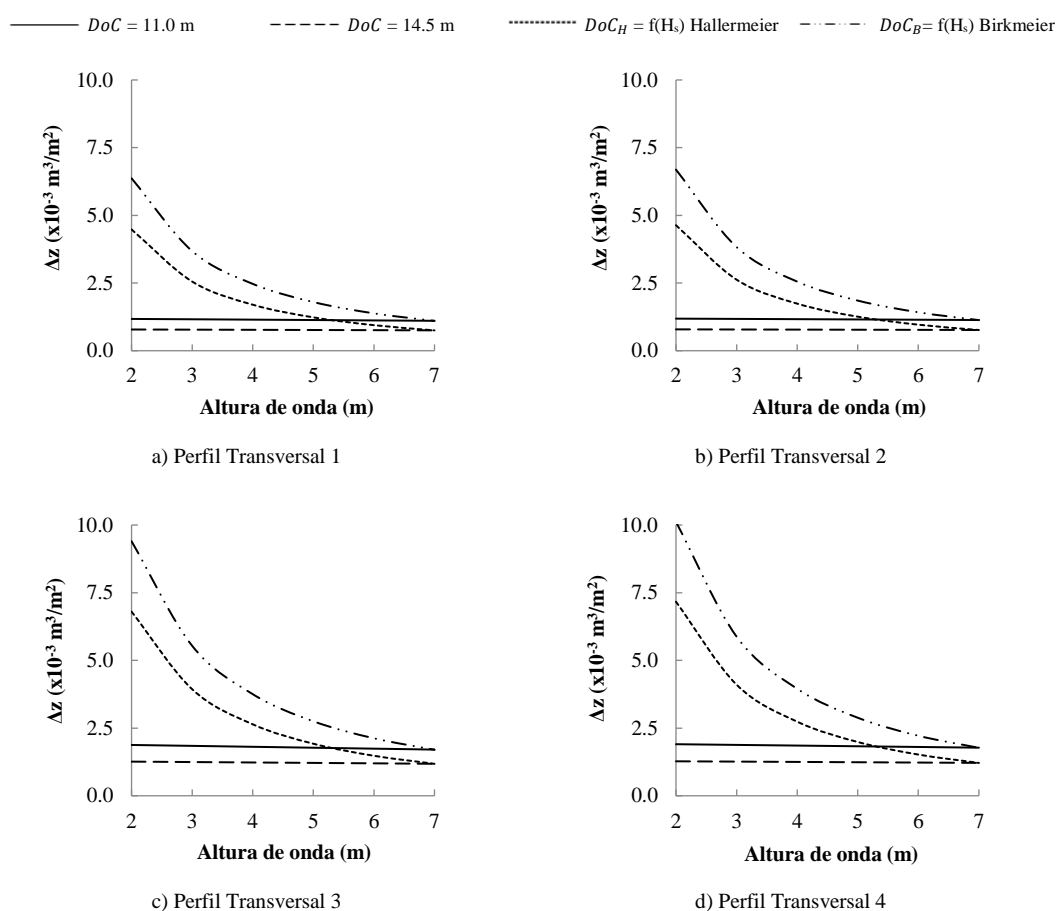


Figura 5.10: Variação da cota (Δz) em função da variação de H , correspondente a um comprimento infinitesimal (Δx), para cada um dos perfis transversais em análise.

Como referido, o balanço sedimentar correspondente a um comprimento infinitesimal Δx representa no GENESIS uma distância horizontal Δy e no LTC uma distância vertical Δz , sendo que no primeiro caso os resultados mantêm-se qualquer que seja a forma do perfil

transversal e no segundo caso são sensíveis a essa questão. Apesar de não ser possível uma comparação direta entre valores (grandezas diferentes), apresenta-se na Tabela 5.2 a relação entre Δy e Δz (no modelo LTC) para cada um dos perfis transversais.

Tabela 5.2: Relação entre Δy e Δz (modelo LTC), em situação de erosão e acreção, para cada um dos perfis transversais (PT).

	PT 1	PT 2	PT 3	PT 4
Acreção	$\Delta y = \left(\frac{\Delta z}{0.125}\right)^{3/2}$		$\Delta y = \left(\frac{\Delta z}{0.173}\right)^{3/2}$	
Erosão	$\Delta y = \frac{\Delta z}{0.03}$	$\Delta y = \frac{\Delta z}{0.06}$	$\Delta y = \frac{\Delta z}{0.03}$	$\Delta y = \frac{\Delta z}{0.06}$

As análises realizadas e os pressupostos de base demonstram diferenças nos resultados obtidos para um passo de tempo nos modelos LTC e GENESIS, sendo que essas diferenças serão propagadas ao longo do tempo. Enquanto no GENESIS os resultados são independentes da topografia e batimetria, no LTC estes variam de acordo com a forma do perfil transversal. A análise da Figura 5.10 permite ainda verificar que a consideração da profundidade de fecho em função da altura de onda tem impactos significativos no valor de Δz , essencialmente na presença de ondas de pequena altura (Coelho *et al.*, 2013).

5.3.2. Calibração

Para comparação direta do desempenho do LTC e do GENESIS, foi realizada a calibração dos modelos para representarem valores do transporte sedimentar similares no fim de um ano de simulação. Optou-se por calibrar os modelos para a situação com maior capacidade de transporte dos cenários referidos em 5.1 ($H_0 = 8$ m e $\alpha_0 = 30^\circ$). Para o modelo LTC foi definido, na secção 5.1, o valor do coeficiente de transporte da formulação de CERC ($k = 0.0126$). Assim, no GENESIS, definindo os mesmos limites do perfil ativo ($DoC = 17$ m e $B = 3$ m), foi encontrado o valor de k_1 que resulta num valor semelhante de transporte sedimentar ao obtido com o modelo LTC ao fim de um ano de simulação (8.1×10^6 m³). O valor definido foi de 0.02455 (recorrendo ao modelo interno). O valor de k_2 , apesar de não ter influência nos resultados (uma vez que a altura de onda é constante), foi considerado 0.01184 ($0.75 k_1$, Hanson e Kraus, 1989). Tal como no modelo LTC, foram consideradas fixas as condições fronteira das simulações efetuadas com o GENESIS.

5.3.3. Modelação do caso de estudo no NEMOS

A ferramenta NEMOS, apresentada na secção 3.2.1, disponibiliza uma série de modelos matemáticos que permitem a simulação a curto, médio e longo prazo, da evolução da linha de costa. Os principais modelos matemáticos disponibilizados são o STWAVE e o GENESIS. O STWAVE é responsável pela simulação da transformação do clima de agitação do largo até à costa e o GENESIS é responsável pela representação da evolução da linha de costa. No entanto, o processo de modelação no NEMOS requer a utilização de outros modelos matemáticos. Nesta secção é descrita de forma muito simplificada a aplicação da NEMOS ao caso de estudo. De referir que, cada um dos modelos foi resumidamente descrito na secção 3.2.1 e que previamente à definição de cada um dos parâmetros adotados na aplicação ao caso de estudo, foi realizada uma análise de sensibilidade da influência de cada um dos parâmetros nos resultados (análises não incluídas no documento).

O *Grid Generator* permite importar toda a informação da batimetria e topografia da área a modelar e a construção das grelhas dos modelos STWAVE e GENESIS. Permite ainda a colocação de estações, que tanto funcionam como pontos de registo de dados para o modelo STWAVE, produto final de simulação, como pontos de dados de entrada para o modelo GENESIS. Essas mesmas estações foram colocadas ao longo da linha batimétrica de 17 m de profundidade (profundidade de fecho para a onda condicionante, calculada através da expressão de Hallermeier, 1978, Expressão 3.29). Na Figura 5.11 está representado o domínio de cálculo referente ao caso de estudo.

As características do clima de agitação foram introduzidas no modelo WWWL, definido pelas 24 ondas que se pretendeu analisar (alturas compreendidas entre 1 m e 8 m, conjugadas com direcções de propagação de 10, 20 e 30°). O período da onda foi determinado através da Expressão 3.19 (Coelho, 2005). Considerou-se cada onda a atuar durante 1 hora e a boia ondógrafo localizada a 83 m de profundidade (idêntica à profundidade da boia de Leixões).

O modelo WSAV permite efetuar uma análise estatística da série de dados representativa do clima de agitação, e a visualização dos resultados gerados, através de diagramas, histogramas ou rosas. No caso de estudo foram definidas diferentes bandas para caracterizar a altura de onda, período e direcção.

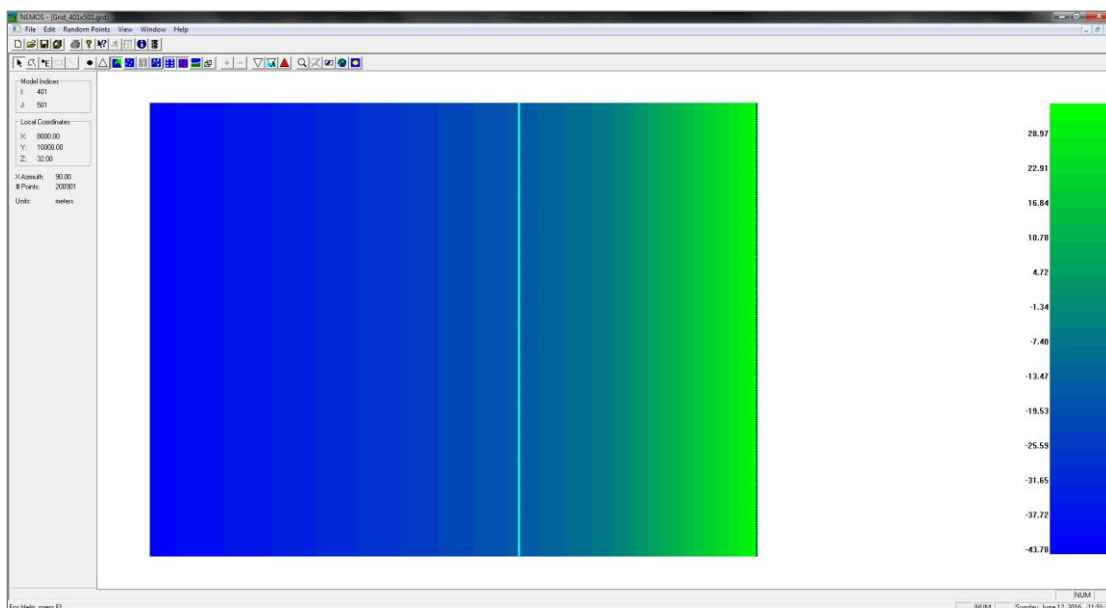


Figura 5.11: Representação do caso de estudo no modelo *Grid Generator*.

O SPECGEN é um aplicativo auxiliar, utilizado para importar, criar ou visualizar espectros energéticos direcionais que irão servir de *input* ao modelo STWAVE. Deverá ser especificado um valor para o parâmetro *Gamma* que afeta a forma do espectro (os valores típicos são 1.0 para um espectro *Pierson-Moskowitz* e 3.3 para um espectro *Jonswap*) e para a constante *nn* (os valores típicos são 4 para o mar e 8 para as condições de ondas *swell*).

Para propagar a onda desde o largo até à costa, o modelo STWAVE interage com os 4 modelos: GRIDGEN, WWWL, WSAV e SPECGEN (ver esquema da Figura 3.4). O modelo STWAVE propaga o clima de agitação e guarda todas as características num ficheiro *output* (estações com o clima de agitação propagado, que inclui as características das 24 ondas em estudo) e que serve de *input* ao modelo GENESIS. O STWAVE necessita de três ficheiros *input*, dois dos quais provenientes do GRIDGEN (domínio espacial da zona de estudo e a localização das estações) e o terceiro proveniente do SPECGEN (espectro das ondas).

Para simular a posição da linha de costa no GENESIS são necessários os ficheiros resultantes da importação do domínio de cálculo e criação da grelha (GRIDGEN), o ficheiro de estações com as características da propagação do clima de agitação desde o largo até à costa (correspondente às 24 ondas em estudo), proveniente do modelo STWAVE (no caso de se pretender a utilização do modelo externo), e o ficheiro do clima de agitação atuante proveniente do WWWL (um ficheiro por cada onda a estudar, num total de 24 ficheiros).

Foram realizadas simulações no GENESIS considerando as duas opções, propagação da onda apenas através do modelo interno ou considerando o modelo interno e o modelo externo (recorrendo, no segundo caso, ao ficheiro de estações obtido na simulação com o STWAVE). A Figura 5.12 resume as características dos sedimentos adotadas no GENESIS, definição do perfil ativo e valores empíricos de k_1 e k_2 . Na Figura 5.13 representa-se o domínio de cálculo e as características do esporão considerado.

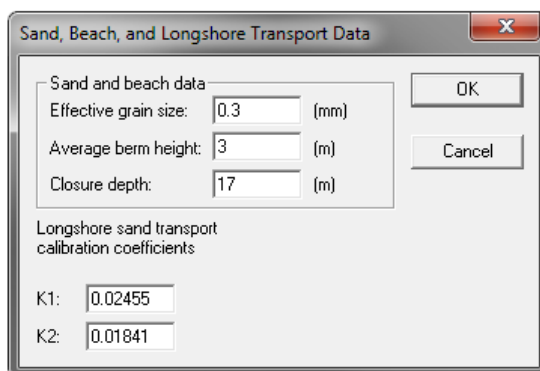


Figura 5.12: Definição de parâmetros dos sedimentos e do perfil transversal no GENESIS.

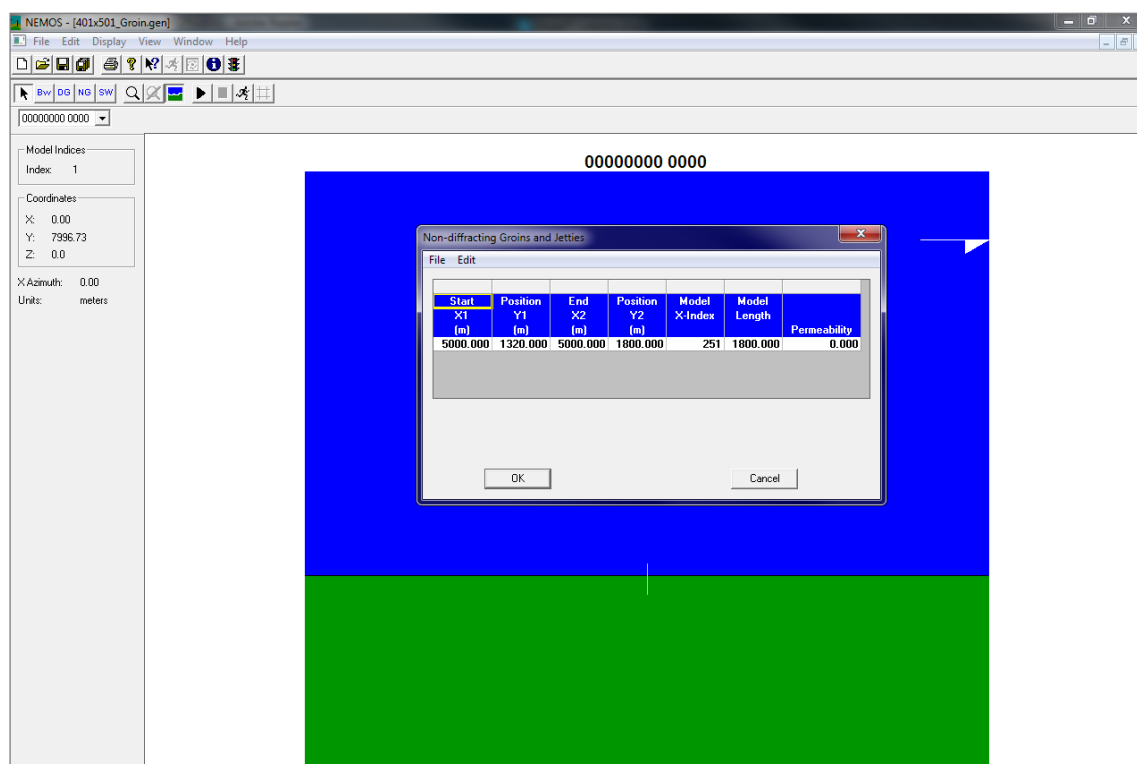


Figura 5.13: Definição das características do esporão no modelo GENESIS e representação do domínio espacial.

5.3.4. Resultados

Foram comparados os resultados das características na rebentação das 24 ondas em estudo para o instante inicial de simulação, sendo a presença do esporão, tendo por base os três modelos de propagação da onda: LTC, GENESIS considerando o modelo interno e GENESIS considerando o modelo externo (e interno). Para a onda de características ao largo $H_0 = 2$ m e $\alpha_0 = 20^\circ$, foram realizadas simulações da evolução da posição da linha de costa em ambos os modelos, para um horizonte temporal de 100 anos, em situação de acreção persistente na presença de um esporão.

Resultados da propagação da onda no instante inicial

Foi gerado um clima de agitação hipotético, construído pelas 24 ondas em estudo, que foi propagado no modelo STWAVE. Paralelamente foram gerados 24 ficheiros de características constantes iguais a cada uma das ondas em estudo (ficheiros WWL). Com o modelo GENESIS, foram propagados os vários climas de agitação (considerando apenas um passo de cálculo) e obtidas as características das ondas na rebentação, considerando apenas o modelo interno e considerando a utilização do modelo externo. Para as mesmas condições, com o modelo LTC foram propagadas as 24 ondas. A Tabela 5.3 resume os valores obtidos para a altura e direção das ondas na rebentação, para as três condições descritas.

Uma breve análise dos resultados obtidos permite constatar que as diferenças máximas registadas ocorrem para a onda mais energética entre o modelo interno e o modelo externo (diferenças próximas dos 10%). Relativamente ao LTC, as diferenças máximas verificadas ocorrem em relação ao modelo interno, também para a onda mais rodada e com maior altura (8%).

Apesar de pouco significativas, as diferenças obtidas nos resultados da propagação da onda de ambos os modelos podem ter impacto a longo prazo, facto que a acrescentar às diferenças de pressupostos de evolução do perfil transversal, pode gerar diferenças consideráveis nos resultados da evolução da linha de costa.

Tabela 5.3: Características da onda na rebentação (ao fim do primeiro passo de tempo), considerando o LTC e o GENESIS (interno e externo).

Características da onda ao largo		Características da onda na rebentação					
		LTC		GENESIS (só modelo interno)		GENESIS (modelo interno e externo)	
H_0 (m)	α_0 (°)	H_b (m)	α_0 (°)	H_b (m)	α_0 (°)	H_b (m)	α_0 (°)
1	30	1.28	7.93	1.22	8.70	1.22	7.86
2		2.33	9.71	2.27	10.36	2.27	10.08
3		3.38	10.49	3.34	11.13	3.33	9.67
4		4.44	10.85	4.47	11.58	4.31	10.77
5		5.52	11.00	5.65	12.04	5.42	11.22
6		6.61	11.02	6.87	12.51	6.55	11.50
7		7.73	10.97	8.14	12.90	7.48	12.20
8		8.87	10.88	9.40	13.35	8.66	12.25
1	20	1.33	5.41	1.26	6.09	1.27	5.42
2		2.42	6.62	2.34	7.16	2.33	7.02
3		3.50	7.16	3.45	7.66	3.42	7.13
4		4.60	7.40	4.60	8.00	4.43	7.95
5		5.72	7.50	5.81	8.33	5.57	7.42
6		6.86	7.51	7.08	8.63	6.75	8.05
7		8.01	7.48	8.37	8.91	7.71	8.52
8		9.19	7.42	9.66	9.23	8.91	8.30
1	10	1.35	2.74	1.28	3.09	1.29	2.97
2		2.47	3.36	2.38	3.67	2.37	3.81
3		3.57	3.63	3.50	3.91	3.49	3.35
4		4.69	3.75	4.67	4.10	4.52	3.70
5		5.83	3.80	5.91	4.24	5.66	4.09
6		7.00	3.81	7.19	4.40	6.87	3.69
7		8.18	3.79	8.50	4.54	7.83	3.93
8		9.38	3.76	9.82	4.70	9.07	4.19

Resultados das simulações a longo prazo

Para comparação dos modelos a longo prazo, foram gerados resultados até aos 100 anos de simulação. Aproximadamente aos 55 anos foi verificado o enchimento do esporão no modelo GENESIS. Foram registados os resultados correspondentes às características da onda na rebentação (direção e altura) e à posição da linha de costa para diferentes perfis. A título de exemplo, na Figura 5.14 representa-se a evolução ao longo do tempo destes três parâmetros, obtida para o modelo LTC e para o modelo GENESIS, considerando a propagação da onda a partir do modelo interno e externo. Foram seleccionados 3 perfis, o perfil imediatamente a barlar do esporão, o perfil que dista 100 metros do esporão e o perfil mais afastado, localizado junto à fronteira do domínio de cálculo, a 5000 m do esporão.

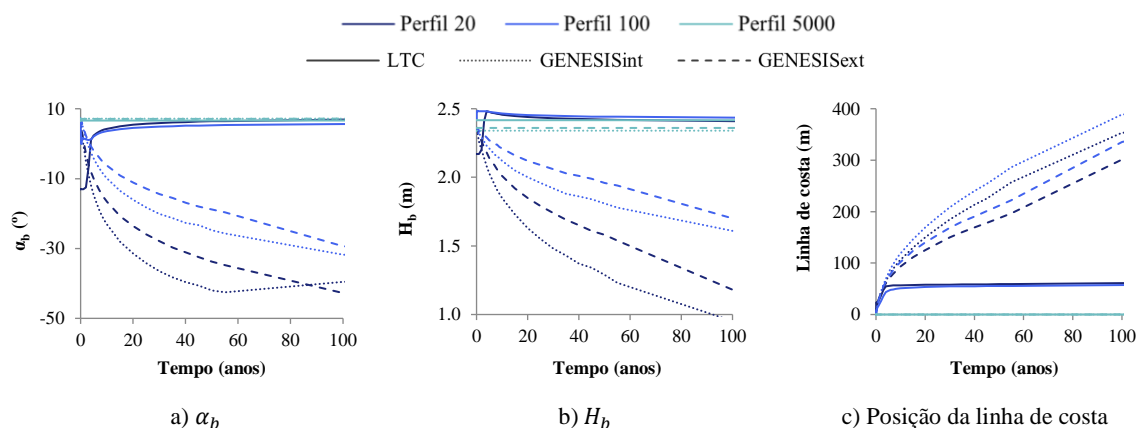


Figura 5.14: Resultados da modelação ao longo do tempo, no LTC e no GENESIS.

A Figura 5.15 representa o comportamento de cada um dos parâmetros em análise, em função da distância ao esporão, numa situação inicial, após 10 anos de simulação e a longo prazo (100 anos).

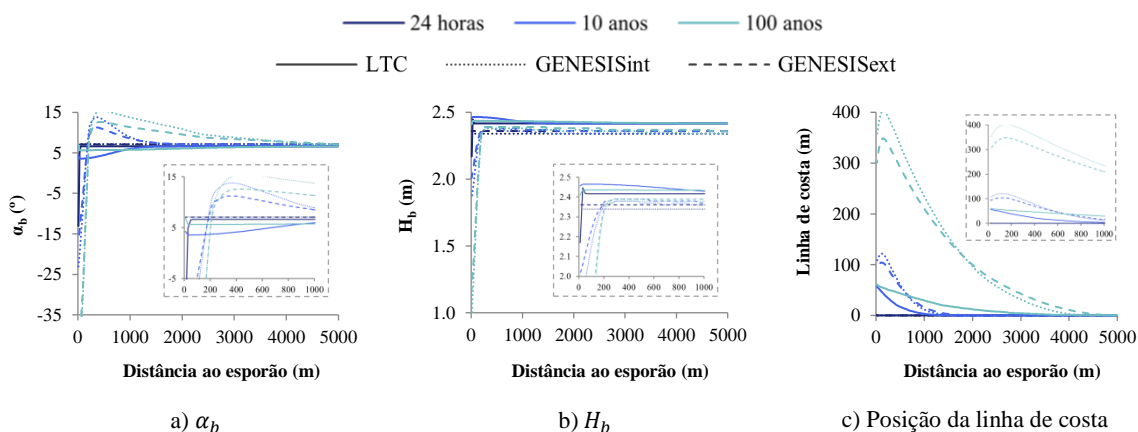


Figura 5.15: Resultados da modelação, em função da distância ao esporão, no LTC e no GENESIS.

Verifica-se que a orientação da onda na rebentação, apesar de na ausência do esporão apresentar valores muito próximos, evolui de forma muito díspar após o impacto do esporão no perfil. Consequentemente, verifica-se um comportamento similar para a altura da onda na rebentação. Relativamente à posição da linha de costa, observa-se um ritmo de evolução muito diferenciado em ambos os modelos, verificando-se, no GENESIS, o enchimento do esporão quando decorridos 55 anos de simulação (Figura 5.16a). De referir que, após o enchimento do esporão, no modelo GENESIS, continua a verificar-se acreção a barlamar da estrutura (Figura 5.16b).

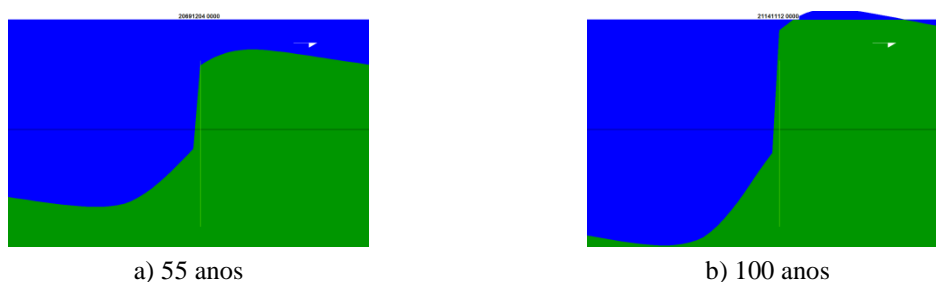


Figura 5.16: Posição da linha de costa junto ao esporão (GENESIS, modelo interno).

5.3.5. Síntese

As principais diferenças entre os dois modelos numéricos consistem no facto do modelo LTC atualizar a batimetria ao longo do tempo, enquanto que o GENESIS mantém fixa a forma do perfil transversal, e na forma de propagação da onda, já que o GENESIS pode recorrer a um modelo externo e o LTC propaga a onda internamente, de forma mais simplista.

Os resultados do modelo LTC e do GENESIS (só interno e interno e externo) apresentam diferenças pouco significativas nas características das ondas na rebentação, no instante inicial, sem a presença do esporão. No entanto, a longo prazo, a evolução da direção e altura da onda no tempo apresenta grandes diferenças entre os modelos. Estas diferenças podem ser causadas por diferenças de pressupostos na definição da orientação da linha de costa inicial em ambos os modelos, já que o LTC considera a linha de costa na interseção da linha de água com o talude do esporão, enquanto que o GENESIS mantém a posição da linha de costa independentemente da existência da estrutura. A alteração da batimetria ao longo do tempo no modelo LTC amplia diferenças com os resultados do modelo GENESIS.

5.4. Comparação com o modelo analítico de Pelnard-Considère

O modelo analítico de Pelnard-Considère (1956), descrito na secção 3.1, permite o cálculo da evolução da linha de costa em resposta à ação das ondas e prevê a possibilidade de existência de barreiras físicas impermeáveis, perpendiculares à costa, como esporões ou quebramares, permitindo a estimativa da posição da linha de costa a barlar da estrutura. A formulação analítica de Pelnard-Considère (1956) serviu de base aos dois modelos numéricos analisados neste capítulo, tornando-se por isso relevante a aplicação desta

formulação ao caso de estudo em análise (considerando a onda de características $H_0 = 2$ m e $\alpha_0 = 20^\circ$). De referir, no entanto, que na secção 5.4.1 são comparados os resultados desta onda com uma onda mais energética ($H_0 = 8$ m e $\alpha_0 = 30^\circ$).

5.4.1. Tempo de enchimento

O tempo de enchimento (t_f), Expressão 3.3, é definido por Pelnard-Considère (1956) como o tempo necessário para que a linha de costa a barlamar atinja a cabeça do esporão, assumindo-se que a partir desse instante o desenvolvimento da linha de costa ocorre mais lentamente, consequência da maior transposição de sedimentos para sotamar.

Uma breve análise da Expressão 3.3 (e consequentemente da Expressão 3.4 e 3.5 onde é definido o parâmetro de calibração, ε) permite perceber que o tempo de enchimento varia em função de diversos fatores, incluindo o coeficiente de transporte (k) e as características da onda na rebentação (H_b e α_b). Assim, para comparação dos resultados obtidos pela formulação de Pelnard-Considère (1956) e pelos modelos numéricos é importante ter em conta os valores correspondentes a cada um destes parâmetros, no cálculo do tempo de enchimento (Tabela 5.4). De referir que, para a comparação com o modelo GENESIS serão apresentados apenas os resultados relativos ao modelo interno de propagação da onda.

Tabela 5.4: Tempo de enchimento do esporão, considerando parâmetros relativos à simulação da posição da linha de costa com o LTC e com o GENESIS.

	LTC	GENESIS
Coefficiente de transporte (-)	0.0126	0.02455
Altura de onda na rebentação (m)	2.42	2.34
Direção da onda na rebentação ($^\circ$)	6.62	7.16
Tempo de enchimento (anos)	27.43	13.07

Os restantes parâmetros necessários ao cálculo do tempo de enchimento por aplicação da formulação de Pelnard-Considère (1956) consideram-se constantes para comparação com ambos os modelos numéricos: $Y = 200$ metros; $k_b = 0.78$; ρ e ρ_s , respetivamente, 1030 kg/m^3 e 2650 kg/m^3 ; $n = 0.4$ e B e DoC , respetivamente, 3 m e 17 m , totalizando uma altura ativa de 20 m .

Ainda relativamente à determinação do tempo de enchimento, verificou-se que, o valor do tempo de enchimento varia de forma diretamente proporcional ao total da altura ativa. O coeficiente de transporte (k), como já concluído em Guimarães *et al.* (2016), apenas influencia a rapidez com que a linha de costa atinge uma determinada posição, não tendo qualquer influência na sua configuração. O tempo de enchimento varia de forma inversamente proporcional ao valor do coeficiente de transporte. Por comparação dos resultados da Tabela 5.4, quando consideradas as características da onda mais energética (das 24 ondas identificadas em 5.1), o tempo de enchimento reduz significativamente ($t_f = 0.39$ anos - LTC e $t_f = 0.11$ anos - GENESIS).

5.4.2. Resultados

Para comparação dos resultados da posição da linha de costa a barlar de um esporão obtida com o modelo analítico de Pelnard-Considère (1956) e com os modelos numéricos LTC e GENESIS, foram gerados resultados num horizonte temporal de 100 anos.

Primeiramente apresenta-se na Figura 5.17 a evolução da linha de costa a barlar do esporão traduzida apenas pelas formulações do modelo analítico de Pelnard-Considère (1956) com o objetivo de perceber as diferenças de evolução em função do valor do coeficiente de transporte e do clima de agitação. Assim, na Figura 5.17a são apresentados os resultados da formulação analítica para a onda analisada nas restantes secções deste capítulo ($H_0 = 2$ m e $\alpha_0 = 20^\circ$) e na Figura 5.17b é apresentada a evolução da linha de costa a barlar do esporão para a onda mais energética ($H_0 = 8$ m e $\alpha_0 = 30^\circ$), à qual corresponde um tempo de enchimento significativamente inferior. Em cada uma das ondas analisadas são apresentados os resultados para quatro instantes de tempo distintos (1 hora, 1 ano, 10 anos e 100 anos) e considerando o tempo de enchimento calculado partindo do coeficiente de transporte e características da onda na rebentação correspondentes à simulação com o modelo LTC (Pelnard-LTC, traço contínuo) e correspondentes à simulação com modelo GENESIS (Pelnard-GENESIS, tracejado).

Uma breve análise dos resultados permite verificar que a evolução da linha de costa é consideravelmente mais rápida considerando os parâmetros correspondentes ao modelo numérico GENESIS, do que considerando os parâmetros do LTC, qualquer que seja o clima

de agitação. A título de exemplo, para o perfil transversal localizado imediatamente a barlar do esporão, considerando a onda menos energética, verificam-se diferenças na ordem dos 20 metros ao fim de um ano de simulação e de 55 metros decorridos 10 anos de simulação. Para a onda mais energética, compara-se o perfil transversal localizado a meia distância, uma vez que, para os mesmos horizontes temporais, já foi atingido o enchimento do esporão. Assim, ao final de um ano de simulação verificam-se diferenças na ordem dos 40 m e no fim de 10 anos, cerca de 80 m. Verifica-se ainda que, o clima de agitação tem uma grande influência na rapidez de evolução da configuração da linha de costa, sendo que, ao final de um ano de simulação, no perfil imediatamente a barlar do esporão, se atingem diferenças de cerca de 160 m e de 145 m, respectivamente, considerando os parâmetros do LTC e do GENESIS.

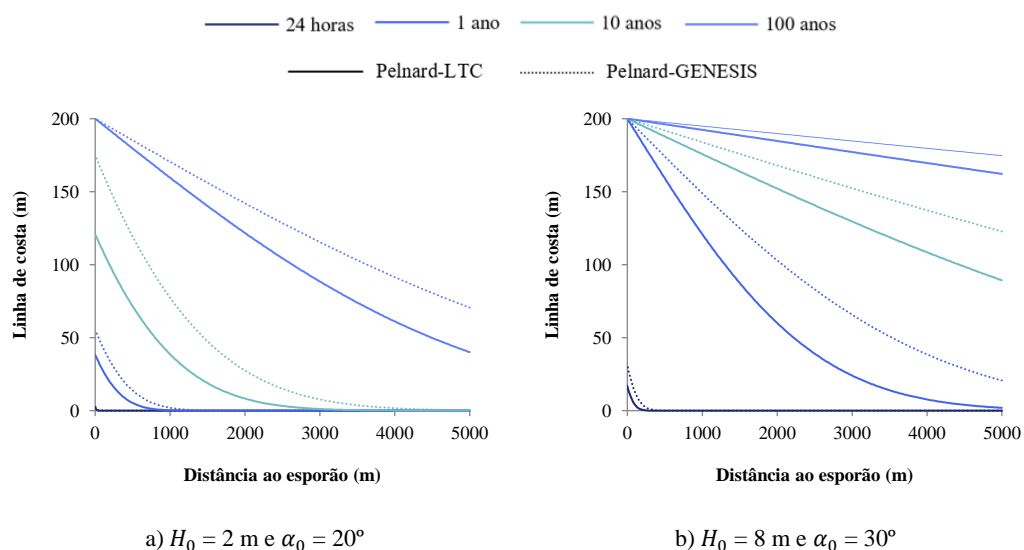


Figura 5.17: Evolução da linha de costa em função da distância ao esporão, segundo Pelnard-Considère (1956).

Na Figura 5.18 apresentam-se também os resultados da comparação da posição da linha de costa a barlar do esporão, para uma onda de características $H_0 = 2 \text{ m}$ e $\alpha_0 = 20^\circ$, em cada um dos modelos em análise: Pelnard-Considère (1956), LTC e GENESIS. Na Figura 5.18a são comparados os resultados entre os três modelos, considerando para a formulação analítica de Pelnard-Considère (1956), os parâmetros da simulação do modelo numérico LTC ($k = 0.0126$, $H_b = 2.42 \text{ m}$, $\alpha_b = 6.62^\circ$ e $t_f = 27.43 \text{ anos}$). Na Figura 5.18b os resultados relativos à formulação analítica foram obtidos considerando as características da simulação

do modelo numérico GENESIS ($k = 0.02455$, $H_b = 2.34$ m, $\alpha_b = 7.16^\circ$ e $t_f = 13.07$ anos). São apresentados resultados para três instantes de tempo: 1 ano, 10 anos e 100 anos.

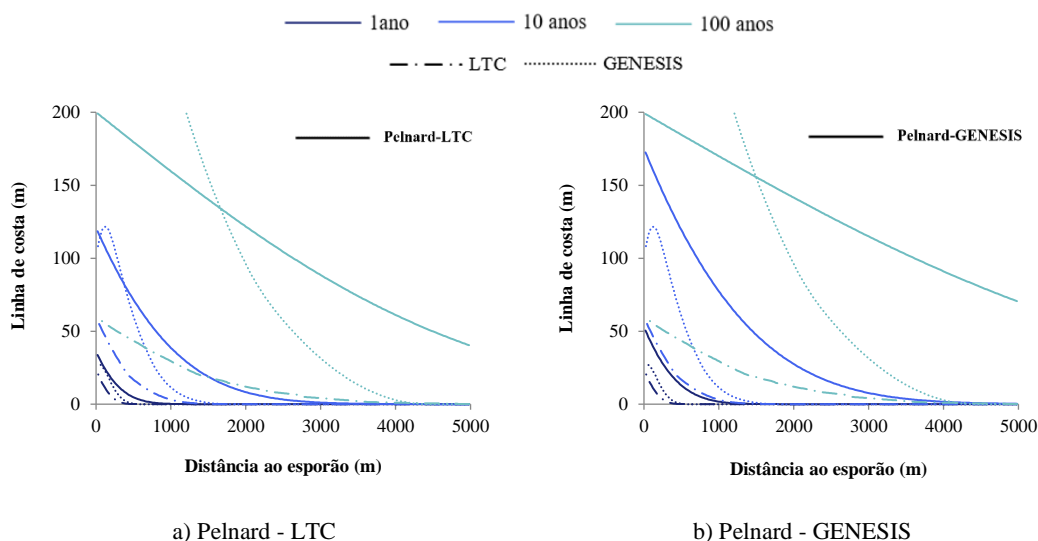


Figura 5.18: Evolução da linha de costa em função da distância ao esporão, considerando a onda $H_0 = 2$ m e $\alpha_0 = 20^\circ$.

O objetivo desta análise foi a comparação do desempenho de cada um dos modelos numéricos com os resultados da formulação analítica obtida com as características correspondentes. No entanto, optou-se por apresentar de igual forma os resultados relativos ao modelo numérico GENESIS na Figura 5.18a e os resultados relativos à simulação do LTC na Figura 5.18b. Numa primeira análise, como verificado na secção 5.3.4, recorrendo ao GENESIS, após o enchimento do esporão, continua a verificar-se acumulação de sedimentos para além do comprimento do esporão.

A Figura 5.19 representa com mais pormenor os resultados apresentados na Figura 5.18. De forma genérica, verificam-se diferenças significativas nos resultados obtidos com os modelos numéricos e com o modelo analítico. No entanto, e apesar das diferenças, verifica-se que a configuração da linha de costa obtida com o modelo numérico LTC se assemelha à configuração obtida com o modelo analítico, apesar de não apresentar o mesmo ritmo de evolução. Esta analogia na configuração não é verificada entre o modelo numérico GENESIS e o modelo analítico.

Na Figura 5.19a verifica-se que, apesar da semelhança obtida para a configuração da linha de costa, o modelo de Pelnard-Considère (1956) apresenta maiores taxas de acreção a

barlamar do esporão que o LTC, representando uma diferença na ordem dos 15 metros no perfil imediatamente a barlamar do esporão, ao fim de um ano de simulação. As diferenças entre o LTC e o modelo analítico aumentam com o decorrer da simulação, sendo de cerca de 90 metros ao final de 10 anos e de 140 metros no final da simulação (para o mesmo perfil transversal). Verifica-se ainda que as diferenças são mais significativas nos perfis próximos do esporão e que diminuem ligeiramente nas proximidades da fronteira do domínio de cálculo, a 5000 m do esporão.

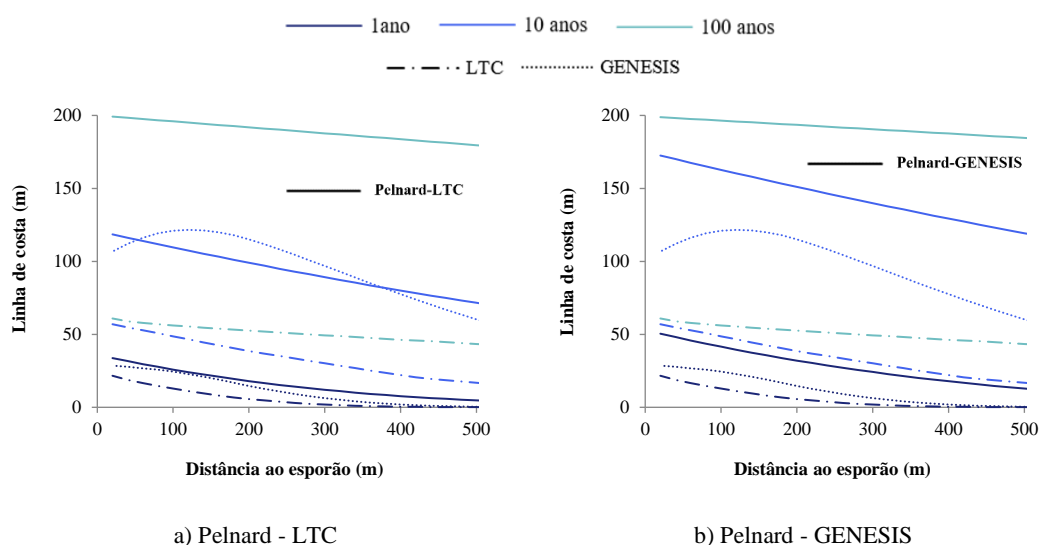


Figura 5.19: Pormenor da evolução da linha de costa em função da distância ao esporão, considerando a onda $H_0 = 2$ m e $\alpha_0 = 20^\circ$.

Na Figura 5.19b verificam-se diferenças significativas entre os resultados obtidos com o modelo numérico GENESIS e o modelo analítico, quer ao nível do tempo necessário para ocorrer acreção, quer ao nível configuração da linha de costa. No modelo analítico, tal como no modelo numérico LTC, a variação da posição da linha de costa vai diminuindo desde o esporão até à fronteira, comportamento que não se verifica nos resultados obtidos com o GENESIS, onde a posição da linha de costa regista maior acreção até uma distância de aproximadamente 100 metros do esporão. Tal como sucede com o LTC, também as áreas de acreção são inferiores no modelo numérico GENESIS quando comparados com o modelo analítico, com a exceção dos instantes que sucedem o enchimento do esporão no GENESIS. No perfil imediatamente a barlamar do esporão as diferenças são na ordem dos 10 metros ao final de 1 ano de simulação e de 35 metros quando decorridos 10 anos.

5.4.3. Síntese

Os modelos numéricos, apesar das melhorias verificadas ao longo dos tempos, apresentam ainda incertezas e limitações. Tendo em conta que o modelo analítico de Pelnard-Considère (1956) serviu de base aos dois modelos numéricos estudados, procedeu-se à comparação dos modelos, aplicada ao caso de estudo em análise.

A evolução da linha de costa a barlamar do esporão através da formulação analítica depende, entre outros aspetos, do tempo de enchimento do esporão (t_f). Verificou-se que, este instante de tempo, caracterizado pelo momento em que a posição da linha de costa atinge a cabeça do esporão, varia de forma inversamente proporcional ao coeficiente de transporte (k) e varia linearmente com o valor da altura ativa do perfil transversal. Verificou-se ainda que, a consideração de climas de agitação mais energéticos, faz diminuir substancialmente o tempo de enchimento.

Verificou-se que os resultados obtidos com o modelo LTC são consistentes com o modelo analítico, mas a linha de costa obtida com o modelo LTC evolui de forma mais lenta. A aproximação dos resultados de ambos os modelos pode ser conseguida, por exemplo, com um aumento do coeficiente de transporte no modelo LTC. Alguns dos pressupostos de base do modelo LTC são diferentes (processo de atualização de cotas) o que pode justificar algumas das diferenças obtidas. Relativamente à comparação do modelo numérico GENESIS com o modelo analítico, verificam-se não só diferenças no ritmo de evolução da linha de costa (também superior no modelo analítico), mas também ao nível da própria configuração da linha de costa.

5.5. Notas Finais

Um dos objetivos deste trabalho pretendia contribuir para a melhoria do desempenho da capacidade de simulação numérica da evolução da linha de costa a médio e longo prazo através da análise do desempenho do modelo LTC e comparação com outros modelos: numéricos (GENESIS) e analíticos (Pelnard-Considère, 1956). Assim, para avaliação e comparação do comportamento dos modelos foi proposto um caso de estudo hipotético, com

batimetria e topografia regulares, de forma a ser possível um maior controlo dos fenómenos envolvidos na modelação numérica da evolução da linha de costa.

Na análise do desempenho do modelo numérico LTC (secção 5.2), foi avaliada a evolução de diferentes parâmetros ao longo do tempo e em função da distância ao esporão: agitação marítima (altura e orientação da onda); dinâmica sedimentar (caudal sólido potencial e real, e variação altimétrica dos perfis transversais); e morfologia (*DoC*, profundidade de rebentação, linha de costa e limite de espraiamento). À exceção da morfologia, todos os restantes parâmetros analisados variaram dentro de um determinado intervalo de tempo, definido pelo instante em que se faz sentir o impacto do esporão no local analisado (variável consoante a distância ao esporão) e pelo instante de estabilização do comportamento da variável (constante ao longo de toda a extensão do litoral). Foram detetadas instabilidades numéricas na posição da linha de costa, mas estas não se devem ao algoritmo de balanço sedimentar do modelo, uma vez que a análise do comportamento dos parâmetros relativos à agitação marítima e dinâmica sedimentar permite concluir que estes estabilizam ao fim de cerca de 340 anos.

Relativamente à comparação entre os dois modelos numéricos, as principais diferenças consistiram no facto do modelo LTC atualizar a batimetria ao longo do tempo, enquanto que o GENESIS mantém fixa a forma do perfil transversal, e na forma de propagação da onda, já que o GENESIS permite recorrer a um modelo externo e o LTC propaga a onda internamente, de forma mais simplista. Observa-se que as diferenças nas características das ondas na rebentação são pouco significativas no instante inicial de simulação, sem a presença do esporão. No entanto, com o evoluir do tempo as diferenças verificadas aumentam, e podem ser causadas por diferenças de pressupostos na definição da orientação da linha de costa adotada por ambos os modelos.

Na aplicação do caso de estudo ao modelo de Pelnard-Considère (1956), foi verificado que os resultados obtidos com o modelo LTC são consistentes com o modelo analítico, mas a linha de costa obtida com o modelo LTC evolui de forma mais lenta, podendo os resultados de ambos os modelos ser aproximados se considerado um coeficiente de transporte mais elevado no modelo LTC. Entre o modelo numérico GENESIS e o modelo analítico verificam-se diferenças não só no ritmo de evolução da linha de costa (também superior no modelo analítico), mas também ao nível da própria configuração da linha de costa.

Capítulo 6

APLICAÇÃO DA COAST

6. APLICAÇÃO DA COAST

A ferramenta numérica COAST, apresentada no Capítulo 4, foi desenvolvida com o objetivo de analisar e otimizar estratégias de mitigação do problema de erosão costeira, contemplando a avaliação do impacto na evolução da linha de costa, o pré-dimensionamento da intervenção de defesa costeira e a quantificação dos custos e dos benefícios envolvidos (englobando implicitamente na análise económica os custos e benefícios sociais, ambientais e culturais).

A ferramenta COAST permite o estudo comparativo entre diferentes soluções de intervenção de defesa costeira, com vista à redução dos custos de execução e manutenção das intervenções, e maximização dos impactos positivos na evolução da linha de costa, auxiliando as entidades responsáveis a sustentar a opção estratégica adotada para a gestão do litoral. Assim, neste capítulo procede-se à aplicação da ferramenta COAST na comparação de diferentes cenários hipotéticos de intervenções de defesa costeira, com o objetivo de demonstrar simultaneamente a versatilidade da ferramenta desenvolvida e o impacto que a incerteza associada à avaliação de determinados parâmetros (dimensão, número e localização das estruturas, clima de agitação, horizonte temporal de análise, configuração do domínio de cálculo, valor económico do território, preço unitário dos materiais envolvidos, orçamento disponível, etc.) provoca na evolução da linha de costa e nos custos de intervenção associados, permitindo uma análise custo-benefício de cada um dos cenários propostos.

Uma análise custo-benefício pressupõe a comparação do cenário de intervenção para mitigação da erosão costeira em estudo com um cenário de referência, relativamente ao qual se obtêm indicadores que permitem avaliar se a solução é economicamente mais rentável ou não. A ferramenta COAST permite, no módulo de custo-benefício, a análise da viabilidade económica de cada cenário simulado, através da obtenção do valor atual líquido (*VAL*, Expressão 3.51) e do cálculo do rácio benefício-custo (*RBC*, Expressão 3.52), em comparação com o cenário de referência, correspondente à “não intervenção” (cenário que equivale à evolução natural da linha de costa, sem qualquer intervenção para mitigação da erosão ao longo do período de cálculo). Para que seja realizada esta análise custo-benefício,

deverá ser considerada a opção “*Cost-Benefit Analysis*” na janela da ferramenta COAST, representada na Figura 4.39. Assim, os benefícios do cenário em análise são calculados por comparação da posição da linha de costa num determinado instante de tempo, com a posição da linha de costa do cenário de referência, obtida para o mesmo instante.

Na secção 6.1 é descrito o cenário de referência para comparação do desempenho dos cenários de intervenção de defesa costeira considerados nas restantes secções. Foram definidos 54 cenários, considerando variações ao nível das características do terreno e da agitação marítima (em 4 cenários), de preços de materiais, custos de investimento inicial, custos ao longo do tempo de simulação e valores de território (em 18 cenários) e ao nível da avaliação das características das intervenções (comprimento, localização, número de estruturas, volumes, etc.), num total de 32 cenários. Os cenários foram agrupados por tipo de intervenção em quatro secções distintas, correspondentes às quatro opções de intervenção disponíveis no módulo de evolução da linha de costa da ferramenta COAST: secção 6.2 para cenários com implantação de esporões (obras perpendiculares à linha de costa); secção 6.3 para cenários que consideram estruturas longitudinais aderentes (obras paralelas à linha de costa); cenários de alimentações artificiais na secção 6.4; e a secção 6.5 para cenários de transposição artificial de areias (fontes aluvionares pontuais). Por fim, na secção 6.6 são discutidos de forma global os resultados obtidos para cada um dos grupos de cenários.

Cada uma das quatro secções correspondentes aos grupos de cenários de intervenção de defesa costeira simulados com a ferramenta COAST inicia-se com a descrição de um cenário base, isto é, o cenário a partir do qual são alterados parâmetros de forma a avaliar o impacto nos resultados finais (impacto físico: áreas de acreção e de erosão; e impacto económico: custos de investimento, custos totais, *VAL*, *RBC*, etc.). Após a descrição de cada um dos cenários considerados e respetiva análise de resultados, a secção termina com uma síntese das principais conclusões verificadas para o tipo de intervenção de defesa costeira em análise.

Note-se que, todas as considerações admitidas nesta análise (pressupostos de evolução da linha de costa e de pré-dimensionamento, características físicas da simulação, valores do território e dos materiais, etc.), não devem ser extrapolados para situações reais sem uma verificação adequada, uma vez que foram definidos unicamente para aplicação da ferramenta

COAST, de forma a avaliar a influência de determinados parâmetros no desempenho físico e económico das soluções.

6.1. Cenário de referência

O cenário de referência considerado para a aplicação da ferramenta COAST e para a comparação de cenários de intervenção de defesa costeira baseia-se no caso de estudo hipotético apresentado na Capítulo 5 deste trabalho. O domínio de cálculo, com batimetria e topografia regulares (Figura 5.1), é caracterizado por uma malha de 401 x 501 pontos, respetivamente, na direção perpendicular e paralela à linha de costa, com igual espaçamento (20 metros), resultando numa área modelada de 8 000 x 10 000 m². A batimetria foi gerada de acordo com o perfil de *Dean*, considerando o parâmetro A e m , respetivamente 0.127 e 2/3 (ver Expressões 5.1 e 5.2) e para a topografia (cotas acima do nível de referência, 0.0 m) foi considerado um declive constante de 2%, resultando num perfil transversal com uma profundidade máxima de aproximadamente 44 m e um talude de 32 m de altura.

O clima de agitação considerado no cenário de referência admite que cada onda atua isoladamente, com características ao largo $H_0 = 2$ m e $\alpha_0 = 10^\circ$, constantes ao longo de toda a simulação. De referir que este será o clima de agitação considerado em todos os cenários de simulação analisados, à exceção dos casos onde se pretende avaliar a influência do clima de agitação, fazendo variar, para esses cenários, a altura de onda entre os 2 e os 4 metros.

Os limites do perfil ativo foram considerados fixos e foram definidos tendo em conta a maior altura de onda ($H_0 = 4$ m e $\alpha_0 = 10^\circ$), resultando numa profundidade de fecho, $DoC = 8$ m, e uma altura de espraiamento, $R_u = 2$ m, totalizando uma altura ativa do perfil de 10 metros. O valor do coeficiente de transporte, $k = 0.03$, foi definido de forma a ser cumprido o critério de estabilidade (secção 3.3.2.1) para a maior onda. Os restantes parâmetros gerais, formulações consideradas no cálculo e ângulos máximos e mínimos admissíveis para os taludes são os representados, respetivamente, nas janelas da Figura 4.11, da Figura 4.13 e da Figura 4.14.

Para a fronteira norte do domínio de cálculo considerou-se a entrada de um valor nulo de sedimentos, enquanto que, no extremo sul da área modelada, o comportamento é dependente das condições na vizinhança, correspondendo a uma extrapolação dos valores de transporte

sedimentar estimado na área modelada vizinha (média dos volumes em transporte nas três secções adjacentes à fronteira sul). O intervalo de tempo considerado nas simulações foi de uma hora, num horizonte temporal de 20 anos (com saídas de resultados anuais).

Definidos todos os parâmetros necessários à simulação do cenário de referência no módulo de evolução da linha costa da ferramenta COAST, descrevem-se agora os dados relativos ao módulo de custo-benefício (o módulo de pré-dimensionamento não é utilizado no cenário de referência uma vez que não tem previstas estruturas de defesa costeira). De acordo com o exposto na secção 4.3.3, e considerando a opção “*Economic Balance*” da janela da Figura 4.39, para que seja possível a obtenção dos índices económicos do cenário (*VAL* e *RBC*) só é necessário definir o valor do território do domínio de cálculo (uma vez que não são consideradas intervenções de defesa costeira).

Foram definidas 3 zonas de território para o cenário de referência (com valor constante ao longo da direção perpendicular à linha de costa), considerando o mesmo valor, quer em situação de acreção, quer em situação de erosão (Figura 6.1): zona 1, correspondente a uma zona de floresta, com extensão de 7.5 km desde a fronteira sul; zona 2, correspondente a uma zona urbanizada e que interessa proteger, com extensão de 1.5 km, adjacente à zona 1; e a zona 3, correspondente a uma zona de dunas, com extensão de 1 km (até à fronteira norte). Os valores de cada zona foram estimados com base nos valores de território apresentados em Roebeling *et al.* (2018): para a zona 1 considera-se 0.20 €/m²/ano, a zona 2 é a zona mais valiosa do domínio de cálculo, com o valor de 10 €/m²/ano e a zona 3 representa um valor anual de 2 €/m² (valores constantes ao longo do horizonte temporal da simulação). A taxa de desconto (*r*) considerada para obtenção dos valores atualizados foi de 3% (baseada em Roebeling *et al.*, 2018).

Os resultados obtidos com a aplicação do módulo de evolução da linha de costa ao cenário de referência, para um horizonte temporal de 20 anos, demonstram que, no caso de não se realizar qualquer intervenção de defesa costeira no domínio de cálculo, existirão perdas de território, que atingem recuos máximos da posição da linha de costa, junto à fronteira norte, de cerca de 230 metros. A Figura 6.2 mostra a posição da linha de costa correspondente ao cenário de referência ao fim de 5, 10 e 20 anos de simulação e demonstra a necessidade de intervir no domínio de cálculo, tendo em conta as perdas de território, essencialmente em zonas de maior valor (zona 2), onde se verificam perdas na ordem dos 15 ha, ao fim de 20

anos. A Tabela 6.1 resume o recuo máximo e as áreas perdidas no domínio de cálculo para o cenário de referência.

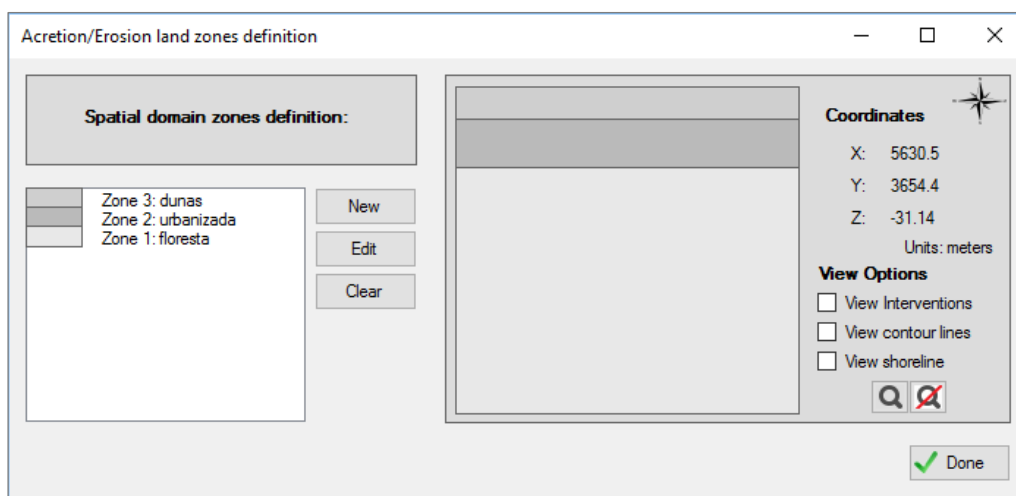


Figura 6.1: Representação das zonas definidas para o domínio de cálculo.

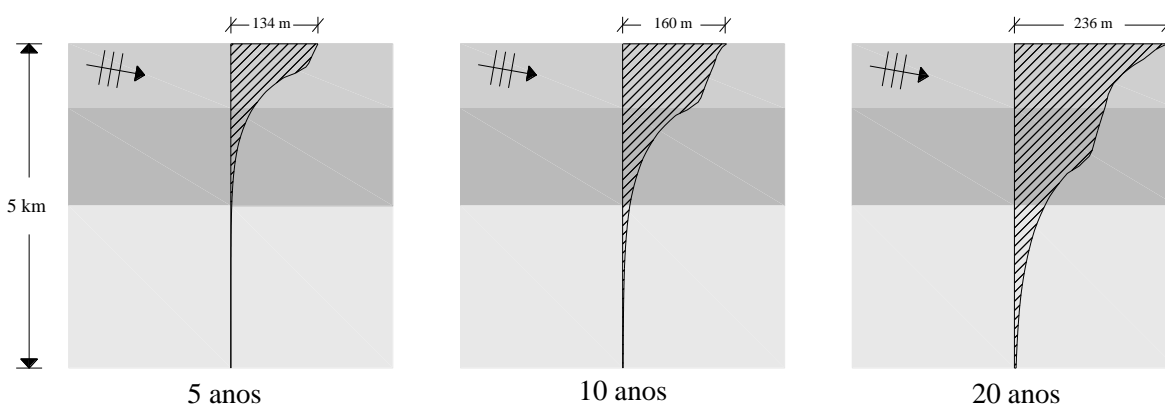


Figura 6.2: Posição da linha de costa no cenário de referência, ao longo do tempo (escala horizontal 10 vezes superior à escala vertical).

Tabela 6.1: Recuo máximo da posição da linha de costa e áreas totais de território perdidas para o cenário de referência, ao longo do tempo de simulação (5, 10 e 20 anos).

	Máximo recuo da linha de costa (m)			Área perdida (m ²)		
	5 anos	10 anos	20 anos	5 anos	10 anos	20 anos
Zona 3	134	160	236	87 356	132 432	172 313
Zona 2	33	102	139	16 348	57 888	151 684
Zona 1	1	10	47	458	6 059	41 460
Total	-	-	-	104 162	196 379	365 458

Tendo por base os valores considerados para cada uma das zonas definidas para o domínio de cálculo ($\text{€}/\text{m}^2/\text{ano}$), é possível estimar, com a aplicação do módulo de custo-benefício da COAST, o *VAL* ao final de cada ano de simulação (o valor de *RBC* não é calculado, uma vez que para o cenário de referência não há quaisquer custos associados). Os valores obtidos demonstram perdas na ordem dos 12 milhões de euros, ao fim de 20 anos de simulação (valores atualizados para o ano 0). Para um horizonte temporal de 5 anos, as perdas de território rondam os 800 mil euros, enquanto que, passados 10 anos, já ultrapassam os 3 milhões de euros.

O cenário definido como cenário de referência, apesar de hipotético, mostra que em zonas costeiras suscetíveis de erosão (volume de sedimentos disponível inferior à capacidade de transporte sedimentar), as perdas económicas que podem advir no caso de não serem implementadas medidas de intervenção de defesa costeira são elevadas. Assim, nas secções seguintes são propostos diferentes cenários hipotéticos de intervenção de defesa costeira para mitigação dos problemas de erosão do cenário de referência, com vista a demonstrar as potencialidades da ferramenta numérica COAST e comparar soluções que apresentam diferentes valores de *VAL* e *RBC*, de área de território perdido, de investimento inicial, etc.

6.2. Esporões

Os esporões são soluções de defesa costeira que promovem a acumulação de areias a barlamar da estrutura e antecipam a erosão a sotamar, devendo por isso ser considerados em situações onde se verifique transporte sedimentar longitudinal. Os esporões podem ser considerados isoladamente ou em conjunto, constituindo, neste último caso, campos de esporões. O número de esporões, comprimento, localização, etc., deve ser definido de forma a que, a quantidade de sedimentos intercetada seja a maior possível, aumentando assim a eficácia da estrutura. Desta forma, é importante avaliar vários cenários de intervenção para analisar os impactos na evolução da linha de costa e, simultaneamente, os índices económicos que lhes estão associados.

Com vista à mitigação do problema de erosão costeira identificado no cenário de referência foi definida uma intervenção traduzida pela implantação no domínio de cálculo de um esporão de 200 metros de comprimento (Figura 6.3). Este cenário foi definido como cenário

base (CB) para comparação com outras soluções com recurso a esporões que foram testadas com o auxílio da ferramenta COAST, de forma a avaliar a incerteza que a variação dos parâmetros representados na Tabela 6.2 tem na evolução da linha de costa e no balanço económico da solução.

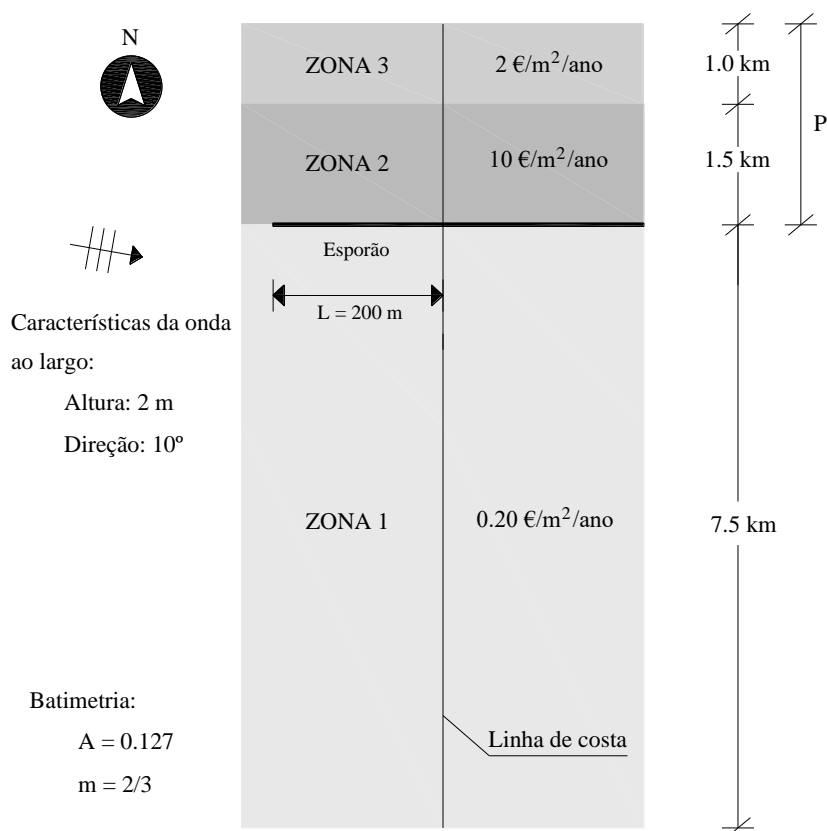


Figura 6.3: Esquemática do cenário base do esporão.

Tabela 6.2: Definição dos cenários com esporão, testados com a ferramenta COAST.

		1	2	3	4
Agitação marítima	<i>i</i>	$H_0 = 3$ m	$H_0 = 4$ m	-	-
Batimetria	<i>ii</i>	$m = 4/5$	$m = 1/2$	-	-
Comprimento	<i>iii</i>	$L = 100$ m	$L = 300$ m	$L = 400$ m	-
Localização	<i>iv</i>	$P = 1.5$ km	$P = 2.0$ km	$P = 3.0$ km	$P = 3.5$ km
Campos de esporões	<i>v</i>	2 esporões espaçados 500 m	2 esporões espaçados 1000 m	3 esporões espaçados 500 m	-
Valor do território	<i>vi</i>	60 €/m ² /ano (zona urbanizada)	3 €/m ² /ano (zona urbanizada)	2 €/m ² /ano (domínio de cálculo)	-
Taxa de desconto	<i>vii</i>	$r = 0\%$	$r = 1.5\%$	$r = 4.5\%$	-

Admitindo as características da simulação do cenário de referência, descritas na secção 6.1, e considerando a implantação do esporão de 200 metros, localizado a 2.5 km da fronteira norte (limite sul da zona urbanizada do território), os resultados obtidos com o módulo de evolução da linha de costa, para um horizonte temporal de 20 anos, demonstram menores recuos da posição da linha de costa junto à fronteira norte e a acumulação de sedimentos junto à frente urbana (Figura 6.4). No entanto, verificam-se taxas de recuo significativas a sotamar do esporão, pelo que, para que seja possível avaliar se a solução definida é economicamente eficaz, importa definir as características da estrutura (módulo de pré-dimensionamento) e contabilizar custos e benefícios envolvidos (módulo de custo-benefício).

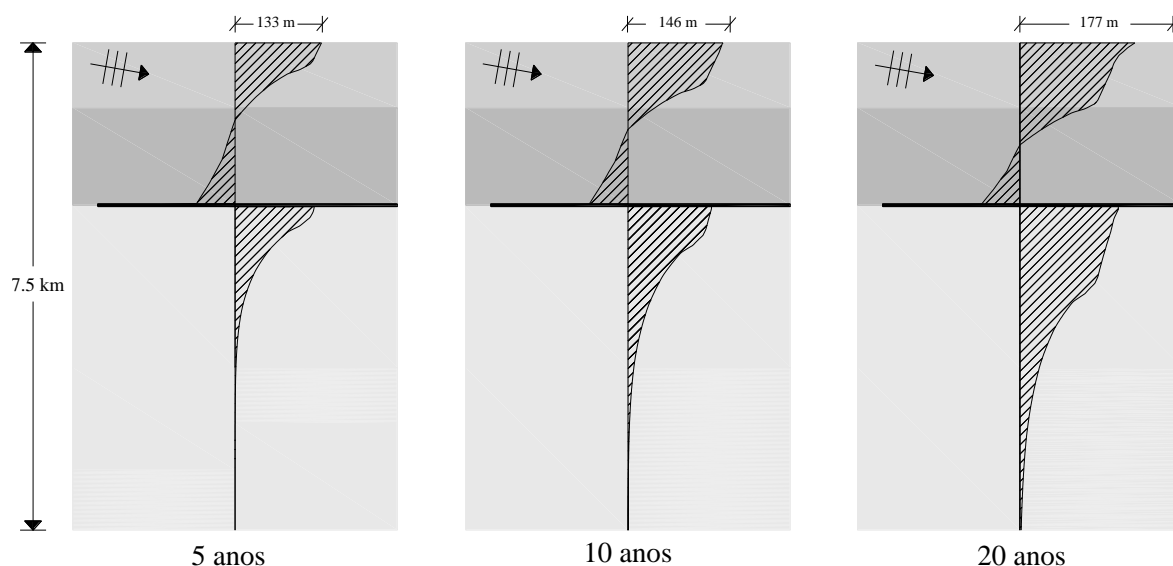


Figura 6.4: Posição da linha de costa no cenário base do esporão, ao longo do tempo (escala horizontal 10 vezes superior à escala vertical).

Com recurso ao módulo de pré-dimensionamento da ferramenta COAST foi definida uma secção transversal tipo para a secção mais desfavorável do esporão (secção correspondente à cabeça do esporão). As características geométricas da secção definida e o volume correspondente a cada uma das camadas que constituem o esporão estão representados na janela da Figura 6.5. Foi considerada uma cota de 6 metros para o coroamento da estrutura (acima do nível de referência). Tendo em conta o perfil transversal da praia e que a cabeça da estrutura se localiza a uma profundidade de cerca de 4.5 metros, a obra totaliza um volume global de material de cerca de 58 000 m³.

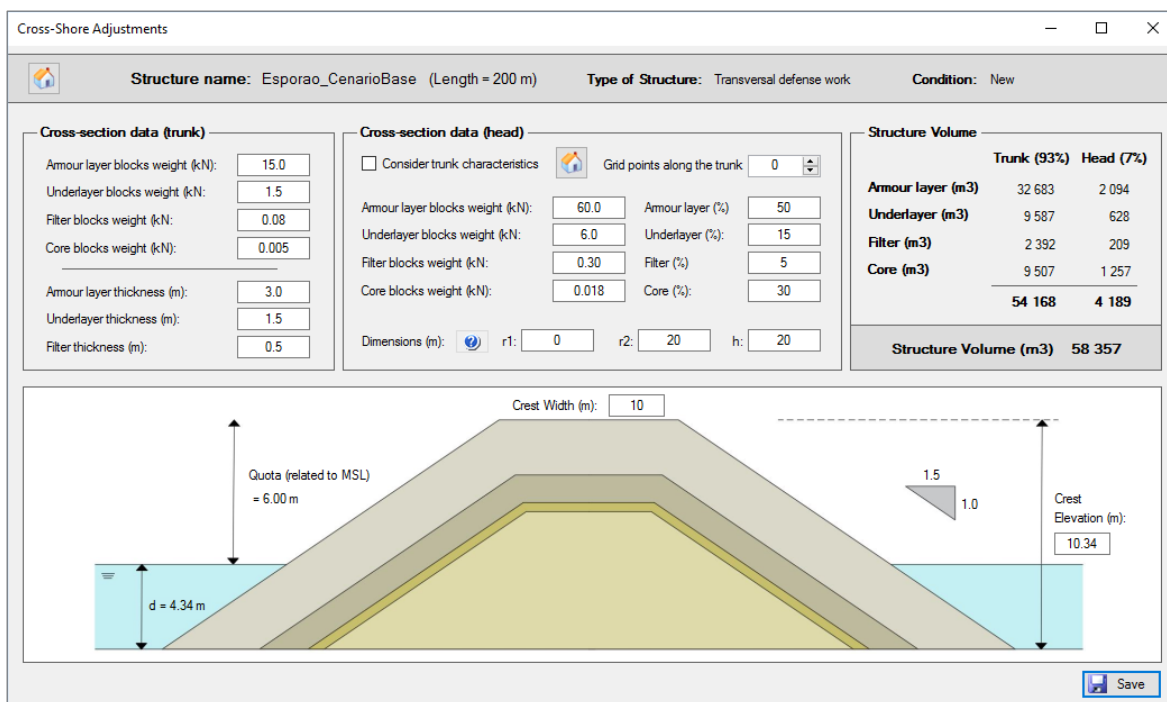


Figura 6.5: Secção transversal do esporão do cenário base, correspondente à profundidade da cabeça (módulo de pré-dimensionamento).

Foram estimados os custos inerentes à construção da estrutura (diretos e indiretos) que, tendo em conta os volumes de material que constituem a estrutura (Figura 6.5), resultam num custo total de investimento para a implantação do esporão de cerca de 1 462 200 €. Considerou-se necessária a manutenção da estrutura com intervenções de 5 em 5 anos para a zona do tronco e com um intervalo mais reduzido, de 2 em 2 anos, para a zona da cabeça. O custo estimado para cada operação de manutenção foi de 30% do custo de primeiro investimento para a zona do tronco e de 50% para a zona da cabeça, totalizando um custo de cerca de 340 mil euros no primeiro caso e de cerca de 160 mil euros no segundo (Figura 6.6).

Tendo por base os valores de território estabelecidos para o cenário de referência (secção 6.1) e os valores definidos para a construção e manutenção do esporão ao longo dos 20 anos de simulação, foi aplicado o módulo de custo-benefício da COAST ao cenário base do esporão, permitindo a obtenção dos índices económicos relativos à solução (Figura 6.6). De referir que, para este cenário (e posteriores), foi considerada a opção “*Cost-Benefit Analysis*” (janela da Figura 4.39), ou seja, o cálculo dos benefícios é realizado em relação à posição da linha de costa do cenário de “não intervenção” do ano correspondente (coincidente com o cenário de referência da secção 6.1).

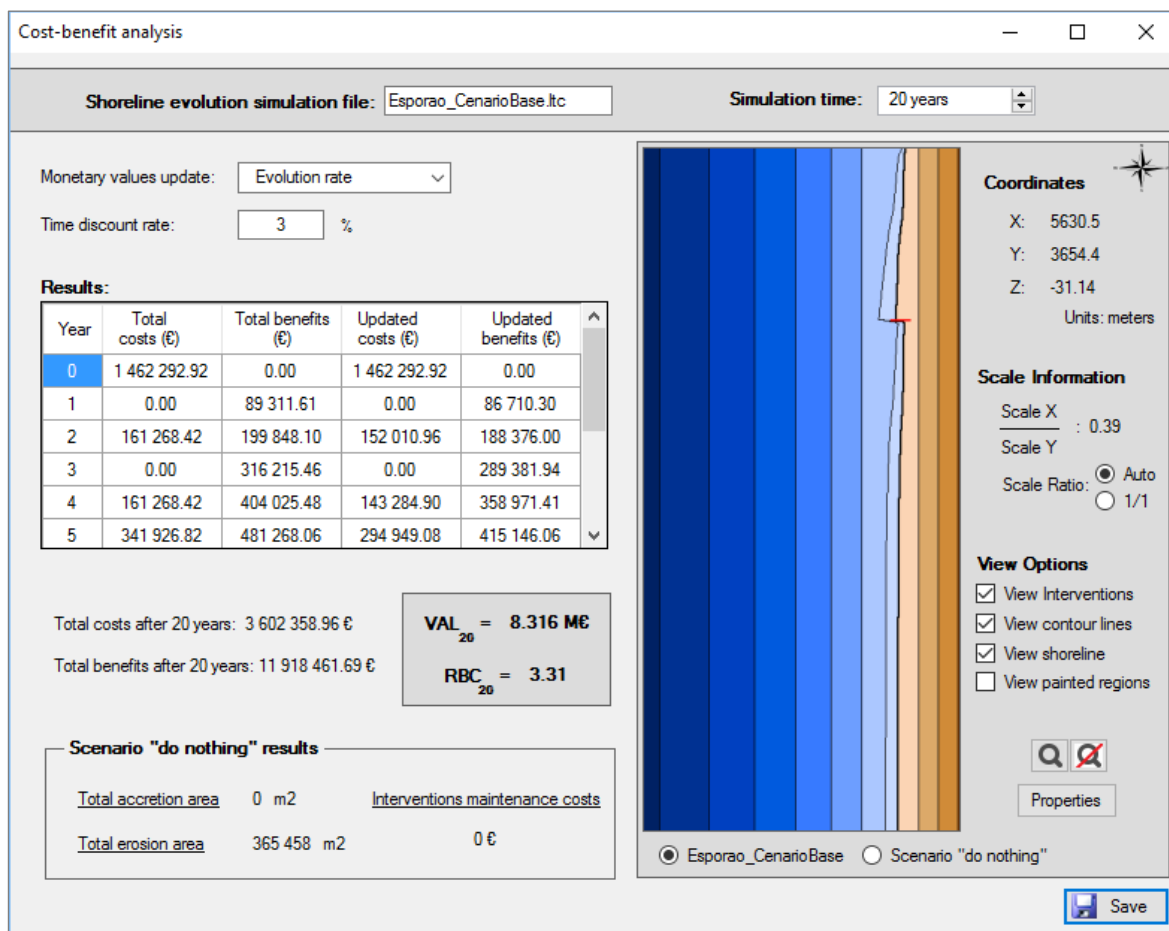


Figura 6.6: Resultados do módulo de custo-benefício, para o cenário base do esporão.

Aplicada a ferramenta COAST, verifica-se que o impacto físico da implantação do esporão é positivo a barlamar da estrutura, com uma área de acreção na ordem dos 2.4 ha, que protege a zona urbanizada do domínio de cálculo, mas, a nível global, a solução apresenta uma área de erosão superior ao cenário de referência (balanço negativo que representa uma perda de território de cerca de 4 ha). Entende-se como balanço, a diferença entre as áreas de erosão do cenário de referência e do cenário em análise, somada à área de acreção do cenário em análise, ao fim dos 20 anos de simulação. Este parâmetro é comumente referido na análise física dos cenários deste capítulo, pois permite verificar se a intervenção resulta em áreas perdidas ou ganhas em relação ao cenário de referência.

Neste caso, apesar do balanço negativo que resulta na perda geral de território por efeito da intervenção, a solução é economicamente vantajosa uma vez que, a partir do sétimo ano de simulação é atingido o ponto de equilíbrio. O ponto de equilíbrio, ou *break-even*, representa o instante no tempo em que é atingido o equilíbrio do investimento, ou seja, o momento em

que o total de benefícios iguala o total de custos da intervenção ($RBC > 1$ e $VAL > 0$). Este indicador económico, tal como o indicador físico anteriormente definido, vai ser frequentemente mencionado na análise económica dos diferentes cenários do presente capítulo e considera-se que, após este momento, a realização da intervenção é economicamente vantajosa.

Como referido, a solução de implantação de um esporão de 200 metros representa um custo inicial de cerca de um milhão e meio de euros, o que tendo em conta a manutenção necessária ao longo dos 20 anos de simulação representa um custo total de cerca 3.6 milhões de euros (valores atualizados para o ano 0, Figura 6.6). Os benefícios inerentes à nova posição da linha de costa, com ganho de território a barlamar do esporão e redução do recuo da posição da linha de costa junto à fronteira norte representam ganhos económicos na ordem dos 12 milhões de euros ao longo dos 20 anos de simulação (por comparação com o cenário de não intervenção, Figura 6.6). A Tabela 6.3 resume o total de áreas ganhas e perdidas ao fim dos 20 anos de simulação e apresenta o rácio benefício-custo (RBC) ao fim de 5, 10 e 20 anos.

Tabela 6.3: Balanço físico e económico do cenário base do esporão.

	Área total ao fim de 20 anos		Rácio benefício-custo		
	Acreção	Erosão	5 anos	10 anos	20 anos
Cenário base (CB)	24 435	431 932	0.65	1.51	3.31

Pode concluir-se que, apesar do impacto físico negativo da implantação do esporão, trata-se de uma solução economicamente vantajosa a médio-longo prazo (após 7 anos de simulação). A curto prazo, por exemplo num horizonte de 4 anos, esta não é uma solução vantajosa, uma vez que implica a disponibilidade de cerca de 1.7 milhões de euros (construção do esporão e respetiva manutenção durante 4 anos), que não são rentabilizados neste espaço de tempo, uma vez que os benefícios resultantes da evolução da linha de costa no período correspondente não ultrapassam 1 milhão de euros.

6.2.1. Agitação marítima

O estudo da influência da agitação marítima no desempenho de uma determinada solução de intervenção costeira é importante, isto porque, o facto de uma solução ser eficaz numa

determinada zona costeira não implica que o seja numa outra zona distinta, caracterizada por um regime de ondulação diferente. Por exemplo, de acordo com Bertin *et al.* (2013), o litoral oeste português é caracterizado por um clima de agitação energético (altura de onda média de cerca de 2 metros), o que não sucede no litoral sul do país, onde a agitação marítima é inferior (altura de onda média de aproximadamente 0.7 metros). Por este motivo, pretende-se estudar a influência que o clima de agitação tem nos resultados obtidos para o cenário base do esporão (esporão com extensão de 200 metros, localizado a 2.5 km da fronteira norte), aplicando a ferramenta COAST para uma altura de onda constante ao longo de toda a simulação, com características ao largo de $H_0 = 3$ m e de $H_0 = 4$ m, mantendo a direção da onda definida para o cenário de referência, $\alpha_0 = 10^\circ$.

Para os cenários correspondentes à onda $H_0 = 3$ m e $H_0 = 4$ m o cenário de “não intervenção” não corresponde aos resultados apresentados na secção 6.1, uma vez que o cenário de referência deve corresponder ao clima de agitação em análise. Apesar do comportamento da evolução da posição da linha de costa ser semelhante ao obtido para o cenário de “não intervenção” correspondente à onda $H_0 = 2$ m (Figura 6.2), o recuo máximo da linha de costa e as áreas de erosão ao fim dos 20 anos de simulação são superiores (Tabela 6.4).

Tabela 6.4: Recuo máximo da posição da linha de costa e áreas totais de território perdidas para o cenário de “não intervenção”, correspondentes à onda $H_0 = 3$ m e $H_0 = 4$ m.

	Máximo recuo da linha de costa (m)			Área perdida (m ²)		
	5 anos	10 anos	20 anos	5 anos	10 anos	20 anos
$H_0 = 3$ m	164	259	402	263 448	492 991	964 624
$H_0 = 4$ m	224	375	590	511 694	984 046	1 838 363

Os resultados obtidos com a aplicação do módulo de custo-benefício da COAST aos cenários correspondentes às duas ondas com maior capacidade de transporte sedimentar mostram que a implantação do esporão continua a ser uma solução economicamente vantajosa (RBC superior a 1, a partir do 6º ano, no caso da onda de 3 m, e a partir do 8º ano, no caso da onda de 4 m). A Tabela 6.5 resume as áreas totais de acreção e erosão obtidas no final dos 20 anos de simulação e o índice RBC para 5, 10 e 20 anos de simulação. Apesar do aumento da altura de onda proporcionar maiores perdas de território consequentes da implantação do esporão, o balanço de áreas em relação ao cenário de “não intervenção” correspondente é positivo.

Contrariamente ao que sucede com o cenário base, para a onda $H_0 = 3$ m e $H_0 = 4$ m, as áreas de erosão ao fim de 20 anos de simulação são inferiores às obtidas para o cenário de “não intervenção”. Verifica-se, no entanto, que no caso da simulação com a onda $H_0 = 4$ m, não ocorre acreção a barlar do esporão, uma vez que a erosão se propaga ao longo dos 2.5 km de extensão, pelo que, apesar de ser uma solução economicamente atraente, não garante a proteção da zona urbanizada do domínio de cálculo. Note-se que, por simplificação, o custo do esporão foi considerado constante, mas, sabe-se que ondas superiores implicam pesos unitários dos blocos a colocar no manto resistente superiores e, conseqüentemente, custos mais elevados.

Tabela 6.5: Balanço físico e económico da influência do clima de agitação nos cenários do esporão.

		Área total ao fim de 20 anos		Rácio benefício-custo		
		Acreção	Erosão	5 anos	10 anos	20 anos
<i>CB</i>	$H_0 = 2$ m	24 435	431 932	0.65	1.51	3.31
<i>i.1</i>	$H_0 = 3$ m	1 964	956 043	0.80	2.02	4.28
<i>i.2</i>	$H_0 = 4$ m	0	1 717 849	0.47	1.75	6.02

O estudo de influência da agitação marítima permitiu concluir que as vantagens económicas inerentes à implantação de um esporão são transversais aos climas de agitação testados. No entanto, regista-se que, o valor de *RBC* das soluções ao fim dos 20 anos de simulação aumenta com o aumento da altura de onda. No que diz respeito ao balanço físico, as conclusões não são tão lineares, uma vez que as soluções correspondentes a alturas de onda superiores à do cenário base apresentam um balanço físico positivo, que aumenta com o aumento da altura de onda, mas as áreas de acreção junto da frente urbana diminuem significativamente com o aumento da altura de onda, uma vez que a erosão se propaga até à zona do esporão, podendo desta forma comprometer a proteção da zona urbanizada.

6.2.2. Batimetria

A batimetria do cenário de referência foi definida considerando o parâmetro $m = 2/3$ (Expressão 5.2), valor proposto por *Bruun* e *Dean* para praias intermédias. No entanto, este parâmetro pode tomar diferentes valores, em função do tipo de dissipação da praia em

análise. Para praias refletivas, autores como *Bowen* (trabalho teórico), *Inman* (trabalho de campo nas costa este e oeste americana e no delta do Nilo) e *Kotvojs* e *Cowell* (trabalho de campo no sudeste da Austrália), apontam o valor de $m = 2/5$. *Vellinga* com perfis de erosão (laboratório e trabalho de campo na Holanda) e *Kotvojs* e *Cowell* (trabalho de campo no sudeste da Austrália) apontam $m = 4/5$ para praias dissipativas. Para as praias intermédias, além do valor considerado para o cenário de referência, *Boon* e *Green* (trabalho de campo nas Caraíbas) indicam $m = 1/2$ e *Keulegan* e *Krumbein* apontam $m = 4/7$ (*Cowell et al.*, 1999).

A batimetria considerada para o domínio de cálculo tem influência não só na evolução da linha de costa ao longo do tempo de simulação, mas também no cálculo do volume de material inerente à implantação do esporão. Assim, para avaliar este aspeto, foi testada a influência da variação do parâmetro m da Expressão de *Dean*: $m = 4/5$, correspondente a uma praia dissipativa, e $m = 1/2$, correspondente a uma praia intermédia, no entanto com um comportamento mais refletivo, em comparação com o cenário base ($m = 2/3$). Para o primeiro cenário (*ii.1*) a profundidade máxima do perfil transversal no domínio de cálculo atinge os 140 metros e na zona da cabeça do esporão a profundidade é de cerca de 9 metros, enquanto que para o segundo cenário (*ii.2*), a profundidade máxima do domínio de cálculo é de cerca de 10 metros e junto à cabeça do esporão atinge cerca de 2 metros.

Foi aplicado o módulo de pré-dimensionamento da COAST aos cenários *ii.1* e *ii.2* de forma a avaliar o volume de material de cada esporão por efeito da batimetria e, posteriormente, o módulo de custo-benefício para obtenção dos custos da obra. A Tabela 6.6 permite comparar os valores obtidos.

Tabela 6.6: Volume e custo de construção do esporão, considerando diferentes batimetrias.

		Volume (m ³)	Custo total (€)
<i>ii.1</i>	$m = 4/5$	83 325	2 192 100
<i>CB</i>	$m = 2/3$	58 357	1 462 293
<i>ii.2</i>	$m = 1/2$	47 481	1 219 927

Tal como na secção anterior, foi necessário simular o cenário de “não intervenção” correspondente às duas novas batimetrias geradas, tendo-se verificado maiores recuos da

linha de costa (300 m junto à fronteira norte ao fim de 20 anos de simulação) e maiores áreas de erosão (558 551 m², decorridos 20 anos) no cenário associado à batimetria de maiores profundidades ($m = 4/5$). Por oposição, no cenário $m = 1/2$ verificaram-se menores erosões (57 m de recuo junto à fronteira norte e 64 968 m² de área perdida, após os 20 anos de simulação).

Aplicada a ferramenta COAST aos cenários *ii.1* e *ii.2*, verificam-se diferenças ao nível da posição da linha de costa, obtendo-se taxas de acreção e erosão significativamente maiores para a praia dissipativa e menores para a praia intermédia/refletiva (Tabela 6.7). No cenário *ii.1* a solução não é fisicamente vantajosa (balanço negativo de áreas de 5.3 ha, por comparação com o cenário de “não intervenção” correspondente), contrariamente ao que acontece quando $m = 1/2$, onde, apesar de pouco significativo, se verifica um balanço positivo de cerca de 117 m². Relativamente ao balanço económico, verifica-se que a construção de um esporão na praia dissipativa é mais vantajosa do que no cenário base (apesar do custo do esporão ser superior), qualquer que seja o horizonte temporal considerado, enquanto que, para o cenário *ii.2* se verifica que o investimento realizado com a construção e manutenção do esporão não é rentabilizado durante os 20 anos em análise.

Tabela 6.7: Balanço físico e económico da influência da batimetria nos cenários do esporão.

		Área total ao fim de 20 anos		Rácio benefício-custo		
		Acreção	Erosão	5 anos	10 anos	20 anos
<i>ii.1</i>	$m = 4/5$	76 030	688 436	0.86	2.19	4.11
<i>CB</i>	$m = 2/3$	24 435	431 932	0.65	1.51	3.31
<i>ii.2</i>	$m = 1/2$	0	64 852	0.00	0.00	0.00

Conclui-se que, diferentes batimetrias consideradas para o domínio de cálculo, implicam diferentes comportamentos da evolução da linha de costa ao longo do tempo e diferentes volumes de material (e custos) na implementação das estruturas. A consideração do mesmo valor para a profundidade de fecho (apesar das diferentes batimetrias) induz diferentes ritmos na evolução da linha de costa, resultando em taxas de acreção e erosão maiores para as praias dissipativas e menores para as praias intermédias/refletivas. A aplicação da COAST numa análise custo-benefício dos cenários demonstra que a implementação de um esporão

no cenário de praia dissipativa não é fisicamente vantajosa. No entanto, e apesar de resultar em custos de construção e manutenção do esporão superiores, a solução é economicamente mais atraente que o cenário base. A evolução a um ritmo mais lento da linha de costa no cenário da praia intermédia/refletiva, não induz benefícios positivos que no horizonte de 20 anos compensem economicamente o custo associado à implementação deste tipo de estrutura.

6.2.3. Comprimento

Uma das principais questões que se coloca no projeto de implantação de um esporão prende-se com o comprimento da obra. Teoricamente, comprimentos maiores garantem de forma mais eficaz a proteção da zona localizada a barlamar (devido a uma maior interrupção de sedimentos), mas, aumentam o custo da intervenção e o impacto negativo nas zonas localizadas a sotamar da estrutura. Assim, a procura do comprimento adequado para a estrutura é um exercício importante e que pode ser conseguido com o auxílio da ferramenta COAST, já que, alterando apenas o comprimento da estrutura, é possível obter simultaneamente o balanço físico e económico da solução.

Foram testados 3 comprimentos distintos para comparação dos resultados com o cenário base (200 metros): esporão com 100 m, 300 m e 400 m. Tendo em conta que as dimensões do esporão variam em cada um dos cenários, foi aplicado o módulo de pré-dimensionamento para estimativa dos volumes de obra correspondentes e o módulo de custo-benefício para estimativa dos custos que lhes estão associados (Tabela 6.8).

Tabela 6.8: Volume e custo de construção do esporão, considerando diferentes comprimentos.

		Volume (m ³)	Custo total (€)
<i>iii.1</i>	<i>L = 100 m</i>	34 600	975 627
<i>CB</i>	<i>L = 200 m</i>	58 357	1 462 293
<i>iii.2</i>	<i>L = 300 m</i>	91 334	2 291 617
<i>iii.3</i>	<i>L = 400 m</i>	130 756	3 263 128

Os resultados obtidos para a evolução da linha de costa ao fim dos 20 anos de simulação demonstram que, qualquer que seja o comprimento testado, o balanço físico é negativo

(Tabela 6.9). No caso do esporão de 100 metros, a acumulação de sedimentos a barlamar do esporão resulta numa pequena área de acreção (inferior a 0.1 ha). No caso dos cenários onde o comprimento do esporão é superior ao considerado no cenário base, a acumulação de sedimentos a barlamar do esporão é maior. Registam-se diferenças mais significativas entre os 200 e os 300 metros (acréscimo de área de acreção de cerca de 200%), enquanto que o acréscimo entre os 300 e 400 metros é de apenas 10%. Apesar de garantida a proteção da zona urbanizada, qualquer um dos cenários avaliados apresenta erosão generalizada junto à fronteira norte e a sotamar do esporão. A área total de erosão aumenta com o comprimento do esporão, e, contrariamente ao que sucede com as áreas de acreção, este aumento é aproximadamente linear (cerca de 10 a 15% por cada 100 metros de aumento do comprimento do esporão).

Tabela 6.9: Balanço físico e económico da influência do comprimento do esporão.

		Área total ao fim de 20 anos		Rácio benefício-custo		
		Acreção	Erosão	5 anos	10 anos	20 anos
<i>iii.1</i>	<i>L = 100 m</i>	892	380 523	0.23	0.57	1.48
<i>CB</i>	<i>L = 200 m</i>	24 435	431 932	0.65	1.51	3.31
<i>iii.2</i>	<i>L = 300 m</i>	74 985	474 373	0.47	1.28	2.96
<i>iii.3</i>	<i>L = 400 m</i>	82 665	478 971	0.32	0.88	2.06

Aplicado o módulo de custo-benefício aos três cenários em análise é possível caracterizar economicamente cada uma das soluções (Tabela 6.9). Ao fim dos 20 anos de simulação, qualquer dos cenários é vantajoso, mas a solução que apresenta maior índice de *RBC* corresponde ao cenário base. No entanto, no caso da disponibilidade financeira inicial (e ao longo do tempo) ser baixa, a solução correspondente ao esporão de 100 metros pode ser uma solução mais viável, uma vez que o custo inerente à construção do esporão e à sua manutenção ao longo do tempo é inferior, mas a solução só apresenta um balanço económico positivo após 15 anos de simulação. As soluções correspondentes aos dois esporões mais longos não são economicamente competitivas (em relação ao cenário base), mas, se o objetivo da intervenção passar, por exemplo, pelo aumento da zona de praia ao longo da extensão da zona urbanizada, estas serão soluções com maior eficácia.

Conclui-se que a definição do comprimento ótimo do esporão depende em grande parte do objetivo pretendido com a implantação da estrutura, isto porque, a solução que atinge mais rapidamente o ponto de equilíbrio (esporão de 200 metros), representa, simultaneamente, o maior impacto negativo na evolução da linha de costa. O esporão de 400 metros resulta em maiores áreas de acreção e, conseqüentemente, maior eficácia na proteção da zona urbanizada. O esporão de 100 metros apresenta-se como solução eficaz no caso de uma menor disponibilidade financeira por parte das entidades competentes e o esporão de 300 metros é a solução que devolve maior valor de *VAL*, apesar de não corresponder ao *RBC* mais elevado.

6.2.4. Localização

No sentido de maximizar a vantagem de acumulação de sedimentos a barlamar, a localização ótima para a implantação de um esporão deverá corresponder ao limite sul da zona que se pretende proteger (correspondente ao cenário base). No entanto, nem sempre é possível que a obra seja localizada na zona teoricamente mais adequada, pela eventual existência de constrangimentos locais que impeçam a solução. Assim, pretendeu-se avaliar o impacto físico e económico resultante da alteração da posição da estrutura, considerando para isso 4 cenários, que distam 500 e 1000 metros para norte e para sul da posição inicialmente estipulada (a 2500 metros da fronteira norte).

A Tabela 6.10 resume os valores obtidos para os quatro cenários testados e mostra que, economicamente, o cenário base é o mais adequado, apesar de, a nível global, não ser o que apresenta maiores áreas de acreção. O que se verifica com a alteração da posição do esporão para sul, é que as maiores áreas de acreção vão ocorrer em zonas do território menos valiosas. Ao deslocar o esporão para norte, resultam áreas de erosão na zona de maior valor. Assim, se se considerar o esporão localizado a 1.5 km da fronteira norte (cenário *iv.1*), a solução não é economicamente vantajosa, sendo também menos eficaz no que à proteção da zona urbanizada diz respeito, apesar de, globalmente, ser a solução que apresenta menores áreas de erosão ao fim de 20 anos. Considerando o esporão 500 metros a sul do cenário anterior, a solução é eficaz após 19 anos de simulação. Nos cenários que correspondem à alteração da localização do esporão para sul do cenário base, os resultados mostram soluções economicamente eficazes ao fim dos 20 anos de simulação (apesar dos valores de *RBC* serem

inferiores ao obtido no cenário base). As áreas de erosão nestes dois últimos cenários são superiores às obtidas para o cenário base, no final do tempo de simulação.

Tabela 6.10: Balanço físico e económico da influência da posição do esporão.

		Área total ao fim de 20 anos		Rácio benefício-custo		
		Acreção	Erosão	5 anos	10 anos	20 anos
<i>iv.1</i>	$P = 1.5$ km	18 079	408 178	-0.65	-1.09	-0.82
<i>iv.2</i>	$P = 2.0$ km	20 264	420 936	-0.20	0.01	1.20
<i>CB</i>	$P = 2.5$ km	24 435	431 932	0.65	1.51	3.31
<i>iv.3</i>	$P = 3.0$ km	30 406	442 447	0.26	0.85	2.18
<i>iv.4</i>	$P = 3.5$ km	37 796	454 131	0.10	0.47	1.45

Como conclusão, constata-se que a localização economicamente mais vantajosa corresponde ao cenário base, onde o esporão é considerado no limite sul da zona urbanizada. No entanto, fisicamente esta não é a solução com mais vantagens, uma vez que a área total de erosão ao fim dos 20 anos de simulação aumenta com o aumento da distância do esporão à fronteira norte. Se o critério de decisão passar por evitar perdas de território, a localização da estrutura deve ser o mais a norte possível (apesar das áreas de acreção serem inferiores e, consequentemente, representarem menor proteção da zona urbanizada). Na impossibilidade de implantação do esporão imediatamente a sul da zona que se pretende proteger, a solução não será economicamente tão eficaz, pelo que deverá ser avaliada a conjugação com outras obras (um outro esporão, exemplo na secção 6.2.5, ou conjugação de um esporão com uma estrutura longitudinal aderente, caso semelhante ao analisado na secção 6.3.3).

6.2.5. Campo de esporões

A melhor solução para mitigação da erosão costeira em determinados locais pode passar pela implantação de soluções conjuntas de obras de defesa costeira, das quais são exemplos os campos de esporões. Este é um tipo de solução que o utilizador da COAST pode considerar para avaliação do desempenho em comparação com uma solução individual, uma vez que o acréscimo de custo com uma obra suplementar pode ser compensado pelos ganhos de território consequentes, sendo por isso adequado proceder a uma análise custo-benefício de

ambas as soluções. Assim, nesta secção são considerados três cenários de soluções conjuntas de esporões. No cenário *v.1*, ao esporão do cenário base é acrescentado um esporão de iguais características, localizado 500 metros a norte deste. O cenário *v.2* considera igualmente um esporão além do considerado no cenário base, mas localizado a 1 000 metros deste (a 1.5 km da fronteira norte). Por fim, o cenário *v.3* traduz a solução conjunta de três esporões, conjugando as localizações dos dois cenários anteriores. O número de esporões considerado em cada cenário, além de influenciar a evolução da linha de costa ao longo do tempo, tem uma influência direta no volume de material utilizado em obras, e consequentemente, nos custos de construção e manutenção ao longo do tempo (Tabela 6.11).

Tabela 6.11: Volume de material e custo de construção associado a cada cenário, tendo em conta o número de esporões considerado.

		Volume (m ³)	Custo total (€)
<i>CB</i>	1 esporão	58 357	1 462 293
<i>v.1 e v.2</i>	2 esporões	116 715	2 924 586
<i>v.3</i>	3 esporões	175 072	4 386 879

Analisando os resultados obtidos para a evolução da linha de costa ao longo do tempo em cada um dos três cenários (Tabela 6.12), verificam-se maiores áreas de acreção e de erosão para as soluções compostas. No caso do conjunto dos dois esporões espaçados de 500 metros, verifica-se um resultado físico pior do que no cenário base, no entanto, para os cenários *v.2* e *v.3* o balanço físico é menos negativo (cerca de 1 ha de diferença). A solução composta pelo conjunto dos três esporões é a que resulta em menor perda de território ao fim de 20 anos de simulação, representando um balanço físico negativo de cerca de 3.3 ha.

Tabela 6.12: Balanço físico e económico da influência do número de esporões.

		Área total ao fim de 20 anos		Rácio benefício-custo		
		Acreção	Erosão	5 anos	10 anos	20 anos
<i>CB</i>	1 esporão	24 435	431 932	0.65	1.51	3.31
<i>v.1</i>	2 esporões espaçados 500 m	38 066	446 802	0.32	0.87	2.01
<i>v.2</i>	2 esporões espaçados 1000 m	36 084	435 472	0.18	0.63	1.79
<i>v.3</i>	3 esporões espaçados 500 m	34 478	432 924	0.16	0.47	1.24

No que diz respeito ao balanço económico, apesar das maiores áreas de acreção estarem associadas aos cenários com soluções compostas, a solução com maior índice *RBC* corresponde ao cenário base. O cenário que apresenta piores resultados económicos corresponde à solução composta por três esporões, o que permite concluir que, neste caso, o acréscimo de investimento associado à construção e manutenção das três estruturas, apesar de ser rentabilizado aproximadamente após 17 anos de simulação, não apresenta vantagens económicas tão competitivas como a solução do cenário base.

Conclui-se que, nas condições definidas, a solução conjunta de vários esporões (dois ou três) não é economicamente competitiva, uma vez que o balanço físico positivo que eventualmente pode advir em consequência de maiores áreas de acreção dos campos de esporões, não é compensado pelo aumento do custo associado à construção e manutenção das estruturas, apesar de todos os cenários analisados serem economicamente vantajosos ao fim dos 20 anos de simulação. Apesar disso, a intervenção relativa à construção de um campo de três esporões é o cenário que corresponde a menores perdas de território.

6.2.6. Valor do território

O valor atribuído ao território é um fator determinante para a avaliação económica da solução, isto porque, a eficácia da mesma solução de intervenção costeira, com o mesmo comportamento físico (evolução da linha de costa ao longo do tempo) depende do valor atribuído a cada zona de território do domínio de cálculo. Assim, foram considerados três cenários com diferentes valores monetários atribuídos ao território, de forma a avaliar a respetiva influência nos resultados. Uma vez que a intervenção de defesa costeira visa principalmente a proteção da zona urbanizada do território, nos primeiros dois cenários fez-se variar o valor atribuído à zona urbanizada, com o objetivo de perceber para que gama de valores a intervenção pode compensar. Assim, considerou-se no cenário *vi.1* um valor de 60 €/m²/ano (valor 6 vezes superior ao cenário base) e no cenário *vi.2*, optou-se por um valor abaixo do considerado no cenário base, 3 €/m²/ano. Para o terceiro cenário, *vi.3*, considerou-se o mesmo valor monetário para toda a extensão do domínio de cálculo (2 €/m²/ano).

Os resultados da Tabela 6.13 mostram que, mantendo constantes os valores de território atribuídos à zona 1 e à zona 3, a solução de implantação de um esporão para mitigação do

problema da erosão costeira apenas é vantajosa no caso do valor da zona urbanizada ser superior a 3 €/m²/ano e que o ponto de equilíbrio é atingido tanto mais rápido quanto maior o valor atribuído (para o cenário *vi.1*, a intervenção é vantajosa logo a partir do 2º ano de simulação). No caso de todo o território possuir o mesmo valor monetário (cenário *vi.3*) verifica-se que os benefícios positivos não ultrapassam os benefícios negativos ao longo dos 20 anos de simulação. Este facto sucede porque nas condições simuladas, o esporão agrava a área de erosão na globalidade do domínio de cálculo.

Tabela 6.13: Balanço económico da influência do valor do território nos cenários do esporão.

		Rácio benefício-custo		
		5 anos	10 anos	20 anos
<i>CB</i>	2 €/m ² /ano- zona de dunas	0.65	1.51	3.31
	10 €/m ² /ano- zona urbanizada			
	0.20 €/m ² /ano- zona de floresta			
<i>vi.1</i>	60 €/m ² /ano (zona urbanizada)	3.98	9.05	19.73
<i>vi.2</i>	3 €/m ² /ano (zona urbanizada)	0.19	0.46	1.01
<i>vi.3</i>	2 €/m ² /ano (domínio de cálculo)	-0.57	-0.97	-1.44

O valor do território é um fator determinante na eficácia económica das soluções, sendo que a implementação do esporão só é considerada vantajosa no caso do território apresentar valores distintos ao longo do domínio de cálculo. O *VAL* e o *RBC* ao fim de 20 anos são tanto maiores quanto mais valioso o território a proteger pelo esporão.

6.2.7. Taxa de desconto ou atualização

Nas situações em que os custos e os benefícios de uma solução são quantificados em termos económicos ao longo do tempo, como é o caso da metodologia implementada no módulo de custo-benefício da COAST, é necessário atualizar o valor desses custos e benefícios para o presente (ano de referência), de forma a ser possível a realização de comparações. Deste modo, a necessidade de atualizar os custos e os benefícios distribuídos num longo período de tempo, tornam o desempenho das opções e os resultados da avaliação sensíveis à seleção do valor mais adequado para a taxa de desconto ou atualização (*r*). Assim, foram aplicadas à análise custo-benefício do cenário base (*r* = 3%) três valores distintos para a taxa de

desconto (0%, 1.5% e 4.5%), com vista a avaliar a influência da incerteza da escolha do valor, nos resultados obtidos para os índices *RBC*.

A Tabela 6.14 resume os balanços económicos obtidos para os três cenários e permite concluir que, apesar da influência da taxa de desconto no índice *RBC* ser pouco significativa, verifica-se que a eficácia económica da solução é tanto maior quanto menor for o valor de *r* associado. No cenário testado, o acréscimo no valor de *RBC* ao fim do tempo de análise, correspondente a uma redução da taxa de desconto de 1.5%, é de cerca de 10%.

Tabela 6.14: Balanço económico da influência da taxa de desconto nos cenários do esporão.

		Rácio benefício-custo		
		5 anos	10 anos	20 anos
<i>vii.1</i>	$r = 0\%$	0.70	1.68	3.94
<i>vii.2</i>	$r = 1.5\%$	0.68	1.60	3.62
<i>CB</i>	$r = 3\%$	0.65	1.51	3.31
<i>vii.3</i>	$r = 4.5\%$	0.63	1.43	3.02

6.2.8. Síntese

Com base no cenário de referência (secção 6.1) e na perspetiva de mitigação do problema de erosão costeira e proteção da zona urbanizada em risco, foi proposta, na secção 6.2, uma solução de intervenção baseada na implementação de um esporão de 200 metros de comprimento, definido como cenário base (Figura 6.3). Aplicados os três módulos da ferramenta COAST ao cenário base do esporão, obtiveram-se resultados para avaliação do desempenho físico e económico da solução. Os resultados mostram um balanço físico negativo na ordem dos 4 ha, o que significa que a implementação do esporão, apesar de proteger a zona urbanizada em risco, resulta em áreas totais de erosão superiores às identificadas no cenário de referência, ao fim de 20 anos de simulação. No entanto, os resultados da análise custo-benefício da implementação do esporão revelam uma solução economicamente vantajosa decorridos 7 anos de simulação.

Com o objetivo de perceber o impacto da alteração das diferentes características que definem o cenário base do esporão, com recurso à ferramenta COAST, foi avaliada a incerteza

associada à definição da agitação marítima, da batimetria do domínio de cálculo, do comprimento e da localização do esporão, do efeito da conjugação de vários esporões, do valor do território e da taxa de desconto, no comportamento físico e económico das soluções de intervenção de defesa costeira.

A Tabela 6.15 resume os resultados físicos e económicos obtidos para os diferentes cenários estudados: o balanço físico associado ao cenário, isto é, a área de território ganha ou perdida relativamente ao cenário de referência (positivo no primeiro caso e negativo no segundo); o valor atual líquido que resulta da solução ao fim dos 20 anos de simulação; os custos de investimento, iniciais e totais (atualizados para o ano 0); e o número de anos necessário para que, com a solução proposta, seja atingido o equilíbrio económico entre custos e benefícios.

Uma vez que o objetivo principal da análise dos diferentes cenários desta secção não passou pela identificação da melhor solução de esporão a implementar no cenário de referência, mas sim por, simultaneamente, evidenciar as potencialidades da ferramenta numérica COAST e avaliar o impacto das incertezas associadas às diferentes características que definem o esporão, os resultados da Tabela 6.15 não devolvem a solução ótima de intervenção. No entanto, definido o objetivo da intervenção (físico, económico ou a conciliação de ambos), para as condições de agitação marítima, batimetria, valor de território e taxa de desconto definidas no cenário base, é possível uma noção aproximada do comprimento ótimo, localização ideal e número de estruturas recomendado (com a ressalva de que não foram testadas as combinações entre a melhor solução de cada grupo de cenários).

A Tabela 6.15 permite identificar quais os cenários que devolvem melhores índices físicos e económicos, evidenciando que: o cenário com o clima de agitação caracterizado pela onda de $H_0 = 4$ m resulta no maior balanço positivo de áreas (tendo a maioria dos cenários resultado num balanço negativo); a solução com um investimento inicial mais atrativo corresponde ao esporão de menor comprimento (100 metros); o maior valor atual líquido ao fim dos 20 anos de simulação foi obtido quando considerado o maior valor de território da zona urbanizada (60 €/m²/ano), que resulta simultaneamente no menor horizonte temporal para que seja atingido o tempo de equilíbrio (2 anos). A Tabela 6.15 também permite concluir que, não é possível a conciliação, na mesma solução, dos melhores resultados tendo

em conta ambos os fatores (físico e económico), sendo por isso fundamental definir quais os principais objetivos da intervenção.

Tabela 6.15: Resumo do balanço físico e económico dos cenários do esporão.

Cenário Base	CB	Figura 6.3	Balanço (m ²)	VAL _{20 anos} (€)	Investimento		Break-even*
					Inicial (€)	Total (0€)	
			-42 040	8 316 103	1 462 293	3 602 359	7° ano
Agitação marítima	<i>i.1</i>	$H_0 = 3$ m	10 546	11 824 415	1 462 293	3 602 359	6° ano
	<i>i.2</i>	$H_0 = 4$ m	120 515	18 087 486			8° ano
Batimetria	<i>ii.1</i>	$m = 4/5$	-53 856	19 176 234	2 192 100	6 169 524	6° ano
	<i>ii.2</i>	$m = 1/2$	117	-2 918 759	1 219 927	2 928 553	- ano
Comprimento	<i>iii.1</i>	$L = 100$ m	-14 173	1 263 061	975 627	2 615 491	15° ano
	<i>iii.2</i>	$L = 300$ m	-33 930	11 612 679	2 291 617	5 925 785	9° ano
	<i>iii.3</i>	$L = 400$ m	-30 849	9 150 555	3 263 128	8 670 313	11° ano
Localização	<i>iv.1</i>	$P = 1.5$ km	-24 641	-6 556 228	1 462 293	3 602 359	- ano
	<i>iv.2</i>	$P = 2.0$ km	-35 214	714 226			19° ano
	<i>iv.3</i>	$P = 3.0$ km	-46 583	4 259 681			11° ano
	<i>iv.4</i>	$P = 3.5$ km	-50 878	1 624 686			16° ano
Campos de esporões	<i>v.1</i>	2 esporões espaçados 500 m	-43 278	7 291 156	2 924 586	7 204 718	11° ano
	<i>v.2</i>	2 esporões espaçados 1000 m	-33 930	5 678 216			13° ano
	<i>v.3</i>	3 esporões espaçados 500 m	-32 988	2 560 639			4 386 879
Valor do território	<i>vi.1</i>	60 €/m ² /ano (zona urbanizada)		67 460 549			2° ano
	<i>vi.2</i>	3 €/m ² /ano (zona urbanizada)	-42 040	35 880	1 462 293	3 602 359	19° ano
	<i>vi.3</i>	2 €/m ² /ano (domínio de cálculo)		-8 789 333			- ano
Taxa de desconto ou atualização	<i>vii.1</i>	$r = 0\%$		13 054 863			7° ano
	<i>vii.2</i>	$r = 1.5\%$	-42 040	10 405 302	1 462 293	3 602 359	7° ano
	<i>vii.3</i>	$r = 4.5\%$		6 657 393			7° ano

* Representa o ponto de equilíbrio do investimento, isto é, o momento em que o total de benefícios iguala o total de custos da análise ($VAL = 0$ e $RBC = 1$). Considera-se que após este momento a realização da intervenção é economicamente vantajosa.

Apesar da implementação do esporão induzir, na maioria dos cenários, maiores perdas de território ao fim dos 20 anos de análise, a solução também evita perdas económicas, significativas nalguns casos. Olhando aos resultados obtidos para o VAL dos cenários

resumidos na Tabela 6.15, e tendo por base o valor monetário perdido no cenário de referência (cerca de 12 milhões de euros), correspondente à evolução natural da posição da linha de costa sem qualquer intervenção, constata-se que, com a implementação do cenário base do esporão, ao fim dos 20 anos de simulação, se evitam perdas económicas na ordem dos 8 milhões de euros.

Para o clima de agitação e condições batimétricas do cenário base, apenas dois dos cenários analisados resultam em ganhos monetários ao fim de 20 anos (cerca de 1 milhão e de 55 milhões de euros, respetivamente, no cenário onde é considerada uma taxa de desconto de 0% e no cenário onde é atribuído à zona urbanizada um valor de 60 €/m²/ano). Note-se mais uma vez que, na estimativa do valor económico atribuído ao território, devem estar contemplados, simultaneamente, fatores ambientais, sociais, culturais, entre outros.

Perante a análise desenvolvida, para a procura da melhor solução de intervenção devem ser conjugados cenários, tendo em conta a perceção adquirida com a influência que a variação das características do esporão tem nos resultados (campos de esporões de comprimentos diferentes, diferentes localizações e espaçamentos entre esporões, etc.).

6.3. Estruturas longitudinais aderentes

Estruturas longitudinais aderentes são obras artificiais de defesa costeira, construídas paralelamente à linha de costa, em geral ao longo da face de um cordão dunar ou do talude inclinado de uma praia, e pretendem fixar o limite da praia em zonas não protegidas adequadamente por praia natural. As estruturas longitudinais aderentes podem desempenhar três funções distintas: resistir à ação das ondas, funcionar como muros de suporte ou evitar galgamentos (Castanho, 1962). São soluções consideradas geralmente em zonas costeiras de grande vulnerabilidade e exposição à erosão e à ação marítima, cujos riscos de ocorrência de danos em edificações e infraestruturas são elevados (Cruz, 2015).

De acordo com Castanho (1962), o comprimento deste tipo de obras deve estar de acordo com o comprimento da zona que se pretende proteger, uma vez que apenas protegem as zonas situadas no tardoz. A altura da estrutura deve ser o maior possível, de modo a evitar galgamentos, visto que estes, para além de colocarem em risco as zonas protegidas, podem

criar assentamentos e a instabilidade da estrutura. No entanto, muitas vezes não é possível optar por estruturas que acompanhem toda a zona de risco e que tenham altura suficiente para evitar galgamentos e inundações ao longo do tempo, tornando-se por isso fundamental a realização de análises custo-benefício que auxiliem a escolha das soluções economicamente mais vantajosas e que resultem em menores perdas de território.

Nesta secção foi definido um cenário base (CB), Figura 6.7, correspondente a uma solução de intervenção de defesa costeira com estrutura longitudinal aderente, com vista à mitigação do problema de erosão costeira identificado no cenário de referência (secção 6.1). Foram admitidas as características de simulação do cenário de referência e considerada a implantação de uma estrutura longitudinal aderente que abrangesse toda a extensão da zona urbanizada do território (1 500 m), com a cota de coroamento aos 6 metros. Com vista à obtenção dos índices físicos e económicos que caracterizam esta solução, foi aplicada a ferramenta COAST.

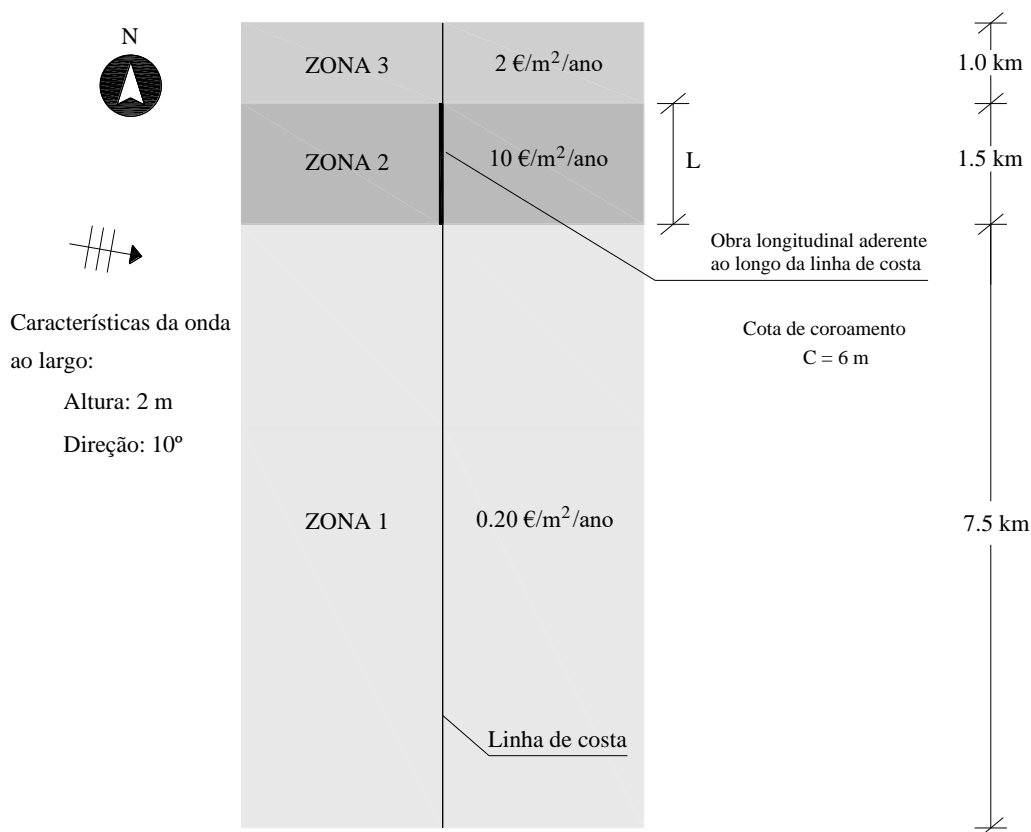


Figura 6.7: Esquematização do cenário base da estrutura longitudinal aderente.

Os resultados obtidos com o módulo de evolução da linha de costa, considerando um horizonte temporal de 20 anos, demonstram, globalmente, uma menor perda de território relativamente ao cenário de referência e, simultaneamente, a proteção da zona urbanizada (Figura 6.8). Com a solução da estrutura longitudinal aderente, o recuo da posição a linha de costa junto à fronteira norte ao longo do tempo é inferior ao valor observado no cenário de referência (e aproximadamente semelhante ao verificado com o cenário base do esporão). Fisicamente esta solução revela-se eficaz, mas interessa definir a secção transversal associada à estrutura, para efetuar a correspondente análise custo-benefício.

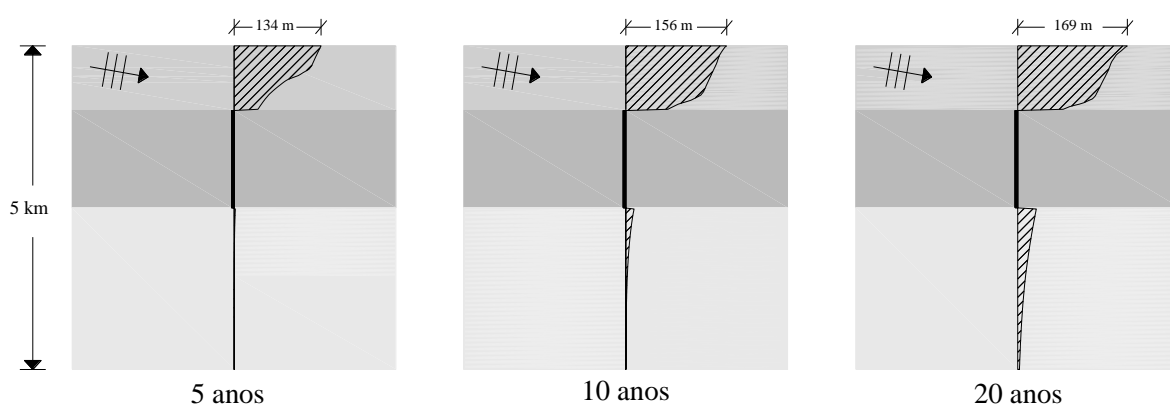


Figura 6.8: Posição da linha de costa no cenário base da estrutura longitudinal aderente, ao longo do tempo (escala horizontal 10 vezes superior à escala vertical).

Com recurso ao módulo de pré-dimensionamento foi definida a secção transversal da estrutura (com características semelhantes à secção correspondente ao cenário base do esporão). A Figura 6.9 resume as características da secção transversal (constantes ao longo de toda a extensão) e o volume de material correspondente a cada uma das camadas que constituem a estrutura (volume global da estrutura de cerca de 132 000 m³).

No que diz respeito aos custos, foi estimado um custo total inerente à construção da estrutura longitudinal aderente de cerca de 2 milhões de euros (englobando custos diretos e indiretos). Considerou-se um custo para cada operação de manutenção da estrutura igual a 30% do custo de primeiro investimento (cerca de 600 mil euros), necessário de 5 em 5 anos. Foi admitido, de forma hipotética, que não ocorrem galgamentos nem inundações ao longo dos 20 anos de simulação.

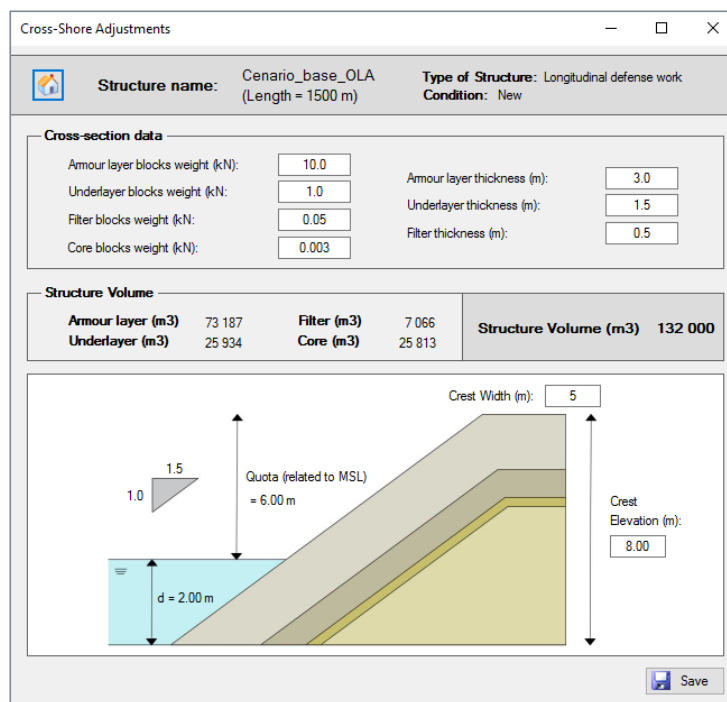


Figura 6.9: Secção transversal da estrutura longitudinal aderente do cenário base (módulo de pré-dimensionamento).

Considerando os valores definidos para o território no cenário de referência e o custo necessário à construção e manutenção da estrutura longitudinal aderente ao longo dos 20 anos de análise, foi aplicado o módulo de custo-benefício da COAST (em relação ao cenário de referência) de forma a analisar economicamente a solução (Figura 6.10).

A análise global dos resultados obtidos com a COAST para o cenário base da estrutura longitudinal aderente mostra que, além de física, esta solução também é economicamente vantajosa. O cenário de referência resulta num total de erosão ao fim de 20 anos de cerca de 37 ha, 15 dos quais ocorrem na zona urbanizada, o que se traduz em perdas económicas avultadas. Com esta solução de intervenção de defesa costeira é garantida a proteção total da zona urbanizada ao longo dos 20 anos de simulação e em relação ao cenário de referência são evitadas perdas de território na ordem dos 20 ha. Economicamente, a solução de implantação da estrutura longitudinal aderente torna-se vantajosa após cerca de 13 anos de simulação ($VAL > 0$ e $RBC > 1$). Os índices físicos e económicos resultantes da implantação da estrutura longitudinal aderente do cenário base, ao qual corresponde um investimento total na ordem dos 4 milhões de euros (valores atualizados para o ano 0), resumem-se na Tabela 6.16.

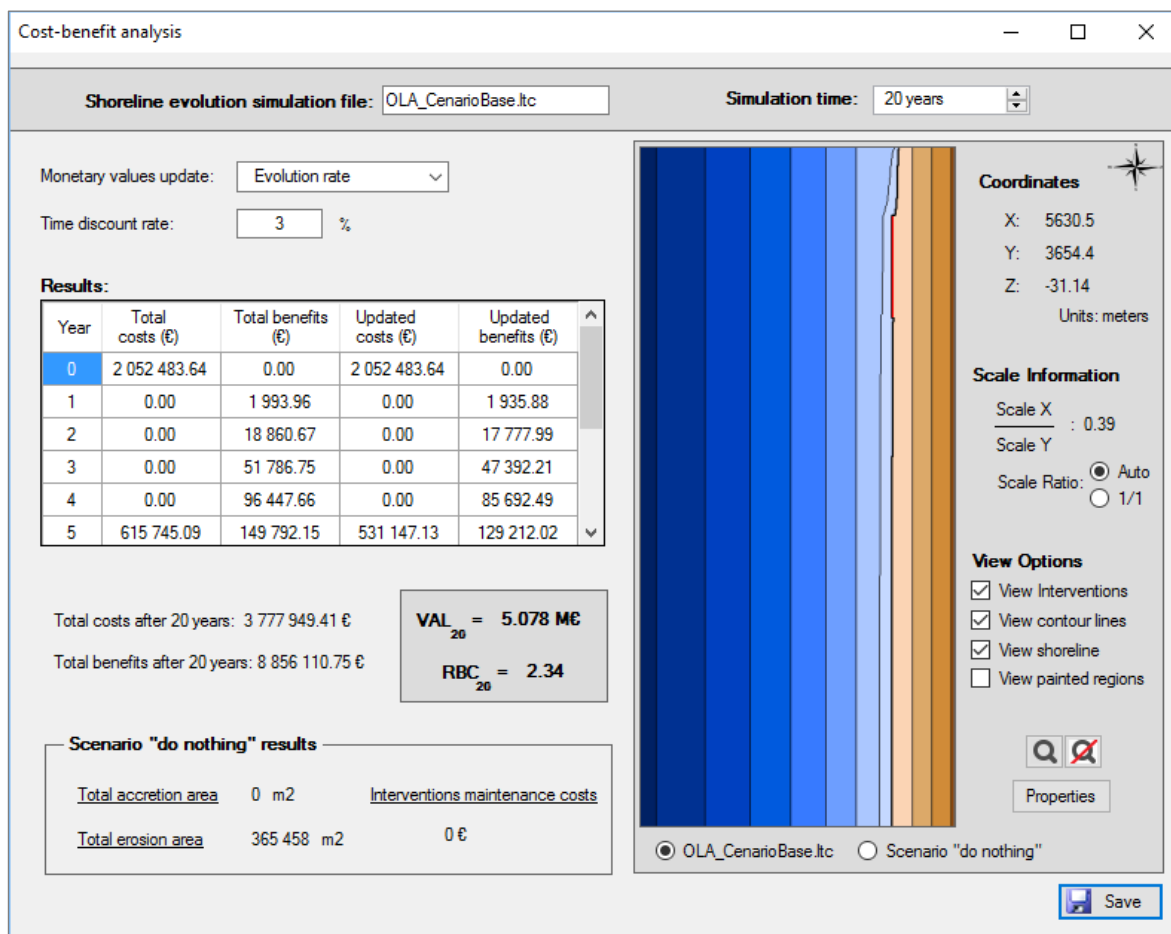


Figura 6.10: Resultados do módulo de custo-benefício, para o cenário base da estrutura longitudinal aderente.

Tabela 6.16: Balanço físico e económico do cenário base da estrutura longitudinal aderente.

	Área total ao fim de 20 anos		Rácio benefício-custo		
	Acreção	Erosão	5 anos	10 anos	20 anos
Cenário base (CB)	0	166 093	0.11	0.57	2.34

Após a análise da solução de base da estrutura longitudinal aderente, foi avaliada a influência da variação do comprimento e da altura da estrutura e do efeito da sua combinação com o esporão definido no cenário base da secção 6.2 (Tabela 6.17), cujos resultados se apresentam nas subsecções seguintes.

Tabela 6.17: Definição dos cenários com estrutura longitudinal aderente, testados com a ferramenta COAST.

		1	2	3
Comprimento	<i>i</i>	$L = 500$ m	$L = 1\,000$ m	-
Cota de coroamento	<i>ii</i>	$C = 5$ m	$C = 4$ m	-
Estrutura aderente a sul do esporão	<i>iii</i>	500 m	1 000 m	1 500 m

6.3.1. Comprimento

O comprimento de uma estrutura longitudinal aderente deve corresponder à extensão da zona que se pretende proteger. No entanto, muitas vezes, por restrições orçamentais (por exemplo), pode não ser viável essa solução, optando-se por comprimentos mais reduzidos. Foram testados dois comprimentos para comparação dos resultados com o cenário base da estrutura longitudinal aderente: cenário *i.1*, com uma estrutura de 500 metros de comprimento; e cenário *i.2*, com 1000 metros (ambas adjacentes ao limite sul da zona urbanizada). Uma vez que o comprimento das obras influencia o volume de material necessário e, conseqüentemente, os custos de construção e manutenção que lhes estão inerentes, foi aplicado o módulo de pré-dimensionamento e o módulo de custo-benefício aos dois cenários, resultando nos valores da Tabela 6.18.

Tabela 6.18: Volume e custo de construção da estrutura longitudinal aderente, considerando diferentes comprimentos.

		Volume (m ³)	Custo total (€)
<i>i.1</i>	$L = 500$ m	44 000	684 161
<i>ii.1</i>	$L = 1\,000$ m	88 000	1 368 322
<i>CB</i>	$L = 1\,500$ m	132 000	2 052 484

A evolução da linha de costa ao longo do tempo apresenta um comportamento semelhante nos três cenários, mas, quanto menor a extensão da estrutura longitudinal aderente, maior é a área de erosão. Nos três cenários registam-se ganhos de área em relação ao cenário de referência (Tabela 6.19). Qualquer dos cenários é economicamente vantajoso nos 20 anos de simulação, mas o que apresenta melhores índices de *RBC* é a solução correspondente ao

cenário base. Quanto menor a extensão da obra, mais tempo se demora a atingir o equilíbrio entre os custos e os benefícios, e menos vantajosa será a solução (o cenário *i.1* apenas se torna economicamente vantajoso passados 19 anos de simulação).

Tabela 6.19: Balanço físico e económico da influência do comprimento da estrutura longitudinal aderente.

		Área total ao fim de 20 anos		Rácio benefício-custo		
		Acreção	Erosão	5 anos	10 anos	20 anos
<i>i.1</i>	<i>L</i> = 500 m	0	327 275	0.03	0.20	1.15
<i>ii.1</i>	<i>L</i> = 1 000 m	0	254 485	0.05	0.32	1.77
<i>CB</i>	<i>L</i> = 1 500 m	0	166 093	0.11	0.57	2.34

6.3.2. Cota de coroamento

As estruturas longitudinais aderentes têm em geral custos de manutenção e reabilitação avultados, que muitas vezes são menosprezados e de difícil quantificação e que aumentam em consequência da ocorrência de galgamentos. Associados a estes custos de intervenção na própria estrutura, os custos nas zonas adjacentes devido a eventos de galgamentos e à consequente limpeza das vias, podem tornar-se significativos. Assim, analisa-se agora o balanço económico entre a redução de custos associada à diminuição da cota da estrutura, em contrapartida com o aumento de custos anuais decorrentes dos danos associados a eventuais galgamentos e consequentes inundações e necessidade de limpeza de vias.

Para a análise foram definidos dois cenários complementares ao cenário base: cenário *ii.1*, onde se considera uma cota de coroamento de 5 metros e um custo anual devido aos galgamentos ocorridos de cerca de 120 mil euros (15 mil euros devido à limpeza da via pública e reparação de infraestruturas e 105 mil euros consequentes de danos em bens privados e edificado); e o cenário *ii.2*, onde a cota de coroamento da estrutura atinge apenas os 4 metros e se considera, hipoteticamente, o dobro da frequência de galgamentos do que ocorre no cenário *ii.1* e, consequentemente, o dobro dos custos anuais associados (240 mil euros). A Tabela 6.20 mostra a redução do volume da estrutura longitudinal aderente e a redução de custos associados a um abaixamento da cota de coroamento da estrutura.

Tabela 6.20: Volume e custo de construção da estrutura longitudinal aderente, considerando diferentes cotas de coroamento.

		Volume (m ³)	Custo total (€)
<i>CB</i>	<i>C = 6 m</i>	132 000	2 052 484
<i>ii.1</i>	<i>C = 5 m</i>	107 625	1 761 598
<i>ii.2</i>	<i>C = 4 m</i>	85 500	1 481 963

A redução da cota de coroamento da estrutura não provoca alterações na evolução da linha de costa mantendo-se, para todos os cenários, um balanço positivo de áreas, por comparação com o cenário de referência (17 ha de área de erosão ao fim de 20 anos de simulação, em vez dos 37 ha perdidos no cenário de referência). Apesar dos três cenários resultarem em valores económicos positivos após os 20 anos de simulação, o valor de *RBC* ao longo do tempo diminui com a diminuição da cota de coroamento da estrutura (Tabela 6.21).

Tabela 6.21: Balanço físico e económico da influência da cota de coroamento da estrutura longitudinal aderente.

		Rácio benefício-custo		
		5 anos	10 anos	20 anos
<i>CB</i>	<i>C = 6 m</i>	0.11	0.57	2.34
<i>ii.1</i>	<i>C = 5 m</i>	0.10	0.48	1.76
<i>ii.2</i>	<i>C = 4 m</i>	0.10	0.41	1.41

Os valores obtidos com a análise da influência da variação da cota da estrutura permitem concluir que, para as condições hipotéticas definidas, o valor anual de danos consequentes dos episódios de galgamentos não compensa monetariamente a redução de custos associados à diminuição da cota da estrutura. No entanto, existem impactos sociais decorrentes da implantação de estruturas com coroamentos elevados junto às zonas marginais, uma vez que retiram visibilidade e tornam os locais menos procurados. É importante que, em contexto real, estas questões (sociais, turísticas, recreativas, etc.) sejam avaliadas e contabilizadas em termos económicos.

6.3.3. Estrutura aderente a sul do esporão

A melhor solução de intervenção para mitigação da erosão costeira pode passar pela conjugação de vários tipos de obra, como esporões e estruturas longitudinais aderentes. Tendo em conta que a implantação de um esporão pode desencadear erosão a sotamar das estruturas, a consideração de estruturas longitudinais aderentes localizadas a sotamar dos esporões pode potenciar soluções de intervenção vantajosas, do ponto de vista físico e económico.

Apesar da zona localizada a sotamar do esporão de base (secção 6.2) corresponder a uma zona pouco valiosa, esta zona foi protegida por uma estrutura aderente no cenário considerado para demonstrar a aplicação da ferramenta COAST a soluções conjuntas de vários tipos de obra. Para a estrutura longitudinal aderente, com limite norte localizado imediatamente a sotamar do esporão, foram considerados três comprimentos distintos: 500 m (cenário *iii.1*), 1 000 m (cenário *iii.2*) e 1 500 m (cenário *iii.3*). A Tabela 6.22 permite comparar o volume de material e o custo total dos cenários de obras conjuntas com o cenário base correspondente à estrutura longitudinal aderente isolada.

Tabela 6.22: Volume e custo de construção da solução conjunta de esporão com estrutura longitudinal aderente.

		Volume total (m ³)	Custo total (€)
<i>CB</i>	<i>L</i> = 1500 m	132 000	2 052 484
<i>iii.1</i>	Esporão e <i>L</i> = 500 m (sul)	102 357	2 146 454
<i>iii.2</i>	Esporão e <i>L</i> = 1 000 m (sul)	146 357	2 830 615
<i>iii.3</i>	Esporão e <i>L</i> = 1 500 m (sul)	190 357	3 514 777

A consideração de uma solução que conjuga uma estrutura longitudinal aderente com um esporão resulta numa redução considerável de território perdido ao longo dos 20 anos de simulação. As perdas de território evitadas são tanto maiores quanto maior a extensão da estrutura longitudinal aderente e representam cerca de 18 ha para o comprimento maior (1 500 m), em contrapartida com o balanço negativo de cerca de 4 ha associado à solução do esporão isolado. No entanto, as áreas de erosão dos três cenários que conjugam obras são superiores à do cenário base da estrutura aderente e não são compensadas pela acreção

verificada a barlamar do esporão, resultando num balanço de áreas que, apesar de positivo (comparativamente ao cenário de referência), é inferior. Verifica-se assim que, do ponto de vista físico, a solução conjunta de esporão com estrutura longitudinal aderente localizada a sotamar não apresenta vantagens em relação à consideração da estrutura aderente de forma isolada na extensão da frente urbana, qualquer que seja o comprimento da estrutura aderente (Tabela 6.23).

Tabela 6.23: Balanço físico e económico da influência da conjugação entre um esporão e estrutura longitudinal aderente.

		Área total ao fim de 20 anos		Rácio benefício-custo		
		Acreção	Erosão	5 anos	10 anos	20 anos
<i>CB</i>	<i>L</i> = 1500 m	0	166 093	0.11	0.57	2.34
<i>iii.1</i>	Esporão e <i>L</i> = 500 m (sul)		245 922	0.47	1.13	2.51
<i>iii.2</i>	Esporão e <i>L</i> = 1 000 m (sul)	24 435	224 739	0.37	0.89	2.00
<i>iii.3</i>	Esporão e <i>L</i> = 1 500 m (sul)		209 132	0.30	0.73	1.66

Em qualquer dos cenários é vantajoso intervir dentro dos 20 anos de simulação, mas o tempo necessário para que seja atingido o ponto de equilíbrio aumenta com o aumento do comprimento da estrutura longitudinal aderente e o valor de *VAL* e *RBC* diminui com o aumento do comprimento da estrutura longitudinal aderente (Tabela 6.23). Ao fim de 20 anos, os cenários *iii.1* e *iii.2* apresentam vantagem económica em relação ao cenário base da estrutura longitudinal aderente, apesar de, no cenário *iii.2* o valor de *RBC* ser inferior.

Pode concluir-se que, por comparação com o cenário base da estrutura longitudinal aderente, as soluções compostas não apresentam vantagens do ponto de vista físico, mas os cenários *iii.1* e *iii.2* revelam-se economicamente mais vantajosos. No entanto, estes dois cenários implicam custos superiores de investimento e manutenção ao longo dos 20 anos de simulação, o que, devido às restrições financeiras muitas vezes impostas, pode ser um entrave à sua implementação.

6.3.4. Síntese

Na secção 6.3 foram propostas soluções de intervenção baseadas em estruturas longitudinais aderentes, para mitigação do problema de erosão persistente identificado no cenário de

referência. Tendo em conta a informação recolhida (Castanho, 1962), as estruturas aderentes devem, quando possível, ter a extensão da zona a proteger, tendo sido por isso definido um cenário base composto por uma estrutura longitudinal aderente com 1500 metros de comprimento e com as características definidas na Figura 6.7. Através da aplicação da ferramenta COAST verificou-se que a medida apresenta vantagens tanto ao nível físico como económico. Além de promover a proteção da frente urbanizada em risco, através da fixação da linha de costa ao longo da sua extensão, a intervenção reduz perdas de território na ordem dos 20 ha ao fim de 20 anos, comparativamente ao cenário de referência.

Por implantação da estrutura longitudinal aderente, à qual corresponde um investimento inicial de cerca de 2 milhões de euros e um total de cerca de 3.8 milhões de euros para os 20 anos de simulação (valores atualizados ao ano 0), são evitadas perdas na ordem dos 5 milhões de euros decorrido o tempo de simulação (correspondente ao valor de *VAL*, Tabela 6.24). O valor dos custos iguala o valor de benefícios aproximadamente ao fim de 13 anos de simulação (*break-even*).

Tabela 6.24: Resumo do balanço físico e económico dos cenários da estrutura longitudinal aderente.

			Balanço (m ²)	VAL _{20 anos} (€)	Investimento		Break-even*
					Inicial (€)	Total (0€)	
Cenário Base	CB	Figura 6.7	199 365	5 078 161	2 052 484	3 777 949	13 ano
Comprimento	i.1	L = 500 m	38 183	188 168	684 161	1 259 317	19 ano
	i.2	L = 1 000 m	110 973	1 950 645	1 368 322	2 518 633	16 ano
Altura	ii.1	C = 5 m	199 365	3 828 289	1 761 598	5 027 822	14 ano
	ii.2	C = 4 m	199 365	2 557 708	1 481 963	6 298 402	16 ano
Conjugação com esporão	iii.1	Esporão e L = 500 m (sul)	143 970	7 336 235	2 146 454	4 861 675	9 ano
	iii.2	Esporão e L = 1 000 m (sul)	165 153	6 123 709	2 830 615	6 120 992	11 ano
	iii.3	Esporão e L = 1 500 m (sul)	180 760	4 893 780	3 514 777	7 380 308	13 ano

* Representa o ponto de equilíbrio do investimento, isto é, o momento em que o total de benefícios iguala o total de custos da análise (*VAL* = 0 e *RBC* = 1). Considera-se que após este momento a realização da intervenção é economicamente vantajosa.

Ao longo da secção 6.3, foram definidos e analisados diferentes cenários, com o objetivo de avaliar o impacto de algumas das características da estrutura longitudinal aderente. A

variação do comprimento da estrutura permitiu concluir que considerar extensões inferiores ao cenário base resulta em índices físicos e económicos menos atraentes. Diminuir a cota de coroamento da estrutura, promove o aumento do número de galgamentos e, conseqüentemente, aumenta os custos de manutenção das estruturas e os custos devidos aos danos nas zonas afetadas, provocando valores atuais líquidos mais baixos ao fim de 20 anos. O desempenho económico da conjugação do esporão com estrutura longitudinal aderente varia consoante o comprimento da estrutura longitudinal aderente, sendo superior para comprimentos de 500 e 1000 metros e inferior para a estrutura aderente com 1500 metros (comparativamente ao cenário base). Fisicamente, a solução correspondente à estrutura aderente considerada isolada (cenário base) é a que promove maiores áreas de território ao fim dos 20 anos de simulação.

Como é possível constatar pelos resultados resumidos na Tabela 6.24, todos os cenários são economicamente vantajosos, e as soluções com melhor desempenho físico (cenário base), não correspondem às soluções economicamente mais atrativas (esporão de 200 metros, conjugado com estrutura aderente de 500 metros de extensão). Assim, constata-se que a escolha das características da intervenção varia em função dos objetivos pretendidos. No entanto, apesar das considerações adotadas nos cenários com estruturas longitudinais aderentes serem física e economicamente atraentes, importa ter em atenção os eventuais impactos sociais negativos muitas vezes associados à construção de estruturas longitudinais aderentes, como as perdas de areal em frente às obras, a redução de visibilidade desde as zonas marginais à obra, e, conseqüentemente, a perda do valor recreativo do litoral intervencionado.

6.4. Alimentações artificiais de praia

As alimentações artificiais de praia representam uma solução de intervenção de defesa costeira para mitigação do problema da erosão, que, segundo Teixeira (2011), tenta compatibilizar a ocupação humana com o recuo do litoral (em oposição às opções de não intervenção e às soluções de fixação da posição da linha de costa através de estruturas de defesa costeira), atuando de forma ligeira, e de acordo com a dinâmica do litoral. Segundo o mesmo autor, além da atenuação da erosão costeira, a alimentação artificial de praias fornece

o benefício suplementar de aumentar a capacidade de carga dos utentes do areal e, através da deriva litoral, reforçar ao longo do tempo as praias a sotamar.

Apesar das vantagens físicas que apresentam, uma vez que respondem de forma direta à principal causa da erosão costeira (falta de sedimentos na orla costeira), as alimentações artificiais têm custos significativos e são muitas vezes encaradas pela sociedade como soluções efémeras. Assim, é importante um planeamento eficaz das soluções de alimentação artificial de praias, uma vez que o seu desempenho depende de inúmeros fatores, como a extensão de deposição dos sedimentos, a localização da intervenção, a frequência com que são realizadas deposições, o volume de sedimentos depositado, etc.

A escolha dos sedimentos para realizar alimentações artificiais obriga ao conhecimento prévio das características dos sedimentos (ou da mancha de empréstimo, no caso de sedimentos dragados). Existe atualmente legislação (Portaria nº 1450/2007) que regula a qualidade química dos dragados e que define, consoante o grau de contaminação dos sedimentos, a classe em que se inserem (desde a classe 1 - material dragado limpo, à classe 5 - material muito contaminado). A mesma portaria refere que, por exemplo, nas recargas de praia e assoreamentos artificiais com vista à utilização balnear, apenas podem ser utilizados materiais da classe 1. Além da qualidade química dos sedimentos, importa também a análise da granulometria (devendo considerar-se manchas de empréstimo com granulometria igual ou superior à das praias que se pretende carregar, Teixeira, 2011). Além disso, fatores como a distância entre a praia e a origem dos sedimentos, local de deposição (zona emersa da praia ou imersa, apesar do algoritmo de evolução da linha de costa incorporado na COAST não simular o transporte transversal), meios de transporte e impactos económicos, sociais, culturais e ambientais, devem ser tidos em conta na escolha dos materiais.

Nesta secção foi proposto e analisado um cenário de alimentação artificial de praia (cenário base, *CB*, Figura 6.11) para mitigação do problema de erosão identificado no cenário de referência (secção 6.1). Com recurso à ferramenta COAST, foram depois testados diversos cenários de alimentação artificial de praia (Tabela 6.25). Para o cenário base da alimentação artificial foi considerada a deposição de 1 milhão de m³ de sedimentos, a cada 5 anos de simulação, a um ritmo médio de 10 mil m³ por dia. Foi adotada uma área de deposição com 500 metros de extensão, centrada com a zona urbanizada do domínio de cálculo (abrangendo

a totalidade da largura ativa do perfil transversal, aproximadamente 600 metros) e estimou-se um custo unitário de 2 €/m³ (Figura 6.11).

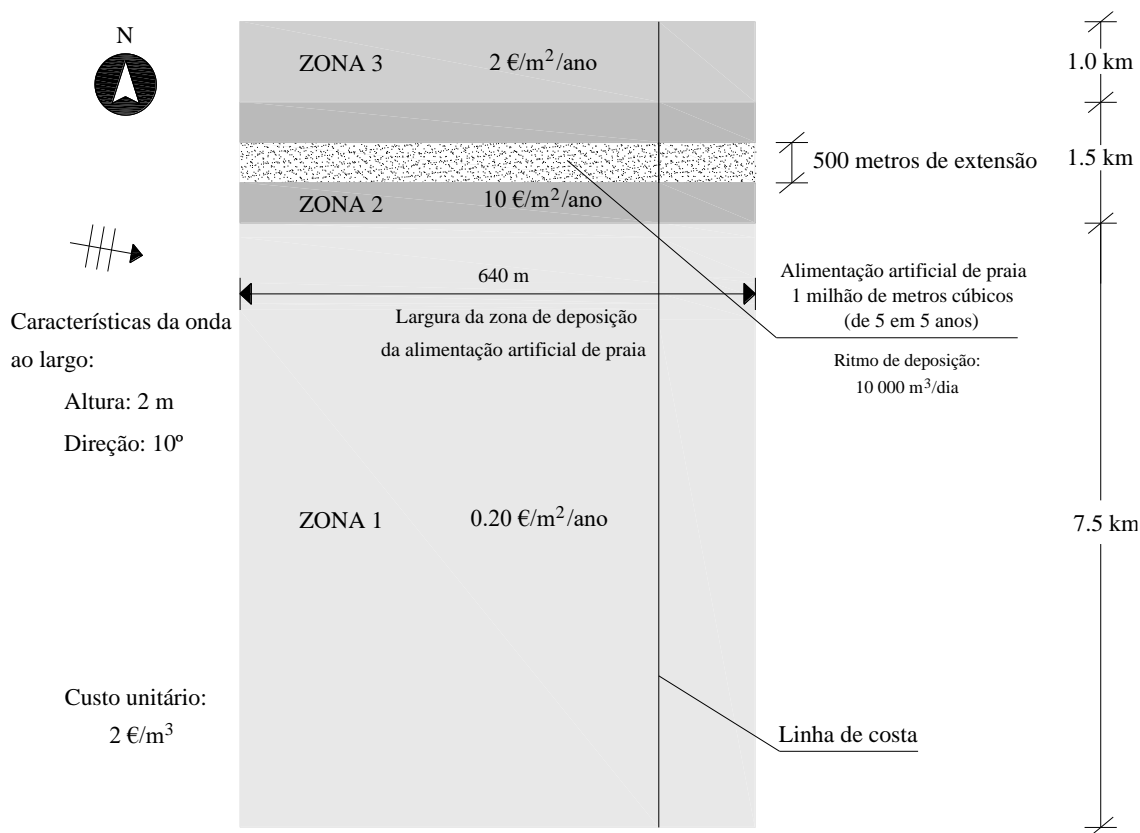


Figura 6.11: Esquemática do cenário base da alimentação artificial de praia.

Tabela 6.25: Definição dos cenários com alimentação artificial de praia, testados com a ferramenta COAST.

		1	2	3	4
Extensão	<i>i</i>	1 000 m (norte)	1 000 m (sul)	1 500 m	-
Localização	<i>ii</i>	500 m para norte	500 m para sul	-	-
Frequência	<i>iii</i>	400 mil m ³ de 2 em 2 anos	2 milhões de m ³ de 10 em 10 anos	-	-
Volume	<i>iv</i>	meio milhão de m ³	2 milhões de m ³	-	-
Custo unitário do material	<i>v</i>	0.5 €/m ³	1.0 €/m ³	4.0 €/m ³	6.0 €/m ³

Os resultados obtidos com o módulo de evolução da linha de costa para o cenário base demonstram que, apesar da erosão verificada junto à fronteira norte (Figura 6.12), as taxas de recuo são inferiores às obtidas com o cenário de referência. A deposição de sedimentos é

fisicamente vantajosa, mas não é garantida a proteção da totalidade da zona urbanizada, apesar da área perdida diminuir significativamente ao longo dos 20 anos de simulação.

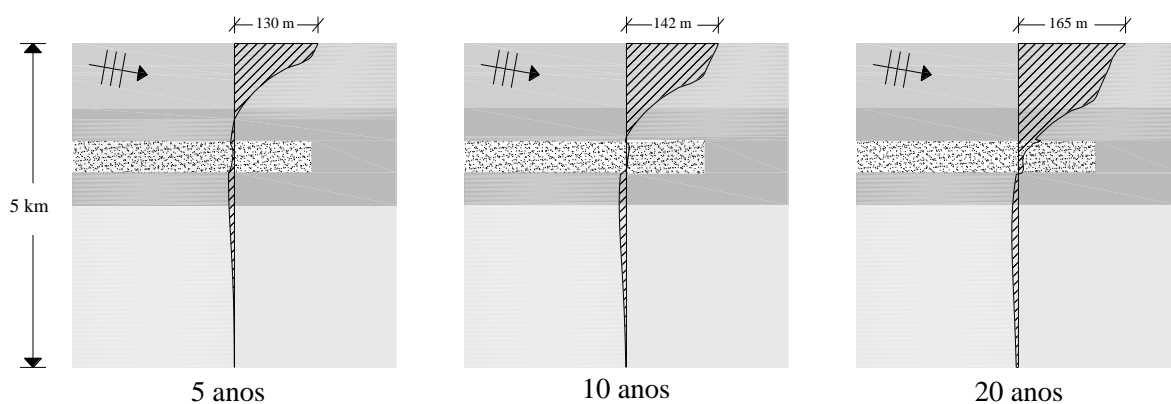


Figura 6.12: Posição da linha de costa no cenário base da alimentação artificial de praia, ao longo do tempo (escala horizontal 10 vezes superior à escala vertical).

A intervenção testada é caracterizada pela introdução de sedimentos no sistema (num total de 4 milhões de m^3 ao longo dos 20 anos de simulação). Os custos associados à operação de alimentação artificial de praia resumem-se, neste caso em particular, ao custo inerente ao material, definido no cenário base em $2 \text{ €/}m^3$ (englobando material, transporte e deposição). A intervenção relativa ao cenário base representa um custo total de 6 milhões e meio de euros (correspondente ao custo de 4 deposições de 1 milhão de m^3 , atualizado para o ano 0). Tendo em conta os valores de território definidos no cenário de referência e as áreas ganhas e perdidas ao longo dos 20 anos de simulação, foi aplicado o módulo de custo-benefício ao cenário base, em comparação com o cenário de referência, dando origem aos resultados da Figura 6.13.

Aplicada a ferramenta COAST verifica-se que a solução testada é física e economicamente vantajosa, uma vez que apresenta um balanço positivo de áreas (relativamente ao cenário de referência) e atinge o ponto de equilíbrio durante a simulação, isto é, o valor dos benefícios ultrapassa o valor dos custos antes do horizonte de 20 anos.

A Tabela 6.26 resume os valores obtidos para o cenário base da alimentação artificial de praia. A análise física dos resultados permite constatar uma redução de área perdida na ordem dos 23 ha, relativamente ao cenário de referência. Economicamente constata-se que após 13 anos de simulação a intervenção é considerada vantajosa, uma vez que o benefício

inerente às áreas de território ganhas e não perdidas supera o montante investido e, aos 20 anos verifica-se que os benefícios são cerca de 70% superiores aos custos totais de investimento ($RBC = 1.73$).

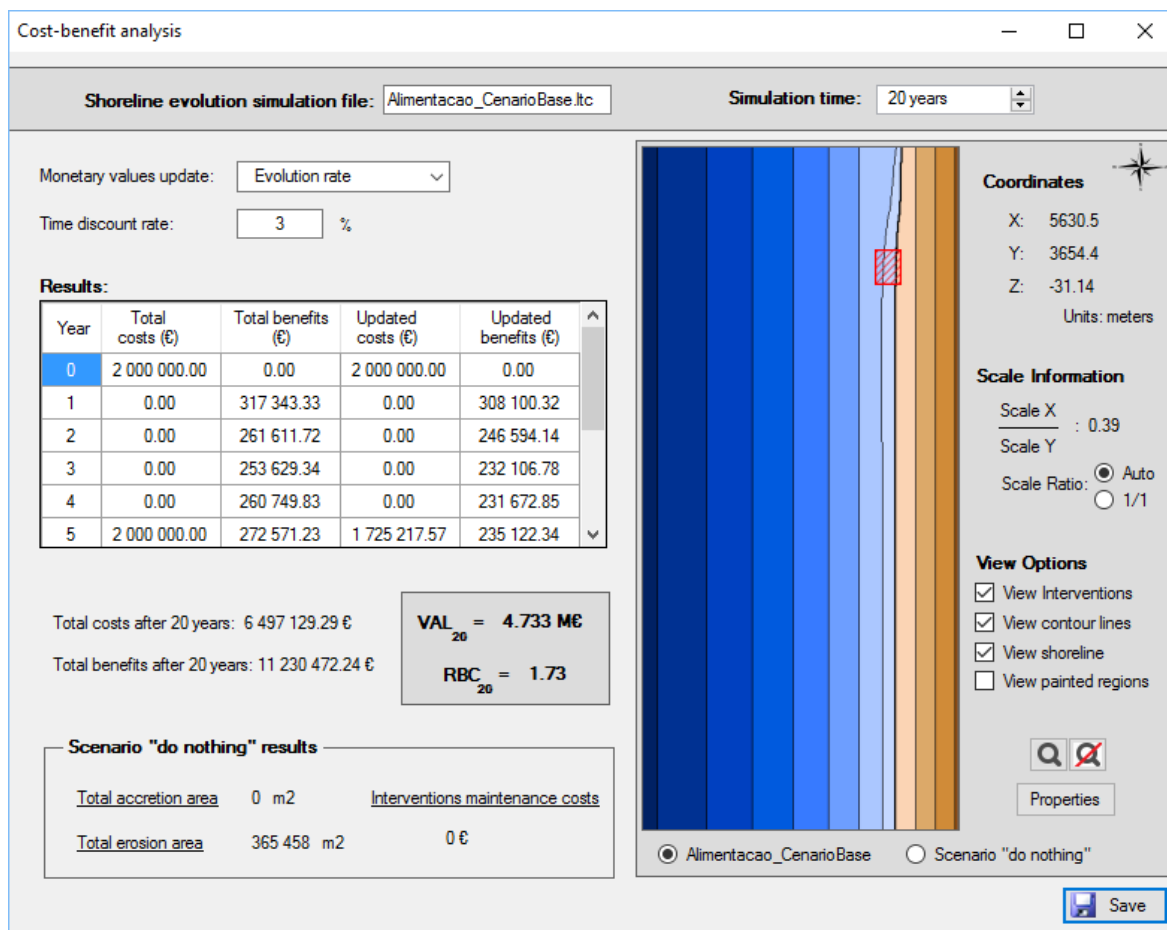


Figura 6.13: Resultados do módulo de custo-benefício, para o cenário base da alimentação artificial de praia.

Tabela 6.26: Balanço físico e económico do cenário base da alimentação artificial de praia.

	Área total ao fim de 20 anos		Rácio benefício-custo		
	Acreção	Erosão	5 anos	10 anos	20 anos
Cenário base (CB)	25 667	165 573	0.34	0.71	1.73

Apesar da solução referente ao cenário base ser física e economicamente vantajosa, outros resultados podem ser conseguidos, quer ao nível de áreas de território a não perder, quer ao nível dos índices económicos obtidos, sendo por isso analisada nas secções seguintes a

influência da alteração das características admitidas para as intervenções de alimentação artificial de praia.

6.4.1. Extensão

Para o cenário base foi definida uma extensão longitudinal de 500 metros ao longo da qual foram depositados os sedimentos provenientes da alimentação artificial. No entanto, a consideração de uma área mais extensa para a deposição de sedimentos pode desencadear diferenças ao nível da evolução da dinâmica sedimentar e, conseqüentemente, nas áreas de território ganhas e perdidas ao longo do tempo. Assim, foram considerados três cenários correspondentes a áreas superiores de deposição: cenário *i.1*, prolongando a extensão da alimentação em 500 m na direção norte; o cenário *i.2*, com a mesma extensão do cenário anterior, mas prolongada na direção sul; e o cenário *i.3*, que abrange a extensão de toda a zona urbanizada (1 500 m). Na direção transversal à linha de costa, a extensão da zona de deposição correspondeu à totalidade da largura do perfil ativo, em todos os cenários simulados.

A evolução da linha de costa nos três cenários é semelhante, mas verifica-se que, o cenário que traduz maiores áreas de acreção (e erosão) corresponde à extensão de 500 metros da área de deposição no sentido sul (cenário *i.2*). No entanto, o cenário que representa o maior ganho de área de território é o cenário *i.1*, correspondente à extensão da área de deposição em 500 metros na direção norte (balanço positivo de cerca de 24 ha, em comparação com o cenário de referência). Verifica-se assim, que, fisicamente, a deposição do volume de sedimentos numa extensão de 1 000 metros (adjacente ao limite norte da zona urbanizada) representa a solução de intervenção mais vantajosa. No entanto, e apesar dos custos associados à intervenção serem mantidos nos três cenários em análise, os benefícios (positivos e negativos) variam ligeiramente, uma vez que as áreas de acreção e erosão ocorrem em diferentes zonas.

Analisando a Tabela 6.27, que resume os resultados obtidos para os três cenários, pode concluir-se que o cenário *i.1* apresenta em simultâneo melhores desempenhos ao nível físico e económico, sendo por isso mais vantajoso aumentar a área de deposição em 500 metros na direção norte do domínio de cálculo. A este cenário corresponde também um ponto de

equilíbrio atingido num menor espaço de tempo (12 anos em vez dos 13 anos de simulação correspondentes ao cenário base).

Tabela 6.27: Balanço físico e económico da influência da extensão da alimentação artificial de praia.

		Área total ao fim de 20 anos		Rácio benefício-custo		
		Acreção	Erosão	5 anos	10 anos	20 anos
<i>CB</i>	500 m (centrada com a zona urbanizada)	25 667	165 573	0.34	0.71	1.73
<i>i.1</i>	1 000 m (extensão para norte)	21 390	150 205	0.34	0.74	1.82
<i>i.2</i>	1 000 m (extensão para sul)	34 752	174 720	0.32	0.69	1.68
<i>i.3</i>	1 500 m (centrada com a zona urbanizada)	29 225	160 341	0.33	0.71	1.76

6.4.2. Localização

Paralelamente à extensão da área de deposição, a escolha adequada para a localização do depósito de sedimentos pode também resultar numa otimização das áreas de território a não perder ao longo do tempo de simulação. Assim, foram considerados dois cenários adicionais, cenário *ii.1* e *ii.2*, que correspondem, respetivamente, à deslocação da área de depósito 500 metros para norte e 500 metros para sul, em relação à localização adotada no cenário base.

Pela análise da Tabela 6.28 verifica-se que a deslocação da área de deposição para norte resulta numa menor perda de território e, simultaneamente, traduz o cenário economicamente mais vantajoso ($RBC = 1.80$, sendo o ponto de equilíbrio atingido ao fim de 13 anos de simulação, tal como no cenário base).

Tabela 6.28: Balanço físico e económico da influência da localização da alimentação artificial de praia.

		Área total ao fim de 20 anos		Rácio benefício-custo		
		Acreção	Erosão	5 anos	10 anos	20 anos
<i>ii.1</i>	500 m para norte	13 356	134 137	0.32	0.70	1.80
<i>CB</i>	centrada com a zona urbanizada	25 667	165 573	0.34	0.71	1.73
<i>ii.2</i>	500 m para sul	36 047	189 688	0.28	0.62	1.51

6.4.3. Frequência

A frequência com que são realizadas alimentações artificiais de praia está muitas vezes relacionada com a disponibilidade financeira e com a necessidade emergente de intervir em situação de emergência, em consequência de um episódio de temporal. No entanto, para um planeamento estratégico e ponderado da gestão costeira, é importante avaliar se é física e economicamente mais vantajoso intervir em curtos espaços de tempo com um volume inferior de sedimentos, ou se, num período mais espaçado, depositar-se um volume maior de sedimentos.

Para o cenário base foram consideradas operações de deposição de 1 milhão de m³, a cada 5 anos. Para avaliação da influência da frequência de intervenção foram considerados dois cenários. Um primeiro cenário correspondente a intervenções mais frequentes, de deposição de 400 mil m³ de 2 em 2 anos (cenário *iii.1*) e um segundo cenário, que corresponde a intervenções mais espaçadas no tempo e com volume de material superior (cenário *iii.2*, deposição de 2 milhões de m³ de 10 em 10 anos).

Os resultados obtidos para os dois cenários (Tabela 6.29), permitem verificar que, contrariamente às duas secções anteriores, neste caso a solução fisicamente mais vantajosa não corresponde à melhor solução em termos económicos. Ao considerar intervalos mais curtos entre alimentações artificiais (cenário *iii.1*) verificam-se menores perdas de território ao longo dos 20 anos de simulação, mas a rentabilidade económica é superior se ao longo dos 20 anos forem apenas realizadas duas intervenções com 2 milhões de m³ cada.

Tabela 6.29: Balanço físico e económico da influência da frequência de deposição de sedimentos nas alimentações artificiais de praia.

		Área total ao fim de 20 anos		Rácio benefício-custo		
		Acreção	Erosão	5 anos	10 anos	20 anos
<i>iii.1</i>	400 mil m ³ de 2 em 2 anos	29 034	154 612	0.45	0.79	1.75
<i>CB</i>	1 milhão de m ³ de 5 em 5 anos	25 667	165 573	0.34	0.71	1.73
<i>iii.2</i>	2 milhões de m ³ de 10 em 10 anos	33 477	169 091	0.69	0.74	1.98

Importa, no entanto, realçar que, apesar de, no cenário *iii.2* o investimento ser mais rapidamente recuperado e o valor de *VAL* ser superior ao fim dos 20 anos de simulação, este é um cenário que exige uma maior capacidade de investimento inicial (4 milhões de euros, enquanto que no cenário *iii.1* são apenas necessários 800 mil euros). A disponibilidade financeira inicial é, muitas vezes, um fator condicionante na escolha da intervenção a realizar.

6.4.4. Volume

Nas três secções anteriores foram analisados cenários de alimentações artificiais de praia com base na introdução do mesmo volume total de sedimentos, o que resultou em custos totais de intervenção aproximadamente iguais, e onde o objetivo principal foi perceber qual a melhor forma de distribuir, espacialmente e temporalmente, os 4 milhões de metros cúbicos de sedimentos introduzidos no domínio de cálculo ao longo dos 20 anos de simulação. Nesta subsecção foi aplicada a ferramenta COAST a dois cenários distintos de volumes totais de sedimentos introduzidos no domínio de cálculo, sendo realizada a avaliação em termos de áreas ganhas e perdidas ao longo do tempo e em termos de custos e benefícios inerentes: cenário *iv.1*, onde se considera a deposição de 500 mil m³ de sedimentos a cada 5 anos; e o cenário *iv.2*, que representa a introdução de 2 milhões de m³ nos mesmos instantes de tempo.

Como seria expectável, o cenário *iv.2* é fisicamente mais vantajoso, evitando perdas de território de cerca de 40 ha (relativamente ao cenário de referência), enquanto que, no cenário *iv.1*, resulta um balanço positivo de áreas de cerca de 13 ha. O cenário *iv.2* apresenta ainda a particularidade de, ao fim de 20 anos de simulação, resultar em maiores áreas de território que as existentes inicialmente (ano 0).

Pela análise dos dados da Tabela 6.30, apesar do benefício físico inerente ao aumento do volume depositado, o valor de *RBC* do cenário *iv.2* é inferior ao correspondente ao cenário de deposição de 500 mil m³ de 5 em 5 anos (cenário *iv.1*). No entanto, a solução correspondente a um volume de 2 milhões de m³ é considerada vantajosa após 12 anos de simulação e, apesar de representar um custo inicial e total de investimento superior, apresenta benefícios ao nível da evolução da linha de costa e diminuição das taxas de recuo junto à fronteira norte (redução do recuo em 60 metros, ao fim de 20 anos de simulação).

Tabela 6.30: Balanço físico e económico da influência do volume de sedimentos nas alimentações artificiais de praia.

		Área total ao fim de 20 anos		Rácio benefício-custo		
		Acreção	Erosão	5 anos	10 anos	20 anos
<i>iv.1</i>	0.5 milhões de m ³	4 483	237 923	0.39	0.86	2.11
<i>CB</i>	1 milhão de m ³	25 667	165 573	0.34	0.71	1.73
<i>iv.2</i>	2 milhões de m ³	119 211	88 811	0.42	0.79	1.68

6.4.5. Custo unitário do material

A variação das características das alimentações artificiais de praia avaliada nas secções anteriores tem impacto quer no desempenho físico da solução de intervenção, ao nível de áreas de acreção e erosão resultantes, quer no desempenho económico da solução. Pretende-se agora, dada a importância do fator económico nas questões relacionadas com a gestão costeira, avaliar o impacto da variação do custo unitário do volume de sedimentos na análise final de custo-benefício da solução.

Para tal, foi aplicado o módulo de custo-benefício da COAST ao cenário base da alimentação artificial de praia considerando quatro cenários correspondentes a quatro valores distintos para o preço unitário do material: 0.5 €/m³, 1.0 €/m³, 4.0 €/m³ e 6.0 €/m³. Os resultados obtidos para o valor de *RBC*, resumidos na Tabela 6.31, mostram naturalmente que o valor de *RBC* diminui com o aumento do custo unitário do material, mas demonstram que, as intervenções relativas aos cenários que correspondem a um custo unitário superior ao valor definido no cenário base (cenário *v.3* e *v.4*) não são vantajosas durante o período de simulação considerado. O valor máximo do custo unitário que justifica, economicamente, a realização da alimentação artificial de praia no período de 20 anos de simulação, para as condições definidas no cenário base é 3.45 €/m³. Considerando a intervenção relativa ao cenário *v.1* e *v.2*, verifica-se, respetivamente, que a partir do 2º e do 4º ano de simulação, a intervenção é considerada vantajosa.

Posto isto, e conhecido o impacto económico da variação do custo unitário do material, a decisão da escolha dos sedimentos para as alimentações artificiais de praia deve assentar num balanço entre o fator económico (menores custos), social (populações satisfeitas com

as recargas nas zonas balneares e/ou na deriva litoral) e ambiental (garantia da sustentabilidade do sistema sedimentar.

Tabela 6.31: Balanço económico da influência do custo unitário dos sedimentos nas alimentações artificiais de praia.

		Rácio benefício-custo		
		5 anos	10 anos	20 anos
<i>v.1</i>	0.5 €/m ³	1.35	2.83	6.91
<i>v.2</i>	1.0 €/m ³	0.67	1.41	3.46
<i>CB</i>	2.0 €/m ³	0.34	0.71	1.73
<i>v.3</i>	4.0 €/m ³	0.17	0.35	0.86
<i>v.4</i>	6.0 €/m ³	0.11	0.24	0.58

6.4.6. Síntese

As alimentações artificiais representam soluções de intervenção costeira eficazes do ponto de vista físico, uma vez que atuam diretamente na principal causa da erosão costeira, o défice de sedimentos. Assim, na secção 6.4, foi proposta uma solução de intervenção baseada na deposição de 1 milhão de sedimentos, de 5 em 5 anos, numa zona de litoral com 500 metros de extensão centrada com a zona urbanizada (Figura 6.11). O desempenho desta solução, definida como cenário base, foi analisado do ponto de vista físico e económico com recurso à ferramenta COAST. Além disso, foram definidos diferentes cenários com o objetivo de avaliar a influência das características das intervenções de alimentação artificial de praia, tais como, a extensão, a localização, a frequência, o volume e o custo unitário do material (Tabela 6.32).

Relativamente ao cenário base, os índices físicos e económicos obtidos demonstram uma solução que resulta num balanço positivo de áreas de território de cerca de 23 ha (em comparação com o cenário de referência) e que, decorridos os 20 anos de horizonte temporal de análise, evita perdas económicas na ordem dos 5 milhões de euros ($VAL_{20 \text{ anos}}$). Trata-se de uma solução que implica um investimento regular ao longo do tempo e um gasto total ao fim de 20 anos de cerca de 6 milhões e meio de euros (valores atualizados para o ano 0), e que atinge o ponto de equilíbrio após os 13 anos de simulação.

Tabela 6.32: Resumo do balanço físico e económico dos cenários de alimentações artificiais de praia.

Cenário Base	CB	Figura 6.11	Balanço (m ²)	VAL _{20 anos} (€)	Investimento		Break-even*
					Inicial (€)	Total (0€)	
			225 552	4 733 343	2 000 000	6 497 129	13° ano
Extensão	i.1	1 000 m (norte)	236 643	5 356 332			12° ano
	i.2	1 000 m (sul)	225 490	4 441 918	2 000 000	6 497 129	13° ano
	i.3	1 500 m	234 342	4 917 737			13° ano
Localização	ii.1	500 m para norte	244 677	5 167 493	2 000 000	6 497 129	13° ano
	ii.2	500 m para sul	211 817	3 311 101			14 ^o (1) ano
Frequência	iii.1	400 mil de m ³ de 2 em 2 anos	239 879	4 643 467	800 000	6 220 104	12° ano
	iii.2	2 milhões de m ³ de 10 em 10 anos	229 844	6 856 026	4 000 000	6 976 376	8 ^o (2) ano
Volume	iv.1	0.5 milhões de m ³	132 018	3 606 909	1 000 000	3 248 565	9 ^o (3) ano
	iv.2	2 milhões de m ³	395 858	8 842 361	4 000 000	12 994 259	12° ano
Custo unitário do material	v.1	0.50 €/m ³		9 606 190	500 000	1 624 282	2° ano
	v.2	1 €/m ³	225 552	7 981 908	1 000 000	3 248 565	4 ^o (4) ano
	v.3	4 €/m ³		-1 763 786	4 000 000	12 994 259	- ano
	v.4	6 €/m ³		-8 260 916	6 000 000	19 491 388	- ano

* Representa o ponto de equilíbrio do investimento, isto é, o momento em que o total de benefícios iguala o total de custos da análise ($VAL = 0$ e $RBC = 1$). Considera-se que após este momento a realização da intervenção é economicamente vantajosa.

(1) O equilíbrio entre custos e benefícios é atingido neste ano, no entanto, por efeito do custo da nova alimentação, no ano seguinte a solução não é considerada vantajosa. A partir dos 16 anos de simulação o valor de VAL é de novo positivo.

(2) Após 8 anos de simulação a solução é considerada vantajosa, situação que se mantém após o nono ano de simulação. No entanto, o valor de RBC após a alimentação realizada no 10º ano é inferior à unidade, e a intervenção só passa a ser vantajosa de novo após 12 anos de simulação.

(3) Depois do nono ano de simulação é atingido o equilíbrio. Ao fim de 10 anos de simulação os custos são superiores aos benefícios e depois do 11º ano o valor de VAL é superior a 0 (e $RBC > 1$).

(4) A solução é vantajosa depois do quarto ano de simulação. Ao fim do 5º e 6º ano os custos são superiores aos benefícios, e a situação é revertida depois do 7º ano de simulação.

Apesar do desempenho positivo da solução correspondente ao cenário base, tanto as áreas de acreção obtidas ao longo do tempo, como as vantagens económicas podem ser melhoradas, apesar de, tal como nas intervenções de defesa costeira analisadas anteriormente (secção 6.2 e 6.3), a melhor solução depender sempre do objetivo pretendido e da análise conjugada entre vantagens e desvantagens. Os resultados obtidos com os cenários analisados (Tabela 6.32), permitem verificar que a localização e extensão da área de deposição na direção norte (em ambos os casos, 500 metros), traz vantagens do ponto de vista físico e

económico. A deposição de um menor volume de sedimentos num curto espaço de tempo traduz-se em maiores áreas de acreção, mas os maiores ganhos económicos correspondem à deposição de um maior volume de sedimentos num maior espaço de tempo. Um maior volume total de sedimentos depositados proporciona maiores áreas de acreção ao longo do tempo e simultaneamente resulta num maior valor atual líquido, ao fim de 20 anos (apesar do valor de *RBC* ser inferior). O custo unitário da operação de alimentação apresenta grande influência no comportamento económico ao longo do tempo, verificando-se que a solução de alimentação artificial correspondente ao cenário base só é economicamente vantajosa quando o custo unitário do material é inferior a 3.45€. Foi ainda verificado que um dos cenários testados (*iv.2*) resulta globalmente em cerca de 3 ha de acreção ao fim de 20 anos, representando uma situação de maior território do que no instante inicial da simulação.

Apesar de alguns dos cenários referidos (e resumidos na Tabela 6.32) apresentarem vantagens económicas mais atraentes que as resultantes do cenário base, têm simultaneamente um custo de investimento inicial que pode ser condicionante para as entidades competentes pela decisão das características da intervenção (situação de consideração de um maior volume de sedimentos). Assim, é importante a análise de todos estes fatores de forma individual e conjugada, tornando-se a aplicação da ferramenta COAST uma ajuda importante à obtenção dos respetivos índices físicos e económicos.

6.5. Transposição artificial de areias

Os sistemas de transposição artificial de areias, muitas vezes denominados por sistemas de *bypass*, traduzem soluções de intervenção costeira caracterizados pela introdução contínua de sedimentos na deriva litoral. Esta solução é geralmente utilizada em embocaduras de rios ou em zonas onde as estruturas portuárias interrompem a normal dinâmica sedimentar. No entanto, estas soluções têm associados custos de investimento inicial elevados (além do próprio custo contínuo de fornecimento de sedimentos e manutenção do sistema).

Não é conhecida a implementação de sistemas de transposição artificial de areias na costa portuguesa, mas de forma a demonstrar a aplicabilidade da ferramenta COAST e com o objetivo de mostrar a potencialidade da implementação deste tipo de intervenção como solução para a mitigação do problema de erosão costeira identificado no cenário de

referência da secção 6.1, foi estabelecido um cenário base de um sistema de transposição artificial de areia (CB) e definidos diferentes cenários alternativos, discutindo aspetos relacionados com a aplicação do próprio sistema.

O cenário base (Figura 6.14) é definido por um sistema de transposição artificial de areias, caracterizado por um custo de investimento inicial de cerca de 3 milhões de euros, implantado no limite superior da zona urbanizada (a 1 km da fronteira norte do domínio de cálculo). O caudal sedimentar transposto corresponde a cerca de 90% da capacidade de transporte sedimentar no início da situação de referência, estimada através da formulação de CERC, o que resulta num caudal transposto de cerca de 25 m³/hora (aproximadamente 219 000 m³/ano). O custo unitário do material, que engloba simultaneamente os custos de operação e manutenção do sistema de transposição, foi considerado igual a 1 €/m³ de sedimentos transpostos.

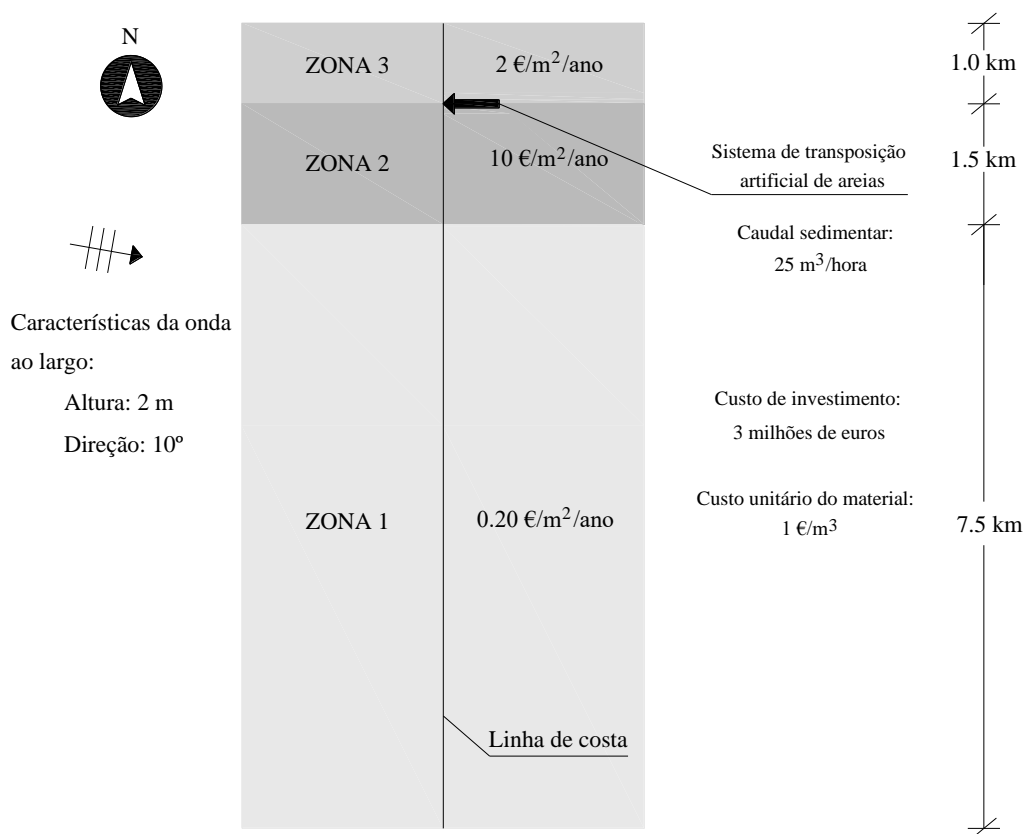


Figura 6.14: Esquemática do cenário base da transposição artificial de areias.

A aplicação do módulo de evolução da linha de costa ao cenário base da transposição artificial de areias (Figura 6.15), resulta em taxas de recuo na fronteira norte inferiores às obtidas para o cenário de referência, apesar de continuar a existir erosão, justificável pelo facto do caudal transposto ser inferior à capacidade potencial de transporte sedimentar. No entanto, e dada a localização do sistema de transposição, não se verificam recuos da posição da linha de costa na zona urbanizada do domínio de cálculo, estando deste modo garantida a sua proteção ao longo dos 20 anos de simulação. Verifica-se que esta é uma solução de intervenção fisicamente vantajosa, uma vez que apresenta menores perdas de território que o cenário de referência (balanço positivo de cerca de 29 ha), com a mais-valia de proteção total da zona urbanizada.

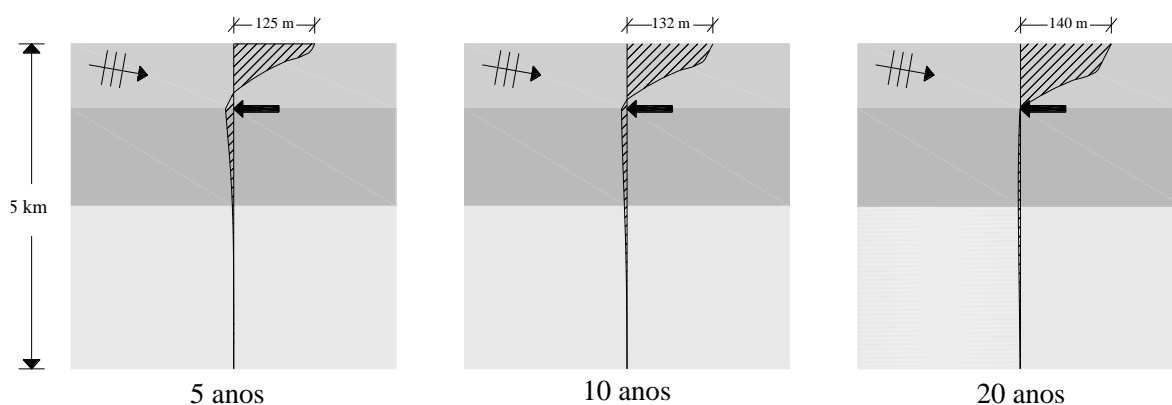


Figura 6.15: Posição da linha de costa no cenário base da transposição artificial de areias, ao longo do tempo (escala horizontal 10 vezes superior à escala vertical).

Em termos de análise económica, aos 3 milhões de euros de custo inicial de investimento, acresce a esta solução o custo contínuo relativo à operação de transposição dos sedimentos que, tendo em conta o custo unitário definido (1 €/m^3) e o caudal transposto ($25 \text{ m}^3/\text{hora}$) resulta num custo anual de 219 000 €. A janela da Figura 6.16 apresenta os resultados da análise custo-benefício realizada para os 20 anos de simulação, onde se verifica que a solução apresenta um *VAL* positivo de cerca de 5.5 milhões de euros. Verifica-se, portanto, que se trata de uma solução física e economicamente vantajosa. A Tabela 6.33 resume os índices obtidos para o cenário base da transposição artificial de areias, fazendo notar que, apesar de economicamente a solução só ser considerada vantajosa passados mais de 10 anos de simulação, evitam-se perdas de território na ordem dos 30 ha ao fim do tempo de análise.

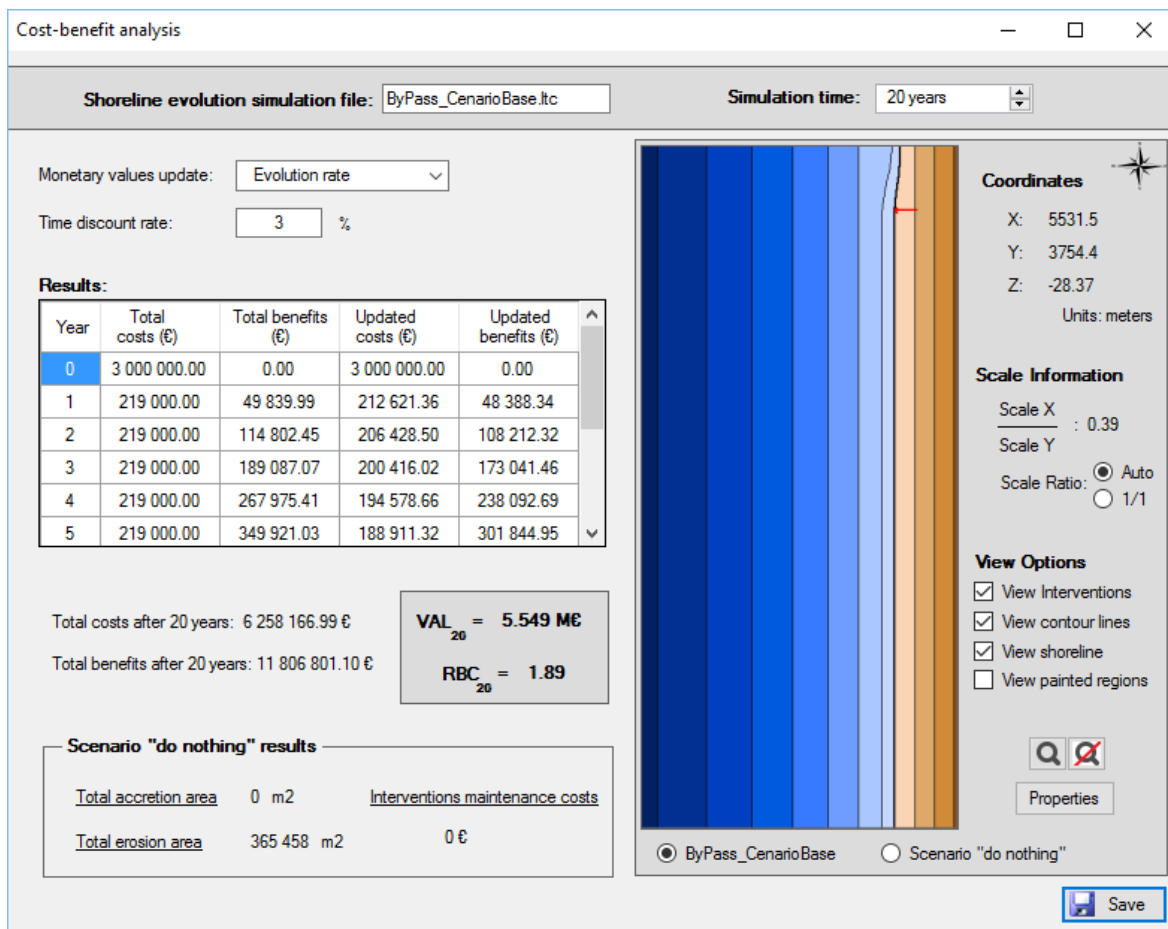


Figura 6.16: Resultados do módulo de custo-benefício, para o cenário base da transposição artificial de areias.

Tabela 6.33: Balanço físico e económico do cenário base da transposição artificial de areias.

	Área total ao fim de 20 anos		Rácio benefício-custo		
	Acreção	Erosão	5 anos	10 anos	20 anos
Cenário base (CB)	9 946	84 454	0.22	0.68	1.89

De forma a avaliar o impacto da alteração das características que definem os sistemas de transposição artificial de areias, foram analisados os cenários enumerados na Tabela 6.34, que consistem na alteração do local de implantação do sistema, na variação do caudal de sedimentos transportado e na consideração de diferentes custos do investimento inicial do sistema e do custo unitário do material (operação e manutenção do sistema).

Tabela 6.34: Definição dos cenários para transposição artificial de areias, testados com a ferramenta COAST.

		1	2	3	4
Posição	<i>i</i>	500 m da fronteira norte	-	-	-
Caudal sedimentar	<i>ii</i>	10% capacidade de transporte	50% capacidade de transporte	150% capacidade de transporte	-
Custo de investimento	<i>iii</i>	1 milhão de euros	5 milhões de euros	-	-
Custo unitário do material	<i>vi</i>	0.25 €/m ³	0.50 €/m ³	2 €/m ³	3 €/m ³

6.5.1. Posição

A posição do sistema definido no cenário base foi escolhida em função da localização da zona urbanizada, com o objetivo de garantir a sua proteção. No entanto, importa verificar se a implantação do sistema numa localização mais a norte resulta em melhorias dos resultados físicos e económicos. Assim, foi considerado um novo cenário, onde a introdução dos sedimentos está localizada 500 metros a norte do cenário base (cenário *i.1*).

A Tabela 6.35 permite comparar os resultados obtidos para os dois cenários, demonstrando que, apesar de fisicamente ser mais vantajosa a deslocação do sistema de transposição de areias para norte (benefício de cerca de 1 ha), economicamente não corresponde à melhor solução. A localização definida para o cenário base apresenta maiores índices de *RBC* e atinge o equilíbrio um ano antes do cenário *i.1* (13 anos de simulação em vez de 14).

Tabela 6.35: Balanço físico e económico da influência da localização do sistema de transposição artificial de areias.

		Área total ao fim de 20 anos		Rácio benefício-custo		
		Acreção	Erosão	5 anos	10 anos	20 anos
<i>i.1</i>	500 m da fronteira norte	85	65 055	0.19	0.63	1.80
<i>CB</i>	1 000 m da fronteira norte	9 946	84 454	0.22	0.68	1.89

6.5.2. Caudal transposto

O fluxo sedimentar introduzido pelo sistema de transposição artificial de areias influencia inevitavelmente o custo associado à intervenção e condiciona fisicamente a solução. Assim,

foi avaliado o impacto da variação do caudal de sedimentos na evolução da linha de costa ao longo dos 20 anos de simulação e no balanço económico da intervenção. Para isso foram definidos três cenários, dois dos quais com caudal inferior ao cenário base, que representam 10% e 50% da capacidade de transporte do clima de agitação, respetivamente, cenário *ii.1* e *ii.2*, e um cenário com capacidade de transposição de sedimentos 50% superior à capacidade de transporte da onda (cenário *ii.3*).

A Tabela 6.36 resume os resultados obtidos e demonstra, como seria de esperar, que uma maior quantidade de sedimentos transpostos pelo sistema resulta em menores perdas de território. Comparando com o cenário de referência, evitam-se se perdas de cerca de 5, 16 e 48 ha, respetivamente, nos cenários *ii.1*, *ii.2* e *ii.3*. O desempenho económico dos cenários segue a mesma linha de tendência do comportamento físico, uma vez que os cenários correspondentes à maior transposição de sedimentos correspondem também a melhores índices económicos. O cenário que traduz aproximadamente 10% da capacidade de transporte não é rentabilizado dentro dos 20 anos de simulação, isto porque os ganhos correspondentes ao território não perdido não atingem os custos inerentes à implementação do sistema de transposição. O cenário que transpõe um caudal de sedimentos superior à capacidade de transporte apresenta-se como o mais vantajoso, física e economicamente, sendo os benefícios associados ao território superiores a duas vezes os custos totais ao fim dos 20 anos de simulação ($RBC = 2.07$). Neste último cenário (*ii.3*) obtêm-se áreas de território ao fim de 20 anos superiores às existentes no instante inicial da simulação (cerca de 11 ha).

Tabela 6.36: Balanço físico e económico da avaliação da influência do caudal transposto na transposição artificial de areias.

		Área total ao fim de 20 anos		Rácio benefício-custo		
		Acreção	Erosão	5 anos	10 anos	20 anos
<i>ii.1</i>	10% capacidade de transporte	0	311 298	0.08	0.26	0.73
<i>ii.2</i>	50% capacidade de transporte	63	197 531	0.17	0.57	1.61
<i>CB</i>	90% capacidade de transporte	9 946	84 454	0.22	0.68	1.89
<i>ii.3</i>	150% capacidade de transporte	119 620	6 099	0.30	0.84	2.07

Tendo em consideração os preços adotados para representar os custos, nestes cenários, a análise da influência do caudal que o sistema de transposição artificial de sedimentos introduz no domínio de cálculo permite concluir que este tipo de intervenção é tanto mais vantajoso quanto maior o volume de sedimentos envolvido, sendo ineficaz quando consideradas percentagens baixas da capacidade de transporte do sistema (exemplo do cenário *i.1*).

6.5.3. Custo de investimento

O custo de investimento inicial, para implementação de um sistema de transposição de sedimentos, varia em função de inúmeros fatores, como o tipo de sistema instalado, a dimensão, a localização, etc. De acordo com o levantamento de casos de estudo de sistemas de transposição artificial de areias realizado por Carpinteiro (2009), os sistemas de transposição podem ser fixos, semi-móveis e móveis, sendo que os últimos são aplicados nos casos de alimentações periódicas (alimentações artificiais de praia). Os sistemas fixos são recomendados para transposições contínuas e os sistemas semi-móveis podem ser utilizados em ambos os casos. A variedade de sistemas existente faz com que o valor considerado para o investimento inicial do sistema seja de algum modo subjetivo. Deste modo, avalia-se a influência do valor definido para o custo de investimento no desempenho económico da solução de intervenção. Foram para isso definidos dois cenários: o cenário *iii.1*, que representa um custo inicial de 1 milhão de euros e o cenário *iii.2* com um custo inicial de 5 milhões de euros.

A Tabela 6.37 mostra que, para as condições definidas no cenário base, para qualquer uma das situações, a implementação do sistema de transposição artificial de areias é vantajosa, mas, verifica-se que, para o cenário que representa o custo mais elevado, o ponto de equilíbrio entre custos e benefícios só é atingido passados 16 anos de simulação. Para as condições estipuladas, verifica-se que o valor máximo para o custo de investimento que garante que os benefícios igualem os custos é de cerca de 8 milhões e meio de euros.

6.5.4. Custo unitário do material

Mantendo o custo inicial do investimento de 3 milhões de euros, fez-se variar os custos de operação e manutenção do sistema por alteração do preço unitário do material, considerando

valores entre os 0.25 €/m³ e os 3.00 €/m³, com o objetivo de avaliar a influência no balanço económico da intervenção.

Tabela 6.37: Balanço económico da influência do custo de investimento na transposição artificial de areias.

		Rácio benefício-custo		
		5 anos	10 anos	20 anos
<i>iii.1</i>	1 milhão de euros	0.44	1.18	2.86
<i>CB</i>	3 milhões de euros	0.22	0.68	1.89
<i>iii.2</i>	5 milhões de euros	0.15	0.49	1.45

Os resultados da Tabela 6.38 mostram naturalmente que o valor dos índices de *RBC* aumentam com a diminuição do custo unitário do material, verificando-se que apenas o cenário correspondente a 3 vezes o valor definido para o cenário base resulta num *RBC* inferior à unidade (solução não compensatória ao longo dos 20 anos de simulação). Para as condições definidas, o valor máximo do custo unitário da operação de transposição que garante valores de *VAL* positivos é 2.80 €/m³.

Tabela 6.38: Balanço económico da influência do custo unitário dos sedimentos na transposição artificial de areias.

		Rácio benefício-custo		
		5 anos	10 anos	20 anos
<i>iv.1</i>	0.25 €/m ³	0.27	0.96	3.12
<i>iv.2</i>	0.50 €/m ³	0.25	0.85	2.59
<i>CB</i>	1.00 €/m ³	0.22	0.68	1.89
<i>iv.3</i>	2.00 €/m ³	0.18	0.50	1.28
<i>iv.4</i>	3.00 €/m ³	0.15	0.39	0.95

6.5.5. Síntese

Os sistemas de transposição artificial de areias, tal como as alimentações artificiais de praia, são soluções muito eficazes do ponto de vista físico, uma vez que contrariam a causa da erosão (o défice sedimentar) e traduzem um acréscimo de sedimentos ao sistema. Na secção

6.5 foi proposto um sistema de transposição artificial de areias, com o objetivo de reduzir o problema de erosão costeira característico do cenário de referência. Apesar do custo avultado que regra geral caracteriza este tipo de sistemas, foi definido para o cenário base um custo de investimento inicial de 3 milhões de euros (valor que poderá estar subestimado relativamente à realidade atual). O cenário base caracterizou-se por um caudal de sedimentos transposto de norte para sul de aproximadamente 90% da capacidade de transporte da agitação marítima e um custo unitário de 1 €/m³ (Figura 6.14). A aplicação da ferramenta COAST a este cenário de intervenção mostra taxas de recuo da posição da linha de costa e áreas de erosão muito inferiores ao cenário de referência correspondente e, simultaneamente, resulta em menores perdas económicas ao fim dos 20 anos de simulação (cerca de 5 milhões e meio de valor atual líquido). O investimento com a intervenção é equilibrado pelos ganhos decorrentes das áreas de acreção e áreas não perdidas, atingindo o ponto de equilíbrio ao fim de 13 anos de simulação.

A Tabela 6.39 resume os resultados físicos e económicos dos cenários testados para caracterizar os sistemas de transposição artificial de areias. A posição do sistema do cenário base corresponde ao limite norte da zona urbanizada, mas, deslocar o sistema 500 metros na direção norte, resulta num balanço positivo de áreas superior. No entanto, economicamente, esta alteração não resultou numa solução mais vantajosa. O aumento do volume de sedimentos considerado na transposição resulta, simultaneamente, em melhores índices físicos e económicos. A análise dos custos de investimento e do material transposto mostram que para as características do cenário base, a solução é vantajosa sempre que o custo inicial é inferior a 8 milhões e meio de euros (para custos de manutenção e operação de 1 €/m³) e quando o custo unitário iguala os 3 €/m³ o VAL ao fim de 20 anos já não é positivo.

O maior balanço positivo de áreas corresponde à solução com maior valor atual líquido ao fim dos 20 anos de simulação, que corresponde à transposição de um caudal superior à capacidade de transporte da agitação marítima (Tabela 6.39). A este cenário (ii.3) corresponde, no final da simulação, uma área total de território superior à do instante inicial de simulação. Estes resultados permitem concluir que, uma vez que a estes sistemas estão associados custos de investimento muito elevados, pode compensar transpor um caudal de sedimentos elevado, que permita a recuperação do valor investido, através de ganhos associados às áreas de acreção e áreas não perdidas ao longo do tempo.

Tabela 6.39: Resumo do balanço físico e económico dos cenários de transposição artificial de areias.

Cenário Base	CB	Figura 6.14	Balanço (m ²)	VAL _{20 anos} (€)	Investimento		Break-even*
					Inicial (€)	Total (0€)	
			290 950	5 548 634	3 000 000	6 258 167	13° ano
Posição	ii.1	500 m da fronteira norte	300 487	4 912 989	3 000 000	6 127 840	14° ano
	ii.2	10% capacidade de transporte	54 160	-977 698		3 625 568	- ano
Caudal	ii.2	50% capacidade de transporte	167 989	2 930 383	3 000 000	4 824 574	15° ano
	ii.3	150% capacidade de transporte	478 979	9 211 946		8 630 113	12° ano
Custo de investimento	iii.1	1 milhão de euros	290 950	7 678 961	1 000 000	4 127 840	9° ano
	iii.2	5 milhões de euros		3 678 961	5 000 000	8 127 840	16° ano
	iv.1	0.25 €/m ³		8 024 841		3 781 960	11° ano
Custo unitário do material	iv.2	0.50 €/m ³	290 950	7 242 881		4 563 920	12° ano
	iv.3	2.00 €/m ³		2 551 120	3 000 000	9 255 681	17° ano
	iv.4	3.00 €/m ³		-576 720		12 383 521	- ano

* Representa o ponto de equilíbrio do investimento, isto é, o momento em que o total de benefícios iguala o total de custos da análise (VAL = 0 e RBC =1). Considera-se que após este momento a realização da intervenção é economicamente vantajosa.

6.6. Notas finais

O presente capítulo teve como objetivo principal a aplicação da ferramenta numérica COAST, desenvolvida no presente trabalho, e que consiste na análise e na otimização de estratégias de mitigação do problema de erosão costeira, contemplando a avaliação do impacto na evolução da linha de costa, o pré-dimensionamento da intervenção de defesa costeira e a quantificação dos custos e dos benefícios envolvidos. Em simultâneo com a demonstração da versatilidade da ferramenta numérica COAST, foi objetivo deste capítulo a avaliação da influência que determinados parâmetros (dimensão, número e localização das estruturas, clima de agitação, horizonte temporal de análise, configuração do domínio de cálculo, valor económico do território, preço unitário dos materiais envolvidos, orçamento disponível, etc.) provocam na evolução da linha de costa e nos custos de intervenção associados. Note-se que, os resultados obtidos nos cenários propostos são naturalmente

dependentes dos pressupostos admitidos pelo modelo de evolução da linha de costa, pelo pré-dimensionamento das intervenções e pelas condições que reproduzem o domínio de cálculo, nomeadamente, o clima de agitação, a batimetria/topografia e o valor do território.

Inicialmente foi definido um cenário de referência (secção 6.1), correspondente a uma situação de “não intervenção”, verificando-se que, após o horizonte temporal em análise (20 anos), se verificam perdas avultadas de território (cerca de 37 ha, dos quais 15 ha correspondem a perdas numa zona urbanizada), que, tendo em conta os valores definidos para o território, representam perdas económicas na ordem dos 12 milhões de euros. Face a este cenário de erosão persistente ao longo do tempo, foram propostas diferentes intervenções para mitigação do problema da erosão costeira, avaliadas com recurso à ferramenta numérica COAST.

Os cenários propostos foram divididos em quatro secções distintas, correspondendo a cada uma, um tipo de intervenção diferente: esporões (secção 6.2), estruturas longitudinais aderentes (secção 6.3), alimentações artificiais de praia (secção 6.4) e transposição artificial de areias (secção 6.5). Em cada uma das secções referidas foi definido um cenário base, a partir do qual se avaliaram os impactos associados à definição de determinados parâmetros que o caracterizam. As secções culminam numa síntese, que resume as principais conclusões alcançadas com a aplicação da COAST para cada tipo de intervenção.

Note-se que, o objetivo principal da análise dos diferentes cenários de cada secção não passou pela identificação da melhor solução de intervenção a implementar no cenário de referência, mas sim, por, simultaneamente, evidenciar as potencialidades da ferramenta numérica COAST e avaliar o impacto físico e económico das diferentes considerações adotadas para cada solução. No entanto, partindo dos valores obtidos para o balanço de áreas de território ganho, mantido ou perdido, em cada cenário (diferença entre as áreas de erosão do cenário de referência e do cenário em análise, somada à área de acreção do cenário em análise, ao fim dos 20 anos de simulação) e para os respetivos índices económicos (*VAL*, *RBC*, tempo de equilíbrio do investimento ou *break-even*: momento em que o total de benefícios iguala o total de custos da intervenção), e estipulando o objetivo da intervenção (físico, económico ou a conciliação de ambos), é possível uma noção de quais as características que melhor conduzem a soluções otimizadas.

Nas tabelas seguintes resumem-se os resultados obtidos para cada um dos cenários base propostos, permitindo uma comparação entre o desempenho de cada um dos tipos de intervenção como solução de mitigação do problema de erosão costeira do cenário de referência. No entanto, ressalva-se que, tal como nas secções anteriores, os resultados apresentados são válidos para as condições definidas e não devem ser retiradas conclusões generalizadas. A Tabela 6.40 resume as características físicas de cada um dos cenários base e a Tabela 6.41, os respetivos índices económicos.

Tabela 6.40: Resumo do balanço físico dos cenários base analisados com a COAST.

	Proteção da zona urbanizada			Recuo na fronteira norte (m)			Área (m ²)		
	5 anos	10 anos	20 anos	5 anos	10 anos	20 anos	Ganha	Perdida	Balanço
Cenário de referência		-		134	160	236	0	365 458	-
Esporão (CB)	parcial	parcial	parcial	133	146	177	24 435	431 932	-42 040
Estrutura longitudinal aderente (CB)	total	total	total	134	156	169	0	166 093	199 365
Alimentação artificial de praia (CB)	parcial	parcial	parcial	130	142	165	25 667	165 573	225 552
Transposição artificial de areia (CB)	total	total	total	125	132	140	9 946	84 454	290 950

Tabela 6.41: Resumo do balanço económico dos cenários base analisados com a COAST.

	RBC _{20 anos}	VAL _{20 anos} (€)	Investimento		Break-even*
			Inicial (€)	Total (0€)	
Esporão (CB)	3.31	8 316 103	1 462 293	3 602 359	7º ano
Estrutura longitudinal aderente (CB)	2.34	5 078 161	2 052 484	3 777 949	13º ano
Alimentação artificial de praia (CB)	1.73	4 733 343	2 000 000	6 497 129	13º ano
Transposição artificial de areia (CB)	1.89	5 548 634	3 000 000	6 258 167	13º ano

* Representa o ponto de equilíbrio do investimento, isto é, o momento em que o total de benefícios iguala o total de custos da análise ($VAL = 0$ e $RBC = 1$). Considera-se que após este momento a realização da intervenção é economicamente vantajosa.

A aplicação do módulo de evolução da linha de costa da COAST a cada um dos cenários base (Tabela 6.40) permitiu observar que, à exceção do caso do esporão, todos os cenários conduzem a uma menor área perdida ao fim dos 20 anos de simulação. Para todos os

cenários, verificam-se reduções significativas do recuo da posição da linha de costa junto à fronteira norte, com destaque para o cenário de transposição artificial de areias, que resulta em recuos cerca de 100 metros inferiores. Este é também o cenário base que resulta em menores perdas de território ao longo do tempo de simulação, apresentando um balanço positivo de áreas (em comparação com o cenário de referência) na ordem dos 30 ha e, simultaneamente, promove a proteção total da zona urbanizada. A implantação do esporão no limite sul da zona urbanizada resulta numa maior área perdida ao fim do tempo de simulação, mas, apesar disso, promove a acumulação de sedimentos a barlamar e apresenta-se como o cenário que resulta numa maior área de acreção na zona urbanizada (o que pode ser uma mais-valia social relevante).

Uma análise custo-benefício realizada com a COAST aos quatro tipos de intervenção, aponta como cenário económico mais atraente a solução de intervenção composta pelo esporão, uma vez que, simultaneamente, apresenta o maior valor atual líquido ao fim dos 20 anos de simulação (cerca de 8 milhões de euros), o maior rácio entre benefícios e custos ($RBC = 3.31$) e corresponde ainda ao menor custo de investimento inicial e total e à solução que mais rapidamente atinge o ponto de equilíbrio (decorridos aproximadamente 7 anos de simulação). A solução que apresenta o maior custo de investimento inicial corresponde à implementação do sistema de transposição artificial de areias, mas, a intervenção com menor índice RBC e VAL ao fim de 20 anos é a alimentação artificial de praia.

Os resultados obtidos para os quatro cenários base reforçam a premissa de que a escolha da melhor solução de intervenção de defesa costeira é complexa e que vai depender, essencialmente, de uma conjugação entre fatores físicos, económicos, sociais, culturais, ambientais, etc., uma vez que, a solução que promove menores perdas de território ao fim de 20 anos é uma das financeiramente menos atraente (transposição de areias) e a solução do esporão, que mais reduz as perdas económicas (cerca de 65% dos 12 milhões de euros perdidos no cenário de referência) resulta em perdas de território ainda superiores ao cenário de referência (balanço negativo de cerca de 4 ha).

Apesar da dificuldade muitas vezes associada à escolha da melhor solução de intervenção, os resultados obtidos mostram que, para todos os cenários base propostos, ao fim de 20 anos de simulação, é economicamente vantajoso intervir. Fisicamente, verifica-se na generalidade dos casos, uma redução da área perdida ao longo do tempo, à exceção do cenário base do

esporão, que representa perdas de território em relação ao cenário de referência. No entanto, em todos os cenários base, ao fim de 20 anos de simulação, há perdas de território em relação ao instante inicial de simulação, independentemente do investimento realizado.

Para além dos índices globais físicos e económicos das intervenções ao fim do tempo de simulação, existem outros aspetos que podem influenciar as decisões por parte das entidades competentes. O custo de investimento inicial mais elevado pode inviabilizar a escolha de soluções de intervenção que poderiam promover melhores desempenhos físicos e económicos ao fim do tempo de simulação. O tempo decorrido para que seja atingido o ponto de equilíbrio económico (*break-even*) pode tornar mais atraentes cenários que rapidamente se tornam vantajosos (horizontes curtos, para rapidamente mostrar eficácia), mesmo que, num horizonte temporal mais distante, não resultem nos melhores índices físicos e económicos.

A avaliação da influência da agitação marítima e da batimetria do domínio de cálculo realizada com a COAST também permitiu concluir que, a mesma solução de intervenção para mitigação do problema da erosão costeira pode ser eficaz numas zonas, e não promover as mesmas vantagens noutras. A análise do valor dos índices *RBC* de cada um dos cenários, aos 5, 10 e 20 anos de simulação, permitiu constatar que, a eficácia de uma solução depende, entre outros fatores, do tempo de análise, uma vez que, para um determinado horizonte temporal a solução pode não ser eficaz, mas para outro, já poder ser considerada vantajosa. O estudo de alternativas às características específicas de cada cenário base, como o comprimento, extensão, localização, altura, frequência, volume, etc. permitiu também verificar que, com o mesmo investimento, podem ser conseguidas melhorias significativas ao nível do desempenho físico e económico da solução.

Note-se que, os impactos sociais (aqui considerados de forma implícita) que podem advir de determinadas soluções de intervenção podem também influenciar decisões, uma vez que, convertidos em custos, podem tornar as soluções economicamente pouco competitivas. Por este motivo, ressalva-se a importância dos cuidados necessários na estimativa do valor dos custos e benefícios que o utilizador da COAST introduz no módulo de custo-benefício, para contemplar fatores não só económicos, mas também sociais, culturais, ambientais, etc.

Após a avaliação de todos estes aspetos, importantes na procura de soluções otimizadas de intervenção de defesa costeira, considera-se que a aplicação da ferramenta numérica COAST, devido à capacidade conjunta de avaliar o impacto da solução na evolução da linha de costa, pré-dimensionar as estruturas e, simultaneamente, permitir uma análise custo-benefício, destaca-se como um auxiliar importante para as entidades responsáveis sustentarem as opções estratégicas adotadas para a gestão do litoral.

Capítulo 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Face aos graves problemas de erosão que as zonas do litoral enfrentam e ao consequente aumento da vulnerabilidade e risco de pessoas e bens, com particular incidência nas frentes urbanas, foi identificada a necessidade de aprofundamento da capacidade de modelação para auxiliar o estudo de estratégias de mitigação do problema da erosão costeira, no sentido de apoiar as entidades competentes na escolha da melhor intervenção de defesa costeira a adotar em cada situação específica. Deste modo, foi desenvolvida nesta dissertação uma ferramenta numérica de análise e comparação do desempenho de intervenções de defesa costeira (COAST – *Coastal Optimization ASsessment Tool*), que reúne a capacidade de projetar a evolução da posição da linha de costa ao longo do tempo, pré-dimensionar estruturas de defesa costeira e apresentar contributos para a seleção de intervenções mais eficazes e com menores custos associados, através de estimativas de custo-benefício. Neste capítulo final pretende-se resumir o trabalho desenvolvido na dissertação, destacar as principais conclusões e propor desenvolvimentos futuros.

7.1. Síntese da dissertação

Nesta secção resume-se todo o trabalho desenvolvido na dissertação, realçando os aspetos mais relevantes. O trabalho foi estruturado em sete capítulos, com um primeiro capítulo introdutório, e o último, relativo às considerações finais. O conteúdo abordado na dissertação foi então repartido por cinco capítulos, sendo os dois primeiros de cariz teórico e exposição de conceitos, e os restantes três, de descrição e aplicação do trabalho desenvolvido.

No Capítulo 1 foi enquadrado o problema que motivou o desenvolvimento deste trabalho e foi apresentada a proposta de investigação. A extrapolação para um futuro próximo dos episódios recorrentes de danos nas zonas costeiras, consequentes dos problemas de erosão persistente devido ao défice sedimentar, efeito das alterações climáticas e crescente pressão urbana nas zonas costeiras, permite antecipar que os investimentos necessários com a implementação e manutenção de intervenções de defesa costeira sejam cada vez maiores.

Assim, as entidades responsáveis pela gestão do litoral necessitam de apoio fundamentado para que, mediante determinados cenários, possam optar pelas intervenções mais eficazes e que correspondam ao menor custo possível. A necessidade de existência de meios que apoiem uma análise e comparação de soluções, pré-avaliando custos e benefícios, motivou o trabalho de investigação proposto que se focou no desenvolvimento de uma ferramenta numérica que contribui para a otimização das propostas de intervenção de defesa costeira para mitigação do problema da erosão, com vista à redução dos custos de execução e manutenção das intervenções, e maximização dos impactos positivos na evolução da posição da linha de costa. Foi objetivo que a ferramenta numérica desenvolvida possuísse, simultaneamente, a capacidade de projetar a evolução da linha de costa ao longo do tempo, pré-dimensionar as estruturas de defesa costeira e quantificar, de uma forma aproximada, os custos e os benefícios envolvidos. Paralelamente, o trabalho de investigação pretendeu também contribuir para a melhoria do desempenho da capacidade de simulação numérica da evolução da linha de costa a médio e longo prazo, através do modelo numérico LTC. A concretização dos objetivos estipulados desencadeou seis tarefas principais, que resultaram no desenvolvimento dos cinco capítulos que compõem o corpo do documento.

No Capítulo 2, no sentido de enquadrar a ferramenta numérica de análise de intervenções de defesa costeira desenvolvida, foi realizado o levantamento da capacidade de modelação numérica de intervenções de defesa costeira, direcionado para as principais metodologias e modelos existentes em cada uma das componentes abordadas: evolução da linha de costa, pré-dimensionamento da estrutura e análise custo-benefício.

A modelação numérica da evolução da linha de costa (secção 2.1) desempenha um papel importante na compreensão e previsão da dinâmica dos sistemas costeiros, mas tem associado um grande grau de incerteza, não existindo um modelo universal para análise e previsão da evolução da linha de costa. O primeiro modelo analítico de evolução da linha de costa foi introduzido pela teoria de “uma linha” (Pelnard-Considère, 1956), onde se considera que o perfil de praia, limitado a *offshore* por uma profundidade de fecho para além da qual não existe movimento significativo dos fundos, se move paralelamente a si próprio. Os modelos numéricos da evolução da linha de costa são uma sequência dos modelos analíticos e podem ter várias classificações, tendo em conta a escala temporal e espacial que abrangem. Os modelos mais utilizados e simples para previsão da evolução da linha de costa

ao longo do tempo são baseados na teoria de “uma linha”, dos quais se destacam: o GENESIS, desenvolvido por Hanson e Kraus (1989); o ONELINE, da autoria de Dabees e Kamphuis (1998); o LITMOD, de Vicente e Clímaco (2003); o LTC, desenvolvido por Coelho (2005); o LITPACK (DHI, 2009); e o UNIBEST (Deltares, 2017). Dos modelos analíticos e numéricos mencionados, destaque para o modelo numérico LTC, que serviu de ponto de partida para o módulo de evolução da linha de costa, e para o modelo numérico GENESIS e modelo analítico de Pelnard-Considère (1956), com os quais foi comparado o desempenho do modelo LTC.

O pré-dimensionamento de estruturas de defesa costeira (secção 2.2) é baseado em formulações essencialmente empíricas, tornando-se importante o domínio dos parâmetros envolvidos, e útil o desenvolvimento de ferramentas de cálculo automático, que permitam a obtenção de resultados otimizados, de forma rápida e expedita. A maior incerteza na fase de pré-dimensionamento das estruturas relaciona-se com a quantificação das ações, que são caracterizadas essencialmente pela altura de onda incidente, que representa uma influência significativa na segurança e no custo da estrutura. Cabe ao projetista a definição do valor da altura de onda de projeto, parâmetro de caracterização complexa, não consensual e cujas considerações variam para cada caso específico e foram alvo de análise neste trabalho. Os diversos métodos para o pré-dimensionamento de estruturas costeiras consistem, basicamente, em diferentes formulações para a determinação do peso dos blocos do manto resistente, que deverá resistir às solicitações da estrutura. Os métodos e pressupostos das formulações devem ser consultados em manuais específicos da literatura, com destaque para: o *Shore Protection Manual* (SPM, 1984); o *Coastal Engineering Manual*, essencialmente a parte VI (Burcharth e Hughes, 2006); o *The Rock Manual* CIRIA (2007a); e a parte 7 da *British Standard Institution, Maritime Structures* (BSI, 1999). As ferramentas numéricas de auxílio à fase inicial de um projeto de estruturas costeiras identificadas foram: o XD-Coast (Lima, 2011); o BREAKWAT (Deltares (2016); o CRESS (CRESS, 2016) e a CLI (CLI, 2017); com destaque para o modelo XD-Coast, base para o módulo de pré-dimensionamento da ferramenta numérica que resultou deste trabalho.

Uma análise custo-benefício permite avaliar o impacto económico líquido de um projeto ao longo do tempo, através da identificação e contabilização dos seus custos e benefícios. Na secção 2.3 foram realizadas considerações relativas à aplicação de análises custo-benefício

a intervenções de defesa costeira, constatando-se a não existência de ferramentas numéricas de análise custo-benefício aplicadas a esta temática, tendo sido identificada apenas a existência de metodologias teóricas baseadas em estudos desenvolvidos por diversos autores. A generalidade das metodologias assume que os custos totais associados a uma intervenção de defesa costeira englobam não só os custos de construção, como também os custos de manutenção periódica, e que ambos dependem do tipo de intervenção a realizar. A quantificação dos benefícios é determinada em função das áreas ganhas (e não perdidas), que traduzem os benefícios positivos, e as áreas de erosão, correspondentes às áreas perdidas ao longo do tempo de análise (benefícios negativos). As metodologias de transferência de benefícios (por exemplo, de Costanza *et al.*, 1997) permitem a adaptação qualitativa ou quantitativa dos recursos ambientais para valores económicos, sendo que a unidade monetária é a única medida que permite avaliar benefícios e custos na mesma unidade. É importante ter em atenção que para diferentes períodos devem ser atualizados os valores para um ano de referência (através da taxa de desconto).

O Capítulo 3 é um capítulo essencialmente teórico, onde foram apresentados os modelos e formulações que serviram de base ao desenvolvimento do trabalho de investigação. Foi avaliada a componente de evolução da linha de costa (com a descrição dos conceitos em que assentam o modelo analítico de Pelnard-Considère, 1956, o modelo numérico GENESIS e o modelo numérico LTC), a componente de pré-dimensionamento (com a descrição do modelo XD-Coast) e a metodologia de custo-benefício considerada na ferramenta numérica.

A formulação analítica de Pelnard-Considère (1956) foi descrita na secção 3.1, nomeadamente, as duas equações que permitem a determinação da posição da linha de costa ao longo do tempo, na presença de uma estrutura perpendicular à linha de costa. A primeira equação é utilizada até que seja atingido o instante relativo ao tempo de enchimento do esporão e a segunda, é considerada após esse instante. Foi verificada a dependência dos resultados em relação ao parâmetro de calibração, que por sua vez varia em função do coeficiente de transporte. Dada a variedade de formulações que existem para estimativa desde coeficiente foram propostos alguns valores de referência, descritas duas metodologias para a sua determinação (Bailard, 1981, 1984 e Valle *et al.*, 1993) e apresentados alguns resultados que permitem concluir que a forma de evolução da configuração da linha de costa ao longo do tempo é independente do coeficiente de transporte.

Os conceitos teóricos necessários à modelação da evolução da linha de costa com recurso ao modelo GENESIS foram descritos na secção 3.2. O GENESIS permite a transformação das características da onda desde o largo até à costa através de um modelo interno e simples ou por intermédio de um modelo externo que trabalha as batimetrias mais complexas (STWAVE). A aplicação dos conceitos apresentados nesta secção foi realizada na secção 5.3, para comparação de resultados do desempenho dos modelos numéricos LTC e GENESIS.

O modelo numérico LTC, dado a importância que representou nesta dissertação foi descrito com algum detalhe na secção 3.3, nomeadamente, os aspetos relativos à formulação teórica em que assenta, estrutura computacional, evolução do modelo (que conta já com duas versões, além da versão inicialmente desenvolvida: versão LTC-RS2010 e versão LTC-CC2012) e aplicação do modelo (com o levantamento de todos os trabalhos onde o modelo numérico LTC foi utilizado, no sentido de identificar o tipo de análises que já foram efetuadas e potenciais problemas detetados na sua aplicação). Foram também identificadas algumas das lacunas do modelo numérico, apontando-se como principal limitação à utilização do modelo, o facto de não ter interface gráfica para o utilizador, o que dificulta a entrada de dados e limita a visualização de resultados.

O XD-Coast é uma ferramenta de cálculo automático que permite o pré-dimensionamento da secção transversal de estruturas costeiras e foi a base para o módulo de pré-dimensionamento da ferramenta numérica desenvolvida. Na secção 3.4 foi descrita a ferramenta e apresentadas as formulações teóricas em que se baseia, destacando-se como principais mais-valias o facto de possuir uma interface gráfica de fácil utilização, ser rápida e expedita, e possibilitar a realização de análises de sensibilidade. Como principal limitação foi identificada a consideração simplista das ações (altura de onda introduzida pelo utilizador).

A metodologia de custo-benefício implementada neste trabalho foi descrita na secção 3.5 e aplicada por Roebeling *et al.* (2011) à zona central da costa portuguesa. Nesta metodologia todos os valores monetários devem ser convertidos em valores atualizados, aplicando uma taxa de desconto ou atualização. São contabilizados os valores atuais de custos e de benefícios que envolvem a intervenção, sendo a viabilidade económica avaliada a partir do valor atual líquido (*VAL*, que representa o balanço acumulado entre os benefícios e os custos

atuais, assumindo valores positivos sempre que a intervenção é economicamente viável) e do rácio benefício-custo (*RBC*, relação entre o somatório dos valores atuais de benefícios e de custos, sendo a intervenção rentável em termos económicos quando o *RBC* é superior a 1).

O Capítulo 4 traduz o principal objetivo do trabalho de investigação e está dividido em três secções principais, sendo cada uma delas reservada a um módulo distinto da ferramenta numérica de análise de intervenções de defesa costeira desenvolvida. A análise do impacto das intervenções de defesa costeira para mitigação dos problemas de erosão, através da ferramenta numérica COAST, contempla três fases distintas, correspondentes a cada um dos três módulos que a compõem. No entanto, quer o módulo de evolução da linha de costa, quer o módulo de pré-dimensionamento podem ser utilizados de forma isolada, caso o utilizador assim pretenda. A utilização do terceiro módulo, relativo à análise custo-benefício implica a utilização sequencial do módulo de evolução da linha de costa e do módulo de pré-dimensionamento de estruturas costeiras.

O módulo de evolução da linha de costa foi descrito na secção 4.1. Engloba a apresentação da interface gráfica desenvolvida para o modelo numérico LTC, em linguagem de programação C#, e a descrição das alterações incluídas no algoritmo, que resultaram na versão LTC-ML2017. O desenvolvimento da interface gráfica traduziu uma grande mais-valia na análise da evolução da linha de costa, uma vez que permitiu a visualização de aspetos importantes que anteriormente eram difíceis de detetar. A janela de trabalho da interface foi desenvolvida de modo a permitir a visualização constante da zona de estudo, à medida que são alternadas as restantes secções de entrada de dados (num total de seis janelas), com o objetivo de auxiliar o utilizador na definição de todas as variáveis intervenientes nas simulações em estudo. Alguns parâmetros característicos da água e dos sedimentos, bem como escolhas de formulações foram conduzidos para janelas adicionais, preenchidas por defeito, que o utilizador só altera caso considere pertinente. Os resultados da simulação são apresentados numa janela única, que contém informação sobre os resultados da evolução da batimetria/topografia do domínio de cálculo, evolução da posição da linha de costa, características da onda na rebentação, perfis transversais e acesso aos ficheiros de AutoCAD® e Excel®. As alterações introduzidas no algoritmo de cálculo correspondem à criação de novos ficheiros de saídas de resultados, inclusão de novas opções

para definir a sequência de leitura das coordenadas dos pontos da grelha que definem o domínio de cálculo, possibilidade de definição da profundidade de fecho e do espraiamento da onda através de um valor fixo (independente das características do clima de agitação), inclusão da possibilidade de saídas intermédias de resultados de batimetria e topografia e alteração do referencial para o cálculo da direção da onda na rebentação.

O módulo de pré-dimensionamento de estruturas foi descrito na secção 4.2 e resultou da melhoria e do aperfeiçoamento da ferramenta XD-Coast. Permite o pré-dimensionamento da secção transversal de uma estrutura costeira e, tendo por base os dados provenientes do módulo de evolução da linha de costa, possibilita a determinação do volume de material envolvido na implantação da solução. A secção 4.2 descreve a interface gráfica da nova versão do XD-Coast, que contempla as alterações necessárias e consequentes da integração deste módulo na ferramenta numérica COAST. A integração do módulo de pré-dimensionamento permitiu o cruzamento e conjugação de informações relevantes que desencadearam o desenvolvimento de uma nova janela de auxílio ao utilizador na escolha da altura de onda de projeto e o desenvolvimento de um algoritmo (e respetiva janela) de estimativa da contabilização do volume de material das estruturas. Foi ainda desenvolvida uma nova janela que sintetiza informação e auxilia o utilizador na definição do coeficiente de estabilidade da formulação de Hudson (1974). Note-se que, algumas das melhorias e alterações introduzidas na ferramenta XD-Coast são transversais à versão isolada e integrada, enquanto que outras, apenas dizem respeito à versão integrada.

A secção relativa à apresentação do módulo de custo-benefício (secção 4.3) descreve considerações relativas à quantificação dos custos de construção e manutenção das obras (incluindo considerações relativas à quantificação do número de galgamentos e danos associados) e relativas ao valor do território que permite quantificar benefícios da intervenção, sendo indicados alguns valores consultados na bibliografia (ajustados à realidade da costa Portuguesa). A interface desenvolvida permite dois tipos de análise: um balanço económico ou uma análise custo-benefício. No primeiro caso é realizado apenas um balanço económico da solução, que se traduz numa quantificação de custos associados à construção e à manutenção das intervenções de defesa costeira previstas e na quantificação de benefícios associados às áreas ganhas e perdidas, sem que seja feita uma comparação com outro qualquer cenário. Na segunda opção, a simulação importada do módulo de evolução

da linha de costa será comparada com o cenário de “não intervenção”, isto é, o cenário que equivale apenas à manutenção das obras já existentes no domínio de cálculo. Deste modo, os benefícios do cenário em análise são calculados por comparação da posição da linha de costa num determinado instante de tempo, com a posição da linha de costa do cenário de “não intervenção” obtida para o mesmo instante. A obtenção dos índices económicos do cenário em análise, *VAL* e *RBC* só é realizada depois do utilizador definir todos os parâmetros necessários à quantificação do valor associado aos custos das intervenções e ao valor do território do domínio de cálculo. Note-se que, a definição dos valores unitários deve resultar numa análise conjunta e ponderada de fatores económicos, sociais, ambientais, culturais, etc., questão muito complexa e que é da inteira responsabilidade do utilizador, com impactos significativos nos resultados.

No Capítulo 5 foram apresentados os resultados da análise do desempenho do modelo numérico LTC e da comparação com o modelo numérico GENESIS e com o modelo analítico de Pelnard-Considère (1956). Foi assim definido um caso de estudo hipotético (secção 5.1), com batimetria e topografia regulares para permitir um maior controlo dos fenómenos envolvidos na modelação numérica da evolução da linha de costa. Neste domínio de cálculo foi introduzido um esporão, provocando uma perturbação no evoluir da linha de costa.

Na análise do desempenho do modelo numérico LTC (secção 5.2) foi avaliada a evolução de diferentes parâmetros ao longo do tempo e em função da distância ao esporão: agitação marítima (altura e orientação da onda); dinâmica sedimentar (caudal sólido potencial e real e variação altimétrica do perfil em cada instante) e morfologia (*DoC*, profundidade de rebentação, linha de costa e limite de espraiamento). Foi verificado que, à exceção da morfologia, todos os restantes parâmetros analisados variaram dentro de um determinado intervalo de tempo, definido pelo instante em que se faz sentir o impacto do esporão no local analisado (variável consoante a distância ao esporão) e pelo instante de estabilização do comportamento da variável (constante ao longo de toda a extensão do litoral). Detetaram-se instabilidades numéricas na posição da linha de costa, mas estas não se devem ao algoritmo de balanço sedimentar do modelo, uma vez que a análise do comportamento dos parâmetros relativos à agitação marítima e dinâmica sedimentar permite concluir que estes estabilizam ao fim de cerca de 340 anos.

Apesar dos modelos numéricos LTC e GENESIS apresentarem os mesmos pressupostos de base (a teoria de “uma linha”), foram identificadas diferenças no algoritmo e no desempenho de ambos os modelos (secção 5.3). As principais diferenças consistiram no facto do modelo LTC atualizar a batimetria ao longo do tempo, enquanto que o GENESIS mantém fixa a forma do perfil transversal, e na forma de propagação da onda, já que o GENESIS permite recorrer a um modelo externo e o LTC propaga a onda internamente, de forma mais simplista. O impacto destas diferenças nas características das ondas na rebentação é pouco significativo no instante inicial, mas propaga-se com o evoluir do tempo de simulação.

A evolução da linha de costa a barlamar do esporão através da formulação analítica Pelnard-Considère (1956), avaliada na secção 5.4, depende, entre outros aspetos, do tempo de enchimento do esporão, que varia de forma inversamente proporcional ao coeficiente de transporte, linearmente com o valor da altura ativa do perfil transversal e diminui substancialmente com a consideração de climas de agitação mais energéticos. Foi verificado que os resultados obtidos com o modelo LTC são consistentes com o modelo analítico, apesar da linha de costa obtida com o modelo LTC evoluir mais lentamente (a consideração de um coeficiente de transporte mais elevado no modelo LTC poderia aproximar os resultados). Entre o modelo numérico GENESIS e o modelo analítico verificam-se diferenças no ritmo de evolução da linha de costa (também superior no modelo analítico), mas também ao nível da própria configuração.

No Capítulo 6 foi aplicada a ferramenta numérica desenvolvida a cenários hipotéticos, tendo por base dois objetivos distintos: demonstrar a versatilidade da COAST perante diferentes cenários de intervenção de defesa costeira; e avaliar o impacto que a definição de determinados parâmetros (dimensão, número e localização das estruturas, clima de agitação, horizonte temporal de análise, configuração do domínio de cálculo, valor económico do território, preço unitário dos materiais envolvidos, orçamento disponível, etc.) provoca na evolução da linha de costa e nos custos de intervenção associados. Ressalva-se que, os resultados obtidos para os cenários propostos são naturalmente dependentes de todos os pressupostos admitidos no modelo de evolução da linha de costa e no modelo de pré-dimensionamento das intervenções, bem como, dependentes das condições que reproduzem o domínio de cálculo, nomeadamente, o clima de agitação, a batimetria/topografia e o valor do território.

Foi inicialmente definido um cenário de referência (secção 6.1), baseado no caso de estudo do Capítulo 5, correspondente a uma situação de “não intervenção”, com um domínio de cálculo dividido em 3 zonas de território (zona de floresta, zona urbanizada e zona de dunas). A aplicação do módulo de evolução da linha de costa da COAST, para um horizonte temporal de 20 anos, demonstrou uma tendência de erosão persistente, com perdas avultadas de território, que resultam em perdas económicas na ordem dos 12 milhões de euros. Face ao panorama verificado no cenário de referência foram propostas soluções para a mitigação do problema da erosão costeira, baseadas nos quatro tipos de intervenção que a COAST disponibiliza: esporões, estruturas longitudinais aderentes, alimentações artificiais de praia e transposição artificial de areias. A aplicação da COAST a cada um dos cenários definidos pretendeu a avaliação do índice físico (caracterizado pelo balanço entre áreas de erosão e acreção no cenário de referência e no cenário em análise, ao fim dos 20 anos de simulação) e dos índices económicos (*VAL*, *RBC* e tempo de equilíbrio ou *break-even*) de cada uma das soluções.

O cenário de intervenção proposto com uma obra perpendicular à linha de costa (secção 6.2) foi composto por um esporão de 200 metros, localizado no limite sul da zona urbanizada. A aplicação da COAST ao cenário base resulta em perdas de território superiores ao cenário de referência (cerca de 4 ha). Apesar disso, os resultados da análise custo-benefício da implementação do esporão revelam uma solução economicamente vantajosa decorridos 7 anos de simulação. Foi avaliada a influência da incerteza associada à definição da agitação marítima, da batimetria do domínio de cálculo, do comprimento e da localização do esporão, do efeito da conjugação de vários esporões, do valor do território e da taxa de desconto, no comportamento físico e económico das soluções de intervenção de defesa costeira. Os resultados obtidos permitiram constatar que nem sempre é possível conciliar os melhores desempenhos, tendo simultaneamente em conta o fator físico e económico. Por este motivo, o principal objetivo de intervenção deve ser bem definido, maximizando determinados aspetos físicos ou económicos.

Para mitigação do problema de erosão costeira com recurso a estruturas longitudinais aderentes (secção 6.3) foi proposto um cenário com uma estrutura de 1 500 metros de comprimento, ao longo de toda a extensão da zona urbanizada. Esta solução apresenta vantagens, tanto ao nível físico como económico, uma vez que foi garantida a proteção da

frente urbanizada em risco, através da fixação da linha de costa ao longo da sua extensão, e verificados ganhos de território na ordem dos 20 ha em relação ao cenário de referência (ao fim dos 20 anos de simulação). Estes resultados representam uma redução de perdas de cerca de 5 milhões de euros. Foram definidos e analisados diferentes cenários, constatando-se que: a consideração de comprimentos inferiores ao cenário base resulta em índices físicos e económicos menos atraentes; a diminuição da cota de coroamento da estrutura promove o aumento do número de galgamentos e, apesar da redução dos custos de construção e manutenção (menor volume da estrutura) aumentam os custos devido aos danos nas zonas afetadas, desencadeando valores atuais líquidos ao fim de 20 anos mais baixos; o desempenho económico da conjugação de estruturas (esporão com estrutura longitudinal aderente) varia consoante o comprimento da estrutura longitudinal aderente, sendo superior para comprimentos de 500 e 1000 metros e inferior para a estrutura aderente com 1500 metros (comparativamente ao cenário base da obra longitudinal aderente).

O cenário base de alimentação artificial de areia proposto (secção 6.4) foi caracterizado pela deposição de 1 milhão de m³ de sedimentos, de 5 em 5 anos, numa extensão de 500 metros, centrada com a zona urbanizada. A análise do desempenho desta solução com a COAST demonstrou um balanço físico positivo de cerca de 23 ha e que, decorridos os 20 anos de horizonte temporal, foram evitadas perdas económicas na ordem dos 5 milhões de euros. Os resultados obtidos para os restantes cenários de alimentação artificial analisados permitiram verificar que: a deslocação e extensão da área de deposição na direção norte (em ambos os casos, 500 metros), traz vantagens do ponto de vista físico e económico; a deposição de um menor volume com maior frequência se traduz em maiores áreas de acreção, mas os maiores ganhos económicos correspondem à deposição de um maior volume de sedimentos de forma menos frequente; um maior volume proporciona maiores áreas de acreção ao longo do tempo e simultaneamente resulta num maior valor atual líquido ao fim de 20 anos; e que a solução só é economicamente vantajosa quando o custo do material de deposição é inferior a 3.45 €/m³.

A implantação de um sistema de transposição artificial de areias (secção 6.5) no limite norte da zona urbanizada, com um caudal de cerca de 90% da capacidade de transporte da agitação marítima e um custo de investimento de 3 milhões de euros (e de operação de 1 €/m³) foi o cenário base definido para este tipo de intervenção. Os resultados obtidos apresentam taxas

de recuo e áreas de erosão muito inferiores ao cenário de referência e, simultaneamente, menores perdas económicas ao fim dos 20 anos de simulação (cerca de 5 milhões e meio de valor atual líquido). A avaliação de variações em relação ao cenário base permitiu verificar que: deslocar o sistema 500 metros na direção norte, resulta num balanço positivo de áreas superior, mas, economicamente não é uma solução mais vantajosa; a consideração de um caudal de transposição superior resulta, simultaneamente, em melhores índices físicos e económicos; a análise dos custos de investimento e do custo unitário do material transposto mostram que, para as características do cenário base, a solução é vantajosa sempre que o custo inicial é inferior a 8 milhões e meio de euros (com custos unitários de 1.0 €/m³) e quando o custo unitário da operação de transposição é inferior a 2.8 €/m³ (com um custo de primeiro investimento de 3 milhões de euros).

De todos os 54 cenários testados no Capítulo 6 (considerando os cenários base e a variação das características que os definem), 4 referem-se a testes das características do terreno e da agitação marítima, 18 a variações de preços de materiais, custos de investimento inicial, custos ao longo do tempo de simulação e valores de território, e os restantes 32 correspondem à avaliação das características das intervenções (comprimento, localização, número de estruturas, volumes, etc.). Destes 32 últimos cenários (que incluem os cenários base de cada tipo de intervenção), 30 (aproximadamente 94%) são economicamente vantajosos ao fim dos 20 anos de simulação. No entanto, mesmo que do ponto de vista económico compense intervir, apesar do investimento nas intervenções, ao fim dos 20 anos de simulação verificam-se perdas de território em 28 dos 30 cenários (à exceção do cenário *iv.2* de alimentação artificial e do cenário *ii.3* da transposição artificial de areias, que ao fim de 20 anos, resultam em maiores áreas que as existentes no início da simulação).

Como nota final, ressalva-se que, o objetivo principal da análise dos diferentes cenários de intervenção não passou pela identificação da melhor solução a implementar no cenário de referência, mas sim, por, simultaneamente, evidenciar as potencialidades da ferramenta numérica COAST e avaliar o impacto físico e económico dos diferentes testes. Apesar disso, aplicada a ferramenta COAST a todos os cenários base, e tendo em conta as hipóteses e simplificações adotadas, foi verificado que, à exceção do caso do esporão, todos conduzem a uma menor área perdida ao fim dos 20 anos de simulação (apesar de em nenhum dos casos ser revertida a tendência de erosão junto à fronteira norte) e que o cenário base

economicamente mais atraente é a solução de intervenção composta pelo esporão, uma vez que, simultaneamente, apresenta o maior valor atual líquido ao fim dos 20 anos de simulação (cerca de 8 milhões de euros), o maior rácio entre benefícios e custos ($RBC = 3.31$) e corresponde ainda ao menor custo de investimento inicial e total e à solução que mais rapidamente atinge o ponto de equilíbrio (decorridos aproximadamente 7 anos de simulação).

7.2. Conclusões

O trabalho realizado nesta dissertação culminou no desenvolvimento de uma ferramenta numérica de análise de intervenções de defesa costeira, a *COAST: Coastal Optimization ASsessment Tool*, que reúne a capacidade de projetar a evolução da linha de costa ao longo do tempo (módulo de evolução da linha de costa), pré-dimensionar estruturas de defesa costeira (módulo de pré-dimensionamento) e estimar custos e benefícios, contribuindo para a obtenção de soluções otimizadas sustentadas (módulo de custo-benefício).

O ponto de partida para o desenvolvimento do módulo de evolução da linha de costa foi o modelo numérico LTC, para o qual foi desenvolvida uma interface gráfica em linguagem de programação C#. Concluiu-se que, o desenvolvimento da interface, para além de facilitar a interação entre o utilizador e o modelo, permitiu visualizar resultados e aspetos no comportamento das variáveis, até então difíceis de detetar no decorrer das simulações (evolução do comportamento ao longo do tempo e da linha de costa: das características da agitação marítima, da dinâmica sedimentar e da morfologia). A análise detalhada do comportamento destes parâmetros, através dos *outputs* da interface gráfica, permitiu detetar a presença de instabilidades numéricas com efeito na evolução da posição da linha de costa. No entanto, concluiu-se que as instabilidades verificadas não se devem ao algoritmo de balanço sedimentar do modelo, uma vez os parâmetros estabilizaram ao fim de 340 anos de simulação, pelo que se considera necessária a revisão do processo de distribuição de sedimentos em situação de acreção persistente (processo de atualização da batimetria e topografia para ajuste do perfil ativo com as zonas adjacentes).

Paralelamente à concretização da interface gráfica foram realizadas ligeiras alterações ao algoritmo do modelo numérico LTC que resultaram na versão LTC-ML2017. A criação de

novos ficheiros de saídas de resultados e a inclusão da possibilidade de saídas intermédias de resultados de batimetria e topografia foram alterações consequentes da interação entre o algoritmo e a interface gráfica. A inclusão de novas opções para definir a sequência de leitura das coordenadas dos pontos da grelha que definem o domínio de cálculo teve como objetivo complementar uma opção já existente no modelo. A alteração do referencial para o cálculo da direção da onda na rebentação surgiu em consequência de problemas detetados num cenário de simulação na presença de alimentações artificiais de sedimentos que não intersectavam a linha de rebentação. A possibilidade de definição da profundidade de fecho e do espraçamento da onda através de um valor fixo (independente das características do clima de agitação) foi implementada de modo a permitir uma comparação do desempenho do modelo LTC com o modelo numérico GENESIS.

A comparação dos modelos numéricos LTC e GENESIS demonstrou pequenas diferenças nas características das ondas na rebentação no instante inicial, mas verificou-se que estas se propagam de forma significativa no tempo. Considera-se que as diferenças de pressupostos entre os dois modelos numéricos, nomeadamente, na forma de propagação da onda e na definição da orientação da linha de costa adotada por ambos os modelos podem ser a causa das diferenças observadas. Quando comparados ambos os modelos numéricos com o modelo analítico de Pelnard-Considère (1956), foi verificado que os resultados do LTC são consistentes com os resultados obtidos com o modelo analítico (apesar de evoluírem a um ritmo diferente). No entanto, na comparação entre o GENESIS e o modelo analítico são observadas diferenças, não só no ritmo de evolução da linha de costa (também superior no modelo analítico), mas também ao nível da própria configuração da linha de costa.

A análise do desempenho do modelo numérico LTC e a comparação com o modelo numérico GENESIS e com o modelo analítico de Pelnard-Considère (1956) permitiu verificar a necessidade de melhoria de alguns aspetos, mas, pode concluir-se que, apesar das diferenças de comportamento, o modelo LTC apresenta capacidade para reproduzir aproximadamente situações reais, validando as análises resultantes do módulo de evolução da linha de costa da COAST.

O módulo de pré-dimensionamento teve como ponto de partida a ferramenta XD-Coast, que foi ajustada de forma a ser possível a sua integração na ferramenta numérica COAST, fazendo a ponte com os dados provenientes do módulo de evolução da linha de costa. Foi

identificado como parâmetro condicionante no pré-dimensionamento do peso unitário dos blocos a colocar no manto resistente, a ação definida pela agitação marítima, pelo que foi desenvolvida uma nova janela, com o objetivo de auxiliar o utilizador na definição da altura de onda de projeto. Foi também desenvolvida uma janela de auxílio para a definição do coeficiente de estabilidade a considerar na formulação de Hudson (1974). Ainda no módulo de pré-dimensionamento, foi incorporada uma metodologia para estimativa da quantificação do volume de material da estrutura, que permite a determinação dos custos de intervenção no módulo de custo-benefício.

A metodologia definida e programada no módulo de custo-benefício recorre aos resultados do cálculo do volume de material (módulo de pré-dimensionamento) e aos resultados de áreas de acreção e erosão ao longo do tempo (módulo de evolução da linha de costa). O módulo de custo-benefício apenas pode ser aplicado de forma integrada na COAST (contrariamente ao módulo de evolução da linha de costa e ao módulo de pré-dimensionamento, que podem ser utilizados isoladamente), pois os resultados da análise custo-benefício, que se resumem ao cálculo do valor atual líquido e do rácio benefício-custo da solução, dependem dos dados provenientes dos outros módulos da COAST e da informação fornecida pelo utilizador (zonamento e valor atribuído ao território, custo unitário dos materiais, custo e frequência da manutenção das estruturas, etc.). Conclui-se, portanto, que apesar da ferramenta COAST permitir uma análise, comparação e otimização de soluções, tendo em conta os custos e benefícios envolvidos, os resultados são dependentes da sensibilidade do utilizador, que deve ponderar devidamente os valores introduzidos, sustentando-os do ponto de vista económico, social, ambiental, etc.

A aplicação da COAST a casos de estudo hipotéticos permitiu comprovar a versatilidade e potencialidades da ferramenta numérica, uma vez que admite a consideração de vários tipos de intervenção de defesa costeira e a variação dos parâmetros que caracterizam as soluções, permitindo a avaliação do impacto que os diferentes cenários provocam na evolução da linha de costa e nos custos de intervenção associados.

A ferramenta numérica desenvolvida permitiu uma comparação de desempenhos e a obtenção de algumas conclusões, válidas para as condições e hipóteses adotadas nos cenários definidos, não devendo, por isso, ser generalizadas. Os resultados obtidos com a aplicação da COAST aos casos de estudo hipotéticos permitem concluir que a escolha da melhor

solução de intervenção de defesa costeira é complexa, e depende, essencialmente, de uma conjugação entre fatores físicos, económicos, sociais, culturais, ambientais, etc., uma vez que, foi constatado que a solução que promove menores perdas de território ao fim de 20 anos é uma das financeiramente menos atraente, e a melhor solução do ponto de vista económico resulta em perdas de território ainda superiores ao cenário de “não intervenção”. Apesar da dificuldade muitas vezes associada à escolha da melhor solução de intervenção, a aplicação da COAST aos cenários base propostos demonstrou que, ao fim dos 20 anos de simulação estipulados como horizonte temporal, é economicamente vantajoso intervir.

Como conclusão final considera-se que o desenvolvimento da interface gráfica para o modelo numérico LTC e a integração da capacidade de projetar a evolução da linha de costa, pré-dimensionar estruturas e quantificar custos e benefícios, que culminaram no desenvolvimento da ferramenta numérica COAST, traduziu-se num meio importante para sustentar e auxiliar as entidades responsáveis nas opções estratégicas adotadas para a gestão do litoral.

7.3. Desenvolvimentos Futuros

Com o agravamento dos problemas de erosão costeira é cada vez mais importante aprofundar o estudo de estratégias de mitigação através da análise do desempenho de intervenções de defesa costeira. Com esta dissertação foi desenvolvida a ferramenta COAST, que permite, de forma integrada, a projeção da evolução da linha de costa, o pré-dimensionamento das estruturas e uma estimativa de custos e de benefícios das soluções. No entanto, e apesar do contributo positivo que poderá proporcionar na melhoria da gestão do litoral, são diversas as melhorias que podem ser implementadas na ferramenta numérica desenvolvida e que podem contribuir para a melhoria do desempenho da capacidade de simulação numérica de diferentes estratégias de intervenção de defesa costeira.

O desempenho do modelo numérico LTC pode continuar a ser melhorado, quer através da introdução de novas funcionalidades de modelação, quer pelo desenvolvimento da própria interface. A aplicação do modelo numérico a casos reais pode contribuir para a sua validação, sendo para isso fundamental a existência de dados que permitam a calibração aos locais de estudo.

Relativamente ao algoritmo do modelo numérico LTC, verifica-se a necessidade de revisão do processo de atualização de cotas em situação de acreção persistente. Importa também avaliar a consequência nos resultados da consideração de um pressuposto diferente para a definição da linha de costa inicial na proximidade de esporões (semelhante ao considerado no modelo numérico GENESIS, Figura 7.1), com consequência direta nas características da onda na rebentação.

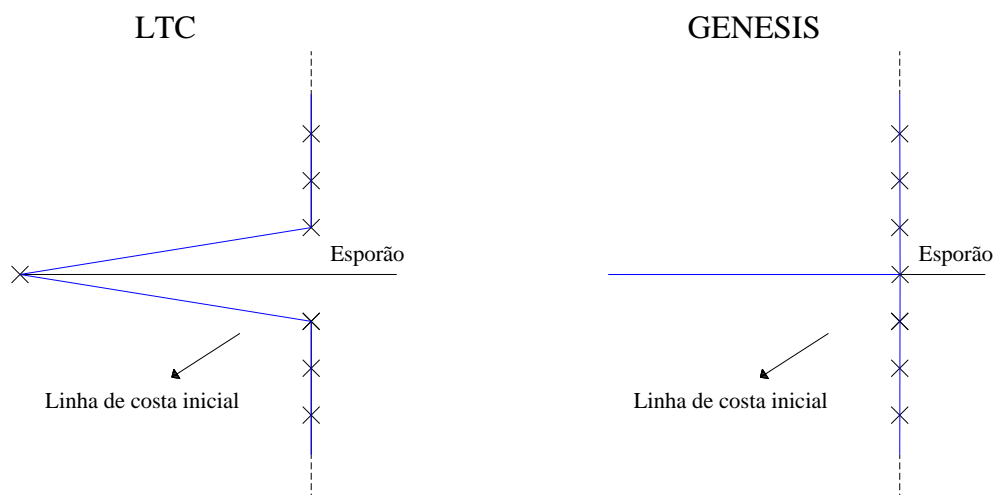


Figura 7.1: Diferença de pressuposto na definição da linha de costa inicial na vizinhança de um esporão, no LTC e no GENESIS.

Ainda relativamente ao algoritmo de evolução da linha de costa, considera-se pertinente deixar em aberto ao utilizador a opção de introdução das características do período de onda: manualmente ou calculadas internamente pelo modelo (opção já disponível). Deve para isso ser incorporada uma nova variável no código, que define a escolha do utilizador relativamente ao cálculo do período de onda. Uma outra mais-valia para o modelo passa pela incorporação da possibilidade de considerar a introdução das intervenções de defesa costeira em instantes de tempo definidos pelo utilizador (estando essa opção para já disponível apenas para as alimentações artificiais de praia). A definição de cenários que pressupõem a construção de estruturas de defesa costeira em diferentes momentos do tempo de simulação pode ser uma solução vantajosa para a mitigação do problema da erosão costeira.

No que diz respeito à interface gráfica do módulo de evolução da linha de costa, a apresentação dos resultados deve ser melhorada e explorada, possibilitando, por exemplo, a representação de gráficos dos resultados. Relativamente às janelas de entrada de dados, o

processo pode ser otimizado através, por exemplo, da importação das características de cada intervenção diretamente através do Excel®. A possibilidade de importação direta de uma imagem do domínio de cálculo (através das valências da Google®), georreferenciando o ponto de origem do domínio de cálculo seria uma mais-valia à análise da evolução da linha de costa em contexto real.

O pré-dimensionamento de estruturas costeiras é um processo complexo, uma vez que a informação existente na bibliografia é dispersa, muitas vezes contraditória e essencialmente baseada em formulações empíricas. Deste modo, ferramentas de cálculo automático que contenham o máximo de formulações e conceitos programados, serão uma mais-valia para os utilizadores. Assim, enumeram-se de seguida algumas questões que podem, eventualmente, ser incorporadas no módulo de pré-dimensionamento para aumentar a sua versatilidade e potencialidade: 1) prever a hipótese de consideração de um peso unitário dos blocos a colocar no manto resistente no lado abrigado das estruturas, inferior ao lado exposto à agitação; 2) introduzir considerações relativas ao dimensionamento do pé-de-talude das estruturas (aspeto particularmente importante na presença de estruturas implantadas a profundidades reduzidas e em mantos de camada única); 3) calcular o grau de estabilidade da estrutura; 4) estudar a influência do período da onda e da duração da tempestade na estabilidade do manto resistente das estruturas e incluir o seu efeito no cálculo do peso unitário dos blocos (essencialmente através da formulação de Hudson, 1974); 5) incluir mais formulações, baseadas noutros autores, para a determinação do peso unitário dos blocos a colocar no manto resistente. Note-se que algumas das sugestões referidas resultam de dificuldades/necessidades constatadas por projetistas de obras de defesa costeira.

Relativamente ao módulo de custo-benefício, podem ser introduzidos por defeito valores de referência para as diferentes zonas de território, com base em estudos existentes, de forma a orientar o utilizador acerca dos valores a considerar. O mesmo se aplica para os custos unitários dos materiais. No entanto, os resultados das análises custo-benefício de cada solução devem depender da sensibilidade do utilizador, que deve definir, ponderadamente, os valores a considerar, tendo em conta todos os fatores económicos, sociais, culturais e ambientais relevantes no caso de estudo.

A interação da ferramenta numérica COAST com o utilizador pode ser melhorada no caso de serem previstos mais idiomas (o algoritmo da interface já prevê essa opção) e a

possibilidade de executar várias simulações em simultâneo. A geração automática de um ficheiro (Word® ou *.pdf*), no final de cada simulação, com a descrição de todos os dados da simulação, dados de entrada, parâmetros definidos, formulações escolhidas, resultados obtidos e imagens geradas será um contributo útil para os projetistas de intervenções de defesa costeira. Refere-se ainda a necessidade de realização de testes da ferramenta numérica noutros contextos, com vista à sua validação e uso generalizado.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação representa um contributo para a otimização do desempenho global de soluções de intervenção de defesa costeira, através do desenvolvimento de uma ferramenta numérica que apoia e sustenta as tomadas de decisão das entidades responsáveis pelo planeamento e gestão das zonas costeiras. No entanto, muitos aspetos podem ainda ser incorporados, desenvolvidos e melhorados, na procura de melhores soluções e de um planeamento estratégico do litoral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alexandrakis, G., Manasakis, C. e Kampanis, N. (2015). Valuating the effects of beach erosion to tourism revenue. A management perspective. *Ocean & Coastal Management*, Volume: 111, 11 p. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2015.04.001.

Almeida, P. (2011). Análise económico-ambiental de alimentação artificial de praias. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 84 p.

Alves, T. (2012). Análise económico-ambiental espacial de esporões no centro de Portugal. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 119 p.

APFF (2015). Estudo da Dinâmica Sedimentar na Embocadura da Barra do Porto da Figueira da Foz. Relatório Final, Novembro de 2015, Universidade de Aveiro, Portugal, 141 p.

APFF (2017). Estudo de Cenários de Dragagens e Locais de Deposição de Sedimentos na Embocadura da Barra do Porto da Figueira da Foz. Relatório Final, Outubro de 2017, Universidade de Aveiro, Portugal, 91 p.

Bailard, J. A. (1981). An Energetics Total Load Sediment Transport Model for a Plane Sloping Beach. *Journal of Geophysical Research*, Vol 86, No. C11, pp. 10938-10954.

Bailard, J. A. (1984). A Simplified Model for Longshore Sediment Transport. 19th International Coastal Engineering Conference Proceedings, ASCE, New York, pp. 1454-1470.

Bakker, W. T. e Edelman, T. (1965). The Coastline of River Deltas. Proceedings of the 9th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 199-218. Citado por Rosati *et al.*, (2002).

Bakker, W. T. (1968). The Dynamics of a Coast with a Groyne System. 11th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 492-517.

Banyard, L. S. (2002). Breakwaters, Coastal Structures and Coastlines. Paper 15: Design of rock groynes and sand beach replenishment under strong tidal flows, N. W. H. Allsop, pp. 191-202.

Baptista, P., Coelho, C., Pereira, C., Bernardes, C. e Veloso-Gomes, F. (2014). Beach Morphology and Shoreline Evolution: Monitoring and Modeling Medium-Term Responses (Portuguese NW Coast Study Site). *Coastal Engineering Journal*, Elsevier, pp. 23-37.

Barata, P. e Pinto, B. (2016). ClimAdaPT.Local - Manual Avaliação Económica de Opções de Adaptação. Lisboa. ISBN: 978-989-99697-4-2.

Bastos, D. N. J. (2016). Relação entre o Transporte Sólido Longitudinal e o Clima de Agitação. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 93 p.

Battjes, J. A. e Janssen, J. P. F. M. (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves. Proceedings of the 16th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, New York, pp. 569-578.

Bayram, A., Larson, M. e Hanson, H. (2007). A new formula for the total longshore sediment transport rate. Coastal Engineering, Volume 54, 9, pp. 700-710. ISBN: 0378-3839.

Bertin, X., Prouteau, E. e Letetrel, C. (2013). A significant increase in wave height in the North Atlantic Ocean over the 20th century. A. Global and Planetary Change, 106, pp. 77-83.

Bertucco, G. (2014). Modeling the Diffraction Effects of Coastal Structures in the Shoreline Evolution. Dissertação de Mestrado, Università Degli Studi Di Padova, Dipartimento di Ingegneria Civile, Padova, Itália, 125 p.

Birkemeier, W. A. (1985). Field Data on Seaward Limit of Profile Change. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 111:3, pp. 598-602.

Bodge, K. R. e Dean, R. G. (1987). Short-term impoundment of longshore transport. Proc. Coast. Sediments' 87, ASCE, Reston, pp. 468-483. Citado por Wang e Kraus (1999).

Bodge, K. R. e Kraus, N. C. (1991). Critical examination of longshore transport rate magnitude. Proc., Coast. Sediments '91, ASCE, Reston, pp. 139-155. Citado por Wang e Kraus (1999).

Bossard, M., Feranec, J. e Otahel, J. (2000). CORINE land cover technical guide - addendum 2000. 284 EEA Technical Report No. 40/2000, European Environment Agency, 105 p.

Breil, P., Grimm, N. B. e Vervier, P. (2008). Surface Water - Groundwater Exchange Processes and Fluvial Ecosystem Function: An Analysis of Temporal and Spatial Scale Dependency. In Hydroecology and Ecohydrology: Past, Present and Future, eds: P. J. Wood, D. M. Hannah and J. P. Sadler, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester. DOI: 10.1002/9780470010198.ch6.

Brouwer, R. (2000). Environmental value transfer: state of the art and future prospects. Ecological Economics, 32, pp. 137-152.

Bruun, P. (1954). Coastal Erosion and Development of Beach Profiles. Technical Memorandum n.44, Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, 79 p.

BSI (1999). British Standard Institution. Maritime Structures - Part 7: Guide to the design and construction of breakwaters. BS 6349-7:1991, ISBN: 0580199908, 52 p.

Burcharth, H. (1994). The Design of Breakwaters, Coastal, Estuarial and Harbour Engineers' Reference Book. Londres, Reino Unido, pp. 381-424. Citado por Taveira-Pinto e Neves (2003).

Burcharth, H. F. e Hughes, S. A. (2006). Fundamentals of Design. Coastal Engineering Manual, Part VI: Design of Coastal Project Elements, Chapter 5, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 312 p.

Carpinteiro, F. (2009). Transposição Artificial de Areias na Barra de Aveiro. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 84 p.

Castanho, J. P. (1962). Métodos Empregados na Defesa contra a Erosão Costeira. Memória nº 196, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 22 p.

CIRIA, C. C. (2007a). The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition). C683, CIRIA, Londres.

CIRIA, C. C. (2007b). The Rock Manual. The Use of Rock in Hydraulic Engineering (2nd Edition). Chapter V - Physical Processes and Design Tools, C683, CIRIA, Londres, pp. 487-756.

CIRIA, C. C. (2007c). The Rock Manual. The Use of Rock in Hydraulic Engineering (2nd Edition). Chapter VI - Design of Marine Structures, C683, CIRIA, Londres, pp. 773-908.

CLI (2017). Concrete Layer Innovations. <http://www.concretelayer.com/fr/calculateur>. Última visualização a 26 de Maio de 2017.

Coelho, C., Taveira-Pinto, F., Veloso-Gomes, F. e Pais-Barbosa, J. (2004). Coastal Evolution and Coastal Works in the southern part of Aveiro Lagoon Inlet, Portugal. Proceedings of the 29th International Conference on Coastal Engineering, Lisboa, Portugal, Vol. 4, pp. 3914-3926.

Coelho, C. (2005). Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 404 p.

Coelho, C. e Veloso-Gomes, F. (2005a). Um Modelo de Previsão de Evolução de Zonas Costeiras Arenosas, a Médio e Longo Termo. 4º Congresso Luso Moçambicano de Engenharia, Maputo, Moçambique, pp. 425-439.

Coelho, C. e Veloso-Gomes, F. (2005b). Classificação de Vulnerabilidades e Riscos como Contributo no Planeamento das Zonas Costeiras. Trabalhos do III Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Maputo, Moçambique.

Coelho, C., Silva, R., Veloso-Gomes, F. e Taveira-Pinto, F. (2006a). Avaliação de Riscos. Modelos de Previsão da Evolução da Configuração Costeira. Recursos Hídricos e Ambiente 1as Jornadas de Hidráulica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, pp. 17-25. ISBN 978-989-95557-0-9.

Coelho, C., Silva, R., Veloso-Gomes, F. e Taveira-Pinto, F. (2006b). A Vulnerability Analysis Approach for the Portuguese West Coast. Risk Analysis 2006 - Fifth International Conference on Computer Simulation in Risk Analysis and Hazard Mitigation, Malta, edited by V. Popov & C.A. Brebbia, Wessex Institute of Technology, UK, WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol. 91, pp. 251-262. ISBN 1-84564-172-8.

Coelho, C., Veloso-Gomes, F. e Silva, R. (2006c). Shoreline Coastal Evolution Model: Two Portuguese Case Studies. Coastal Engineering 2006, Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering, San Diego, USA, Vol. 4, pp. 3430-3441. ISBN 978-981-270-992-9.

Coelho, C., Silva, R. e Veloso-Gomes, F. (2006d). Shoreline Evolution Model – A Tool to Compare Coastal Protection Measures. Coastal Dynamics, Geomorphology and Protection, 8th International Conference LITTORAL 2006 - Coastal Innovations and Initiatives, Gdansk, Polónia, pp. 115-123. ISBN 83 88617 82-6.

Coelho, C., Silva, R., Veloso-Gomes, F. e Taveira-Pinto, F. (2009). Potential Effects of Climate Change on NW Portuguese Coastal Zones. ICES Journal of Marine Science 66, pp. 1497-1507.

Coelho, C., Silva, R., Veloso-Gomes, F. e Rodrigues, L. (2010). Artificial nourishment and sand by-passing in the Aveiro inlet, Portugal - Numerical studies. Proceedings of the Coastal Engineering Conference.

Coelho, C., Lima, M. e Veloso-Gomes, F. (2013). Relationship between cross-shore active profile and one-line shoreline evolution models performance. Journal of Coastal Research, SPEC. ISSUE 65, pp. 2107-2112.

Coelho, C. e Pereira, C. (2013). Previsão de Recuo da Linha de Costa. In: Dias, J. M. & Alves, F. L. (Eds), Risco de Cheias e Estratégias de Adaptação para a Zona Costeira e Lagunar da Ria de Aveiro, Universidade de Aveiro, CESAM, Aveiro, pp. 22-26.

Coelho, C., Cruz, T. e Roebeling, P. (2016). Longitudinal revetments to mitigate overtopping and flooding: Effectiveness, costs and benefits. In: *Ocean and Coastal Management*, Volume 134, pp. 93-102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.09.022>.

Cordeiro, M. B. (2016). Custos Associados a Diferentes Estratégias de Adaptação à Erosão Costeira. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 146 p.

Costa, L., Tekken, V. e Kropp, J. (2009). Threat of sea level rise: Costs and benefits of adaptation in European Union coastal countries. J. O. C. In: RESEARCH, ed. SI 56 - Proceedings of the 10th International Coastal Symposium, Lisboa, Portugal, pp. 223-227.

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P. e van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. In: *Nature*, Nature Publishing Group, Volume: 387, 253 p.

Cowell, P. J., Hanslow, D. J. e Meleo, J. F. (1999). The Shoreface. *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*, Edited by Andrew D. Short, University of Sydney, Sydney, Australia, pp. 39-71. Citado por Coelho (2005).

CRESS (2016). Coastal and River Engineering Support System. <http://www.cress.nl/About.aspx>. Última visualização a 25 de Maio de 2016.

Cruz, T., Pereira, C., Coelho, C. e Roebeling, P. (2015). Desempenho de Obras Longitudinais Aderentes no Concelho de Ovar, Portugal. *Trabalhos do VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, 14 a 16 de Outubro, Aveiro, Portugal, 1B2_Artigo_045, 15 p. ISBN 978-989-8509-13-0.

Cruz, T. S. (2015). Análise Custo-Benefício de Obras Longitudinais Aderentes. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 160 p.

Dabees, M. A. e Kamphuis, J. W. (1998). ONELINE, A Numerical Model for Shoreline Change. In: 26th International Conference on Coastal Engineering, Copenhagen, Denmark, American Society of Civil Engineers, pp. 2668-2681.

Davis, S. e Skaggs, L. (1992). Catalog of residential depth-damage functions, used by the Army Corps of Engineers in flood damage estimation. Institute for Water Resources, US Army Corps of Engineers, Fort Belvoir, USA. Citado por Cruz (2015).

De Jong, T. J. (1996). Stability of Tetrapods at Front Crest and Rear of a Low-Crested Breakwater. Delft Hydraulics Publication No. 453, Delft Hydraulics Laboratory, The Netherlands. Citado por CIRIA (2007).

Dean, R. G. (1977). Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts. Ocean Engineering Report n.o 12, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark, USA.

Dean, R. G. (1984). Principles of Beach Nourishment. Chapter 11, CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion, P. D. Komar, ed., CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, pp. 217-232. Citado por Rosati *et al.*, (2002).

Dean, R. G. e Dalrymple, R. A. (1994). Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. Advanced Series on Ocean Engineering, Englewood Cliffs, New Jersey: World Scientific, 368 p. ISBN 978-981-02-0421-1.

Deltares (2016). Deltares. Enabling Delta Life. BREAKWAT Software. <https://www.deltares.nl/en/software/breakwat/>. Última visualização a 25 de Maio de 2016.

Deltares (2017). Deltares. Enabling Delta Life. UNIBEST Software. <https://www.deltares.nl/en/software/unibest-cl/>. Última visualização a 30 de Outubro de 2017.

DHI (2009). An Integrated Modelling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics. A Short Description and Tutorial. 14 p.

Di Bona, S. (2013). Modeling of coastal evolution: long term simulation in the Vagueira region (Portugal). Dissertação de Mestrado, Universidade de Padova, Padova, Itália, 141 p.

Dias, J. M., Lopes, C. L., Coelho, C., Pereira, C., Alves, F. L., Sousa, L. P., Antunes, I. C., Fernandes, M. L. e Philips, M. R. (2014). Influence of mean sea level rise on Ria de Aveiro littoral: adaptation strategies for flooding events and shoreline retreat. A.N. and Cooper In: Green, J.A.G. (eds.), Proceedings 13th International Coastal Symposium (Durban, South Africa), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 70, pp. 320-325. ISSN 0749-0208.

DMC (2014). Guidelines for Xbloc Concept Designs. Delta Marine Consultants, Gouda, Holanda, Março de 2014, 24 p.

Ferreira, A. M. R. (2016). Evolução Morfológica do Litoral após Alimentações Artificiais de Sedimentos. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 158 p.

Fleming, C. A., Allsop, N. W. H., Leeming, M. B., Sharp, B. N., Slater, D., Williams, A. J. e Titman, P. (1998). Concrete in Coastal Structures. Edited by Richard T. L. Allen, Thomas Telford, London, 301 p.

Fontão, F. (2008). Intervenções de defesa em zonas costeiras. Projeto de final de curso em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro,

French, P. W. (2001). Coastal Defences: processes, problems and solutions. Routledge, Londres, 366 p.

Gravens, M. B., Kraus, N. C. e Hanson, H. (1991). GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change. Report 2, Workbook and System User's Manual, USACE, 431 p.

Green, D. R. e King, S. D. (2003). Progress in geographical information systems and coastal modeling: an overview (chapter 21). In: V. C. Lakhan (Eds.), Advances in Coastal Engineering, Elsevier Oceanography Series, Elsevier, Volume 67, pp. 553-580. ISBN: 0422-9894.

GTL (2014). Gestão da Zona Costeira - O Desafio da Mudança. Relatório do Grupo de Trabalho do Litoral, Dezembro de 2014, 237 p.

Guimarães, A. (2014). Ensaio em Modelo Físico e Numérico do Impacto de um Esporão. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 123 p.

Guimarães, A., Lima, M., Coelho, C. e Veloso-Gomes, F. (2015). Análise Paramétrica do Transporte Sedimentar a Barlamar de um Esporão: Impacto na Evolução da Linha de Costa. Trabalhos do VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, 14 a 16 de Outubro, Aveiro, Portugal, 2A2_Artigo_033, 15 p. ISBN 978-989-8509-13-0.

Guimarães, A., Lima, M., Coelho, C., Silva, R. e Veloso-Gomes, F. (2016). Groin impacts on updrift morphology: Physical and numerical study. Coastal Engineering, 109, pp. 63-75.

Hallermeier, R. (1978). Uses for a Calculated Limit Depth to Beach Erosion. Proceedings, 16th Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers, pp.1493-1512.

Hallermeier, R. (1981). Terminal settling velocity of commonly occurring sand grains. *Sedimentology*, 28(6), pp. 859–865. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1981.tb01948.x.

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. (1988). GENESIS - A Generalized Shoreline Change Numerical Model. *Journal of Coastal Research*, 5(1), Charlottesville (Virginia), ISSN 0749-0208, pp. 1-27.

Hanson, H. e Kraus, N. C. (1989). GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change. Report 1, Technical Reference, Technical Report CERC-89-19, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS, 185 p.

Hanson, H. e Kraus, N. C. (1991). GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change. Report 2, Workbook and System User's Manual, U.S. Army Corps of Engineers, 431 p.

Hanson, H., Aarninkhof, S., Capobianco, M., Jiménez, J. A., Larson, M., Nicholls, R. J., Plant, N. G., Southgate, H. N., Steetzel, H. J., Stive, M. J. F. e De Vriend, H. J. (2003). Modelling of Coastal Evolution on Yearly to Decadal Time Scales. *JCR*, 19, 4, pp. 790-811.

Hanson, H. e Kraus, N. C. (2011). Long-Term Evolution of a Long-Term Evolution Model. In: Roberts, T.M., Rosati, J.D., and Wang, P. (eds.), Proceedings, Symposium to Honor Dr. Nicholas C. Kraus, *JCR*, Special Issue, No. 59, West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208, pp. 118-129.

Hanson, H. (2015). Modeling Shoreline Evolution. Apontamentos de aula, Universidade de Lund, Lund, Suécia, Março de 2015.

Hendriyono, W., Wibowo, M., Hakim, B. A. e Istiyanto, D. C. (2015). Modeling of Sediment Transport Affecting the Coastline Changes due to Infrastructures in Batang - Central Java. *Procedia Earth and Planetary Science*, 14, pp. 166-178.

Henriques, J. P. V. (2007). Coastline evolution at the south of the Figueira da Foz harbour: Application of a mathematical computational model. *Resumo Técnico*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 11 p.

Herbich, J. B. (2000). Handbook of Coastal Engineering. Chapter 8: Coastal Protection Methods, McGraw-Hill, New York, U. S. A, 66 p.

Hinkel, J. (2005). DIVA: an iterative method for building modular integrated models. *J. Adv. Geosci.*, 4, pp. 45-50.

Hollings, B. (2006). Cooks Beach Coastal Erosion Management Strategy: Part I - Strategy. Environment Waikato Technical Report 2006/21, 18 p.

Hudson, R. Y. (1974). Concrete Armor Units for Protection Against Wave Attack. Miscellaneous, Paper H-74-2, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. Citado por Burcharth e Hughes (2006).

Jensen, O. J. (1984). Monograph on Rubble Mound Breakwaters. Danish Hydraulic Institute, Agern Allé 5, DK-2970 Horsholm, Dinamarca,

Jorge, A. (2010). Análises de incidências ambientais e de custo-benefício no estudo de alternativas de intervenções de defesa costeira versus retirada planejada de aglomerados urbanos em risco. Caso de Estudo Esmoriz/Cortegaça. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 89 p.

Kamphuis, J. K., Davies, M. H., Nairn, R. B. e Sayao, O. J. (1986). Calculation of Littoral Sand Transport Rate. *Coastal Engineering*, Nº 10, pp. 1-21.

Kamphuis, J. W. e Readshaw, J. S. (1978). A model study of alongshore sediment transport rate. *Proceedings of the 16th ICCE, ASCE, Reston*, pp. 1656-1674.

Kamphuis, J. W. (1991). Alongshore Sediment Transport Rate. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Volume 117, pp. 624-641.

Kamphuis, J. W. (2000). Introduction to Coastal Engineering and Management. *Advanced Series on Ocean Engineering*, Singapore: World Scientific, 437 p. ISBN 981-02-3830-4.

King, D. B. e Galvin, C. J. (2002). Coastal Sediment Properties. In: Walton, T. (editor), *Coastal Engineering Manual, Part III, Coastal Sediment Processes, Chapter III-1, Engineer Manual 1110-2-1100*, U. S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 119 p.

Klein, R. J. T. e Hinkel, J. (2009). Global Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Experience from DINAS-COAST. Chapter 5, In: Assessing Vulnerability to Global Environmental Change, Edited by: Patt, A., Schröter, D., Richard J. T., K., de la Vega-Leinert, A., Leemans, R., Schellnhuber CBE, H., London: Routledge, 18 p.

Komar, P. D. e Inman, D. L. (1970). Longshore sand transport on beaches. Journal of Geophysical Research, Vol. 75, No. 30, pp. 5514-5527.

Kramer, J. (2005). UNIBEST CL+ 6.0, User & Theoretical Manual. WL| delft hydraulics, 155 p.

Kraus, N. C., Isobe, M., Igarashi, H., Sasaki, T. O. e Horikawa, K. (1982). Field Experiments on Longshore Sand Transport in the Surf Zone. Proceedings, 18th International Conference on Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers, pp. 969-988.

Kraus, N. C. (1983). Applications of a Shoreline Prediction Model. Proceedings of Coastal Structures '83, American Society of Civil Engineers, pp. 632-645.

Kraus, N. C. (1984). Estimate of Breaking Wave Height behind Structures. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 110:2, pp. 276-282.

Kraus, N. C. (1989). Beach Change Modeling and the Coastal Planning Process. Proceedings Coastal Zone '89, American Society of Civil Engineers, pp. 553-567.

Larson, M., Hanson, H. e Kraus, N. C. (1987). Analytical solutions of the one line model of shoreline change. Vicksburg, Mississippi: Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Waterways Experiment Station, Report TR-CERC-87-15, 95 p.

LeMéhauté, B. e Brebner, A. (1961). An Introduction to Coastal Morphology and Littoral Processes. Report No. 14, Civil Engineering Department, Queens University at Kingston, Ontario, Canada. Citado por Rosati *et al.* (2002).

Liberty, J. e MacDonald, B. (2006). Learning C# 2005. O'REILLY, 528 p.

Lima, M. (2011). Programação de Métodos de Pré-Dimensionamento de Obras Costeiras. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 131 p.

Lima, M., Coelho, C. e Cachim, P. (2011). Programação de Métodos de Pré-Dimensionamento de Obras de Defesa Costeira. 6 e 7 de Outubro, Porto, Portugal, Comunicação 26, 7as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, 18 p.

Lima, M., Coelho, C. e Cachim, P. (2013). Programming Methods for Pre-Design of Coastal Structures. V International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, Marine 2013, 29 a 31 de Maio, Hamburgo, Alemanha, pp. 868-879. ISBN: 978-849414074-7.

Lima, M. e Coelho, C. (2017). O modelo de evolução da linha de costa LTC: pressupostos, evolução, validação e aplicação. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, Volume 17, Issue 1, pp. 5-17. ISSN 1646-8872.

Linham, M. M. e Nicholls, R. J. (2010). Technologies for Climate Change Adaptation: Coastal Erosion and Flooding. TNA Guidebook Series, UNEP Risø Centre on Energy, Climate and Sustainable Development, Roskilde, Denmark,

Losada, M. e López, C. (2000). Mound breakwater stability versus wave reflection. *Coastal Structures '99*, Santander, Espanha, Inigo J. Losada, Balkema, Vol. 1, pp. 283-288. Citado por Taveira-Pinto e Neves (2003).

Loureiro, H. (2011). C# 4.0 com Visual Studio 2010. Curso completo. FCA, Lisboa, Portugal, 589 p.

Luis, B. e Trigo-Teixeira, A. (2003). Análise custo-benefício sobre intervenções costeiras, Aplicação SIG. *Trabalhos do II Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, Recife, Brasil, 5 p.

Martínez, M. L., Intralawan, A., Vazquez, G., Perez-Maqueo, O., Sutton, P. e Landgrave, R. (2007). The coasts of our world: Ecological, economic and social importance. *Ecological Economics*, Volume 63, pp. 254-272.

Martino, S. e Amos, C. L. (2015). Valuation of the ecosystem services of beach nourishment in decision-making: The case study of Tarquinia Lido, Italy. In: *Ocean & Coastal Management*, Vol. 111, pp. 82-91. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.03.012>.

Massey, T. C., Anderson, M. E., Smith, J. M., Gomez, J. e Jones, R. (2011). STWAVE: Steady-State Spectral Wave Model User's Manual for STWAVE, Version 6.0. ERDC/CHL TR-11-1, Coastal and Hydraulics Laboratory, U. S. Army Corps of Engineers, 83 p.

McConnell, K., Allsop, W. e Cruickshank, I. (2004). Jetties and Related Structures Piers, Exposed to Waves: Guidelines for Hydraulic Loadings, Thomas Telford.

McCowan, J. (1891). On the Solitary Wave. *Philosophical Magazine*, 5th Series, Volume 36, pp. 430-437.

Miller, H. C. (1998). Comparison of storm longshore transport rates to predictions. Proceedings of the 26th Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp. 2954-2967.

NARCIS (2016). National Academic Research and Collaborations Information System. <http://www.narcis.nl/research/RecordID/OND1307179>. Última visualização a 25 de Maio de 2016.

O’Riordan, T., Gomes, C. e Schmidt, L. (2014). The difficulties of designing future coastlines in the face of climate change. *Landscape Research*, 39, 613–630. Doi:10.1080/01426397.2014.975108.

Oliveira, A. (2012). Discussão do custo e benefício das intervenções de defesa costeira. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 91p.

Oliveri, E. e Santoro, M. (2000). Estimation of urban structural flood damages: the case study of Palermo. *Urban Water*, 2(3), pp. 223–234. Doi: 10.1016/S1462- 0758(00)00062-5.

Ozasa, K. e Brampton, A. H. (1980). Mathematical Modeling of Beaches Backed by Seawalls. *Coastal Engineering*, Volume 4, No 1, pp. 47-64.

Ozhan, E. (1982). Laboratory study of breaker type effect on longshore sand transport. *Mech. of Sediment Transport Proc., Euromech*, Vol. 156, B. M. Sumer and A. Muller, eds., pp. 265-274. Citado por Wang e Kraus (1999).

Paape, A. e Walther, A. (2011). Akmon armour unit for cover layers of rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering Proceedings* 1, (8).

Pelnaud-Considère, R. (1956). Essai de Theorie de l’Evolution des Forms de Rivage en Plage de Sable et de Galets (in French). 4th Journees de l’Hydraulique, Les Energies de la Mer, Question III, Rapport No. 1, pp. 289-298.

Pereira, C. (2010). Risco de Erosão para Diferentes Cenários de Evolução do Litoral de Aveiro. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro Aveiro, Portugal, 78 p.

Pereira, C. e Coelho, C. (2013). Mapping Erosion Risk Map under different Scenarios of Climate Change for Aveiro Coast, Portugal. *Natural Hazards*, Springer. DOI: 10.1007/s11069-013-0748-1.

Pereira, C., Coelho, C., Ribeiro, A., Fortunato, A., Lopes, C. L. e Dias, J. M. (2013). Numerical modelling of shoreline evolution in the Aveiro coast, Portugal - climate change scenarios.

Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65, pp. 2161-2166. ISSN 0749-0208.

Pereira, C., Coelho, C. e Silva, P. (2016). Modelling Long-Term Shoreline Evolution: Figueira da Foz Beach, Portugal. Proceedings of the 35th International Conference On Coastal Engineering, Antalya, Turquia, 11 p. ISBN: 978-0-9896611-3-3.

Pilarczyk, K. W. (2014). Coastal Structures in International Perspective. In: Young C. Kim (Editor), Coastal and Ocean Engineering Practice, Series on Coastal and Ocean Engineering Practice - Vol. 1, World Scientific, pp. 39-94.

Pita, C. (1978). Porto de Sines. Molhe Oeste. Ensaios de Estabilidade e Galgamento em Canal de Ondas Irregulares. Relatório II, Relatório, LNEC, Fevereiro de 1978. Citado por Pita (1986).

Pita, C. (1985). Considerações sobre a Observação de Quebra-Mares de Talude. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Memória N° 647, 17 p.

Pita, C. (1986). Dimensionamento Hidráulico do Manto Resistente de Quebra-Mares de Talude. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Memória n° 670, 68 p.

Reeve, D., Chadwick, A. e Fleming, C. (2004). Coastal Engineering. Processes, theory and design practice. Spon Press, U.S.A., 461p.

Reis, E. (2010). Evolução da linha de costa e defesa das zonas costeiras – Análise custo/benefício. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 105 p.

Rijn, L. (1984). Sediment transport: Part I – Bed load transport, Part II – Suspended load transport, Part III – Bed forms and alluvial roughness. Journal of Hydraulic Engineering, 110, pp. 1431–1456.

Rodeia, L. (2014). Impacto dos Esporões no Transporte Sedimentar - Formulações e Modelos. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 80 p.

Rodrigues, L. (2010). Gestão de sedimentos na zona costeira - alimentações artificiais. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 97 p.

Roebeling, P., Coelho, C. e Reis, E. (2011). Coastal erosion and coastal defense interventions: a costbenefit analysis. Journal of Coastal Research, SI 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium), Szczecin, Poland, pp. 1415-1419. ISSN 0749-0208.

Roebeling, P., Rocha, J., Alves, H., Rodríguez-Blanco, M. e Fonseca, S. (2012). Assessing the Cost-Effectiveness of Reduced N-Fertilizer Application Rates and Alternative Application Regimes in the Cértima Catchment. Proceedings of the 21st Century Watershed Technology Conference and Workshop Bari, Italy. Doi: 10.13031/2013.41448.

Roebeling, P., Rocha, J., Coelho, C., Alves, F. e Vizinho, A. (2015). Cost-Benefit Analysis of Coastal Erosion Adaptation Pathways Along the Barra-Vagueira Coastal Stretch. Project BASE - Bottom-up Climate Adaptation Strategies for Europe, Universidade de Aveiro, Portugal.

Roebeling, P., Coelho, C., D'Elia, E. e Alves, T. (2016). Assessing Coastal Erosion Adaptation Strategies: an Environmental-Economic Modelling Approach. Littoral 2016 - The Changing Littoral, Anticipation and Adaptation to Climate Change, Biarritz, França, 25 a 29 de Outubro, pp. 99.

Roebeling, P., d'Elia, E., Coelho, C. e Alves, T. (2018). Efficiency in the design of coastal erosion adaptation strategies: An environmental-economic modelling approach. Ocean & Coastal Management (In Press).

Rosati, J., Walton, T. e Bodge, K. (2002). Longshore Sediment Transport. In: Walton, T. (editor), Coastal Engineering Manual, Part III, Coastal Sediment Processes, Chapter III-2, Engineer Manual 1110-2-1100, U. S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 119 p.

Ruggiero, P., Komar, P. D., McDougal, J. e Beach, R. A. (2001). Wave Runup, Extreme Water Levels and the Erosion of Properties Backing Beaches. JCR, 17:2, pp. 407-419.

Sampaio, M. J. R. T. (2008). Aplicação do modelo SWAN na caracterização da agitação marítima na zona adjacente a Pinheiro da Cruz. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Santos, F. D., Forbes, K. e Moita, R. (2001). Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures - SIAM Project. Distribuição Gradiva, 456 p. ISBN: 972-662-843-1.

Schoonees, J. e Theron, A. K. (1993). Review of the field data base for longshore sediment transport. Coastal Engineering, Vol. 19, Issues 1-2, pp. 1-25.

Schoonees, J. S. e Theron, A. K. (1994). Accuracy and applicability of the SPM longshore transport formula. Proceedings of the 24th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 2595-2609.

SETH (2010). Sociedade de Empreitadas e Trabalhos Hidráulicos: Obras Engenharia Costeira e Portuária - Quebra-mar Destacado Castelo do Neiva. <http://www.seth.pt/>. Citado por Reis (2010), consultado pela última vez em Fevereiro de 2010.

Silva, D. (2014). Parameter analysis of the armour layer in coastal structures. Dissertação de Mestrado, Aveiro, Portugal, 109 p.

Silva, R., Coelho, C., Taveira-Pinto, F. e Veloso-Gomes, F. (2007a). Coastline Numerical Evolution for Dune-Beach System Adaptation - Analysis in Aveiro Coastal Stretch, Portugal. Conferencia Internacional sobre Restauración y Gestión de las Dunas Costeras, Santander, Espanha, 3 a 5 Outubro 2007, pp. 100-106. ISBN: 978-84-8102-497-5.

Silva, R., Coelho, C., Veloso-Gomes, F. e Taveira-Pinto, F. (2007b). Dynamic numerical simulation of medium term coastal evolution of the West Coast of Portugal. Journal of Coastal Research, SI 50 (Proceedings of the 9th International Coastal Symposium), Gold Coast, Australia, pp. 263-267. ISSN 0749.0208.

Silva, R. (2010). Avaliação Experimental e Numérica de Parâmetros Associados a Modelos de Evolução da Linha de Costa. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 488 p.

Silva, R., Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F. e Coelho, C. (2011). 3D Movable Bed Model Results Integration in Shoreline Change Model. Seventh International Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Sediment Processes - Coastal Sediments '11, Miami, Florida, USA, 2 a 6 de Maio, Eds. Rosati, J.D., Wang, P., Roberts, T.M, World Scientific Publishing. ISBN-13 978-981-4355-52-0.

Smith, E. R., Wang, P. e Zhang (2003). Evaluation of the CERC formula using large-scale model data. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg, 13 p.

Sorensen, R., Thompson, E. F., Briggs, M., Chasten, M. A. e Lillycrop, L. (2003). Harbour Hydrodynamics. In: Demirbilek, Z. (editor), Coastal Engineering Manual, Part II, Coastal Hydrodynamics, Chapter II-7, Engineer Manual 1110-2-1100, U. S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 98 p.

Soulsby, R. (1997). Dynamics of marine sands: a manual for practical applications. Dynamics of Marine Sands: a Manual for Practical Applications, Thomas Telford, ISBN: 978-970-7277-2584-X.

SPM (1975). Shore Protection Manual. 2th ed., U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.

SPM (1977). Shore Protection Manual. 3th ed., U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.

SPM (1984). Shore Protection Manual. 4th ed., 2 Vol, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.

Szmytkiewicz, M., Biegowski, J., Kaczmarek, L. M., Okrój, T., Ostrowski, R., Pruszek, Z., Różyński, G. e Skaja, M. (2000). Coastline changes nearby harbour structures: comparative analysis of one-line models versus field data. Coastal Engineering: 40-2, pp. 119-139.

Taborda, R., Magalhães, F. e Ângelo, C. (2005). Evaluation of coastal defence strategies in Portugal. In: Zimmermann C., Dean R.G., Penchev V., Verhagen H.J. (eds) Environmentally Friendly Coastal Protection, NATO Science Series (Series IV: Earth and Environmental Series), vol 53, Springer, Dordrecht, pp. 255-265. ISBN: 978-1-4020-3301-8.

Taveira-Pinto, F. e Neves, A. (2003). A Importância da Consideração do Carácter Irregular da Agitação Marítima no Dimensionamento de Quebramares de Taludes. Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Número 16, pp. 95-111.

Teixeira, N. (2014). Estudo do limite de espraiamento das ondas. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil Universidade de Aveiro.

Teixeira, S. B., Furtado, A. e Gaspar, M. (1998). Avaliação do Impacte da Alimentação Artificial da Praia de Vale do Lobo nas Comunidades de Bivalves (Algarve-Portugal). Dragados e Ambientes Costeiros Seminário sobre Dragagens, pp. 47-56.

Teixeira, S. B. (2011). Alimentação Artificial de Praias com Dragados no Algarve. In Coelho, C., Silva, P., Pinheiro, L., Gonçalves, D. (Eds). Dragagens: Fundamentos, Técnicas e Impactos, Universidade de Aveiro, pp. 221-240.

Thach, N. N., Truc, N. N. e Hau, L. P. (2007). Studying shoreline change by using LITPACK mathematical model (case study in Cat Hai Island, Hai Phong City, Vietnam). VNU Journal of Science, Earth Sciences 23, pp. 244-252.

Thomas, R. C. e Frey, A. E. (2013). Shoreline Change Modeling Using One-Line Models: General Model Comparison and Literature Review. ERDC/CHL CHETN-II-55, Vicksburg, MS: US Army Engineer Research and Development Center, 10 p.

Townsend, K. E., Thomas, R. C. e Frey, A. E. (2014). Shoreline change modeling using one-line models: Application and comparison of GenCade, Unibest, and Litpak. ERDC/CHL CHETN-IV-102, Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center.

Turner, R. K., Burgess, D., Hadley, D., Coombes, E. e Jackson, N. (2007). A cost-benefit appraisal of coastal managed realignment policy. V.17, Global Environmental Change, pp. 397-407.

Valle, R., Medina, R. e Losada, M. A. (1993). Dependence of Coefficient K on Grain Size. Technical Note No. 3062, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol 119, No. 5, September/October, pp. 568-574.

van der Meer, J. W. (1988a). Stability of Cubes, Tetrapods and Accropode. Proceedings of the Breakwaters '88 Conference, Design of Breakwaters, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford, London, UK, pp. 71-80.

van der Meer, J. W. (1988b). Rock Slopes and Gravel Beaches Under Wave Attack. Ph.D. diss, Delft University of Technology, The Netherlands, K.W. Pilarczyk, 214 p.

van der Meer, J. W. (1991). Stability and Transmission at Low-Crested Structures. Delft Hydraulics Publication No. 453, Delft Hydraulics Laboratory, The Netherlands, The Netherlands. Citado por Burcharth e Hughes (2006).

Veloso-Gomes, F. e Taveira-Pinto, F. (1999). Reconstruction and Repair of Portuguese Coastal Defence Structures. Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

Veloso-Gomes, F. (2010). Operações de alimentação artificial de praias e dunas com areias provenientes de fontes da plataforma continental e das operações de dragagem nas zonas portuárias. Avaliação de incidências ambientais. Análise custo / benefício versus eficácia como base de decisão sobre as opções de alimentação artificial de areias nas praias, com fontes offshore ou nas zonas portuárias e canais de navegação. Polis Litoral Norte. IHRH / FEUP.

Veri-Tech, I. (2004). NEMOS System Components & Typical procedures. Tutorial, Summit, Mississippi, USA.

Vicente, C. M. e Clímaco, M. (2003). Evolução de Linhas de Costa. Desenvolvimento e Aplicação de um Modelo Numérico. Informação Técnica Hidráulica ITH 42, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 167 p.

Vincent, C. L., Demirbilek, Z. e Weggel, J. R. (2006). Estimation of Nearshore Waves. Coastal Engineering Manual, Part II: Coastal Hydrodynamics, Chapter 3, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 41 p.

Vitale, P. (1981). Movable-bed laboratory experiments comparing radiation stress and energy flux factor as predictors of longshore transport rate. No. 81-4, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, 94 p.

Walton, T. e Chiu, T. (1979). A Review of Analytical Techniques to Solve the Sand Transport Equation and Some Simplified Solutions. Proceedings of Coastal Structures '79, American Society of Civil Engineers, pp. 809-837. Citado por Rosati *et al.*, (2002).

Wang, P., Kraus, N. C. e Richard A. Davis, J. (1998). Total Longshore Sediment Transport Rate in the Surf Zone: Field Measurements and Empirical Predictions. Journal of Coastal Research, Vol. 14, No. 1, pp. 269-283.

Wang, P. e Kraus, N. C. (1999). Longshore Sediment Transport Rate Measured by Short-Term Impoundment. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, Volume 125, pp. 118-126.

Watson, K., Nagel, C., Pedersen, J. H., Reid, J. D. e Skinner, M. (2010). Beginning C# 2010. Wiley Publishing Inc, Indianapolis, U.S.A, 1037p.

Yalciner, A. C., Ergin, A., Kahyaoglu, I. C. e Yuncu, H. (1999). 3D experimental study on the stability coefficients for breakwaters armoured with antifer blocks under irregular waves. Proceedings of the COPEDEC V, Cape Town, South Africa, pp. 1458-1469.

Yoo, D. H. (2010). Surf Parameters for the Design of Coastal Structures, In: Handbook of Coastal and Ocean Engineering, Chapter 17, pp. 441-453.

Young, R. S., Pilkey, O. H., Bush, D. M. e Thieler, E. R. (1995). A Discussion of the Generalized Model for Simulating Shoreline Change (GENESIS). Journal of Coastal Research, Vol. 11, No. 3 (Summer, 1995), pp. 875-886, ISSN 0749-0208.

Zerbe, R. O. e Dively, D. D. (1994). Benefit-Cost Analysis in Theory and Practice. Harper Collins College Publishers, New York, USA, 557 p.

