



**Américo Daniel
Rodrigues Oliveira**

**Discussão do custo e benefício das intervenções
de defesa costeira**



**Américo Daniel
Rodrigues Oliveira**

**Discussão do custo e benefício das intervenções de
defesa costeira**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação científica do Doutor Peter Roebeling, Investigador Auxiliar do Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM), Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

“Este trabalho foi suportado pela FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia), no âmbito do projeto de investigação PTDC/AAC – CLI/100953/2008 – ADAPTARia: Climate Change Modeling on Ria de Aveiro Litoral – Adaptation Strategy for Control and Fluvial Flooding.”

o júri

presidente

Prof. Doutor Paulo Barreto Cachim
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Joaquim Luís Pais Barbosa
Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências Naturais, Engenharias e Tecnologias da Universidade Lusófona do Porto

Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Peter Cornelis Roebeling
Equiparado a Investigador Auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao concretizar esta dissertação não posso deixar de agradecer a todos que me auxiliaram ao longo desta importante jornada.

Ao Professor Doutor Carlos Coelho, orientador da dissertação, por todos os conhecimentos transmitidos paciência e disponibilidade, fundamentais para a realização do trabalho.

Ao Professor Doutor Peter Roebeling, pela colaboração e conhecimentos transmitidos.

À minha família que com o seu apoio e motivação, foram essenciais ao longo do meu percurso académico.

Aos meus colegas e amigos de curso, pela amizade e ajuda ao longo destes anos.

palavras-chave

erosão costeira, modelação numérica, esporão, dinâmica costeira, análise custo-benefício

resumo

Desde a antiguidade que as zonas costeiras exercem uma grande atração sobre o Homem, desempenhando uma grande variedade de funções sociais, económicas e ambientais. Apesar do elevado valor estratégico que possuem, as zonas costeiras apresentam uma elevada vulnerabilidade, resultante da crescente ameaça da erosão costeira. Este fenómeno provoca elevados prejuízos, com especial incidência nas frentes edificadas e nos aglomerados urbanos vulneráveis às ações energéticas dos mares. Existem várias abordagens possíveis para a mitigação do processo erosivo da linha costeira. A aplicação de esporões é a solução mais disseminada e com maior representatividade em Portugal, e é por isso, a estrutura de defesa costeira em foco na realização deste estudo. Os custos elevados associados a este tipo de intervenção tornam necessária a realização de uma avaliação de viabilidade económica dos projetos de intervenção. Esta avaliação passa pela elaboração de uma análise custo-benefício, onde são comparados os custos e benefícios associados a cada uma das soluções em análise. Assim esta dissertação tem como objetivo a elaboração de uma análise custo-benefício de vários cenários de intervenção de defesa costeira para um horizonte temporal de 20 anos. A análise custo-benefício tem como base o conhecimento da evolução da linha da costa para o horizonte temporal pretendido. Para isso procedeu-se à análise física dos resultados dos diferentes cenários, recorrendo ao modelo numérico LTC (Long Term Configuration). Posteriormente foi realizada a análise custo-benefício, aplicada aos cenários modelados. Esta análise baseia-se na estimativa do Valor Atual Líquido, como indicador económico da viabilidade do projeto de defesa costeira, e na otimização dinâmica para a estimativa do comprimento ótimo do esporão a ser aplicado. Foi por fim testada a robustez da análise custo-benefício através da elaboração de uma análise de sensibilidade sobre os custos, os benefícios e sobre a taxa de desconto utilizada. Esta metodologia permitiu de forma simplificada, e com algum grau de incerteza, verificar a viabilidade económica de diferentes soluções de defesa costeira, indicando que do ponto de vista económico, a aplicação de esporão é vantajosa em cenários caracterizados por ondulações de altura superior a 1 metro, perdendo a viabilidade quando aplicado a ondulações de menor altura.

keywords

coastal erosion, numerical modeling, groin, coastal dynamics, cost-benefit analysis

abstract

Since antiquity that coastal areas exert a major attraction on Man, playing a variety of social, economic and environmental roles. Despite the high strategic value they possess, coastal areas are highly vulnerable to the growing threat of coastal erosion. This phenomenon causes considerable losses, with special incidence on the built seafront, and in urban areas vulnerable to sea wave's destructive action. There are several shoreline erosion mitigation approaches. The application of rocky groins is the most widespread and representative solution in Portugal, therefore is the coastal defense structure in focus in this study. The high costs associated with this type of intervention makes necessary to evaluate the economic viability of the costal intervention project. This essay is the development of a cost-benefit analysis, which compares the costs with the benefits associated with each one of the solutions under consideration. Therefore this thesis aims to develop a cost-benefit analysis of the various intervention scenarios of coastal defense for a time horizon of 20 years. A cost-benefit analysis is based on the knowledge of the evolution of the coastline during a desired timeframe. For this it was elaborated a physical analysis of different scenarios, using the numerical model LTC (Long Term Configuration). After that, it was performed a cost-benefit analysis, applied to the simulated scenarios. This analysis is based on the estimated Net Present Value as an indicator of the economic viability of the coastal defense project, and by performing a dynamic optimization in order to estimate the optimum length of the groin to be applied. Finally it was tested the robustness of the cost-benefit analysis by performing a sensitivity analysis applied to the costs, benefits and to the chosen discount rate. These methodologies allowed, in a simplified way, and with some degree of uncertainty, evaluate the economic viability of different coastal defense solutions. The cost-benefit analysis indicates that from an economic perspective, the groin application is an advantageous solution in scenarios characterized by waves of height greater than 1 meter, but it is not a good option when applied to small wave regimes.

Índice

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos	7
1.3 Metodologia e estrutura da dissertação	8
Capítulo 2 – REVISÃO DA LITERATURA.....	13
2.1 Análises custo-benefício.....	13
2.2 Modelos numéricos.....	22
Capítulo 3 – CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO.....	25
3.1 Modelo numérico de evolução da linha da costa	25
3.2 Caso de estudo inicial.....	31
3.3 Cenários de intervenção	34
Capítulo 4 – RESULTADOS	37
4.1 Estudo dos cenários de referência	37
4.2 Estudo dos cenários de intervenção	40
4.3 Interpretação de resultados.....	44
Capítulo 5 – CUSTOS E BENEFÍCIOS.....	49
5.1 Estimativa dos Custos.....	49
5.1.1 Dimensão do esporão	50
5.1.2 Apresentação dos custos.....	52
5.2 Estimativa dos benefícios.....	54
5.2.1 Benefícios gerados	55
5.3 Discussão de resultados	59
Capítulo 6 – OTIMIZAÇÃO DA ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO.....	61
6.1 Análise do Valor Atual Líquido (VAL).....	63

6.2	Otimização.....	65
6.3	Discussão dos resultados	70
6.4	Conclusões.....	73
Capítulo 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS		75
7.1	Exposição dos resultados	75
7.2	Conclusões.....	77
7.3	Considerações futuras.....	80
Referências Bibliográficas.....		83
Anexo I.....		87

Índice de tabelas

Tabela 1.1 – Tipos e funções de estruturas de defesa costeira (adaptado de Burchartch e Hughes, 2001)	5
Tabela 2.1 – Matriz de tomada de decisão (adaptado de Hoolings, 2006).	18
Tabela 3.1 – Vantagens e desvantagens do modelo numérico LTC (Coelho, 2005)	29
Tabela 4.1 – Distribuição relativa da área de erosão, para as várias alturas de onda incidente, ao longo de 20 anos	39
Tabela 5.1– Período médio de manutenção para diferentes obras de defesa costeira (adaptado de Reis, 2010).....	50
Tabela 5.2 – Volumes dos esporões	52
Tabela 5.3 – Valores de ecossistemas costeiro (em 2010) (Roebeling <i>et al.</i> , 2011).....	56
Tabela 6.1 – Valor atual líquido (VAL) para os diferentes cenários ($\times 10^6$ €)	63
Tabela 6.2 – Comprimento do esporão ótimo e correspondente Valor Atual Líquido para cada cenário de altura de onda	66
Tabela 6.3 – Comprimento ótimo dos esporões (m) para os diferentes valores de custos e benefícios	68
Tabela 6.4 – Valor Atual Líquido ($\times 10^6$ €), para diferentes comprimentos de esporão e alturas de onda, em função dos preços dos custos e benefícios.....	68
Tabela 6.5 – Comprimento ótimo dos esporões (m) para as diferentes taxas de desconto	69
Tabela 6.6 – Valor Atual Líquido ($\times 10^6$ €), para diferentes comprimentos de esporão e alturas de onda, em função da taxa de desconto	70

Índice de figuras

Figura 1.1 – Esquema representativo das diferentes estratégias de gestão costeira (adaptado de EuroSION, 2004)	4
Figura 1.2 – Exemplo da ação dos esporões na acumulação de areia proveniente da deriva litoral (Veloso – Gomes, 1991)	6
Figura 1.3 – Transporte sólido longitudinal na secção de implantação de uma estrutura perpendicular à costa (Coelho, 2005)	7
Figura 2.1– Campo de esporões da praia de Quarteira	14
Figura 2.2 – Localização da área em estudo	16
Figura 2.3 – Análise qualitativa das opções de defesa costeira	19
Figura 2.4 – Análise custo-benefício	20
Figura 2.5 – Área de estudo	21
Figura 3.1 – Representação esquemática da formulação de base no modelo LTC (Coelho, 2005) .	28
Figura 3.2 – Esquema da sequência de cálculo do LTC (Coelho, 2005)	30
Figura 3.3 – Exemplo de saída gráfica que se pode realizar de um cenário em erosão, modelado no LTC.....	31
Figura 3.4 – Perfil transversal da praia modelada.....	32
Figura 3.5 – Configuração da linha de costa a modelar	34
Figura 4.1 – Comportamento da linha de costa ao longo do tempo, em situação de erosão, para uma altura da agitação incidente de $H_s=2.5m$ e $R=80^\circ$	38
Figura 4.2 – Evolução da área de erosão para os cenários de referência (m^2)	39
Figura 4.3 – Evolução das áreas de erosão para os cenários de onda de 1 m de altura (m^2).....	40
Figura 4.4 – Comportamento da linha de costa ao longo do tempo nas proximidades de um esporão para uma altura da agitação incidente de $H_s=2.5m$ e $R=80^\circ$	41
Figura 4.5 – Evolução da área perdida ao longo do tempo para os diferentes cenários simulados	42
Figura 4.6 – Evolução da área perdida ao longo do tempo para os diferentes rumos para uma onda incidente de altura 1 m	44
Figura 4.7 – Comportamento da linha de costa nas proximidades de um esporão, para duas situações de proveniência da agitação (Coelho, 2005).....	47
Figura 5.1 – Esquema do perfil transversal e longitudinal do esporão.....	51
Figura 5.2 – Custo de construção e de funcionamento durante 20 anos, para diferentes comprimentos de esporão	54

Figura 5.3 – Benefício resultante da construção de diferentes esporões, para diferentes alturas de onda incidente	58
Figura 5.4 – Benefícios resultantes da incidência de ondulação para altura de onda de 1m, e de rumos 60°,70° e 80°.....	59
Figura 6.1 – Evolução do Valor Atual Líquido (VAL) para os diferentes cenários ($\times 10^6$ €)	64
Figura 6.2 – Relação entre Custo e Benefício.....	65

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

Desde o início dos tempos que o mar exerceu uma grande atração sobre o Homem, tendo-se afirmado como uma importante via de comunicação e fonte de recursos.

As áreas costeiras têm portanto uma variedade importante de funções sociais e económicas. Estas áreas foram sempre muito procuradas no passado por razões de conveniência de transporte, mas atualmente são procuradas principalmente como áreas de habitação, recreação e lazer. Além do serem valiosas para o turismo e recreação, as áreas costeiras são valiosas pela biodiversidade da sua fauna e flora. As dunas e terras húmidas fornecem também proteção contra inundações, água potável e assimilação de resíduos (Persson, 2010).

1.1 Enquadramento

Portugal dispõe de uma das maiores zonas económicas exclusivas da Europa, com mais de 1700000 km², o que corresponde a cerca de 18 vezes a sua área terrestre. Neste sentido, Portugal dispõe de um enorme potencial de recursos associados aos espaços marítimos, sobre os quais poderá ser aprofundado o conhecimento científico e técnico numa perspetiva de exploração de recursos e de desenvolvimento sustentável. A zona costeira Portuguesa apresenta uma elevada densidade populacional, com cerca de 70% da população aí a residir. Além disso, a tendência num futuro próximo é a do aumento desta proporção, com a taxa de aumento populacional a ser superior nos municípios do litoral do País em comparação com o restante território nacional (Coelho *et al.*, 2004). A concentração populacional e de atividades económicas evidencia bem o valor da zona costeira no quadro socioeconómico nacional, razão pela qual deve ser considerada como

um recurso de maior valia, um recurso global, não só pelas funções que exerce mas também pelo usos e atividades económicas que proporciona (INAG, 2009). Considerando a importância estratégica em termos económicos, ambientais e sociais que as zonas costeiras possuem, é necessário levar em linha de conta também a sua enorme fragilidade e a situação de risco em que se encontra e que nos últimos tempos se tem agravado (Fontão, 2008).

A zona costeira pode ser considerada uma zona extremamente dinâmica, em que as transformações e alterações são permanentes, devido ao facto de se tratar de uma zona em que as fronteiras sólidas terrestres estão sujeitas a ações hidrodinâmicas marítimas. Pela diversidade de fatores e parâmetros envolvidos, o estudo destas transformações é algo complexo (Carpinteiro, 2009). A dinâmica costeira é por isso uma situação de equilíbrio delicado, sendo facilmente afetado por processos naturais e intervenções humanas. A “linha de costa”, entendida como a interceção do plano de água com a faixa terrestre, não permanece estática ao longo do tempo (nem nunca permaneceu). A sua configuração e posição alteram-se, a escalas de tempo que variam de alguns minutos a milhões de anos, em resposta a oscilações e mudanças das ações hidromorfológicas do meio envolvente. A erosão costeira é portanto um processo natural que ao longo da história tem transformado significativamente a paisagem costeira. A intervenção humana sobre as zonas costeiras, em particular a crescente urbanização, transformou o fenómeno natural de erosão num problema de intensidade crescente. Em muitas áreas, as consequências da erosão foram agravados pelas atividades humanas e pela edificação de frentes marítimas progressivamente mais próximas da linha de costa, sobre dunas e arribas. Presentemente, a maioria da costa arenosa Portuguesa sofre de erosão com margens de regressão que em algumas localizações atingem alguns metros por ano. Este comportamento está relacionado com um importante défice de material sedimentar provocado principalmente pela construção de barragens, pela exploração de areia e cascalho e pela dragagem intensiva feita nos estuários com a função de garantir boas condições de navegabilidade em portos ou embocaduras. A regressão costeira é também agravada pela retenção de material sedimentar a barlar das estruturas de defesa

costeira, como esporões e quebra-mares, provocando erosão e o conseqüente emagrecimento da costa arenosa a sotamar dessas mesmas estruturas. A combinação da erosão costeira com o elevado valor das propriedades nesta zona e a importância económica do turismo para as populações locais criou um problema de difícil resolução (Taborda, *et al.*, 2004). A abordagem a esta problemática de ordenamento do território baseia-se na avaliação de cinco estratégias distintas para a gestão da zona costeira (EUROSION, 2004):

- **Não intervir** – esta estratégia passa por deixar a natureza seguir o seu curso. Nenhuma medida é tomada para defender a linha costeira ou alterar a sua posição, obtendo assim uma nova dinâmica de equilíbrio entre o mar e a costa.
- **Retirar** – nesta situação é permitido o avanço do mar sobre o território costeiro. As estruturas de defesa em serviço são eliminadas, e a linha da costa evoluirá livremente para uma posição mais estável.
- **Proteger** – aqui a linha da costa é mantida na posição inicial através da construção de estruturas de defesa da costa ou de outros métodos menos rígidos de defesa costeira.
- **Avançar** – novas estruturas de defesa costeira são construídas. A linha costeira avança em direção ao mar, em relação à sua posição original.
- **Intervenção limitada** – intervém-se sobre a linha da costa através de métodos não rígidos, permitindo uma adaptação gradual desta zona costeira ao avanço do mar.

As diferentes opções são representadas esquematicamente na Figura 1.1.

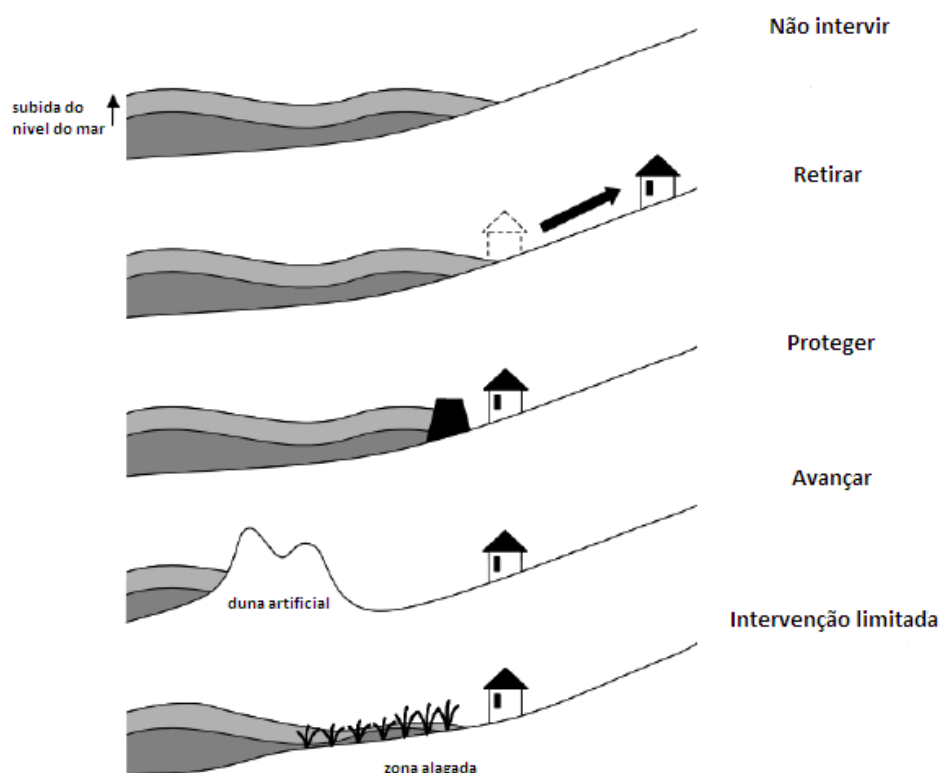


Figura 1.1 – Esquema representativo das diferentes estratégias de gestão costeira (adaptado de EuroSION, 2004)

As estratégias de avançar ou de proteger a linha da costa dependem principalmente da construção de estruturas de proteção rígidas ou de reposição sedimentar em grande escala. Por outro lado, a opção pelo recuo da linha costeira ou por uma intervenção de defesa mais limitada, leva à implementação de soluções mais flexíveis, como por exemplo a recuperação das dunas litorais. Assim, dependendo da estratégia a ser seguida, diferentes soluções de defesa costeira são consideradas, nomeadamente a construção de esporões, estruturas aderentes, quebra-mares, alimentação artificial das praias com areias e reconstrução e estabilização das dunas litorais. A estratégia a ser utilizada em cada caso deve ser feita com base em critérios de natureza funcional, económica e ambiental, já que cada uma destas soluções vai ter diferentes funções, custos de construção e diferentes impactos paisagísticos e ambientais. A Tabela 1.1, oferece uma breve descrição das soluções mais frequentemente utilizadas no combate à erosão costeira.

Tabela 1.1 – Tipos e funções de estruturas de defesa costeira (adaptado de Burchartch e Hughes, 2001)

Tipo de estrutura	Objetivo	Função principal
Esporão	Prevenir a erosão costeira	Reduzir o transporte longitudinal de sedimentos
Estrutura aderente	Proteger frentes marítimas urbanizadas de galgamento e inundação	Reforçar o perfil longitudinal de uma zona de praia
Quebra-mar	Abrigar bacias e entradas portuárias da ação das ondas e correntes marítimas	Dissipação da energia das ondas e/ou reflexão da energia das ondas.
Quebra-mar destacado	Prevenir a erosão costeira	Redução da altura das ondulação incidente na praia, e redução do transporte sedimentar longitudinal.
Alimentação artificial de praias e reconstrução de dunas litorais	Proteção de praias contra inundação e a erosão costeira	Enchimento artificial de praias e dunas com material sedimentar a ser erodido

Como é possível verificar, as soluções de defesa costeira são variadas. No entanto, este estudo vai ser focado apenas no uso de esporões, uma vez que em Portugal a proteção costeira dependia até muito recentemente quase em exclusivo do uso de campos de esporões e de obras longitudinais aderentes, e consequentemente esta é a solução de defesa da costa mais disseminada e com maior representatividade no país.

Os esporões são obras de defesa construídas em betão ou mais correntemente em enrocamento, dispostas em perfis perpendiculares à linha da costa, com um alinhamento retilíneo ou especial (em L, S ou Z). São usados principalmente em zonas de frente costeira com valor económico significativo e que são afetadas por fenómenos de erosão causados pelas correntes de marés ou pela agitação marítima.

Os esporões têm como função provocar a deposição de areia em zonas afetadas por erosão, através da interrupção parcial ou total do fluxo do material sedimentar ao longo da costa. Esta ação tem como consequência a deposição de sedimentos a barlamar da

estrutura, criando ou alargando a zona de praia existente que estaria a ser erodida e em risco de desaparecer. É pois necessário para o bom funcionamento do esporão que exista transporte sedimentar ao longo da costa. A aplicação de esporões será também benéfica na supressão da fuga de material sedimentar de uma praia sub-alimentada e que se pretenda conservar (Figura 1.2).

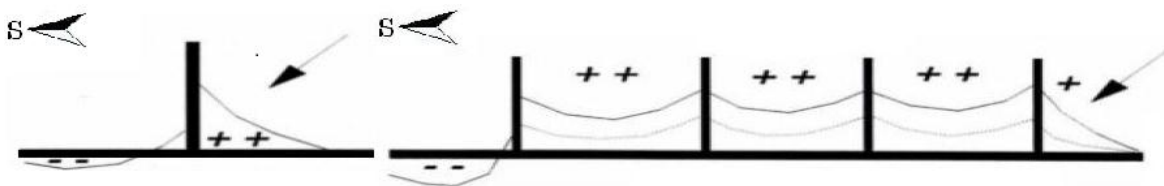


Figura 1.2 – Exemplo da ação dos esporões na acumulação de areia proveniente da deriva litoral (Veloso – Gomes, 1991)

Por outro lado, os esporões provocam um considerável impacto visual negativo e introduzem dificuldades de circulação do público ao longo da praia, diminuindo assim o valor estético e recreativo da praia. O uso de esporões vai perturbar também a normal realização dos processos costeiros, em especial o transporte sedimentar ao longo da costa. A interrupção do transporte litoral que é induzido pelo esporão vai provocar a redução da alimentação sedimentar das zonas a sotamar do esporão, promovendo a erosão dessas zonas devido a um balanço sedimentar negativo, o qual se propaga na direção predominante do transporte litoral. Quando a praia a barlamar deixa de crescer (saturação), em certas condições hidrodinâmicas retoma-se o transporte para sotamar e os impactes negativos são mitigados (Langa, 2003) ou seja, o déficit sedimentar que existe a sotamar volta a ser igual ao déficit sedimentar de barlamar. Por isso, o agravamento do processo erosivo a sotamar manifesta-se apenas durante o período de enchimento do esporão e decresce progressivamente no tempo (Coelho, 2005). Este comportamento é resumido através do esquema representado na Figura 1.3.

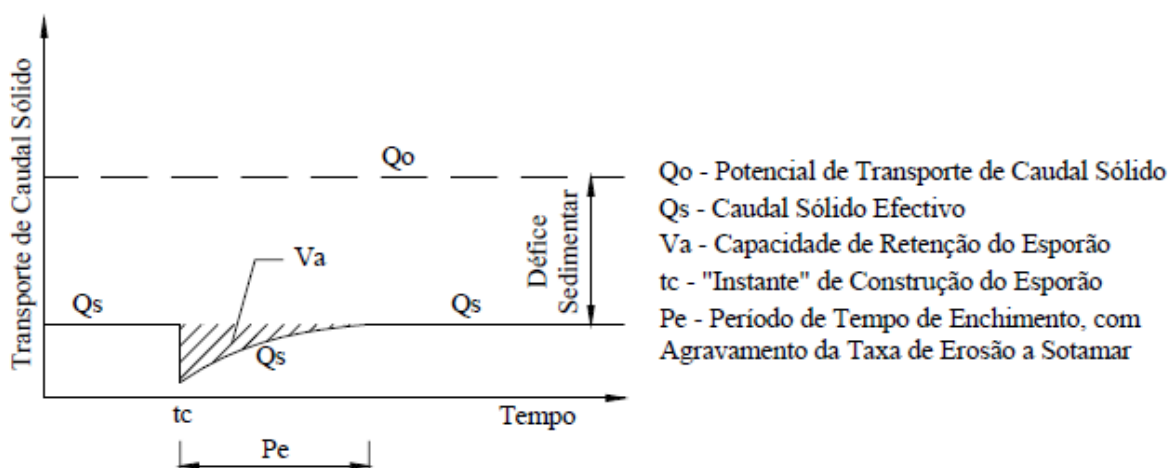


Figura 1.3 – Transporte sólido longitudinal na secção de implantação de uma estrutura perpendicular à costa (Coelho, 2005)

Qualquer que seja a intervenção de defesa costeira escolhida, terá de ser sempre viável do ponto de vista ambiental, social e económico (Taborda *et al.*, 2004). De facto, uma das questões mais importantes na construção destas obras é que estas conduzem a custos elevados, o que levanta uma importante problemática que recai sobre a avaliação custo/benefício das intervenções de defesa ou do seu reforço em comparação com o valor económico, social e histórico do património da zona a defender. Expandir, conter e adaptar, retirar ou defender são soluções que se colocam, todas elas com pontos favoráveis e pontos contra (Coelho, 2005). Esta análise deve ser realizada através de uma análise custo/benefício, onde se procede a identificação dos fatores positivos – os benefícios, e dos fatores negativos – os custos (Canhoto, 1994).

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste estudo é a elaboração de uma análise custo-benefício de vários cenários de intervenção de defesa costeira, com recurso ao modelo de evolução da linha da costa LTC (Long-Term Configuration) aliado a uma abordagem de transferência de benefícios usada na estimativa do valor dos ecossistemas costeiros (Roebeling *et al.*, 2011). Neste caso em particular, foi avaliado o uso de esporões como método de

mitigação da erosão da costa. Mais especificamente, este estudo foi definido pelas seguintes tarefas:

- Caracterização de intervenções de defesa da linha de costa e respetivos impactos;
- Avaliação física dos diferentes cenários de intervenção de defesa da linha de costa, englobando a evolução de linha de costa para diferentes horizontes temporais, com recurso a modelação numérica;
- Avaliação financeira dos diferentes cenários de intervenção de defesa da linha de costa, englobando custos de construção e manutenção ao longo do tempo e o valor económico e ambiental do território em função do respetivo uso de solo;
- Análise custo-benefício dos diferentes cenários de intervenção de defesa da linha de costa, ajudando a identificar as opções de intervenção mais custo-eficazes e/ou rentáveis.

1.3 Metodologia e estrutura da dissertação

Neste capítulo é feita a descrição do conteúdo de cada um dos capítulos seguintes e da metodologia usada na elaboração de cada um deles. É indicada também a sequência dos capítulos dentro da estrutura do estudo realizado.

Esta dissertação é composta por sete capítulos. Neste primeiro capítulo é primeiramente exposto o conceito de área costeira e a importância que estas zonas têm tido no modo de vida da população do litoral. É apresentada a introdução à problemática da erosão costeira e uma breve descrição do uso de esporões como ferramenta de combate a este fenómeno. Por último, são enumerados os principais objetivos da elaboração deste estudo.

No segundo capítulo é feita a descrição de casos de estudos custo-benefício realizados anteriormente. Estes estudos, à semelhança desta dissertação, são realizados no âmbito da análise de custos e benefícios aplicada às zonas costeiras. Apesar de se focarem no mesmo tema, estes estudos diferem na metodologia usada na avaliação dos custos, dos benefícios e do modo como estes valores se relacionam no processo de tomada de decisão. Neste capítulo é também feita uma referência aos principais modelos numéricos de utilizados na previsão do comportamento da costa, bem como algumas diferenças entre o seu funcionamento.

O terceiro capítulo pretende fazer a apresentação do modelo numérico que foi utilizado na simulação dos diferentes cenários definidos para a análise custo-benefício, o LTC. Assim, é feita uma descrição resumida do funcionamento e estrutura do programa, bem como dos parâmetros de entrada usados na calibração do modelo numérico. São estes parâmetros que vão moldar a dinâmica costeira e a diferença de comportamento entre os vários cenários modelados. Os seus valores correspondem essencialmente às propriedades físicas dos sedimentos, da água do mar e do clima de agitação, sendo baseados em dados experimentais e empíricos que traduzem a dinâmica da linha costeira na região Centro de Portugal. Além destes dados, para os cenários onde ocorre a intervenção de defesa costeira são definidas as propriedades dos esporões, nomeadamente o seu comprimento e posicionamento.

No quarto capítulo é realizada uma análise física sobre os diferentes cenários modelados. Estes cenários podem ser divididos em dois grupos distintos, cenários em erosão e cenários onde se procede à intervenção de defesa costeira. São também exibidos os resultados das simulações dos cenários no modelo numérico. Estes resultados são inicialmente expressos por um balanço entre as áreas de erosão e de acreção determinadas pelo LTC. A área de acreção é caracterizada pela área que é definida de acordo com o avanço da linha da costa em relação ao cenário em erosão. Por outro lado, a área em erosão é a área formada pelo recuo da linha da costa em relação ao cenário em

erosão. A soma entre a área de acreção e a área de erosão define o valor de área perdida em cada cenário, para um determinado horizonte temporal.

No quinto capítulo são descritos os custos e os benefícios resultantes dos cenários modelados. Os benefícios são determinados a partir das áreas não perdidas, isto é, a diferença entre as áreas perdidas no cenário em erosão, e as áreas perdidas no cenário onde ocorre intervenção. Finalmente estas áreas são convertidas para um valor monetário expresso em €/ha/ano.

Por outro lado, os custos são determinados em função do custo unitário de volume de esporão. Naturalmente, o volume do esporão é calculado em função do comprimento do esporão. É importante salientar que os custos englobam não só os custos de construção do esporão, mas também um custo de manutenção periódico (de três em três anos), ou seja, aos custos de construção inicial somam-se os custos de manutenção a cada três anos de funcionamento.

No sexto capítulo é realizado o estudo custo-benefício propriamente dito. É com base nos dados provenientes deste estudo que se apoia o processo de tomada de decisão de gestão da linha costeira. Este estudo consiste na determinação de parâmetros de avaliação económica, e posteriormente na otimização dinâmica dos dados resultantes da análise custo-benefício. A otimização dinâmica procura encontrar o ponto de maior distância entre as curvas de benefícios e de custos. Este ponto revela o comprimento ótimo do esporão para o cenário em estudo. Para o estudo custo-benefício é determinado parâmetros económicos, como o Valor Atual Líquido Anual. É ainda testada a sensibilidade dos resultados à alteração dos custos e benefícios, e à variação da taxa de desconto.

Finalmente, o sétimo e último capítulo destaca as principais conclusões deste estudo. São feitas considerações sobre o trabalho desenvolvido e sobre a metodologia seguida.

Apontam-se ainda possíveis desenvolvimentos futuros que contribuam para o aprofundamento do estudo deste tema.

Capítulo 2 – REVISÃO DA LITERATURA

Análises custo-benefício de adaptação e de mitigação do fenómeno de erosão costeira estão presentes em inúmeros estudos. Existem diferentes abordagens na realização de uma análise custo-benefício aplicada à gestão das zonas costeiras em processo de erosão. Como ferramenta de auxílio à avaliação custo-benefício, são usados modelos numéricos de configuração da linha costeira. Diferentes modelos numéricos foram utilizados em estudos desta natureza, pelo que também neste capítulo se descreve resumidamente os principais modelos numéricos.

2.1 Análises custo-benefício

A análise custo-benefício consiste num método para avaliar o impacto económico líquido de um projeto público. O objetivo da análise custo-benefício consiste em determinar se um projeto é viável do ponto de vista do bem-estar social, através da soma algébrica dos seus custos e benefícios, descontados ao longo do tempo (QREN, 2012). O tratamento de questões que contemplam a análise custo-benefício é abordado de várias formas na bibliografia existente. De facto, o procedimento de realização de estudos deste tipo não está normalizado, variando a metodologia aplicada de auto para autor. Alguns exemplos são expostos em seguida:

- **Evaluation of Coastal Defense Strategies in Portugal (Taborda *et al.*, 2004).**

O objetivo principal deste estudo era estabelecer uma comparação custo-eficácia entre dois métodos de defesa costeira para as praias de Quarteira/Vale do Lobo, no litoral sul

Português. Para estes casos procurou-se fazer a comparação entre a aplicação de um campo de esporões e a alimentação artificial de praias.

O trecho analisado é caracterizado por uma praia arenosa estreita suportada por falésias. Estas falésias são a principal fonte de areia que alimenta a circulação de sedimentos ao longo da costa. Com o objetivo de impedir a erosão costeira numa das zonas de maior atividade turística do Algarve, foram construídos na década de 1970 vários esporões na praia de Quarteira, interrompendo o transporte sedimentar para leste. Como consequência, verificou-se um aumento nas taxas de erosão da falésia. Atualmente, o campo de esporões de Quarteira é composto por 6 esporões, com comprimentos que variam de 100 m a 140 m de comprimento, protegendo uma faixa costeira de cerca de 1500 m (Figura 2.1).



Figura 2.1– Campo de esporões da praia de Quarteira

A retenção de areia pelo campo de esporões e o progressivo recuo da praia causou erosão em outros locais turísticos importantes, aumentando a pressão para construir estruturas de proteção. Para estimar os custos relacionados com a construção dos esporões, foram analisados dados sobre a construção de obras similares na costa do

Algarve. Chegou-se a um preço de 6000 €/m (considerando o custo de construção e manutenção) para um período de 50 anos, obtendo um preço de 120 €/m/ano.

Devido importância turística da zona foi considerada a solução de alimentação artificial das praias. Esta opção iria permitir manter os valores ambientais da região e a integridade das praias e falésias. A alimentação artificial de areia envolveu a deposição de 600000 m³ de areia ao longo de 1400 m da linha da costa. Esta operação teve um custo total de 2.4x10⁶ €, correspondendo a um custo de 4 €/m³. No entanto, não foi devidamente monitorada a evolução da linha costeira, tornando assim impossível avaliar devidamente o impacto desta operação na preservação da praia. Neste caso, assumindo que a necessidade de alimentação a longo prazo seja um volume igual ao potencial de transporte sedimentar ao longo da costa (100000 m³/ano), e um custo de areia de 2.5 €/m³, o custo de proteção anual seria de cerca de 250000 €/ano. Considerando-se a extensão da praia, obtém-se um valor de 180 €/m/ano. No entanto apesar de após algum tempo a areia se considerar “perdida” para a praia, esta não desaparece do sistema. Devido à circulação dos sedimentos ao longo da costa, a areia usada na alimentação de uma praia irá proteger as praias a sotamar, atuando sobre uma extensão superior à que originalmente se pretendia proteger. Isto significa que o valor real do preço por unidade de medida vai ser inferior quando se considera a proteção de áreas de grande extensão. Ao considerar trechos costeiros de 5 km (Quarteira/Vale-do-Lobo), o custo de manutenção será reduzido para 50 €/m/ano. Estes resultados mostram que mesmo para pequenos trechos de praia, os custos são muito mais baixos que os obtidos para a construção de um campo de esporões.

- **Cooks Beach Coastal Erosion Management Strategy (Hollings, 2006).**

Cooks Beach é uma área caracterizada por uma grande densidade de edificação residencial na proximidade da orla costeira. Esta condição associada a uma considerável vulnerabilidade às ações energéticas do mar associa esta zona a um elevado índice de

risco de exposição. Hollings (2006) efetuou um estudo com o objetivo de identificar os fatores que estão na origem da problemática da erosão costeira em Cooks Beach, e selecionar a melhor opção sob o ponto de vista técnico e da relação custo-benefício, que permita uma gestão eficaz e sustentável da área costeira.

Cooks Beach é uma praia relativamente bem abrigada, em forma de crescente e de areia fina, com aproximadamente 3 km de comprimento e localizada ao longo da costa Sul de Mercury Bay (Nova Zelândia). No extremo Este da praia localiza-se um pequeno estuário. Na entrada deste estuário foi formado um delta de vazante de dimensões consideráveis. Os sedimentos estão retidos entre promontórios localizados nos extremos Este e Oeste da praia. Esta situação provoca uma troca de sedimentos muito reduzida com as praias adjacentes (Figura 2.2).



Figura 2.2 – Localização da área em estudo

O clima de agitação marítima predominante na costa Nordeste da Nova Zelândia é caracterizado por uma ondulação incidente de Nordeste, de alturas de onda 0.5-1.5 m, e períodos de 5-7 segundos. A praia é vulnerável à ondulação proveniente de Nordeste, e são precisamente as ondas associadas a esta direção a principal causa da erosão costeira

mais severa. O processo erosivo parece estar relacionado principalmente com flutuações da dinâmica costeira, e não devido a um recuo permanente da costa. Estas flutuações que ocorrem na dinâmica da costa aparentam estar relacionadas com ciclos climáticos e com influência do delta de vazante localizado no extremo Este da praia.

As opções para Beach Cooks foram determinadas considerando-se fatores económicos, sociais e ambientais para alcançar uma solução a longo prazo para o desenvolvimento sustentável da praia. A abordagem utilizada foi a seguinte:

- a) As causas do problema da erosão costeira foram pesquisadas, incluindo investigações para saber se há um risco de erosão costeira em Cooks Beach.
- b) Uma lista de opções potenciais foram selecionadas para a área de Cooks Beach, com base em fontes bibliográficas e o conhecimento e experiência da equipa do projeto.
- c) Uma vez que as opções de defesa costeira foram selecionadas, confrontou-se cada uma delas com uma série de indicadores (categorias de impacto). Os indicadores permitem fazer uma comparação entre as diferentes soluções, no que diz respeito aos impactos causados pela sua aplicação. Todas as soluções consideradas foram confrontadas com os indicadores para um prazo de 50 anos, e classificadas de acordo com o seu impacto (positivo ou negativo) e do nível desse impacto (elevado, médio ou baixo).
- d) Cada opção foi avaliada quantitativamente, utilizando técnicas de análise custo-benefício para medir os impactos das diferentes opções sobre Cooks Beach.
- e) Uma série de opções preferenciais de gestão costeira da erosão foram identificadas, utilizando uma matriz de avaliação, e os resultados da análise económica. Estas opções são avaliadas para um horizonte temporal de 50 anos.

Tabela 2.1 – Matriz de tomada de decisão (adaptado de Hoolings, 2006).

	<i>Status quo</i>	Retirar e recolocar	Defesa aderente recuada +	Esporão + alimentação	Quebra-mar destacado
Complacência					
Serviços da praia					
Acessos					
Distúrbios de construção					
Segurança					
Pressão política					
Incerteza					
Resistência do público					
Valores culturais					
Herança histórica					
Equidade					
Biodiversidade					
Carácter natural					
Dinâmica costeira					
Inundação da costa					
Alterações climáticas					
Pegada ambiental					
Reversibilidade					
Custos de construção					
Custos de propriedade					
Economia local					
Custos de transação					
Turismo					
Capital privado					
Proteção de infraestruturas					

- f) Selecionaram-se as opções que apresentam a melhor relação entre os impactos positivos e negativos.
- g) As soluções selecionadas foram analisadas do ponto de vista económico e foi realizada a escolha da opção com melhor relação custo-benefício.

Cada opção ao longo do topo da matriz foi avaliado contra o indicadores situada no lado esquerdo da tabela, dependendo se terá efeito positivo ou negativo (vermelho representa impacto negativo, e verde um impacto positivo). O comprimento da barra indica o grau de impacto. Barras longas representam um impacto significativo (positivo ou negativo) e barras curtas indicam impactos menores.

O gráfico abaixo (Figura 2.3) mostra, de forma resumida, os resultados da matriz de avaliação. Os resultados mostram que as opções de "retirar e recolocar" e "defesa aderente recuada" apresentam a melhor relação entre os impactos positivos e os impactos negativos.

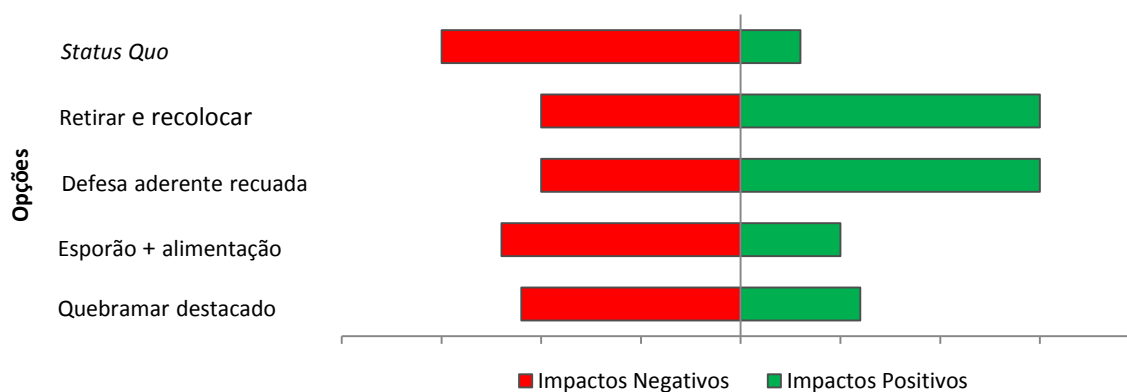


Figura 2.3 – Análise qualitativa das opções de defesa costeira

Feita a análise qualitativa das várias opções de defesa costeira, foi necessário efetuar a análise económica. Esta análise passa por dar um valor económico a cada um dos impactos (positivos ou negativos) promovidos pelas várias opções de defesa costeira. O gráfico da Figura 2.4 mostra que a construção de uma defesa aderente recuada é a opção

que apresenta a melhor relação custo-benefício, sendo esta a melhor solução a aplicar na defesa da linha costeira em Cooks Beach.

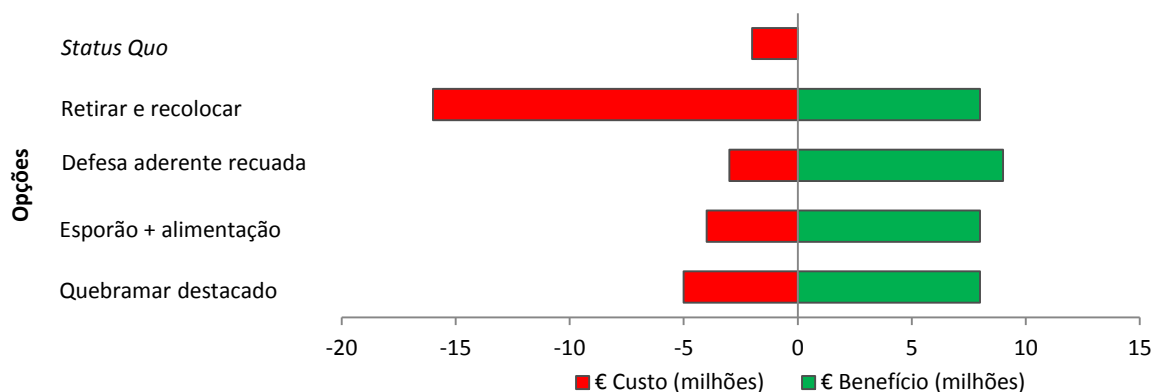


Figura 2.4 – Análise custo-benefício

- **Coastal erosion and coastal defense interventions: a cost-benefit analysis (Roebeling *et al.*, 2011).**

Este estudo teve como objetivo a realização de uma análise custo-benefício para um trecho de costa na zona Centro de Portugal (Figura 2.1). A zona é caracterizada por praias arenosas submetidas a um clima de agitação muito energético, alcançando alturas de onda de 8 m durante as tempestades de Inverno. Verifica-se que nesta zona o transporte sedimentar longitudinal é promovido principalmente pela ação da ondulação. A erosão da linha costeira do Centro de Portugal é atribuída principalmente à crescente artificialização da costa e ao défice de abastecimento de sedimentos por parte de fontes naturais.

A metodologia neste estudo combina a modelação do litoral usando o modelo de evolução costeira LTC (Long-Term Configuration; Coelho, 2005) e uma abordagem de transferência de benefícios para a valorização dos ecossistemas costeiros, na avaliação dos custos e benefícios de uma vasta gama de tipos, localizações e combinações de diferentes estruturas de defesa costeira.

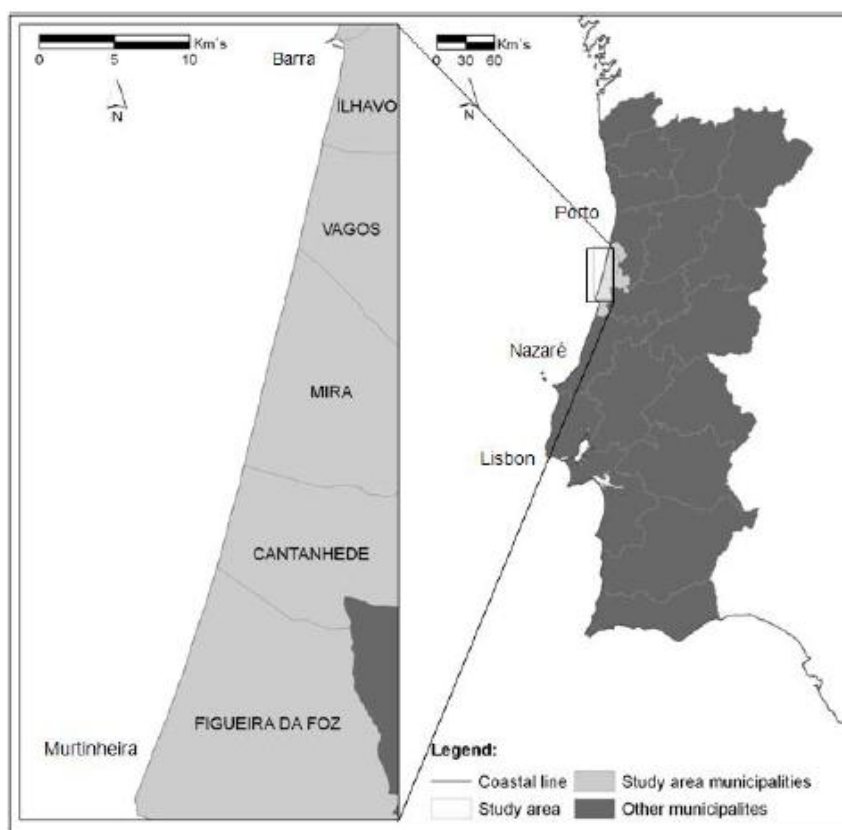


Figura 2.5 – Área de estudo

As soluções de defesa costeira consideradas foram, a aplicação de esporões, a alimentação artificial das praias e a construção de defesas aderentes. Na opção do uso de esporões é feita a distinção entre a construção de estruturas de raiz ou o prolongamento dos esporões já existentes. Os cenários foram simulados para um horizonte temporal de 50 anos, sendo feito o controlo das áreas de erosão e acreção a cada período de 10 anos.

A análise custo-benefício foi realizada em relação à situação inicial, por isso os custos são associados à construção/prolongamento das estruturas de defesa costeira, e os benefícios aos valores dos serviços dos ecossistemas da área (ainda) não perdidos devido a essas intervenções. Para comparar e avaliar a viabilidade económico-financeira de intervenções de defesa costeira com diferente despesa de investimento, custos de manutenção e intervalos de manutenção, foram calculados o valor atual líquido (NPV) e a taxa interna de retorno (IRR) dadas.

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (2.1)$$

Em que r representa a taxa de desconto. O investimento num projeto é compensador quando o valor atual líquido é positivo.

$$\sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+IRR)^t} = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+IRR)^t} \quad (2.2)$$

Neste caso, o investimento num projeto é positivo quando o valor da taxa interna de retorno é superior à taxa de desconto considerada.

Do ponto de vista da análise física observou-se que todos os cenários de intervenção conduziam a uma área perdida menor quando comparada com a situação inicial. No entanto, nenhuma das soluções apresentada revertia a tendência de erosão. A implantação das estruturas a Norte conduz a uma perda menor de área de território visto que a circulação de sedimentos se dá de Norte para Sul. No que diz respeito à análise económico-financeira os autores concluíram que a construção de novos esporões não é uma solução atrativa (baixos valor atual líquido e taxa interna de retorno), enquanto as restantes soluções apresentam um retorno de investimento positivo.

Os autores deste estudo concluíram que é sempre vantajoso a aplicação de estruturas de defesa costeira, uma vez que os benefícios provenientes do usufruto das áreas não perdidas superam os seus custos de funcionamento.

2.2 Modelos numéricos

A elaboração da uma análise custo-benefício aplicada a uma possível intervenção de defesa na linha costeira baseia-se no conhecimento do comportamento da linha da costa

para uma efetiva e eficiente tomada de decisão na resolução dos complexos problemas dos ambientes costeiros. No entanto, a previsão da evolução da linha costeira é uma tarefa de difícil concretização com um grau de precisão efetivo. De facto, a evolução da morfologia da linha da costa é o resultado da interação de diversos processos físicos complexos, que na maior parte dos casos, não podem ser representados numericamente de forma exata. Assim, o estudo com modelos numéricos é um elemento essencial na compreensão e previsão da dinâmica dos sistemas costeiros, e consequentemente nas decisões tomadas para a gestão da linha costeira.

Estes modelos simulam a evolução da linha da costa a médio e longo prazo. Assumem que a forma do perfil transversal é conhecida, simulando as alterações à linha da costa em resposta à alteração das ações incidentes, às condições de fronteira ou a outras intervenções, sendo este ajustamento proporcional ao afastamento em relação à situação de equilíbrio (Silva, 2010).

Os modelos da evolução da linha da costa simulam a evolução da linha da costa para diferentes configurações da praia, podendo incluir diferentes tipos de estruturas de defesa costeira, diferentes tipos de praia e condições de fronteira, para as quais a ação exercida pela agitação marítima é feita variar no espaço e no tempo. Nestes modelos as variações da morfologia do perfil da costa, são atribuídas à evolução temporal das diferenças espaciais das taxas de transporte sedimentar longitudinal. Estes modelos são indicados principalmente na análise de tendências de evolução sistemáticas como a resposta da linha costeira à aplicação de um esporão (Silva, 2010)

Não existe ainda um modelo universal de análise e previsão da evolução da linha costeira a longo prazo. Existe uma variedade de modelos numéricos com abordagens distintas e diferentes pontos de vista, dependendo a escolha do modelo da abordagem pretendida, da natureza do problema e dos objetivos do estudo a realizar. A maioria dos modelos utilizados baseia-se no transporte de sedimentos e na aplicação da equação da continuidade aos volumes de areia movimentados (Clímaco *et al.*, 2008). Os modelos

numéricos mais utilizados são o LITMOD, o GENESIS e o LTC. O LTC por ser o modelo numérico utilizado no âmbito deste estudo, vai ser alvo de uma descrição mais detalhada no Capítulo 3 – CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO.

Capítulo 3 – CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

3.1 Modelo numérico de evolução da linha da costa

A capacidade de prever a médio e longo prazo a evolução da costa arenosa é um desafio complicado devido à complexidade dos processos envolvidos, nomeadamente a variabilidade do regime das ondas, o efeito das tempestades, as fontes de sedimentos e sumidouros, os níveis de água devido a fatores meteorológicos e das marés, a classificação da praia e o seu perfil, a interação com o cordão dunar, etc. A tendência de evolução deve ter também em conta a existência de zonas críticas nas cristas das dunas. As consequências de erosão e inundação vão ser significativamente agravadas quando as praias e dunas são vulneráveis (Coelho *et al.*, 2004). Neste contexto é necessário ter disponível uma ferramenta que ofereça suporte na avaliação de diferentes cenários de evolução e de intervenção. Com este propósito o modelo numérico LTC (Long-Term Configuration) permite o estudo da evolução costeira a médio/longo prazo.

Este modelo permite a consideração de diversos cenários de intervenção de defesa costeira, em função dos quais é possível simular as evoluções previsíveis da zona costeira, para horizontes até 100 anos. O modelo permite verificar possíveis consequências em relação ao tecido urbano edificado e em relação a diversas atividades humanas. Este programa poderá apoiar a tomada de decisão em termos de planeamento, na medida em que é possível comparar alternativas como as de não intervir, proceder a alimentações artificiais com areias, construir estruturas de defesa costeira com diferentes características e dimensões, combinar soluções, suspender ou intensificar a extração de areias, reforçar cordões dunares e deste modo auxiliar na escolha de soluções de

engenharia mais adequadas em termos técnicos, ambientais e socioeconómicos, na mitigação da problemática da erosão da costeira (Coelho e Veloso-Gomes, 2005).

O modelo LTC foi desenvolvido especialmente para praias arenosas, formadas por sedimentos não coesivos, onde a principal causa de evolução da linha da costeira é o transporte dos sedimentos ao longo da costa, estando este transporte dependente do estado da ondulação, nível da água, características e origem do sedimento e estados de fronteira da área de estudo (Coelho, 2005). Os dados de entrada do modelo são a variação do nível da água (causada pelas marés ou pela subida do nível do mar) e a topografia da zona de costa adjacente que vai sendo alterada durante o cálculo (Silva *et al.*, 2007). A formulação base deste modelo numérico consiste no balanço de volumes. Os volumes transportados são estimados através da aplicação de fórmulas que são dependentes do ângulo de incidência da onda na costa e da sua altura (fórmula de CERC), ou do ângulo e da altura, mas também do declive da praia e da granulometria do material sedimentar, quando se recorre à fórmula de Kamphuis (Coelho, 2005). É possível com este modelo simular vários regimes de ondulação, baseados em anos típicos, regimes de ondas aleatórias ou ondas com características constantes. 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, considerando os fenómenos da refração, empolamento e difração junto às estruturas costeiras (Silva *et al.*, 2007). Para cada onda é estimado o transporte longitudinal induzido, fazendo-se um balanço sedimentar, em cada secção elementar da praia, através da equação de continuidade, e avaliando qual o volume de sedimentos em erosão ou acreção.

O modelo numérico LTC combina o modelo clássico de evolução da costa de uma linha, com um modelo de evolução de perfil transversal (Silva, 2010). À semelhança de um modelo de evolução da costa de uma linha, a formulação base deste modelo numérico consiste no balanço de volumes, recorrendo à aplicação da equação de continuidade. O modelo admite que a variação do volume de areia, V , ao longo de uma extensão

infinitesimal de linha de costa é igual à variação de sedimentos em transporte, Q , nessa mesma extensão, ao qual será adicionado ou subtraído eventuais caudais sólidos provenientes de fontes externas (fontes aluvionares, alimentações artificiais, dragagens, extrações de areias, etc.) distribuídas por essa extensão infinitesimal, num instante de tempo dt (Coelho, 2005).

$$\frac{\partial V}{\partial y} = \left(\frac{\partial Q}{\partial y} + q_{ext} \right) dt \quad (3.1)$$

Definindo intervalos de tempo Δt e de espaço Δy , é possível encontrar uma relação entre a variação de volume e a variação no tempo do caudal de sólidos usando a seguinte expressão:

$$\Delta V = (Q_i - Q_{i-1} + Q_{ext})\Delta t = (\Delta Q + Q_{ext})\Delta t \quad (3.2)$$

Considerando $q_{ext} = Q_{ext} \Delta y$ e que a variação de volume de sedimentos ΔV numa extensão Δy ao longo da costa é igual a uma variação na cota Δz dos pontos desse mesmo perfil, é possível o cálculo da alteração do perfil transversal associado a cada trecho Δy por variação do volume de areia ΔV , através da equação 3.3.

$$\Delta z = \frac{\Delta V}{(\text{largura activa})\Delta y} \quad (3.3)$$

A variação de caudal sólido em transporte ao longo de um trecho de extensão Δy , resulta da diferença entre o volume de sedimentos que entra, Q_i , e o volume de sedimentos que sai, Q_{i-1} , desse mesmo trecho em cada intervalo de tempo Δt . Por sua vez esses volumes sólidos em transporte dependem essencialmente das características das ondas na rebentação (altura e orientação), sendo calculados para cada extensão de linha de costa Δy (Coelho, 2005). No modelo LTC o volume calculado é distribuído pelo perfil transversal ativo. Verifica-se uma subida (acrecção) 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. De facto como é demonstrado na Figura 3.1, o modelo numérico procede a ajustes do perfil ativo com as zonas adjacentes, pelo que a variação da posição da linha de costa não vai depender apenas da variação da cota Δz , mas também da barimetria e topografia associada a cada perfil transversal.

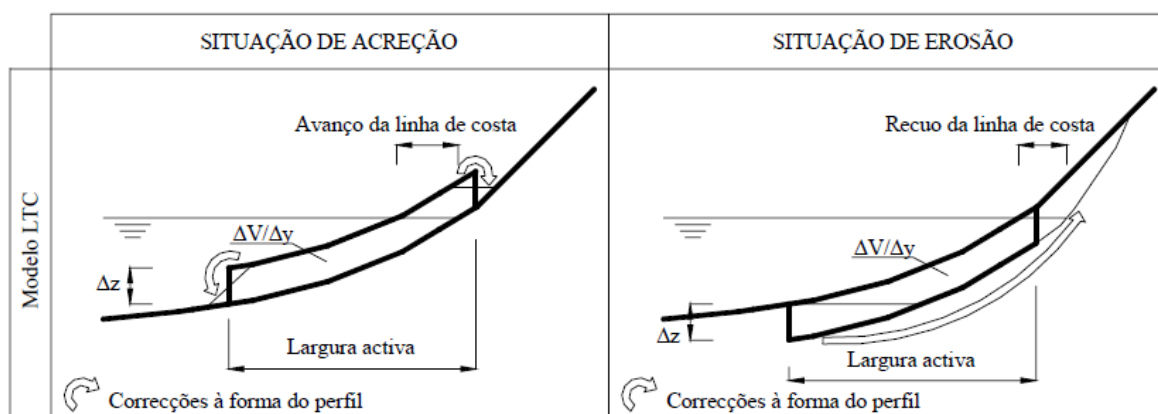


Figura 3.1 – Representação esquemática da formulação de base no modelo LTC (Coelho, 2005)

A variação do perfil é controlada pelas inclinações mínimas, definidas pelo utilizador para a sua parte submersa e emersa, e pela estabilidade dos taludes criados, função do ângulo de repouso dos sedimentos. No caso de situação de acreção, quando o talude de cálculo tem uma inclinação superior ao ângulo de atrito do material sedimentar, é considerado o deslizamento deste material para zonas mais profundas. Na zona emersa, a acumulação das areias provoca o crescimento da praia na horizontal ou de acordo com um declive indicado pelo utilizador. Em situações de erosão, de modo a evitar a escavação contínua na zona de largura activa, o volume que aprofundaria o perfil, é retirado da zona mais alta desse mesmo perfil. Nesta zona, no caso de existirem taludes de inclinação superior ao ângulo de atrito das areias, dá-se, à semelhança do que ocorre na situação de acreção no perfil, o deslizamento das areias para zonas mais profundas, com a consequente correção das formas do perfil. É importante referir que em qualquer das situações acima referidas, na correção da forma do perfil, o balanço de volumes é mantido, respeitando a equação de continuidade dos volumes (Coelho, 2005). 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 (Silva, 2010).

Devido à grande importância das condições fronteira, o modelo permite várias opções, correspondendo a um volume de sedimentos a sair ou a entrar de modo constante na área de modelação, variação de volume na fronteira ou à extrapolação das condições na zona vizinha (Coelho *et al.*, 2004). Além disso, é possível considerar vários trabalhos de defesa costeira em simultâneo. De facto, praticamente não existe limite para o número de esporões, quebra-mares, defesas aderentes, fontes de sedimentos ou alimentações artificiais (Coelho, 2005). A tabela seguinte descreve as principais potencialidades e limitações do modelo numérico LTC.

Tabela 3.1 – Vantagens e desvantagens do modelo numérico LTC (Coelho, 2005)

Potencialidades	Limites
<ul style="list-style-type: none"> • Tradução das diferenças de evolução para além dos limites do perfil ativo, em função de diferentes características topográficas; • Perfil ativo dependente de cada onda, pelo que a distribuição transversal do transporte ao longo de um período de tempo significativo reflete as ocorrências de altura de onda; • Número quase ilimitado de esporões, quebra-mares, revestimentos longitudinais, alimentações artificiais e fontes aluvionares pontuais; • Introdução de ondas ao largo, com diferentes modalidades de alturas, períodos e direções. • Possibilidade de variação dos níveis de água por efeito da maré ou subida do nível do mar; • Difração das ondas devido a esporões e quebra-mares; • Transposição de areias em torno de esporões e quebra-mares; • Versatilidade de condições nas fronteiras da área modelada, constituída por valores ou extrapolação dos caudais sólidos; 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitações inerentes ao atual conhecimento da forma de evolução dos perfis transversais em condições persistentes de erosão ou acreção; • Distribuição transversal do transporte longitudinal é admitida constante ao longo de todo o perfil ativo de cada onda, independentemente do tipo de rebentação da onda; • A posição e forma das intervenções estão condicionadas pela grelha de pontos definida; • Não inclui o efeito das correntes originadas pelas marés, no transporte sólido; • Tratamento muito simplificado da difração. Não inclusão da reflexão em estruturas; • Limitações inerentes ao atual conhecimento do fenómeno de transposição de areias em esporões; • Necessidade de conhecer as características reais, usualmente de difícil quantificação;

O modelo LTC é composto por um conjunto de sub-rotinas de pequena extensão organizadas de acordo com a Figura 3.2. Esta estrutura simplificada permite uma melhor

compreensão do funcionamento do programa, bem como uma rápida e simples alteração dos valores dos parâmetros de entrada, e dos métodos de cálculo usados, potenciando assim o uso do LTC para os mais variados cenários.

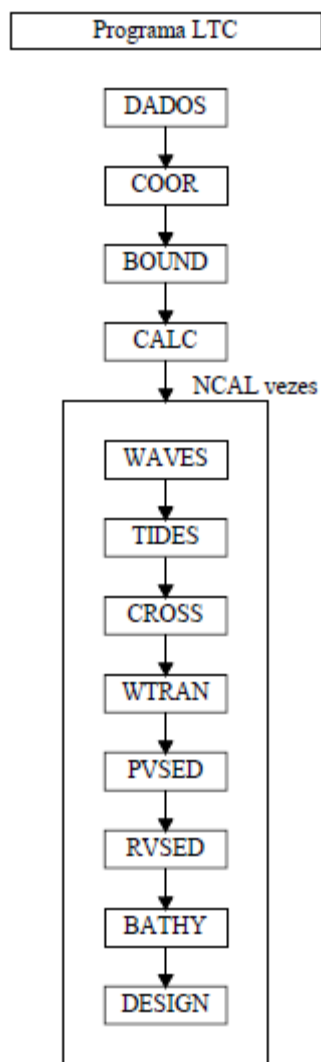


Figura 3.2 – Esquema da sequência de cálculo do LTC (Coelho, 2005)

O LTC permite determinar as áreas de erosão e acreção ao longo da costa decorrentes de diferentes cenários definidos pelo utilizador. A área de acreção representa a área em que existe avanço da linha da costa em relação à posição da linha da costa ao início da simulação. A área de erosão é caracterizada pela área resultante do recuo da linha da costa em relação ao início da simulação (Almeida, 2011).

A evolução da linha costeira para cada cenário pode ser avaliada recorrendo ao ficheiro de saída gráfica gerada pelo Autocad, exemplificado na Figura 3.3.

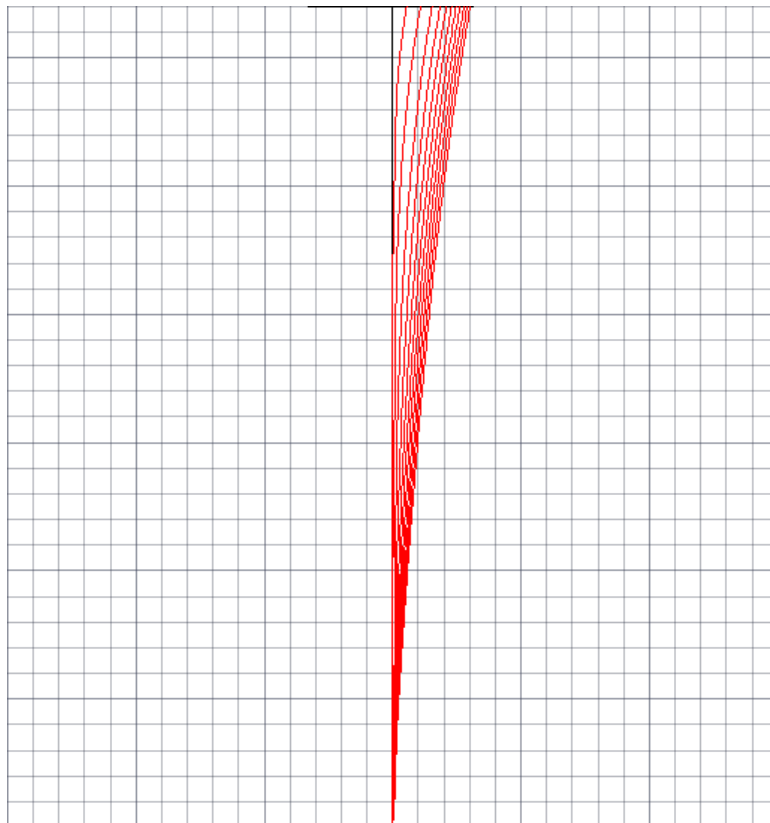


Figura 3.3 – Exemplo de saída gráfica que se pode realizar de um cenário em erosão, modelado no LTC

3.2 Caso de estudo inicial

O caso de estudo apresentado neste trabalho vai recair sobre a análise de um cenário de zona costeira genérico. De maneira a obter dados que permitam uma discussão pertinente e realista sobre a dinâmica dos processos costeiros, foram definidos parâmetros físicos representativos de um trecho de costa da zona noroeste de Portugal. Sobre a zona de estudo fez-se a simulação dos inúmeros cenários de intervenção com esporões recorrendo ao modelo numérico LTC. Para que a configuração do modelo numérico traduza as características naturais da zona alvo do estudo, são definidos dados gerais, nomeadamente as características da água do mar, as características dos

sedimentos, a inclinação dos taludes de erosão e acreção, os intervalos de cálculo e quantidades de saídas gráficas pretendidas e os códigos de tipos de formulações desejadas nos cálculos efetuados pelo modelo numérico. Adotou-se uma base que representa um trecho costeiro de dimensões 8000x20000 m². Este cenário é caracterizado por uma malha de 401 pontos espaçados de 50 m na direção paralela à linha da costa, e 321 pontos espaçados de 25 m na direção perpendicular. O perfil da praia é caracterizado por material sedimentar definido por um $d_{50} = 0.3$ mm e ângulo de atrito de 15° e inclinações nulas nos taludes gerados tanto em situação de acreção como em situação de erosão. A batimetria da região foi gerada com recurso ao perfil de equilíbrio de Dean:

$$h = Ax^m \quad (3.4)$$

Admitiu-se $m=2/3$, para praias intermédias, o que de acordo com Coelho (2005), será o caso da generalidade das praias na costa Oeste de Portugal. Definiu-se ainda o parâmetro $A=0.125$ de acordo com (Morang e Parson 2002).

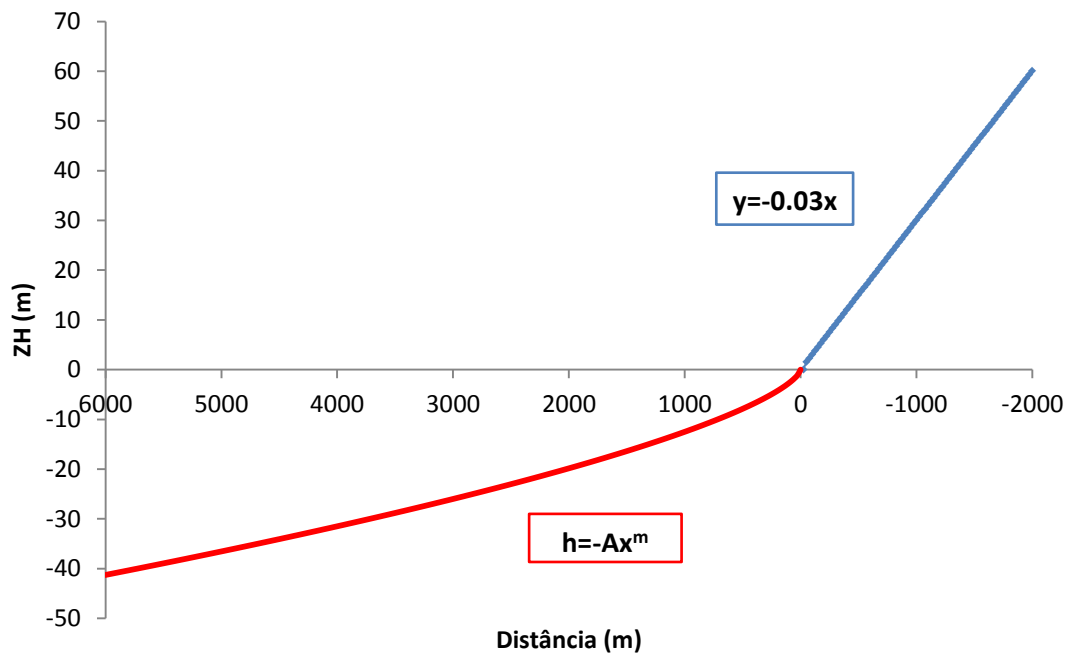


Figura 3.4 – Perfil transversal da praia modelada

Acima da cota 0.0 m (ZH), o perfil é definido pelo declive de 3%. Na Figura 3.4 está representado o perfil transversal da praia, gerado através das expressões adaptadas para o caracterizar.

No que diz respeito às variações das marés, foi admitido que o nível médio do mar se mantém à cota +2.0 m (ZH). Foram testados vários climas de agitação com a onda a variar em termos de altura e ângulo de proveniência. Foram feitos testes com a altura da onda a variar entre $H_s=0.5$ m e $H_s=2.5$ m com intervalos de 0.5m para ângulos de 80° . De modo semelhante, foram testados cenários para ângulos de proveniência de ondas de 80° , 70° e 60° . Nestes cenários a altura de onda permaneceu constante, com 1 m de altura.

Durante as simulações foi adotada a fórmula de CERC no cálculo do volume de sedimentos em transporte ao longo da costa (equação 3.5):

$$Q_l = K \left(\frac{\rho \sqrt{g}}{16k_b^{\frac{1}{2}} (\rho_s - \rho)(1 - n)} \right) H_b^{\frac{5}{2}} \sin(2\alpha_b) \quad (3.5)$$

e a fórmula de Hallermeier no cálculo da profundidade de fecho do perfil transversal (equação 3.6):

$$h_c = 2.28 H_s - 68.5 \left(\frac{H_s^2}{gT_{H_s}^2} \right) \quad (3.6)$$

Nas condições fronteira não foi permitido o fluxo de sedimentos através da fronteira Norte da área modelada. Na fronteira Sul, o volume sedimentar foi obtido através da extrapolação das condições na vizinhança da fronteira, baseado na média dos volumes em transporte nas três secções adjacentes à fronteira Sul. Os testes foram feitos para um horizonte de 172500 horas (20 anos), sendo feito um controlo das áreas de erosão e acreção para cada período de cálculo de 8760 horas (1 ano).

3.3 Cenários de intervenção

Neste subcapítulo é feita a descrição dos vários cenários de intervenção. Estes cenários são representativos das soluções de defesa costeira aplicadas ao caso de estudo inicial. A problemática abordada neste estudo é a erosão da linha costeira e a perda de território para o avanço do oceano. No âmbito deste estudo é somente analisado o uso de esporões numa extensão de linha costeira sujeita a este fenómeno.

Foi definido que o esporão iria ser aplicado no ponto médio do trecho de costa a ser modelado, ou seja, à distância de 10000 m de cada uma das fronteiras da área modelada (Figura 3.5).

Para verificar o impacto do aumento do comprimento do esporão, foi testada a aplicação de esporões de diferentes comprimentos.

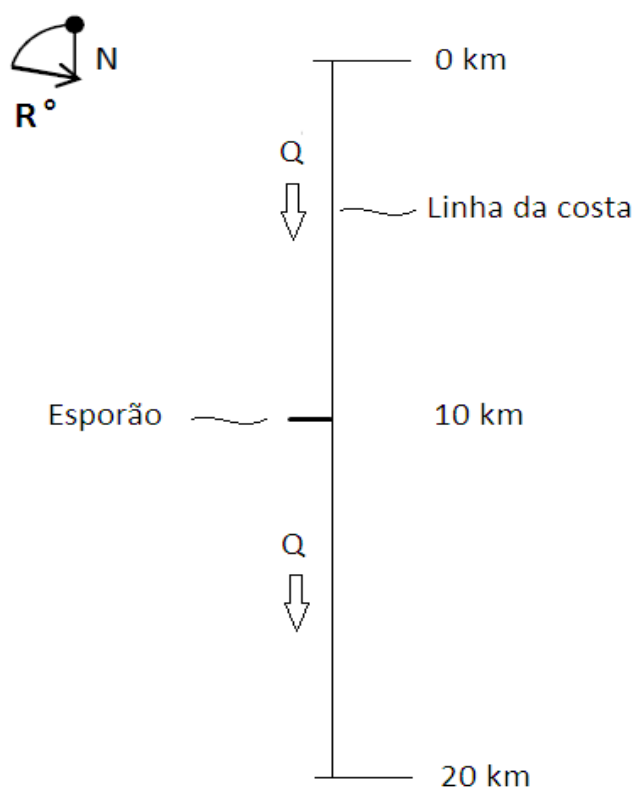


Figura 3.5 – Configuração da linha de costa a modelar

Realizou-se simulações para comprimentos de esporão de 100 m até 500 m, com intervalos de 50 m (nove valores de comprimento). Foram testadas várias alturas de onda. Para cada altura de onda incidente foi testado o recurso aos nove comprimentos de esporão diferentes.

Para a altura de onda $H_s=1.0$ m, os esporões de diferente comprimento foram também testados nos cenários em que a onda tinha um ângulo incidente de 60° e 70° .

Nas simulações das diferentes intervenções também se considerou um horizonte temporal de 172500 horas (20 anos). A frequência de controlo das áreas de erosão e acreção foi de 8760 horas (1 ano). A coincidência de escala temporal entre os cenários de referência e os cenários onde existe intervenção foi necessária para a análise dos benefícios obtidos resultantes da aplicação do esporão para cada um dos cenários modelados. Esta análise consiste num balanço de áreas ganhas entre os cenários em erosão (considerados de referência) e os cenários correspondentes em que existe a intervenção de defesa costeira (implementação de um esporão).

Capítulo 4 – RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da modelação no LTC para cada um dos cenários em estudo. Estes resultados baseiam-se no valor das áreas de erosão e acreção para cada cenário testado, e na observação dos ficheiros de saída gráfica do Autocad. Complementariamente é também realizada uma análise física sobre cenários testados, com a finalidade de uma melhor compreensão da dinâmica costeira na costa Portuguesa.

4.1 Estudo dos cenários de referência

O estudo dos cenários de referência (em erosão) realiza-se através da modelação de um trecho de linha costeira sujeito ao clima de agitação marítimo, e desprovido de qualquer obra de proteção costeira. Foram testadas ondas incidentes de alturas (H_s) compreendidas entre 0.5 m e 2.5 m, com intervalos de 0.5 m, originando assim cinco cenários de erosão distintos. Os controlos das áreas são realizados a cada ano para um horizonte temporal de 20 anos, para o qual foi analisada a evolução da linha costeira. Esta informação pode ser verificada graficamente através da manipulação dos ficheiros de saída gráfica no Autocad, como é demonstrado no exemplo da Figura 4.1.

Em termos de incidência da erosão ao longo da costa, é visível na Figura 4.1 que a ação erosiva do clima de agitação marítimo tem maior expressão junto à fronteira a Norte, diminuindo gradualmente o seu impacto em direção a Sul. A Figura 4.1 demonstra ainda que na ausência de uma estrutura que promova a retenção de sedimentos, a área de erosão vai ser muito significativa, sendo a área de acreção em todos os cenários nula, ou de valor negligenciável.

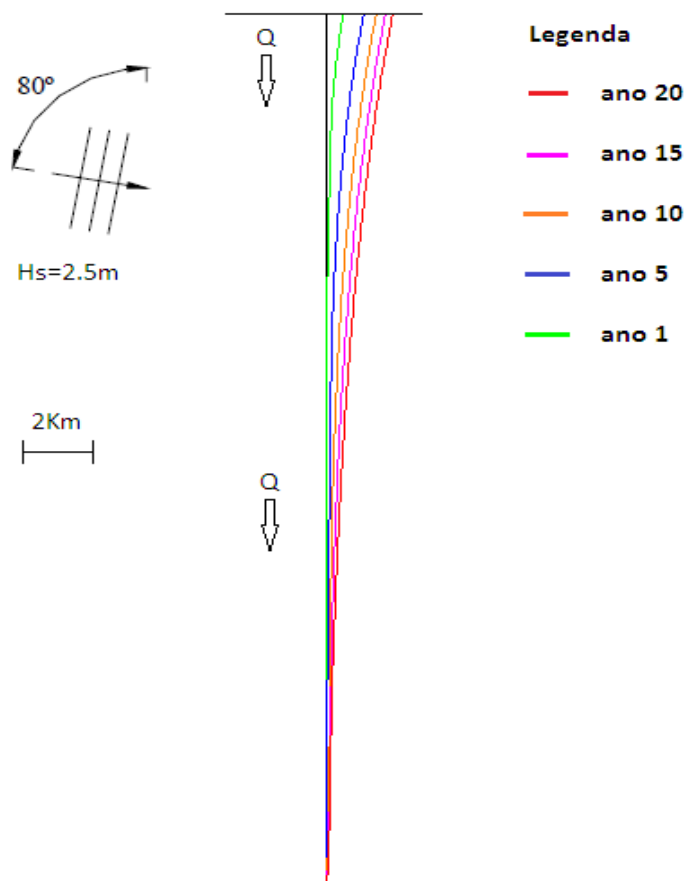


Figura 4.1 – Comportamento da linha de costa ao longo do tempo, em situação de erosão, para uma altura da agitação incidente de $H_s=2.5\text{m}$ e $R=80^\circ$

Em adição ao ficheiro de saída gráfica, o modelo numérico apresenta também como opção de saída a informação sobre o valor (m^2) exato das áreas de acreção e erosão ao longo do horizonte de tempo pretendido, permitindo uma análise mais precisa da evolução da linha da costa para cada um dos cenários modelados. Verifica-se que na totalidade dos cenários, a área de erosão aumenta com o passar do tempo, mas por outro lado, denota-se um abrandamento da tendência de erosão durante o horizonte temporal de estudo. A Tabela 4.1 demonstra esta tendência de aproximação ao equilíbrio. Esta tendência de erosão é visivelmente influenciada pelas características de onda incidente, uma vez que o aumento da altura da onda provoca uma evolução mais acelerada da erosão costeira.

Tabela 4.1 – Distribuição relativa da área de erosão, para as várias alturas de onda incidente, ao longo de 20 anos

Tempo (anos)	[1-5]	[6-10]	[11-15]	[16-20]
H _s =0.5m	29%	26%	23%	22%
H _s =1m	30%	25%	24%	21%
H _s =1.5m	31%	26%	23%	20%
H _s =2m	32%	27%	22%	19%
H _s =2.5m	33%	27%	22%	18%

Outro aspeto observado, e que é importante realçar, é a diferença entre as áreas de erosão dos vários cenários modelados. Na Figura 4.2, observa-se que a área total erodida ao longo de uma secção de linha costeira, é proporcional à altura de onda incidente, ou seja, quanto maior a altura da onda incidente sobre um trecho de costa, maior será a área de erosão resultante.

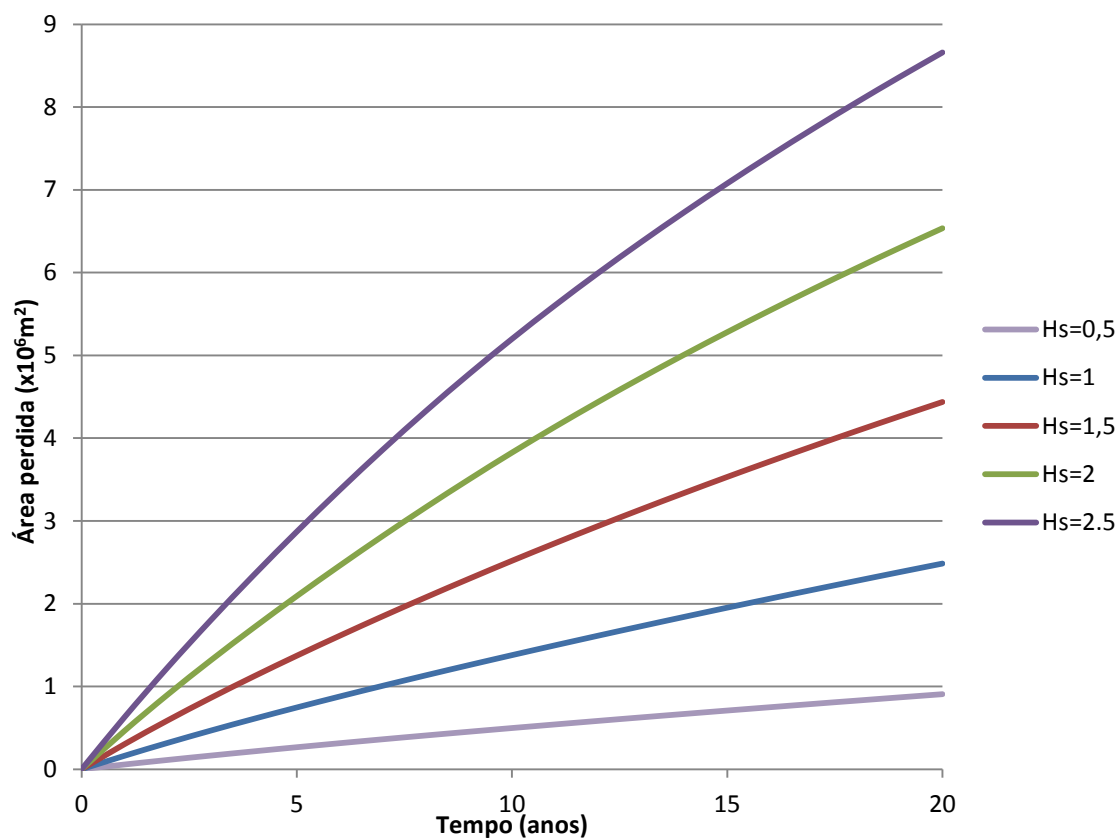


Figura 4.2 – Evolução da área de erosão para os cenários de referência (m²)

Para a altura de onda de 1.0 m, fez-se ainda variar o ângulo de incidência das ondas na rebentação. Observa-se que a erosão é máxima para uma ondulação com um rumo de incidência de 60° em relação à linha da costa, diminuindo a área erodida para rumos de incidência de maior valor. A figura seguinte demonstra que existe uma relação de proporcionalidade inversa entre o rumo da onda incidente e a área de erosão de cada cenário.

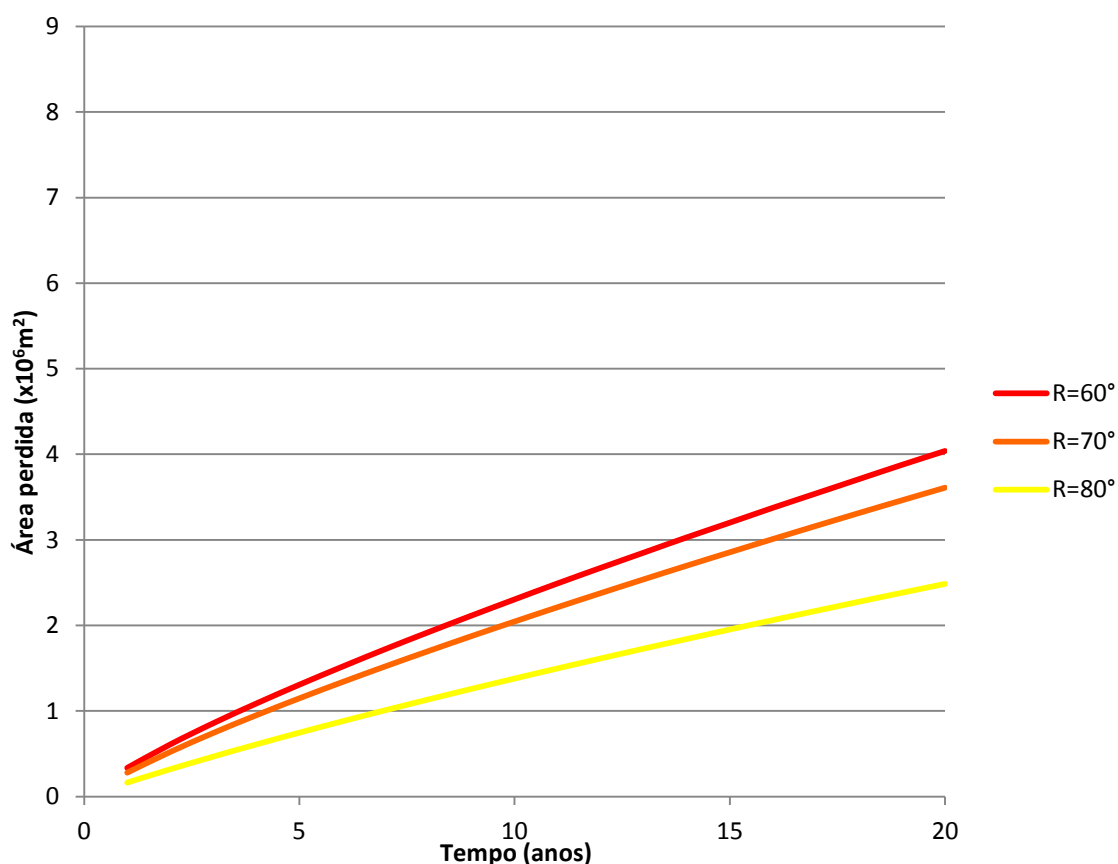


Figura 4.3 – Evolução das áreas de erosão para os cenários de onda de 1 m de altura (m²)

4.2 Estudo dos cenários de intervenção

Os cenários de intervenção resultam da aplicação de obras de defesa costeira aos cenários em erosão analisados no subcapítulo anterior. Neste estudo é analisado o efeito da aplicação de esporões na mitigação do processo erosivo da linha costeira. Além disso,

procura-se perceber a relação entre o comprimento do esporão, e a alteração da dinâmica costeira que a sua ação provoca. São simulados cenários com os diferentes comprimentos de esporão, e analisam-se os respectivos resultados. A presença de um esporão vai mudar a dinâmica costeira, quando comparado com os cenários de referência como é exemplificado na Figura 4.4.

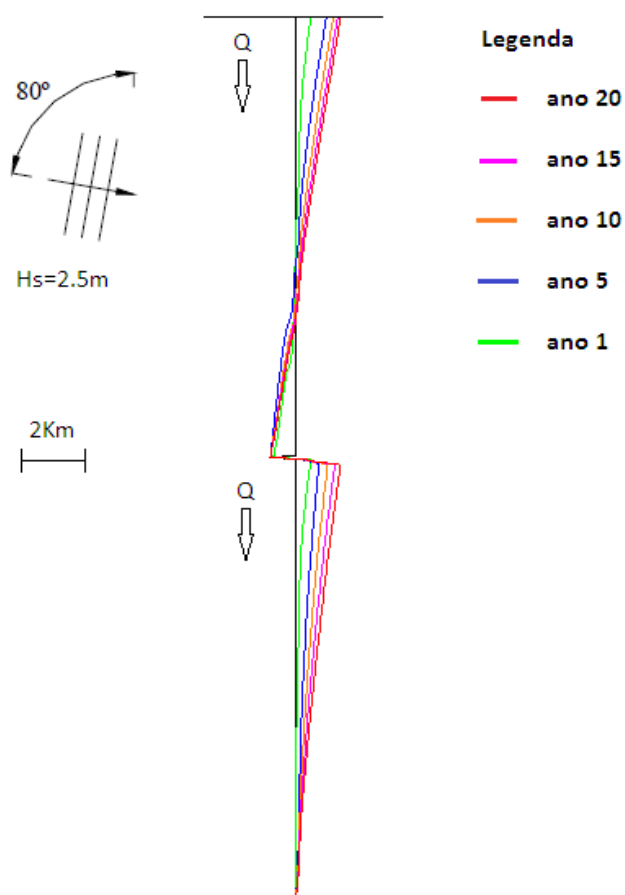


Figura 4.4 – Comportamento da linha de costa ao longo do tempo nas proximidades de um esporão para uma altura da agitação incidente de $H_s=2.5\text{m}$ e $R=80^\circ$

Ao invés da erosão contínua que se verifica nos cenários de referência ao longo do horizonte temporal de estudo, o esporão impede a circulação dos sedimentos, promovendo a retenção de sedimentos a barlar (a Norte). No entanto a quebra do transporte longitudinal sedimentar origina um déficit sedimentar a sotamar (a Sul) do esporão, e como consequência nesta zona dá-se um maior recuo da linha da costa.

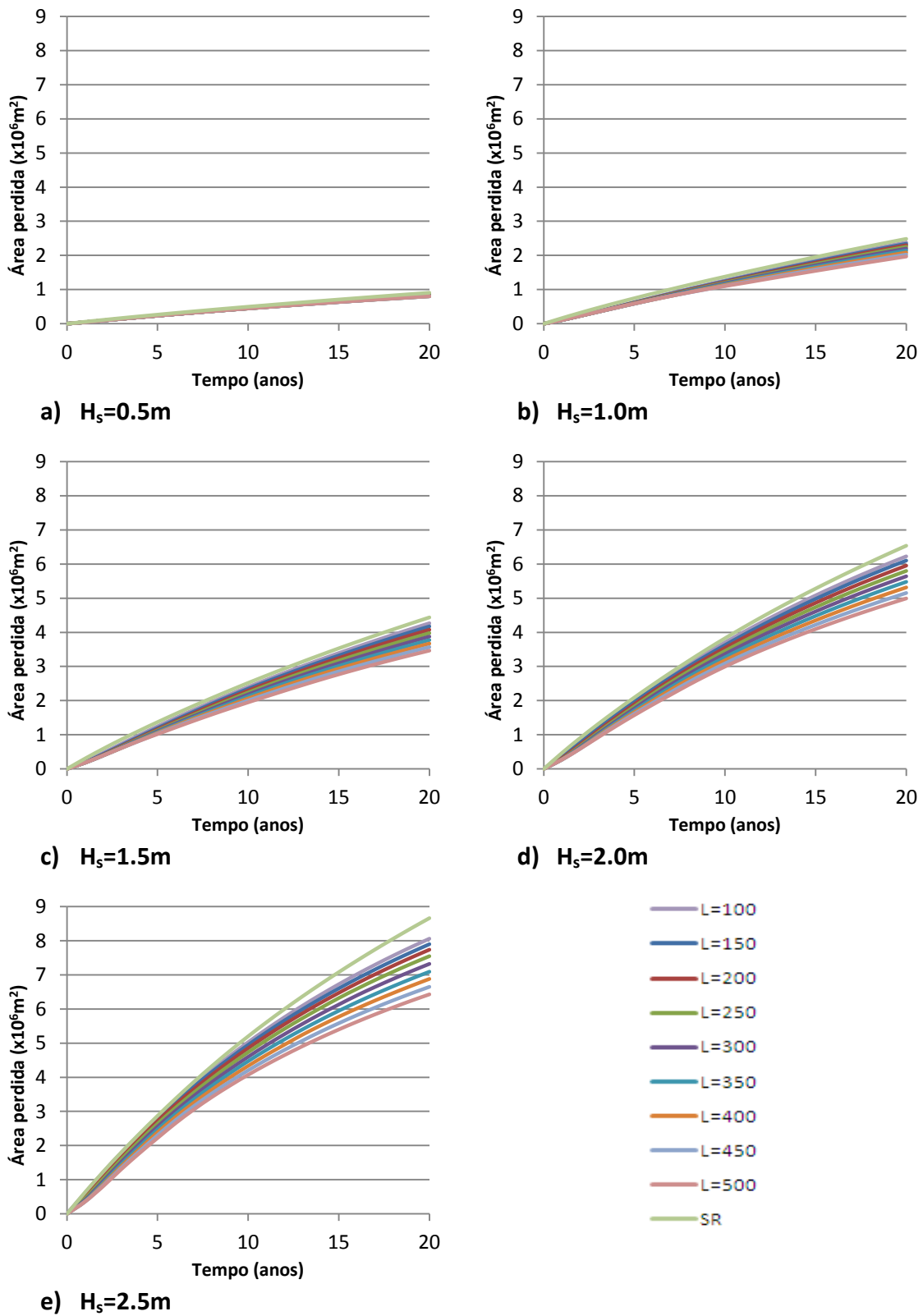


Figura 4.5 – Evolução da área perdida ao longo do tempo para os diferentes cenários simulados

A análise dos resultados da modelação consiste em grande parte numa análise sobre as áreas resultantes, tanto de acreção como de erosão. A Figura 4.5 apresenta a diferença entre a área de erosão e a área de acreção (um balanço de áreas), representando a área perdida para cada cenário.

A análise dos resultados mostra que para todos os cenários simulados, ocorre um aumento contínuo da área perdida ao longo do horizonte temporal considerado. Esta tendência ocorre para todos os comprimentos de esporão. No entanto, a Figura 4.5 mostra que a área perdida é menor em cenários servidos por esporões de maior comprimento. De facto, a situação mais favorável ocorre no cenário do esporão de 500 m, enquanto a maior área perdida ocorre no cenário do esporão de 100 m.

Observa-se ainda que a altura da onda incidente influencia a área perdida, uma vez que para condições semelhantes, a erosão é maior em cenários de maior altura de onda incidente, ou seja, quanto maior a altura da onda, maior será a área perdida resultante da ação do clima de agitação marítima. Foi testada também a influência que o rumo da ondulação incidente possui na dinâmica costeira. Para uma altura de onda de 1.0 m foram testados diferentes rumos de incidência, correspondendo a 70 e 60°.

Na Figura 4.6 é representada a evolução das áreas perdidas para os diferentes rumos dos cenários de onda incidente de altura 1.0 m. A área perdida é visivelmente influenciada pelo rumo da ondulação incidente, sendo maior para o rumo de 60° e diminuindo para os rumos de 70° e 80°. Pode-se dizer então que a área perdida aumenta pela razão contrária ao ângulo do rumo da ondulação em relação à linha da costa. Este comportamento é coincidente entre os cenários intervencionados e os cenários de referência.

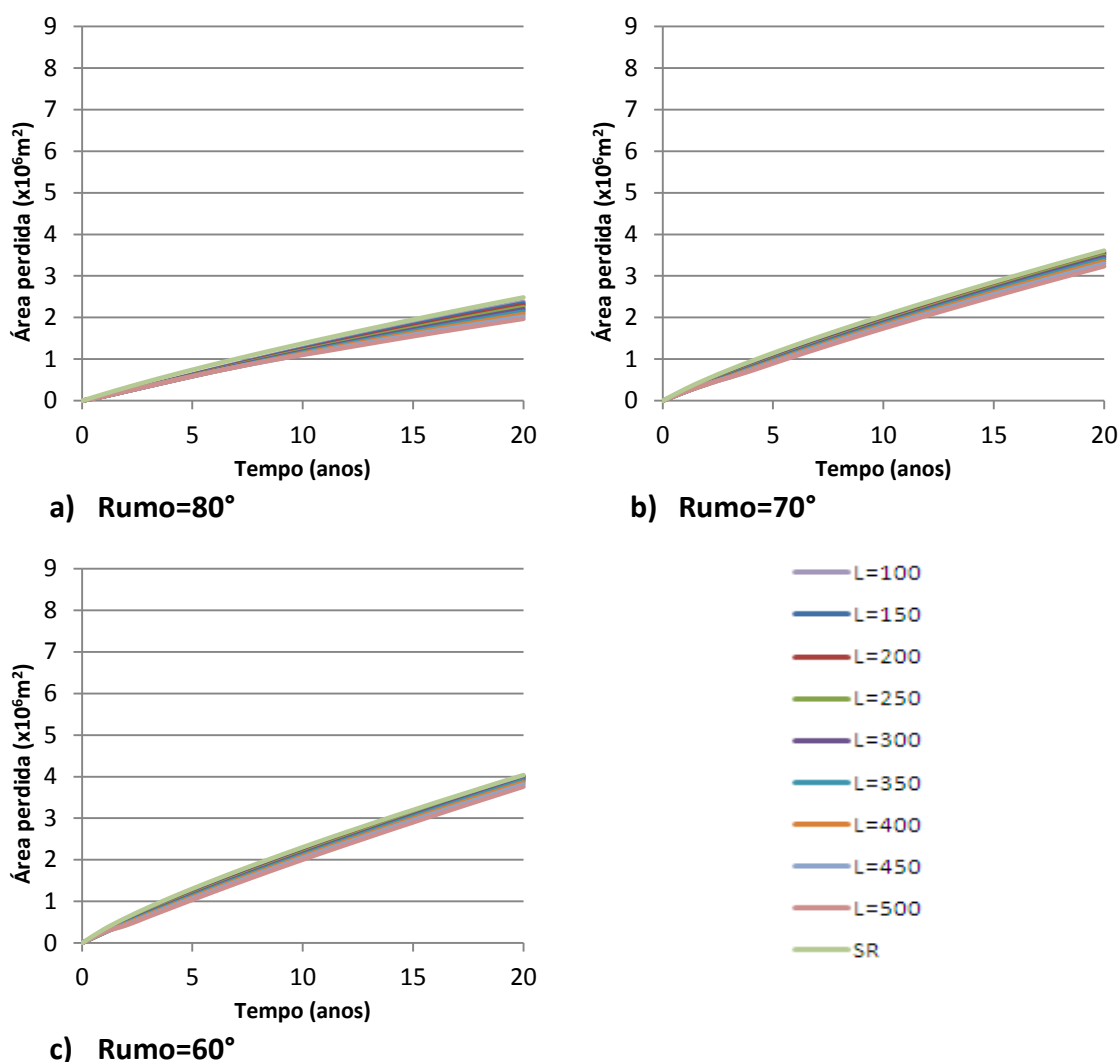


Figura 4.6 – Evolução da área perdida ao longo do tempo para os diferentes rumos para uma onda incidente de altura 1.0 m

4.3 Interpretação de resultados

1. Cenários de referência

O ficheiro de saída gráfica do Autocad revela que a distribuição da área de erosão não é uniformemente distribuída ao longo da extensão de praia modelada. Observa-se que a área de erosão é máxima junto à fronteira Norte, diminuindo o seu impacto no sentido Sul. Esta disposição da linha da costa resulta da ação da ondulação incidente (Noroeste) e

das condições de fronteira que limitam o transporte sedimentar no perfil modelado. A proveniência da ondulação incidente (Noroeste) resulta numa circulação de sedimentos no sentido de Norte para Sul. A dinâmica da linha costeira, além de depender do volume sedimentar em circulação no sistema, depende também das condições fronteira adotadas. Para simular um cenário em déficit sedimentar, é necessário que não haja realimentação contínua da célula costeira por sedimentos provenientes da fronteira Norte. Para isso, foi imposto ao modelo numérico um volume sedimentar nulo de entrada na fronteira Norte. Na fronteira Sul impôs-se que o volume sedimentar de saída de sedimentos é extrapolado do valor médio da zona adjacente à fronteira Sul, ou seja os sedimentos que chegam a esta zona são os mesmos que circulam para fora da fronteira. A circulação de sedimentos no sentido Norte-Sul e o déficit sedimentar imposto provoca um recuo da linha da costa muito acentuado na zona Norte e uma quase total ausência de movimentos da posição da linha da costa a Sul.

A Tabela 4.1 mostra que para os cenários de referência (em erosão), ocorre uma diminuição relativa da ação erosiva sobre a linha costeira ao longo do horizonte temporal considerado. No entanto, o comportamento indica que para as condições impostas aos cenários analisados, o horizonte temporal de 20 anos é insuficiente para que a linha da costa atinga a posição de equilíbrio.

Ao analisar os dados resultantes dos cenários para as diferentes altura e rumos da onda incidentes, verifica-se que a capacidade de transporte sedimentar é sensível à variação destes parâmetros. A Figura 4.2 mostra que as áreas erodidas são maiores para alturas de onda de maior valor, o que sugere que quanto maior a altura de onda incidente, maior será a sua capacidade de transporte sedimentar. No que diz respeito aos rumos da ondulação, verifica-se na Figura 4.3 que diferentes rumos originam diferentes perdas de território. Quanto menor for o ângulo do rumo da ondulação incidente em relação à linha da costa, maior será o transporte sedimentar. Sabe-se que um trecho de costa submetido à ação erosiva da agitação marítima, tende a aproximar a sua orientação à orientação da crista da ondulação incidente. Assim, a incidência de uma ondulação de menor ângulo, vai

obrigar a uma maior “rotação” da linha da costa, e conseqüentemente uma maior retirada de sedimentos.

Esta dinâmica é traduzida pela fórmula de CERC. A fórmula de CERC (equação 3.5) é principalmente dependente da altura da ondulação incidente (H_s) e do ângulo da ondulação em relação à linha da costa (rumo) (Coelho, 2005). Ao analisar esta expressão torna-se evidente que quanto maior for o valor da altura de onda incidente, maior será a capacidade de transporte sedimentar exercida pela agitação marítima. De modo semelhante, um menor ângulo entre a linha costeira e a orientação da ondulação incidente favorece a capacidade de transporte sedimentar longitudinal expressa pela fórmula de CERC.

2. Cenários de intervenção

A análise aos cenários de intervenção foi efetuada com base na determinação das áreas perdidas para os diferentes cenários. As áreas perdidas aumentam ao longo do horizonte temporal de 20 anos de forma contínua. O crescimento contínuo das áreas perdidas indica que a erosão aumenta a um ritmo superior ao da acreção, estabelecendo ao longo de 20 anos uma diferença cada vez maior entre a área de erosão e a área de acreção. Como se verifica na Figura 4.5, este comportamento é observado para todos os comprimentos de esporão testados.

Apesar de todos os cenários de intervenção apresentarem um balanço sedimentar negativo (área perdida sempre superior a zero), verificou-se que a área perdida em cada cenário era sempre inferior quando comparada à área perdida nos cenários de referência (não servidos por esporões) correspondentes. Concluiu-se então, que independentemente do comprimento do esporão ou da altura de onda incidente, a aplicação de esporões representa sempre um ganho de território costeiro em relação aos cenários de referência. Os dados da Figura 4.5 mostram que este ganho de território é tanto maior quanto maior for o comprimento de esporão aplicado, uma vez que para

todas as alturas de ondulação, a área perdida decresce à medida que aumenta comprimento do esporão. É então possível estabelecer que quanto maior o comprimento do esporão, maior será a área de território não perdida.

Neste estudo, à semelhança do estudo dos cenários de referência, foram analisados os efeitos da variação dos parâmetros de altura (H_s) e rumo (R) de incidência da ondulação. Observa-se na Figura 4.5, que o transporte sedimentar relaciona-se com a altura de onda incidente de forma exponencial. A área perdida é maior para ondas incidentes de maior altura, diminuindo para ondulação de menor altura. No que diz respeito ao critério de aplicação dos esporões, verifica-se que para ondas de menor altura, nomeadamente a onda de 0.5 m e 1.0 m de altura, a variação do comprimento dos esporões causa pouco impacto no ganho de território costeiro. Para as ondas de maior altura, o efeito de mitigação da erosão promovido pelo esporão é significativo, aumentando os ganhos ao longo do horizonte temporal.

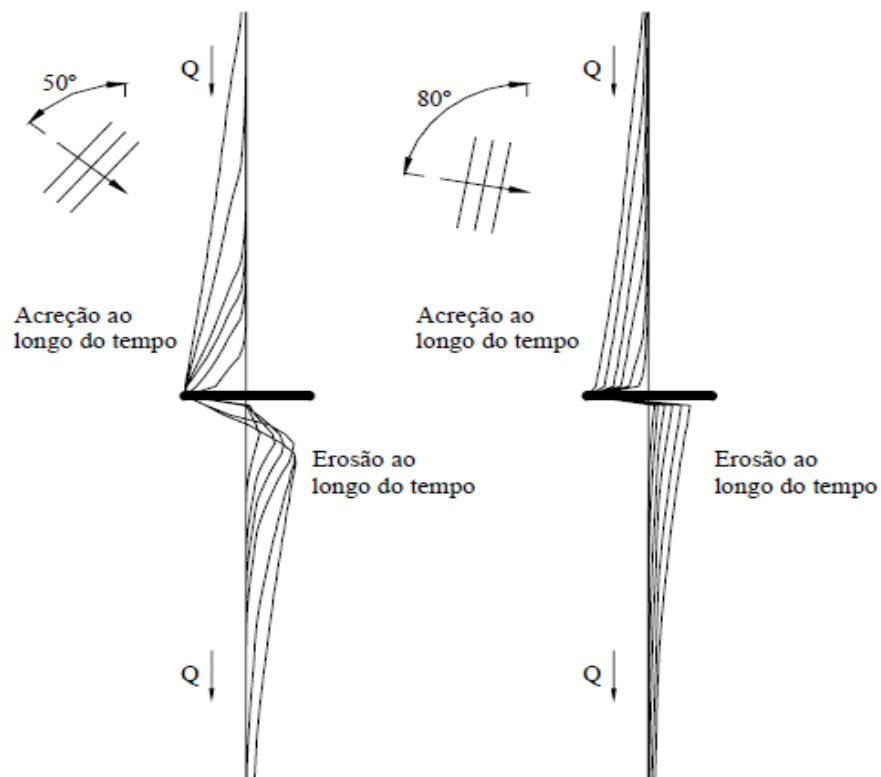


Figura 4.7 – Comportamento da linha de costa nas proximidades de um esporão, para duas situações de proveniência da agitação (Coelho, 2005)

Por fim foi analisada a influência do rumo da ondulação em cenários servidos por um esporão. Para uma onda de altura igual a 1.0 m, constata-se que a aplicação de um esporão não altera a dinâmica base de transporte sedimentar. De modo semelhante aos cenários de referência, quanto menor for diferença entre o rumo da ondulação e a linha da costa, maior é o transporte sedimentar, e consequentemente maior a área perdida. Este comportamento é exemplificado na Figura 4.7.

Capítulo 5 – CUSTOS E BENEFÍCIOS

Após a definição dos diferentes cenários a modular no decorrer do estudo custo-benefício, foi necessário encontrar os custos e os benefícios de cada cenário. A partir destes valores é que se pode definir o balanço entre custos e benefícios para cada cenário, uma vez que esta análise é a base do processo de decisão inerente à intervenção de defesa costeira (Anexo I).

5.1 Estimativa dos Custos

A estimativa dos custos intervenientes numa análise custo-benefício consiste na determinação do custo de investimento e de manutenção durante o período de estudo definido (20 anos). Mais concretamente no caso de estruturas de defesa costeira, o custo de investimento é definido pelo custo do projeto, custo de transporte da matéria-prima e custo de construção. Ao custo de investimento é somado o custo das intervenções de manutenção. De facto ao longo do tempo a capacidade estrutural do esporão vai-se reduzindo fruto das ações energéticas do clima de agitação marítimo. É então essencial proceder a intervenções de manutenção periódicas, para que as estruturas continuem a desempenhar satisfatoriamente as suas funções de retenção de sedimentos. O período de manutenção vai estar dependente principalmente das condições energéticas atuantes e do modo de execução da estrutura. Como já foi referido, o custo das intervenções de manutenção é um custo periódico, ou seja, é um valor que será contabilizado repetidamente ao fim de um determinado período de tempo. Para a escolha do período de manutenção a considerar foi considerado um período médio determinado a partir das intervenções de reparação de esporões em diferentes zonas do país (Tabela 5.1).

Tabela 5.1– Período médio de manutenção para diferentes obras de defesa costeira (adaptado de Reis, 2010)

Local	Anos com intervenções	Período médio (anos)
Espinho	1996(2x), 1999, 2001, 2003	2.2
Ovar	1996 (3x), 2002	2.0
Vagos	1997,1999(2x), 2002	2.5
Figueira da Foz	1998 (3x)	3.3

Nos locais referenciados, o período médio determinado para operações de manutenção é de 2.5 anos. Optou-se por simplificar o processo de cálculo com a adoção de um período exato de manutenção, de 3 anos. Assim durante vinte anos de funcionamento do esporão, são realizadas intervenções de manutenção ao fim de 3, 6, 9, 12, 15 e 18 anos. Portanto, durante o período de estudo é contabilizado por uma vez o custo de construção e por seis vezes o custo de intervenção de manutenção.

5.1.1 Dimensão do esporão

O custo de investimento do esporão é naturalmente dependente das suas dimensões, uma vez que tanto o custo de construção como o custo de transporte da matéria-prima variam de acordo com o volume de material utilizado no processo de construção. De modo semelhante, os custos de manutenção são proporcionais ao volume do esporão, aumentando ou diminuído conforme a maior ou menor quantidade de material a ser repostado no esporão. O volume do esporão vai naturalmente aumentar de acordo com o comprimento e altura da obra. O aumento do comprimento contribui para o aumento do volume do esporão, mas à medida que o esporão avança em direção ao mar a sua altura também aumenta, uma vez que a fundação do esporão segue o perfil descendente da praia.

Começou-se por definir a geometria e as dimensões do perfil transversal do esporão. Foi adotada para os esporões uma seção transversal do tipo trapezoidal, com taludes de inclinação 1.5:1 para assegurar estabilidade (Figura 5.1). A cota de coroamento foi fixada

como sendo + 8.0 ao Zero Hidrográfico (ZH), e definiu-se uma largura para o coroamento de 6.0 m. No enraizamento a cota de coroamento mantém-se, a sua altura diminui progressivamente de acordo com o perfil da praia de inclinação 3%. Abaixo da cota 0.0 (ZH) a profundidade do esporão segue o perfil imerso da praia, e é definida pela expressão do perfil de equilíbrio de Dean (equação 3.4).

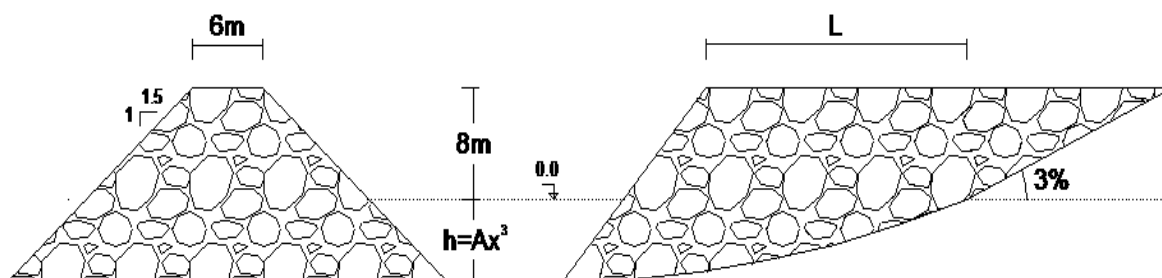


Figura 5.1 – Esquema do perfil transversal e longitudinal do esporão

Foram determinadas expressões que traduzissem a área do perfil do esporão em toda a sua extensão. Para a definição do volume total do esporão foi calculado o integral das expressões da área do perfil do esporão em ordem à extensão do esporão.

$$V = 7200 + 0.01L(L^{4/3} + 179.2L^{2/3} + 8960) \quad (5.1)$$

Na expressão 5.1, a variável L representa o comprimento do esporão a modelar. Com o objetivo de estudar o impacto do esporão na dinâmica da linha costeira, foi decidido proceder à implementação de esporões de diferentes dimensões. Os esporões variam no seu comprimento de caso para caso, enquanto a área transversal permanece constante para todos os casos de estudo. O comprimento do esporão pode variar entre 100 m e 500 m, com incrementos de 50 m entre cada cenário. Portanto existem nove casos de estudo, cada um associado a um comprimento e conseqüentemente a um volume diferente, como é exposto na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Volumes dos esporões

Comprimento (m)	Volume (m³)
100	20485
150	29424
200	39316
250	51316
300	64197
350	78342
400	93743
450	110392
500	128287

5.1.2 Apresentação dos custos

Após o cálculo do volume de cada esporão foi estimado o custo de funcionamento de cada um. O custo de funcionamento é estimado pela soma do custo inicial de construção, com os custos das intervenções de manutenção periódicas ao longo do período de funcionamento do esporão (20 anos). O custo de construção é definido pela aplicação do custo unitário de construção ao volume total do esporão. De modo semelhante, o custo de manutenção é estimado pela multiplicação do custo unitário de manutenção pelo volume total do esporão, como se mostra na equação 5.2.

$$C(V_{\#}) = \alpha V_{\#} \quad (5.2)$$

Na expressão, α simboliza os custos unitários definidos e $V_{\#}$ (em m³) representa o volume do esporão a ser construído. O custo de construção difere conforme o contexto em que se pretende realizar a obra. O preço da matéria-prima, distância de transporte da fonte até ao local da obra e o preço de mão-de-obra, são fatores que contribuem para a variabilidade do preço de construção de um esporão. Após a consulta de estudos realizados sobre o tema de aplicação em praia de esporões, optou-se por admitir um valor de 30 €/m³ para o preço de construção.

Calcula-se os custos de manutenção da maneira análoga aos custos de construção. Neste caso o valor do custo unitário de manutenção é distinto do custo unitário de construção. Estima-se que os custos de manutenção respeitem a proporção de aproximadamente 30% do custo inicial de construção arte (DPI, 2007). Assim, para o custo de construção de 30 €/m³, foi adotado um custo de manutenção de 10 €/m³.

No decorrer de uma análise custo-benefício é necessário projetar não só valores de custo e benefício atual, mas também valores de custo e benefício em algum ponto no futuro. De maneira a possibilitar uma comparação entre custos e benefícios projetados em diferentes pontos no tempo, é necessário considerar o valor da moeda de um único ano, aplicando a estes valores uma taxa de desconto (Rosa, 2006). Assim, para converter valores futuros para valores atuais, aplicou-se para cada ano de estudo a seguinte relação entre estes valores:

$$C(V_{\#}) = \frac{\alpha V_{\#}}{(1 + r)^t} \quad (5.3)$$

De acordo com Roebeling *et al.* (2011), nesta expressão C_t (€) representa os custos estimados em cada ano, r representa a taxa de desconto adotada e t o período de estudo (anos). Adotou-se uma taxa de desconto de 5% por ser a taxa usualmente aplicada a este tipo de projetos. Assim, foi determinado para os diferentes comprimentos de esporão, o custo de construção e o custo de funcionamento para o horizonte temporal de 20 anos. A Figura 5.2 expõe os custos de construção e de funcionamento dos vários esporões.

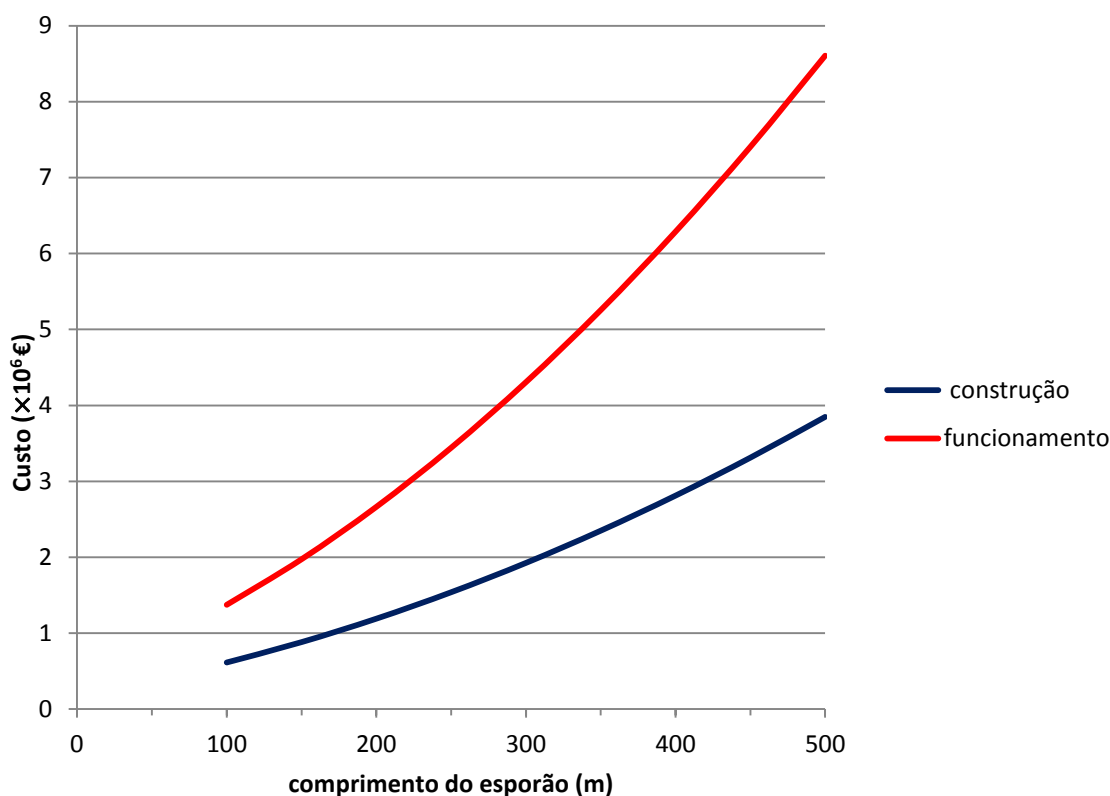


Figura 5.2 – Custo de construção e de funcionamento durante 20 anos, para diferentes comprimentos de esporão

5.2 Estimativa dos benefícios

A análise dos benefícios permitem identificar o valor positivo que será expectável da possível realização de um projeto, auxiliando assim na tomada de decisão sobre a sua viabilidade económica. No caso deste estudo, os benefícios estão associados à preservação de territórios nas zonas costeiras. Os benefícios da intervenção de proteção costeira resultam diretamente da valorização da área não perdida em cada cenário estudado. A área não perdida representa a área que é “recuperada” ao avanço do mar em consequência da construção da estrutura de defesa costeira sobre os cenários iniciais (em erosão). Para a realização da análise custo-benefício, a área não perdida de cada cenário é convertida num valor monetário, possibilitando assim a sua comparação com os custos das obras de defesa costeira.

5.2.1 Benefícios gerados

Definidas as áreas dos cenários de erosão e dos cenários de intervenção de defesa costeira, é possível estimar os benefícios. A equação 5.4 demonstra o processo de cálculo da área não perdida. A área não perdida é determinada através da diferença entre as áreas perdidas no cenário de referência (A_i) e em cada um dos cenários de intervenção ($A_{\#}$). Este método é realizado ao longo do tempo para cada um dos diferentes cenários de intervenção de defesa costeira.

$$A_{NP\#} = A_i - A_{\#} \quad (5.4)$$

Obtidas as áreas não perdidas para cada cenário, é possível então estimar os benefícios associados a essas áreas. A estimativa dos benefícios é obtida através do produto entre as áreas não perdidas (em m^2), resultantes do balanço de áreas, e o valor do preço unitário adotado para as áreas.

$$B(A_{NP\#}) = \beta A_{NP\#} \quad (5.5)$$

Na equação 5.5, β é o valor do preço unitário (€/ha/ano), e a área não perdida de cada cenário é representada por $A_{NP\#}$ (ha). O valor de preço de área unitário (β) depende da função exercida no território salvaguardado, ou seja, vai ser valorizado o rendimento que esta área pode oferecer na condição de ser poupada à erosão costeira. A abordagem usada para a determinação deste “preço unitário” é a chamada transferência de benefícios. A transferência de benefícios é uma ferramenta de avaliação econômica que usa estimativas de avaliação de outras áreas (locais de estudo), e aplica estes valores a locais similares. O uso desta ferramenta envolve um sistema de balanceamento de erros e *trade-offs* para chegar a estimativas de valor de uma área natural quando existem restrições temporais e financeiras. A chave para a transferência de benefícios é aceitar que uma exata estimativa de um valor econômico não é possível devido a restrições

orçamentárias e/ou financeiras, e assim, fazer o melhor uso possível de literatura existente como meio para avaliar a importância económica de um área natural. Isto é feito através da adaptação e aplicação de estimativas a partir de estudos existentes que melhor se adequam ao novo contexto. Neste estudo a transferência de benefícios é utilizada na estimativa de um valor de preço de área unitário para os ecossistemas costeiras da costa Noroeste de Portuga (Roebeling *et al.*, 2011).

O facto dos cenários modelados neste estudo serem representações genéricas de um trecho de costa da zona Noroeste Portuguesa, não permite a aplicação de um valor de preço de área unitário em concreto. Assim o valor da área a ser usado foi baseado numa estimativa da média dos valores de ecossistemas presentes na Tabela 5.3, correspondente a cerca de 10000 (€/ha/ano). No entanto pelo facto de se assumir que na zona estudada existe a predominância de sistemas de praia/duna/areia, foi adotado um valor superior à média estimada. Deste modo, optou-se por usar para a totalidade dos cenários, o valor de 15000 (€/ha/ano) na determinação dos benefícios promovidos pelas áreas não perdidas.

Tabela 5.3 – Valores de ecossistemas costeiro (em 2010) (Roebeling *et al.*, 2011)

Nível 1	Nível 2	Nível 3	Valor (€/ha/ano)
Zonas Húmidas	Interior	Pântano	22714
	Costeira	Sapais	11588
		Salinas	11588
Corpos de água	Interior	Todas as categorias	9857
	Marítimos	Lagoas costeiras	22044
		Estuários	26485
Agricultura	Arável	Todas as categorias	107
	Permanente	Todas as categorias	107
	Heterogénea	Todas as categorias	107
Floresta	Floresta	Todas as categorias	350
	Arbustos	Todas as categorias	269
	Aberto	Praia/Duna/Areia	22714
		Vegetação esparsa	269

De modo a comparar fluxos económicos de diferentes pontos no tempo, aplica-se aos benefícios obtidos uma taxa de desconto. Como é demonstrado na equação 5.6

(Roebeling *et al.*, 2011), é um processo em tudo semelhante ao da estimativa dos custos, divergindo no uso dos valores dos benefícios por valor de área no lugar dos valores dos custos unitários. Este valor de área é aplicado às áreas não perdidas.

$$B_t(A_{NP\#}) = \frac{\beta A_{NP\#}}{(1+r)^t} \quad (5.6)$$

B_t (€) representa o benefício para cada ano, r a taxa de desconto a 5%, e t o tempo do estudo (anos). O uso da taxa de desconto neste processo é baseado na premissa que o dinheiro recebido no futuro é menos valioso que o mesmo dinheiro recebido no presente. A partir da soma dos benefícios gerados em cada ano obtém-se uma estimativa dos benefícios para cada um dos cenários ao fim de um horizonte temporal de 20 anos, como é demonstrado na Figura 5.3. A análise dos benefícios foi realizada em função do comprimento de esporão. Procurou-se compreender a influência da variação do comprimento do esporão na evolução dos benefícios. Esta análise foi efetuada separadamente para cada altura de onda incidente e para cada período de 5 anos. Foi feito um controle dos benefícios a cada 5 anos do horizonte temporal, ou seja, ao fim do quinto ano, do décimo ano, do décimo quinto ano e ao vigésimo ano (final do horizonte temporal).

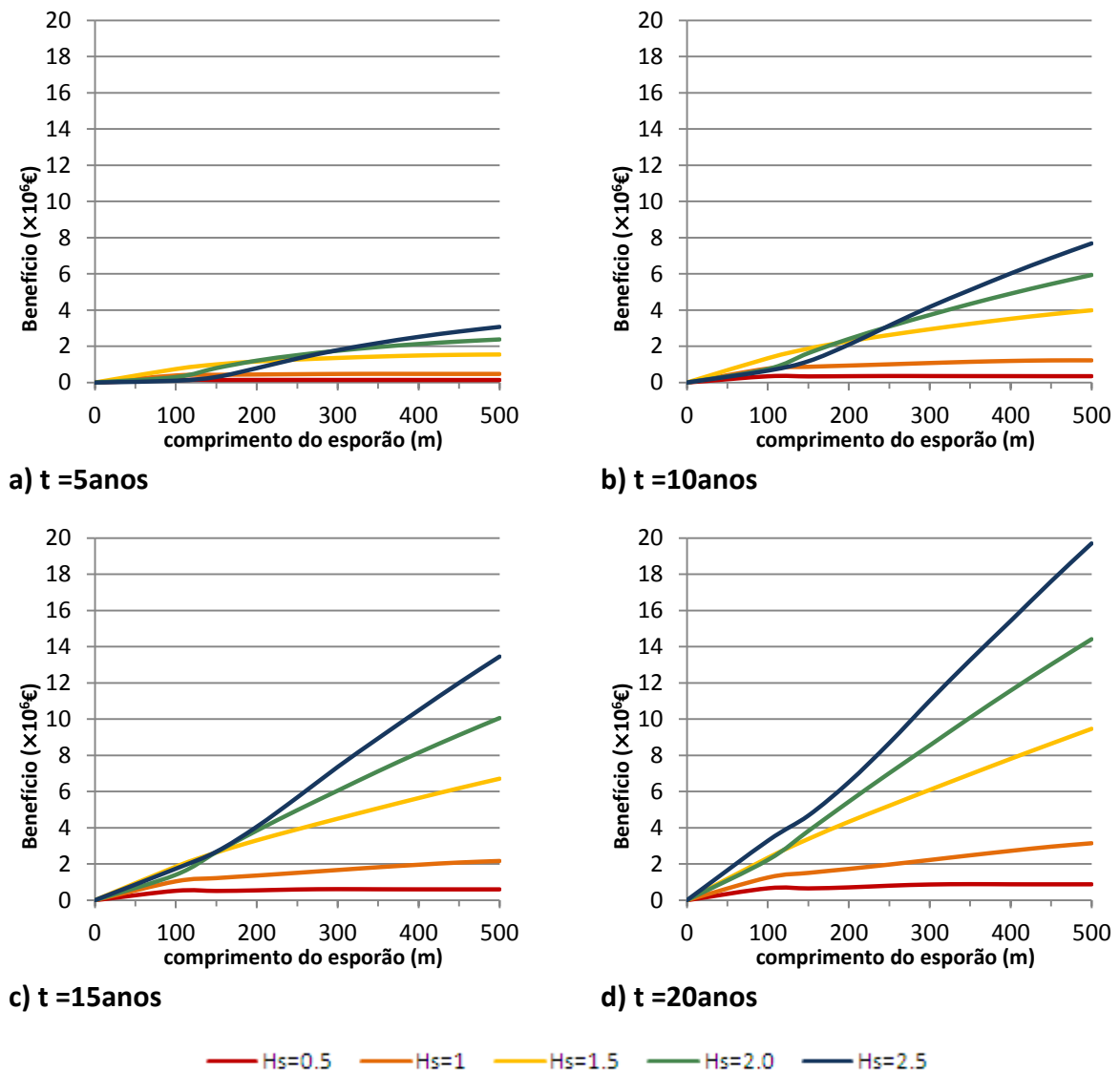


Figura 5.3 – Benefício resultante da construção de diferentes esporões, para diferentes alturas de onda incidente

Procurou-se ainda elaborar uma comparação entre os benefícios resultantes de ondulações provenientes de diferentes rumos. Esta análise realizou-se para uma onda de altura incidente de 1.0 m (Figura 5.4).

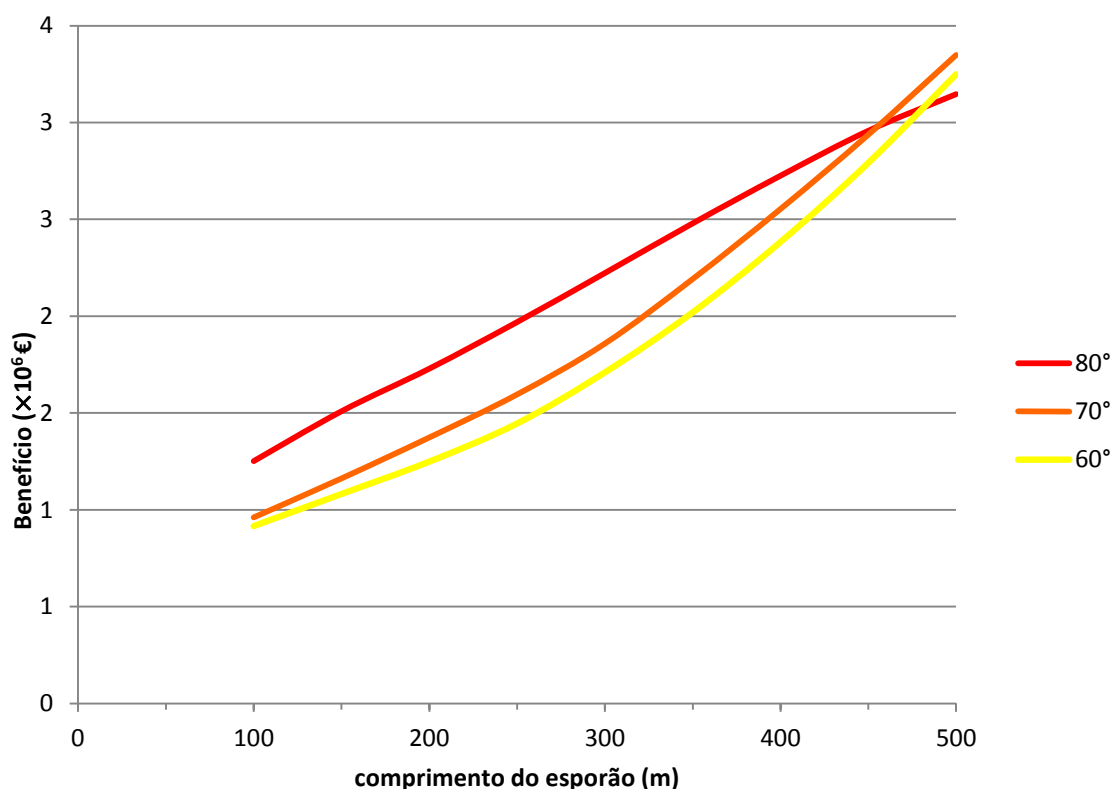


Figura 5.4 – Benefícios resultantes da incidência de ondulação para altura de onda de 1.0 m, e de rumos 60°, 70° e 80°

5.3 Discussão de resultados

Ao analisar o gráfico dos custos verifica-se que estes aumentam de forma exponencial, de acordo com o aumento do comprimento do esporão. O aumento de comprimento do esporão conduz a de um maior volume de material necessário para a sua construção, e consequentemente a maiores custos de transporte, construção e manutenção. Verifica-se que variação do comprimento do esporão não se traduz de igual forma na variação do preço de funcionamento. Ao dobrar o comprimento do esporão, ter-se-á um custo de funcionamento superior ao dobro. Pode-se por fim concluir que o processo de manutenção periódica dos esporões representa uma parte importante dos custos de funcionamento ao longo de um horizonte temporal de 20 anos.

A Figura 5.3 demonstra que a aplicação de um esporão a uma praia em situação de déficit sedimentar é vantajosa. Para a totalidade dos cenários modelados, a aplicação de um esporão conduziu a benefícios económicos positivos, independentemente do desenvolvimento do esporão considerado. Verifica-se que os benefícios são proporcionais ao comprimento do esporão, uma vez que um aumento do comprimento do esporão promove um maior ganho nos benefícios, relacionado com o aumento das áreas não perdidas. Logo, quanto maior a acreção proporcionada pelo esporão, maiores os benefícios alcançados. Para todos os comprimentos de esporão os benefícios aumentam de ano para ano, atingindo o seu maior valor ao fim do horizonte temporal de 20 anos.

Os benefícios gerados estão também relacionados com a altura de onda incidente. A Figura 5.3 mostra que os benefícios são superiores ao fim de 20 anos, nos cenários que sofrem a incidência de ondas de maior altura. Apesar de ondas de maior altura provocarem um aumento da erosão nos cenários de referência (na ausência de esporão), simultaneamente promovem uma maior circulação de sedimentos (já avaliado no Capítulo 4), e conseqüentemente uma maior área de acreção a barlamar. Este ganho de área traduz-se logicamente num ganho de benefícios.

A Figura 5.4 mostra a evolução dos benefícios para os rumos de ondulação considerados. A onda de rumo de 80° apresenta os maiores benefícios, seguida pela onda de 70°, e por último a onda de 60° promove os menores benefícios. Mais uma vez esta variação no ganho de benefícios está ligada à variação de áreas não perdidas. Como já foi exposto no capítulo anterior, ondas incidentes com rumos de menor ângulo em relação à linha costeira, provocam maior erosão da praia. Assim uma maior erosão conduz a maiores perdas de território e conseqüentemente a menores benefícios.

Capítulo 6 – OTIMIZAÇÃO DA ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO

A análise custo-benefício constitui fundamentalmente uma ferramenta de apoio aos processos de tomada de decisão, em especial em projetos de grande vulto e complexidade. A análise custo-benefício é uma ferramenta utilizada para determinar o valor de um projeto destinado ao melhoramento do bem-estar da sociedade como um todo, através da soma algébrica dos seus custos e benefícios, descontados ao longo do tempo (QREN, 2012).

Este tipo de análise deve cobrir todos os *inputs* e resultados, quer sejam sociais ou privados, diretos ou indiretos, tangíveis ou intangíveis. A partir do momento em que todos os custos e benefícios estão expressos na mesma unidade monetária, estes podem ser agregados e comparados. Pode-se então calcular o benefício líquido da intervenção e, assim, a análise custo-benefício pode constituir uma base útil para a tomada de decisão (Barros e Robalo, 2012). Normalmente a avaliação de um projeto deverá ter em conta os seguintes etapas (Commonwealth of Australia, 2006):

1. Determinar o âmbito e objetivos;
2. Identificar as restrições;
3. Listar alternativas viáveis;
4. Especificar os custos e benefícios;
5. Quantificar os custos e benefícios;
6. Descontar custos e benefícios futuros;
7. Efetuar teste de sensibilidade para reduzir a incerteza;
8. Delinear questões de equidade.

Esta análise identifica e procura quantificar os custos e os benefícios de um programa ou atividade, e converte os dados disponíveis em informação mais facilmente manejável. A vantagem do método é que ele fornece uma estrutura para a análise de dados de uma forma lógica e consistente. Este método é largamente aplicado e, no pressuposto de que se consegue identificar e associar um valor monetário a todas as variáveis, é uma ferramenta poderosa de análise. Os custos e benefícios dos diferentes anos terão que ser atualizados (mediante a taxa de desconto) a uma determinada data (início da análise) para se obterem valores atuais e assim permitir o somatório do total dos custos com o total dos benefícios, chegando a um valor de benefício líquido (Barros e Robalo, 2012).

Ao contrário de outros tantos métodos, este permite determinar se uma intervenção é benéfica (mérito económico), ou não, para a sociedade, sem necessitar de comparação entre diferentes alternativas. A análise custo-benefício ajuda gestores a responder a questões como:

- A proposta fornecerá benefícios líquidos para a comunidade como um todo?
- Deve o projeto proposto ser realizado?
- Deve o projeto ser continuado?
- Existem projetos alternativos a ser realizados?

A análise custo-benefício acrescenta rigor à avaliação do programa, porque, entre outras coisas, torna explícita a ligação entre as ações e resultados, e realça possíveis lacunas na informação disponível. Ao expressar os aspetos positivos (benefícios), e negativos (custos) em termos monetários, a análise custo-benefício permite a comparação entre diferentes tipos de projetos, assim como diferentes abordagens na realização de um projeto (Commonwealth of Australia, 2006). A estimativa da viabilidade económica de projetos requer a utilização de parâmetros económicos como o Valor Atual Líquido (VAL). É também realizado um processo de otimização dinâmica, com o intuito de determinar as dimensões ótimas do esporão a ser aplicado em cada cenário distinto.

6.1 Análise do Valor Atual Líquido (VAL)

O Valor Atual Líquido (VAL) é uma ferramenta usada na avaliação da viabilidade económica de um projeto. O Valor Atual Líquido (equação 6.1) é o método que transfere para o instante atual a diferença entre os custos (equação 5.3) e os benefícios (equação 5.6) esperados, descontados a uma determinada taxa de desconto, ou seja, em termos simples, o Valor Atual Líquido indica qual é o valor atual (hoje) dos benefícios futuros do projeto, deduzidos dos respetivos custos.

$$VAL = \sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (6.1)$$

Na expressão 6.1, B_t são os benefícios não descontados, C_t os custos não descontados, r é a taxa de desconto e t o tempo de funcionamento da obra. Um projeto de investimento é considerado rentável quando o seu Valor Atual Líquido é positivo, por outro lado se o valor de VAL é menor que zero, é desaconselhável o investimento no projeto em causa.

Tabela 6.1 – Valor atual líquido (VAL) para os diferentes cenários (x10⁶ €)

L (m)	H _s =0.5 m	H _s =1.0 m	H _s =1.5 m	H _s =2.0m	H _s =2.5 m
100	-0.72	-0.12	0.97	0.85	1.91
150	-1.32	-0.46	1.41	1.85	2.70
200	-1.96	-0.94	1.67	2.78	3.85
250	-2.64	-1.47	1.78	3.58	5.24
300	-3.44	-2.08	1.79	4.24	6.71
350	-4.37	-2.78	1.70	4.83	8.01
400	-5.41	-3.56	1.52	5.29	9.14
450	-6.53	-4.45	1.24	5.61	10.21
500	-7.73	-5.46	0.86	5.81	11.10

Neste estudo foi estimado o Valor Atual Líquido para os diferentes cenários modelados, para cada altura de onda incidente (H_s), e para o horizonte temporal de 20 anos. É

admitida a taxa de desconto utilizada na estimativa dos custos e benefícios, ou seja, uma taxa de desconto de 5% (Tabela 6.1).

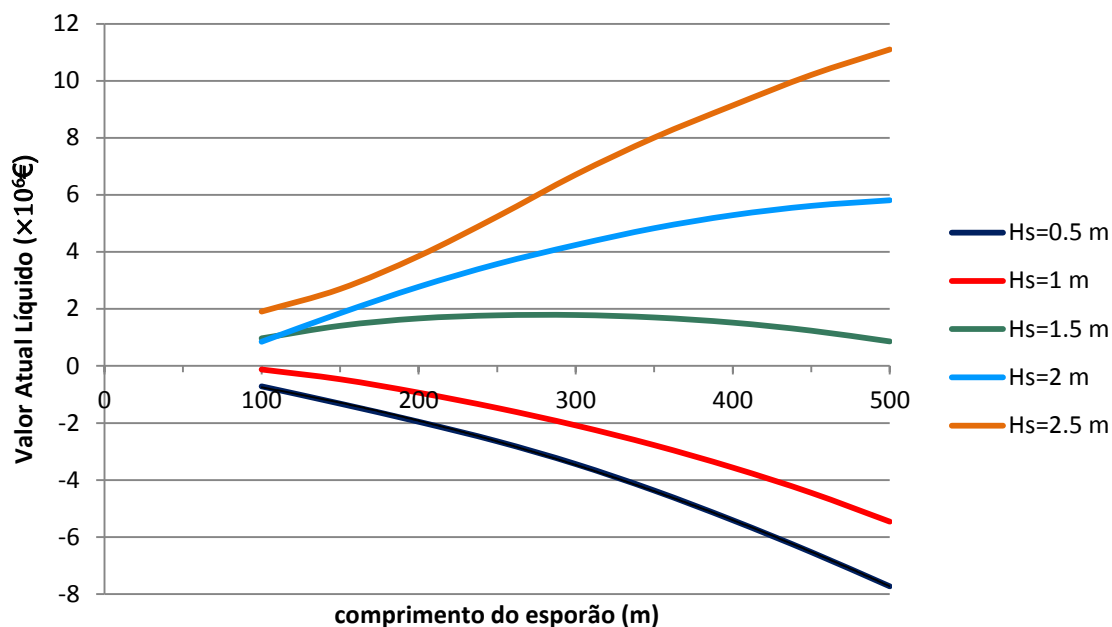


Figura 6.1 – Evolução do Valor Atual Líquido (VAL) para os diferentes cenários ($\times 10^6$ €)

Na Figura 6.1 fica claro que os cenários caracterizados por incidência de ondulação de altura inferior a 1.0 m apresentam Valor Atual Líquido menores que zero. Nestes cenários dá-se uma descida do Valor Atual Líquido à medida que o comprimento do esporão aumenta, sendo o valor mínimo encontrado para um esporão de 500 m de comprimento. Este resultado significa que nos climas de agitação mais calmos, a construção de um esporão não é uma boa solução. Os cenários modelados com uma altura de onda de 1.5 m apresentam para a totalidade dos diferentes esporões um Valor Atual Líquido positivo, atingindo o valor máximo para um esporão de 300 m, decrescendo depois para o seu mínimo no esporão de 500 m. Para os restantes cenários ($H_s=2.0$ m e $H_s=2.5$ m), o Valor Atual Líquido é sempre positivo. Além disso, apresentam também uma tendência de crescimento contínuo, e atingem o valor máximo para o esporão de 500 m de comprimento. Importa ainda dizer que se observa que ondas de maior altura apresentam Valor Atual Líquido maiores.

6.2 Otimização

Após serem identificados os cenários para os quais é conveniente a aplicação de esporões como meio de mitigar o processo de erosão, é necessário determinar as características da obra que proporcionam a melhor razão entre custos de funcionamento, e os benefícios gerados. Com base na simulação dos cenários de aplicação de esporões às diferentes condições de agitação, estimaram-se curvas de benefícios e de custos. A determinação do comprimento ótimo do esporão ($L_{\text{ótimo}}$) a ser aplicado em cada cenário é efetuada pela identificação do ponto mais distante entre a curva dos benefícios das áreas não perdidas, e a curva relativa aos custos de funcionamento do esporão, como é esquematizado no exemplo da Figura 6.2. O comprimento ótimo de um esporão proporciona a melhor relação entre custos e benefícios gerados, ou seja, o esporão que permite obter o maior Valor Atual Líquido para cada cenário.

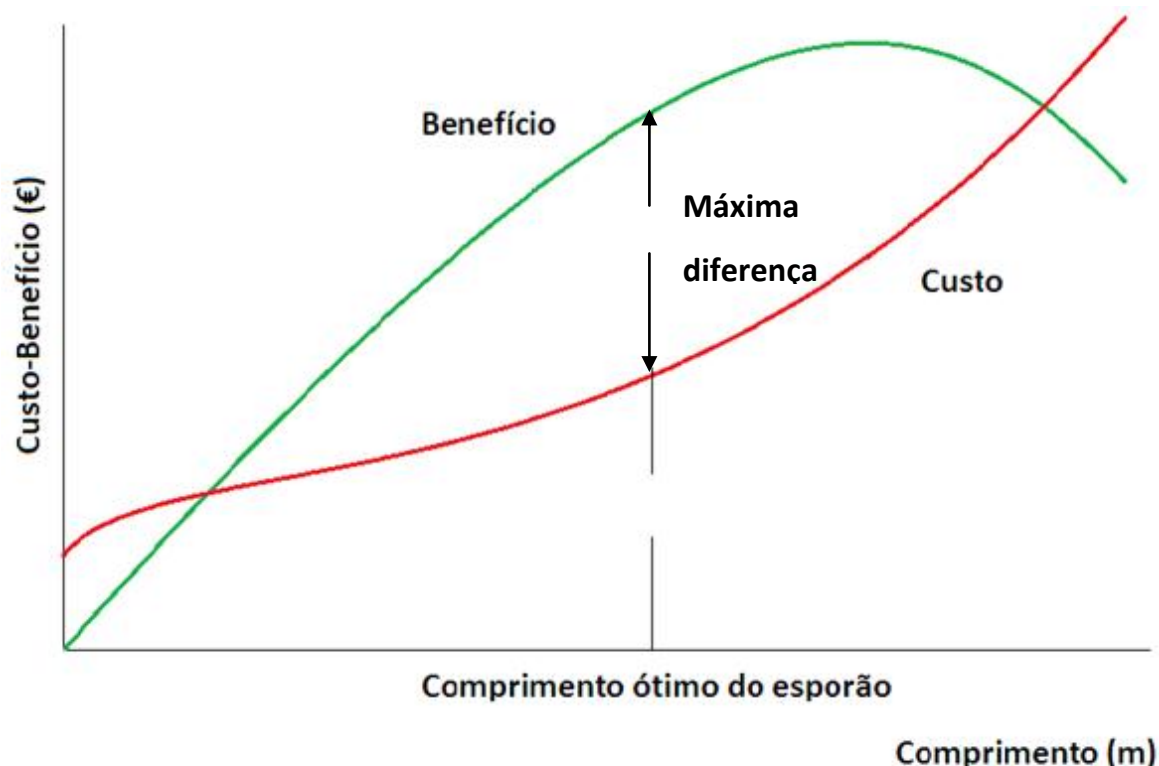


Figura 6.2 – Relação entre Custo e Benefício

Matematicamente, a sua determinação tem por base a primeira derivada do lucro (π) em ordem ao comprimento ($L_{\#}$) igualada a zero (equação 6.3). O lucro é dado pela diferença entre as expressões representativas dos benefícios e dos custos (equação 6.2).

$$\pi = B(L_{\#}) - C(L_{\#}) \quad (6.2)$$

Então, derivando o lucro ($\partial\pi$) em ordem ao comprimento do esporão (∂L) e igualando a zero, obtém-se, o comprimento esporão ótimo para todos os cenários.

$$\frac{\partial\pi}{\partial L} = 0 \quad (6.3)$$

Os resultados são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Comprimento do esporão ótimo e correspondente Valor Atual Líquido para cada cenário de altura de onda

H_s (m)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
$L_{\text{ótimo}}$ (m)	Não viável	Não viável	292	570	3200
VAL ($\times 10^6$ €)	Não viável	Não viável	1.8	6	45

Os resultados da otimização mostram que os comprimentos ótimos dos esporões aumentam de acordo com a altura de onda incidente. Nos climas de agitação mais energéticos, com processo erosivos mais rápidos e de maior dimensão, verifica-se que é adequada a construção de esporões de maior dimensão. Para a onda de altura de 2.5 m, o comprimento ótimo é de valor elevado, ultrapassando largamente as dimensões do esporão de maior comprimento (500 m) entre os simulados.

Deve-se fazer notar que estes resultados estão condicionados pelos pressupostos admitidos na modelação numérica, e por isso não podem ser extrapolados de forma genérica para qualquer situação, mas apontam uma tendência de comportamento importante.

- Análise de sensibilidade

No estudo desenvolvido foi efetuada ainda uma análise de sensibilidade a parâmetros que influenciam a relação custo-benefício dos cenários modelados. Devido à existência de um certo grau de incerteza na atribuição dos valores de custo e benefícios unitários, interessa fazer uma análise de sensibilidade a estas grandezas para compreender o efeito promovido pela sua variação. Por um lado, fez-se variar o preço unitário (α) de funcionamento (manutenção e construção) do esporão para valores inferiores e superiores em 25% ao custo base. A análise de sensibilidade foi também efetuada aos benefícios, variando os benefícios unitários (β) correspondentes às áreas geradas nos cenários simulados em valores superiores e inferiores em 25% em relação ao valor unitário de base. A análise de sensibilidade consiste no estudo das tendências de variação do comprimento ótimo de esporão, e do Valor Atual Líquido para os diferentes testes. Foram testadas as combinações possíveis permitidas por estas variações de valores.

Para facilitar a representação desta análise adotou-se a seguinte simbologia:

- **CB** – Custos e Benefícios de valor base;
- **C_{+25%}B** – Custos com valor acrescentado em 25% e benefícios de base;
- **C_{-25%}B** – Custos com valor diminuído em 25% e benefícios de base;
- **CB_{+25%}** – Custos de base e benefícios com valor acrescentado em 25%;
- **CB_{-25%}** – Custos de base e benefícios valor diminuído em 25%.

É importante lembrar, que o valor de custo unitário (α) foi inicialmente admitido em de 30 €/m³ para a construção e 10 €/m³ para a manutenção dos esporões. O valor do preço unitário (β) adotado para os bens e serviços das áreas não perdidas foi de 15000 €/ha/ano.

Os resultados desta análise de sensibilidade aos custos e benefícios são apresentados na Tabela 6.3. Estes resultados são expressos em termos de comprimento ótimo para cada um dos testes efetuados.

Tabela 6.3 – Comprimento ótimo dos esporões (m) para os diferentes valores de custos e benefícios

H _s (m)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
CB	Não viável	Não viável	292m	570m	3200m
C_{+25%}B	Não viável	Não viável	206m	452m	1531m
C_{-25%}B	Não viável	Não viável	419m	745m	27647m
CB_{+25%}	Não viável	Não viável	387m	696m	41176m
CB_{-25%}	Não viável	Não viável	189m	404m	1277m

Os cenários caracterizados por um aumento do custo unitário de funcionamento do esporão (C_{+25%}B), ou pela diminuição do preço unitário dos benefícios gerados (CB_{-25%}), originam comprimentos ótimos de esporão menores. Por outro lado, os cenários em que se aumentam o preço dos benefícios (CB_{+25%}), ou se diminui o preço dos custos unitários (C_{-25%}B), apresentam comprimentos de esporão superiores aos cenários de preço base. Pode-se também observar que existe uma grande sensibilidade provocada pela variação de custos e benéficos para os cenários de ondulação incidente de 2.5 m de altura.

No Tabela 6.4 são expostos os resultados da análise de sensibilidade em termos de Valor Atual Líquido gerado para cada teste.

Tabela 6.4 – Valor Atual Líquido (×10⁶€), para diferentes comprimentos de esporão e alturas de onda, em função dos preços dos custos e benefícios

H _s (m)	C _{+25%} B			C _{-25%} B			CB _{+25%}			CB _{-25%}		
	1.5	2.0	2.5	1.5	2.0	2.5	1.5	2.0	2.5	1.5	2.0	2.5
L (m)	206	452	1531	419	745	27647	387	696	41176	189	404	1277
VAL(×10⁶€)	0.9	3.7	17	3.1	9.2	1167	3.4	10	722	0.6	2.3	10

Quando comparados com os resultados provenientes dos preços base, verifica-se que o aumento do custo do esporão ($C_{+25\%}B$) resulta em comprimentos ótimos menores, e obtém-se um Valor Líquido Atual menor que o valor de base. O mesmo ocorre para o aumento do valor dos benefícios ($CB_{+25\%}$). Neste caso o comprimento de esporão ótimo é menor, obtendo-se também um Valor Atual Líquido inferior. Por outro lado um aumento do valor dos benefícios ($CB_{+25\%}$) ou a diminuição do valor dos custos do esporão ($C_{-25\%}B$) conduzem a esporões de comprimento ótimo e Valor Atual Líquido superiores aos valores obtidos a partir da aplicação do preço de base.

Realizou-se ainda uma análise de sensibilidade à taxa de desconto, a fim de garantir que o valor utilizado é adequado, e não se torna o principal responsável pelo resultado da avaliação custo-benefício do projeto. Isto pode ser usado para melhorar a robustez da análise custo-benefício, e é particularmente importante quando existe a incerteza sobre a taxa de desconto mais adequada. Foi então testada a aplicação de taxas de desconto de 8% e 10%, na atualização dos valores de custo e benefício base, utilizados no estudo (Tabela 6.5).

Tabela 6.5 – Comprimento ótimo dos esporões (m) para as diferentes taxas de desconto

H_s (m)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
r = 5%	Não viável	Não viável	292m	570m	3200m
r = 8%	Não viável	Não viável	215m	443m	1370m
r = 10%	Não viável	Não viável	178m	385m	943m

O comprimento ótimo dos esporões diminui à medida que se aumenta a taxa de desconto. Mais concretamente, pode-se observar que os cenários aos quais se aplica a taxa de desconto de 10% apresentam os menores valores de comprimento ótimo, seguidos pelos cenários com taxa de 8%, e por fim uma taxa de desconto de 5% implica os maiores comprimentos ótimos de esporão.

Para estes comprimentos ótimos de esporão determinou-se o Valor Atual Líquido. Desta forma pretende-se analisar a influência da taxa de desconto na avaliação da viabilidade de um projeto de uma obra de defesa costeira (Tabela 6.6).

Tabela 6.6 – Valor Atual Líquido ($\times 10^6 \text{€}$), para diferentes comprimentos de esporão e alturas de onda, em função da taxa de desconto

H _s (m)	r=5%			r=8%			r=10%		
	1.5	2.0	2.5	1.5	2.0	2.5	1.5	2.0	2.5
L (m)	292	570	3200	215	443	1370	178	385	943
VAL ($\times 10^6 \text{€}$)	1.8	6	45	0.9	3	12	0.6	1.9	6.4

Como foi referido anteriormente, a utilização de taxas de desconto de maior valor conduz a comprimentos ótimos de esporão de menores. A diminuição dos comprimentos de esporão origina também a diminuição do Valor Atual Líquido obtido.

6.3 Discussão dos resultados

- Valor Atual Líquido

Os resultados expostos na Figura 6.1 mostram que a aplicação de esporões não é viável para todos os cenários. Para os cenários com alturas de onda incidente de 0.5 e 1.0 m, o Valor Atual Líquido é negativo para qualquer comprimento de esporão. Esta tendência leva a estabelecer que a construção de esporões não é uma opção viável do ponto de vista económico na proteção de cenários expostos a ondulação de pouca altura. Nestes cenários, o Valor Atual Líquido apresenta uma tendência decrescente, o que significa que o crescimento do custo de funcionamento do esporão não é acompanhado por um crescimento de benefícios da mesma ordem. Obviamente, o aumento das dimensões da estrutura implica um acréscimo no custo de funcionamento.

O comportamento registado nestes cenários deve-se à menor capacidade de transporte sedimentar de ondas de pouca altura. Esta reduzida capacidade de transporte sedimentar

é, apesar do aumento do comprimento do esporão, traduzida em áreas de acreção reduzidas. Esta dinâmica resulta em cenários que promovem benefícios de baixo valor, e simultaneamente, elevados custos de funcionamento. Assim esta conjectura leva a um Valor Atual Líquido negativo, que torna a aplicação de um esporão a estes cenários um projeto pouco interessante do ponto de vista económico.

Por outro lado, em cenários com ondulação incidente com altura superior a 1.0 metro, o Valor Atual Líquido é positivo para todos os diferentes comprimentos de esporão. Para estes cenários ($H_s=1.5$ m, $H_s=2.0$ m e $H_s=2.5$ m), é viável economicamente a aplicação de um esporão no combate à erosão costeira, ou seja, para um horizonte temporal de 20 anos e independentemente das dimensões do esporão projetado, os custos de funcionamento totais descontados são inferiores aos benefícios totais descontados.

A Figura 6.1 mostra que para uma onda incidente de 1.5 m de altura, o esporão que apresenta um melhor compromisso entre os custo e os benefícios, é o esporão de 300 m de comprimento. A partir deste comprimento o Valor Atual Líquido decresce, o que leva a crer que para uma onda com estas características, a capacidade de promoção de benefícios (área de acreção) promovida pelo esporão não acompanha o aumento do seu comprimento, e por consequência do seu custo de funcionamento. Por sua vez, existe um crescimento contínuo do Valor Atual Líquido nos cenários de ondulação incidente de maior altura ($H_s=2.0$ m e $H_s=2.5$ m). Esta tendência de crescimento significa que quando aplicados a estes cenários, o aumento do comprimento do esporão promove um crescimento continuado dos benefícios associados às áreas não perdidas. Esses benefícios apresentam uma taxa de crescimento que supera o crescimento do custo de funcionamento do esporão.

- Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade aos custos e benefícios permitiu concluir que o comprimento ótimo de esporão é máximo quando os custos são menores e os benefícios mais elevados,

justificando assim a opção pela construção de um esporão de maior comprimento. Assim pode ser interpretado através destes resultados que quanto mais elevados são os benefícios da área protegida e menores os custos de alimentação, maior é a tendência do aumento do comprimento ótimo de esporão.

A variação dos custos e dos benefícios (+25% e -25%,) permite ainda verificar que o Valor Atual Líquido sofre variações pouco significativas, com exceção dos cenários de altura de onda incidente de 2.5 m. No entanto esta tendência de crescimento exagerado deste parâmetro pode não traduzir o comportamento “real” da dinâmica costeira destes cenários, sendo necessário para uma avaliação mais fiável das tendências de evolução dos custos e benefícios associados, o estudo da aplicação de esporões de maior comprimento.

No que diz respeito à análise de sensibilidade para as taxas de desconto, verificou-se que a aplicação de taxas de maior valor resultou em comprimentos de esporão ótimo mais baixos. Como os benefícios nestes cenários apresentam valores superiores aos dos custos, esta aproximação dá-se por uma diminuição do valor dos benefícios por aumento de taxa de desconto. A diminuição dos benefícios leva a crer que o valor monetário associado sofre penalizações superiores aos custos através do processo de atualização dos valores dos fluxos de caixa futuros. Isto deve-se à diferença entre a distribuição dos custos e dos benefícios durante o horizonte temporal de 20 anos. Ora, como o custo de construção constitui uma grande parte do custo total de construção e manutenção do esporão, isto significa que uma grande parcela dos custos não sofre penalização pela subida da taxa de desconto. De modo contrário, a criação de benefícios encontra-se distribuída por todo o horizonte temporal de funcionamento do esporão, logo a sua valorização será mais penalizada no processo de atualização dos fluxos de caixa futuros. Pode ser ainda referido que a escolha de taxas de desconto mais altas leva à projeção de Valor Atual Líquido mais baixos. Significa isto que a adoção de uma taxa de desconto mais alta resulta numa avaliação mais pessimista do projeto de investimento, enquanto a opção por uma taxa de desconto mais baixa projeta um maior retorno económico futuro.

6.4 Conclusões

A utilização do Valor Atual Líquido como ferramenta de avaliação da viabilidade de projetos de grande dimensão e complexidade é vantajosa, na medida em que permite auxiliar no processo de tomada de decisão de escolha da melhor abordagem ao problema, e evitar a eleição de opções economicamente desfavoráveis.

Pode ser concluído através do estudo do Valor Atual Líquido que para cenários em processo de erosão e sob ação de ondulação incidente de maior altura, é vantajoso do ponto de vista económico a aplicação de esporões como meio de mitigação do processo erosivo. Por outro lado, para cenários em que a ondulação incidente seja de altura menor, a aplicação de esporões na defesa da costa não é economicamente viável, justificando-se talvez uma abordagem menos rígida e menos dispendiosa na intervenção destes cenários.

Valores de custo de construção baixos e benefícios elevados conduzem à aplicação de esporões de maiores dimensões.

A taxa de desconto escolhida na atualização dos fluxos de caixa futuros terá influência no processo de otimização. Conclui-se que a variação da taxa de desconto penaliza com mais intensidade os fluxos de caixa mais distantes no tempo.

Existe uma grande sensibilidade na variação dos valores dos benefícios e dos custos unitários em cenários com climas de ondulação de grande altura incidente.

Capítulo 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo efetuou-se uma análise custo-benefício para a implementação de obras de defesa costeira, com o objetivo de mitigar os efeitos da erosão presente na linha costeira Portuguesa. O estudo foi dividido em diferentes fases, cada uma destas fases é correspondente a uma etapa na elaboração da análise custo-benefício. Este capítulo oferece um resumo de todo o trabalho realizado, evidenciando as principais conclusões de cada fase do estudo e apresentando algumas considerações sobre estudos futuros.

7.1 Exposição dos resultados

Nesta secção é feito um resumo do desenvolvimento do trabalho efetuado em cada um dos capítulos deste estudo. Pretende-se também apresentar as conclusões de maior relevância adquiridas ao longo da realização desta dissertação.

No primeiro capítulo é essencialmente feita a identificação e o enquadramento do fenómeno de erosão costeira. Inicialmente é realizada a descrição da dinâmica das áreas costeiras, e da sua importância para o bem-estar da sociedade atual. São expostas as estratégias a considerar na abordagem à problemática da erosão costeira, assim como possíveis soluções a ser aplicadas na defesa da linha da costa. Neste capítulo também se descreve a estrutura e metodologia da dissertação.

No segundo capítulo é realizada uma revisão de literatura existente acerca do tema da análise custo-benefício aplicada à proteção das zonas costeiras. São descritos três casos de estudo caracterizados por diferentes abordagens à realização da análise custo-

benefício para zonas costeiras em erosão. É também feita uma breve descrição dos modelos numéricos utilizados na modelação da costa.

No capítulo três são descritas as potencialidades e limitações do modelo numérico LTC. Descreve-se o funcionamento interno do modelo numérico e os seus parâmetros de entrada e saída. São caracterizados os diferentes cenários modelados no LTC para a realização deste estudo. Foi modelada um cenário genérico representativo de um trecho de linha costeira de 20000 m de extensão, sem entrada de fluxo de sedimentos a Norte, com saída regular a Sul, com ondulação incidente para as alturas de 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 m de altura, e rumos de 80, 70 e 60 graus.

O quarto capítulo consiste numa análise física à dinâmica de um trecho de linha costeira sob ação do processo erosivo do clima de agitação marítimo. É analisada a evolução da linha costeira imposta pela aplicação de um esporão aos cenários em processo de erosão para um horizonte temporal de 20 anos. É testada a aplicação de esporões de comprimento a partir de 100 m de comprimento até 500 m de comprimento com intervalos de 50 m. São ainda comparados os efeitos promovidos pelos diferentes parâmetros de entrada do modelo numérico (altura de onda incidente e rumo da ondulação) que caracterizam a dinâmica costeira.

No quinto capítulo, procede-se à estimativa dos custos e benefícios associados a cada um dos cenários modelados. Os custos são determinados pela soma dos custos de manutenção e construção dos esporões aplicados para um horizonte temporal de 20 anos. Definiu-se o custo unitário de construção em 30 €/m³, e o custo unitário de manutenção em 10 €/m³. Os benefícios resultam da valorização económica da área não perdida resultante da aplicação dos esporões aos cenários em erosão, adotando-se um valor unitário de área em 20000 €/há/ano. As áreas não perdidas resultam da diferença entre as áreas perdidas no cenário de referência, e as áreas perdidas nos cenários intervencionados. É ainda realizada uma análise sobre a evolução dos benefícios gerados ao longo do horizonte temporal de 20 anos.

É no capítulo sexto que é realizado o estudo custo-benefício. Verifica-se a viabilidade da implementação de cada um dos cenários através do indicador económico Valor Atual Líquido. Efetua-se um processo de otimização através das funções de custo e benefício para a determinação do comprimento ótimo de esporão para os diferentes cenários. Para verificar a robustez da análise custo-benefício realizou-se uma análise de sensibilidade. Esta análise consiste na variação dos valores unitários dos custos e dos benefícios gerados, em valores superiores e inferiores em 25%. Foram testados valores de 8% e 10%, de taxa de desconto, em complemento à taxa de 5% utilizada nas estimativas de base.

7.2 Conclusões

Este subcapítulo apresenta as principais conclusões retiradas de cada uma das etapas da elaboração deste estudo.

As áreas costeiras são zonas de grande importância para a sociedade atual, no entanto, sofrem de um elevado grau de vulnerabilidade em relação à ação erosiva do mar. Considerou-se o uso de esporões como a solução a ser aplicada neste estudo, por ser a estrutura com maior representatividade na proteção costeira em Portugal. A aplicação de esporões promove a acreção de sedimentos a barlamar da estrutura, apresentando no entanto também aspetos negativos, tais como a erosão a sotamar do esporão, e a diminuição do valor estético e funcional da praia.

Existem diferentes abordagens para a realização de uma análise custo-benefício. O Valor Atual Líquido é uma ferramenta importante no auxílio de tomada de decisão no que concerne à gestão da linha costeira. A análise custo-benefício baseia-se no conhecimento do comportamento da linha costeira para o horizonte temporal de estudo, e sob a ação de um determinado clima de ondulação. No entanto este comportamento é de difícil previsão devido à elevada complexidade da dinâmica costeira. O modelo numérico LTC permite a simulação da evolução da costa para diferentes configurações de praia, e

diferentes horizontes temporais de estudo, possibilitando uma melhor compreensão dos processos físicos envolvidos na evolução da linha costeira.

No que diz respeito à análise física dos cenários de referência (em erosão), os resultados mostram que existe maior erosão junto à fronteira Norte, diminuído o seu impacto no sentido Sul. A ondulação incidente proveniente de Noroeste promove a circulação sedimentar no sentido de Norte para Sul. Verifica-se que ocorre uma diminuição relativa da ação erosiva sobre a linha costeira ao longo do horizonte temporal de 20 anos, sendo no entanto este horizonte temporal insuficiente para atingir o estado de equilíbrio. O transporte longitudinal de sedimentos é sensível à variação dos parâmetros físicos que caracterizam o clima de agitação marítimo. Quanto maior a altura de onda incidente, maior será a sua capacidade de transporte sedimentar, e conseqüentemente, maior a capacidade de promover erosão. O transporte sedimentar é inversamente proporcional ao ângulo do rumo da ondulação incidente em relação à linha da costa.

Independentemente das características do clima de agitação incidente, a aplicação de um esporão a um cenário em processo de erosão, significa sempre uma melhoria em termos de perda de área de território costeiro em relação aos cenários de referência. Comprimentos de esporão maiores promovem maiores áreas não perdidas. No entanto, para cenários caracterizados por ondulação incidente de pouca altura, a variação do comprimento de esporão é pouco importante em termos do efeito de mitigação da erosão costeira. Por outro lado, para ondas incidentes de altura superior a 1.0 m o impacto é muito mais significativo.

Os custos são provenientes da soma entre o custo de construção, e o custo de manutenção periódico do esporão para o horizonte temporal de 20 anos. Desta forma o custo de funcionamento do esporão é proporcional às dimensões da estrutura a construir. Os benefícios estão diretamente relacionados com as áreas não perdidas, logo a sua evolução é proporcional às áreas de acreção promovidas pela aplicação do esporão.

Os benefícios são continuamente crescentes ao longo do horizonte temporal. Assim, verifica-se que os benefícios são positivos para todos os cenários modelados.

Do ponto de vista económico, os resultados da estimativa do Valor Atual Líquido, mostram que para cenários de altura de onda incidente inferior a 1.0 m, a aplicação de um esporão não é viável do ponto de vista económico. Para cenários de ondulação incidente de pouca altura é preferível a opção por métodos de defesa costeira menos rígidos e dispendiosos. Para os cenários altura de onda incidente superior a 1.0 m, o Valor Atual Líquido estimado é sempre positivo, o que significa que a aplicação de um esporão é para estes casos economicamente viável. Para os cenários de onda incidente de maior altura ($H_s=2$ m e $H_s=2.5$ m), o Valor Atual Líquido cresce de acordo com o aumento do comprimento do esporão. Isto significa que cenários caracterizados por climas de agitação mais energéticos e erosivos beneficiam da aplicação de esporões de maior comprimento.

O comprimento ótimo do esporão é o ponto em que existe a melhor relação entre os custos associados ao projeto e os benefícios gerados, sendo este o ponto que apresenta maior Valor Atual Líquido. O aumento da altura incidente de onda provoca o aumento do comprimento de esporão ótimo.

A análise de sensibilidade aos custos e benefícios, mostra que o comprimento ótimo do esporão é máximo quando existem custos menores e valores de benefícios mais elevados. A taxa de desconto utilizada influencia os resultados da análise custo-benefício e do processo de otimização. O processo de atualização de fluxos de caixa penaliza com maior intensidade valores monetários mais distantes no tempo. Taxas de desconto mais elevadas originam comprimentos de esporão ótimo de menor dimensão. Assim a escolha de taxas de desconto mais altas resulta na projeção de Valor Atual Líquidos mais baixos. Podemos concluir que a adoção de uma taxa de desconto mais alta resulta numa avaliação mais pessimista da viabilidade de um projeto a médio/longo prazo, por outro lado, uma taxa de desconto mais baixa projeta um maior retorno económico.

O uso de ferramentas económicas como ferramenta de auxílio de gestão da linha costeira é pouco frequente em Portugal. Este estudo procurou reunir dados que permitam, estabelecer uma melhor compreensão dos processos de dinâmica costeira recorrendo à modelação no LTC, auxiliar na definição dos benefícios e dos custos associados à aplicação do esporão como obra de defesa costeira e a utilização da avaliação custo-benefício como parâmetro de auxílio aos processos de decisão associados às políticas integradas de gestão costeira em Portugal.

7.3 Considerações futuras

Ao longo deste estudo procurou-se desenvolver uma análise custo-benefício aplicada à implementação de estruturas de defesa costeira na mitigação da erosão da costa. No entanto por se tratar de uma análise sobre um cenário genérico, foi necessário estabelecer algumas simplificações em termos dos valores adotados, nomeadamente nos valores unitários para os custos de funcionamento do esporão, e para os benefícios gerados pelas áreas não perdidas. Contudo como desenvolvimento futuro, sugere-se a análise de casos de estudo mais específicos, que representem cenários característicos do território costeiro de Portugal. Isto implica a consideração de diferentes valores unitários de área dentro de um mesmo cenário para a determinação dos benefícios gerados.

No que concerne à modelação, o horizonte temporal de 20 anos revelou-se insuficiente para atingir o estado de equilíbrio da costa. Assim torna-se importante adotar um horizonte temporal mais alargado na simulação dos cenários a ser estudados, para uma melhor perceção do comportamento da linha costeira ao longo do tempo.

Uma outra limitação que se observou prende-se com a modelação de cenários caracterizados por ondas de altura superior a 2.0 m. Nestes cenários não foi possível compreender a tendência da evolução da linha costeira em função do comprimento do esporão, tornando assim, pouco precisa a estimativa do comprimento ótimo para estas

condições. Por isso sugere-se a utilização de comprimentos de esporão superiores a 500 m na modelação de cenários caracterizados por ondas de altura superior a 2.0 m.

Esta dissertação teve como foco do estudo exclusivamente a implementação de esporões como solução de mitigação da erosão costeira. No entanto uma solução mais eficiente poderá passar pela combinação de esporões com outro tipo de soluções de defesa costeira. Mais concretamente, apesar da maior complexidade na modelação, é interessante estudar a associação de esporões com intervenções periódicas de alimentação artificial de praias com areias.

O estudo sobre praias intermédias caracterizadas por material sedimentar de $d_{50}=0.3\text{mm}$. O perfil da praia é definido pelo perfil de equilíbrio de Dean (equação 3.4). Assim acordo com esta expressão, o perfil da praia é determinado pelas características dos sedimentos que constituem a praia, nomeadamente o seu ângulo de atrito e granulometria. Seria então interessante comparar a evolução da linha costeira entre cenários de características granulométricas distintas.

Este estudo foi realizado a partir do pressuposto de não existência de limite de custos a serem aplicados no processo de defesa costeira. Esta premissa é pouco realista quando está em causa o processo de decisão para a gestão de casos de estudo reais. Sugere-se então que seja imposto um limite nos custos para a realização de futuras análises custo-benefício.

Referências Bibliográficas

Almeida, P., (2011). “Análise económico-ambiental de alimentação artificial de praias”; Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 85 p.

Australia, Commonwealth of (2006). “Introduction to Cost-Benefit Analysis and Alternative Evaluation Methodologies”; Department of Finance and Administration and Financial Management Group, Australia, (4), 52 p.

Barros, M., Robalo, M., (2012). “Eficiência – Análise e Metodologias”, DOCUMENTOS DE TRABALHO, Instituto Português de Apoio ao Desenvolvimento, Lisboa, (7), 20 p.

Burchartch, H. F., Huges, S. A., (2001). “Types and Functions of Coastal Structures”; Coastal Engineering Manual, Chapter VI-2, Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 56 p.

Canhoto, A., (1994). “Análise custo-benefício da Barragem do Alqueva”; Faculdade de Economia, 34 p.

Carpinteiro, F., (2009). “Transposição Artificial de Areias na Barra de Aveiro”; Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 84 p.

Clímaco, M., Fortunato, A. B., Oliveira, F., Oliveira, A., Sancho, F., Freira, P., (2008). “Dinâmica Fisiográfica da Orla Costeira: Estudos de Reabilitação e Protecção”; Revista da Gestão Costeira Integrada, (8), pp. 45-63.

Coelho, C., Veloso-Gomes, F., (2005). “UM MODELO DE PREVISÃO DE EVOLUÇÃO DE ZONAS COSTEIRAS ARENOSAS, A MÉDIO E LONGO TERMO”; 4º Congresso Luso Moçambicano de Engenharia, Maputo, Moçambique.

Coelho, C., Taveira-Pinto, F., Veloso-Gomes, F., Pais-Barbosa, J., (2004). “COASTAL EVOLUTION AND COASTAL WORKS IN THE SOUTHERN PART OF AVEIRO LAGOON INLET”; COASTAL ENGINEERING CONFERENCE, Lisboa, Portugal.

Coelho, C., (2005). “Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira”; Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 404 p

DPI (2007). “Department for Planning and Infrastructure - Report for Busselton Groynes and Seawall Preliminary Options Assessment”; 88 p.

EUROSION (2004). “Living with coastal erosion in Europe: Sediment and Space for Sustainability”; 162 p.

Fontão, F., (2008). “Intervenções de defesa em zonas costeiras”; Projeto de Final de Curso; Universidade de Aveiro, 53 p.

Hollings, B., (2006). “Cooks Beach Coastal Erosion Management Strategy”; in Environment Waikato (ed.), Environment Waikato Technical Report, Cooks Beach, New Zealand, 23 p.

INAG (2009). “Instituto Nacional da Água - Estratégia Nacional para a Gestão integrada da Zona costeira”; 84 p.

Langa, J., (2003). “Erosão Costeira da Cidade de Maputo: Causas, considerações sobre intervenções de defesa”; Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 212 p.

Morang, A., Parson, L. E., (2002). “Coastal Morphodynamics”; Coastal Engineering Manual, Part IV, Coastal Geology, Chapter IV-3, Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps Engineers, Washington, DC, 86 p.

Persson, M., (2010). “Impact Assessment and Project Appraisal in Cases of Coastal Erosion”; International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment, Vol. 1 (3), pp. 297 - 309.

QREN (2012). “A Avaliação do Desenvolvimento Socioeconómico”; MANUAL TÉCNICO II: Métodos e Técnicas Instrumentos de Enquadramento das Conclusões da Avaliação: Análise Custo-Benefício; 14 p.

Reis, E., (2010). “Evolução da linha de costa e defesa das zonas costeiras – Análise custo/benefício”, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 105 p.

Roebeling, P., Coelho, C., Reis, E., (2011). “Coastal erosion and coastal defense interventions: a cost-benefit analysis”; Journal of Coastal Research, (64), pp. 1415 - 19.

Rosa, T., (2011). “Taxa de desconto”, Conservation Strategy Fund. (Última consulta Outubro 2012)
<<http://conservation-strategy.org/pt/hydrocalculator-help-article/taxa-de-desconto>>.

Silva, R., Coelho, C., Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F., (2007). “Dynamic Numerical Simulation of Medium-term Coastal Evolution of the West Coast of Portugal”, Journal of Coastal Research, (50), 264 p.

Silva, R., (2010). “Avaliação Experimental e Numérica de Parâmetros Associados a Modelos de Evolução da Linha de Costa”, Tese de Doutoramento, Universidade do Porto.

Taborda, R., Ângelo, C., Magalhães, F., (2004). “Evaluation of Coastal Defence Strategies in Portugal”, 11 p.

Veloso-Gomes, F., (1991). “Algumas reflexões sobre a problemática das obras de protecção costeira”; Actas do 2º Simpósio sobre a Protecção e Revalorização da Faixa Costeira do Minho ao Liz”, Porto, pp. 128-143.

Anexo I

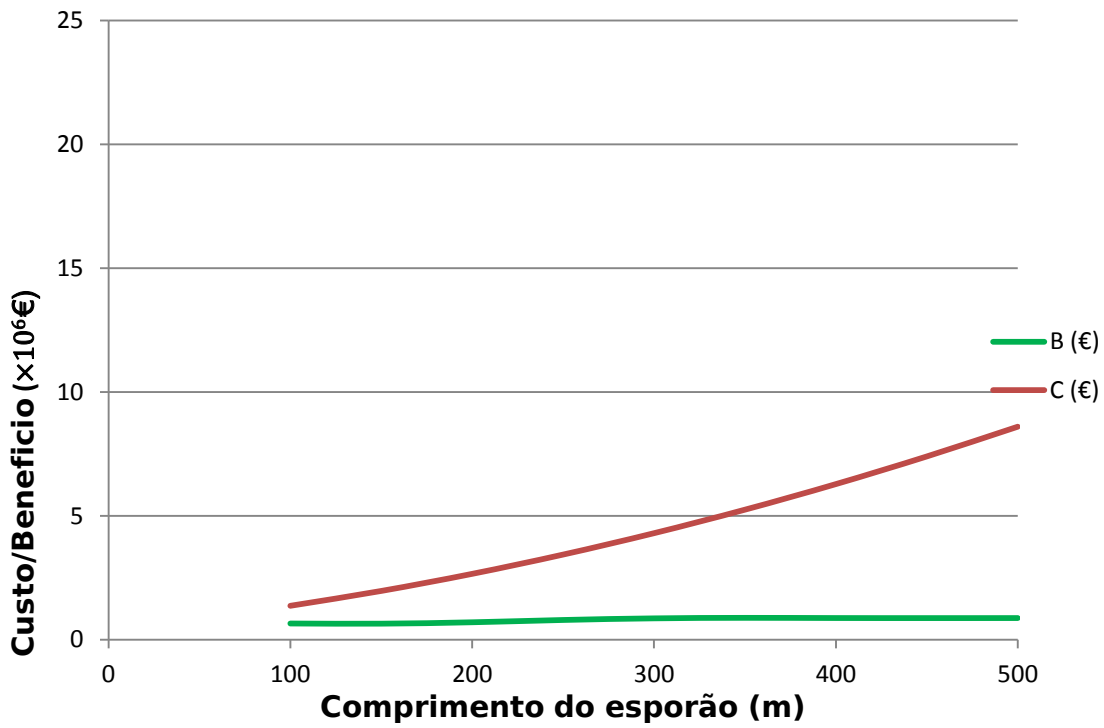


Figura 1 – Gráfico de Custo e benefício para $H_s=0,5m$ e $R=80^\circ$ ($\times 10^6\text{€}$)

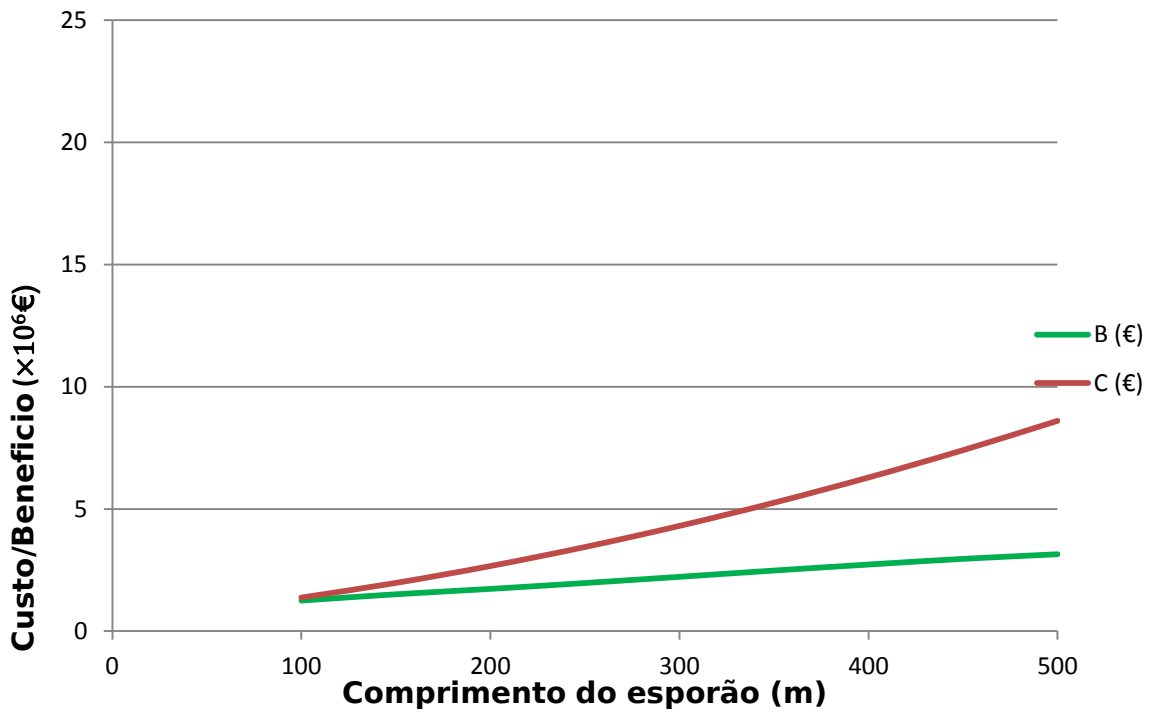


Figura 2 – Gráfico de Custo e benefício para $H_s=1,0m$ e $R=80^\circ$ ($\times 10^6\text{€}$)

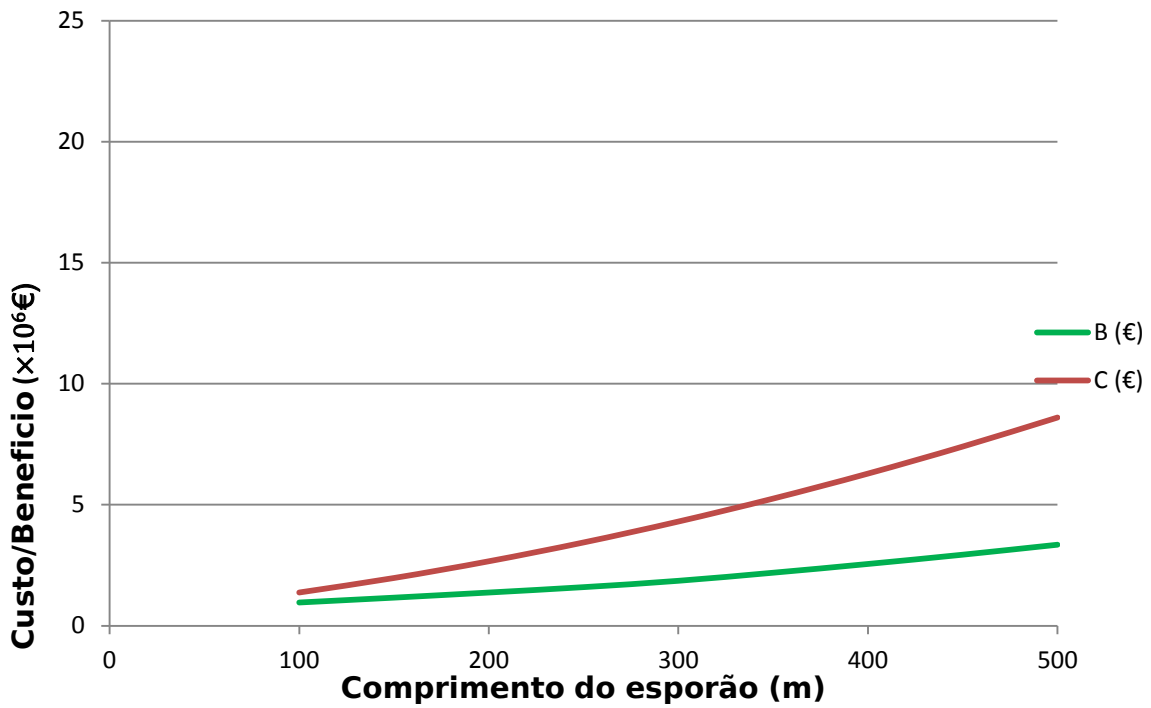


Figura 3 – Gráfico de Custo e benefício para $H_s=1,0m$ e $R=70^\circ$ ($\times 10^6\text{€}$)

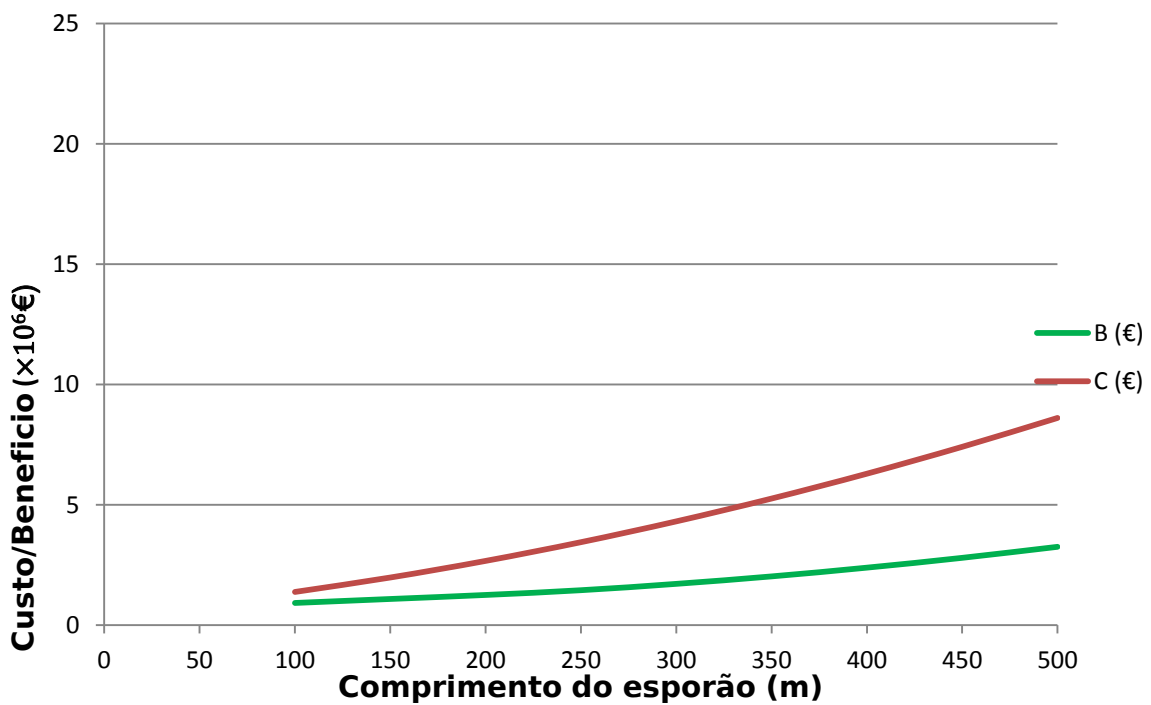


Figura 4 – Gráfico de Custo e benefício para $H_s=1,0m$ e $R=60^\circ$ ($\times 10^6\text{€}$)

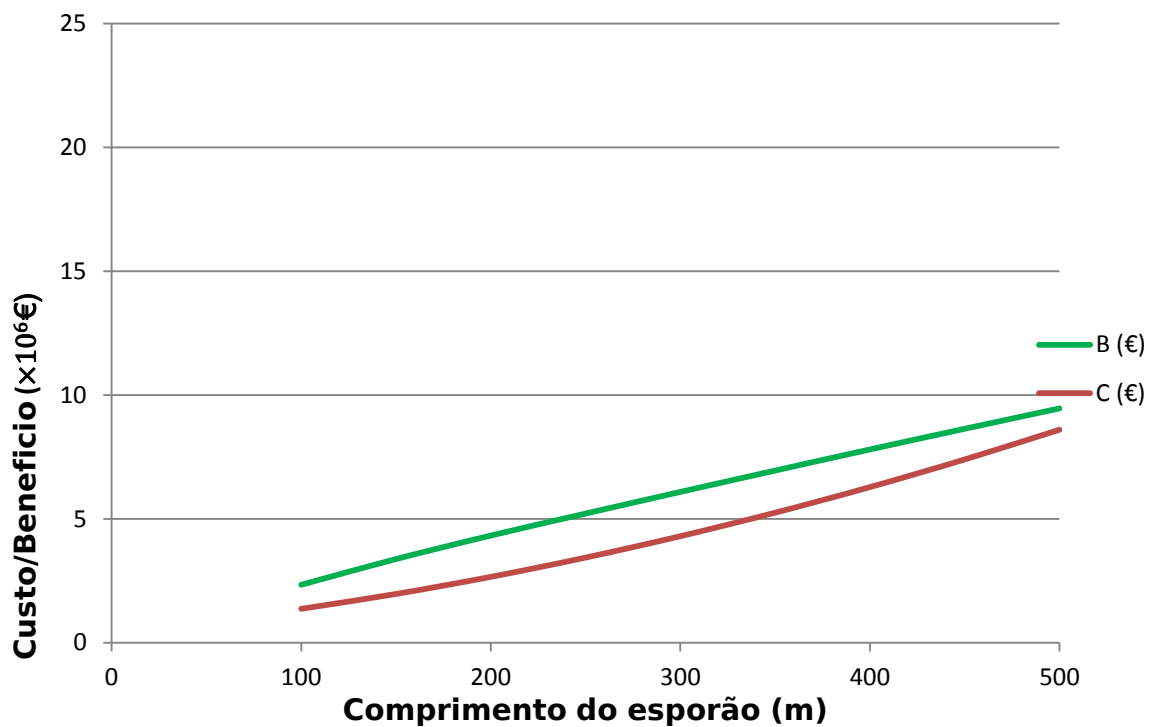


Figura 5 – Gráfico de Custo e benefício para $H_s=1,5m$ e $R=80^\circ$ ($\times 10^6\text{€}$)

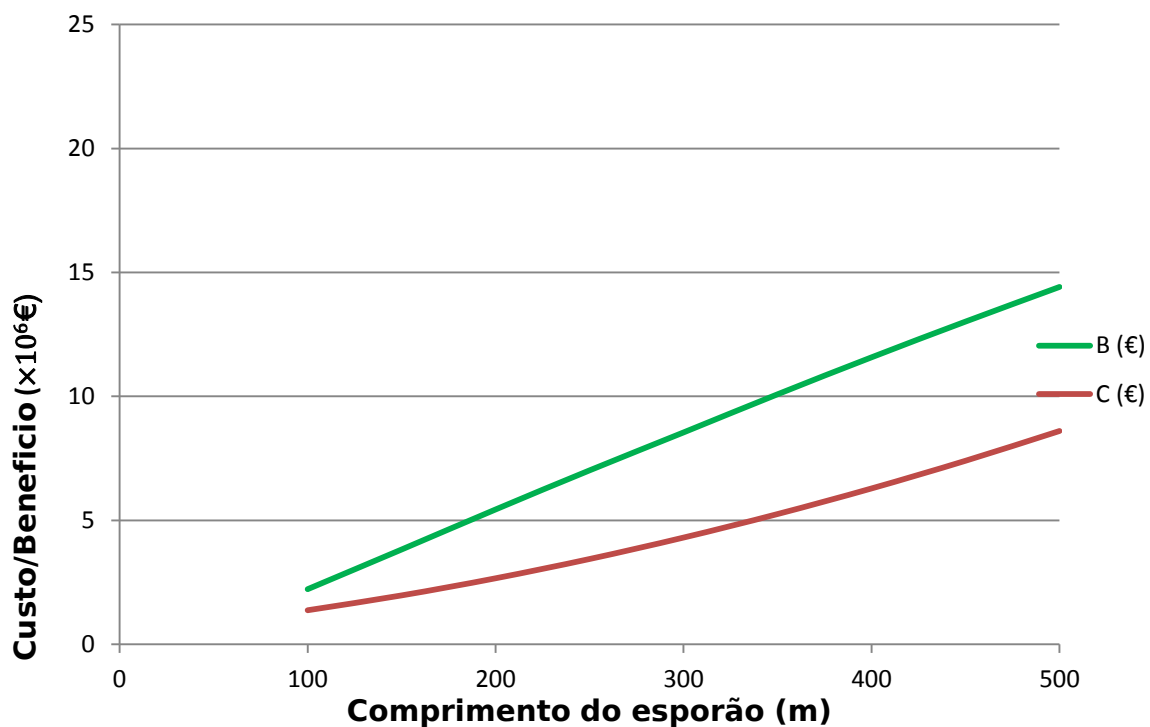


Figura 6 – Gráfico de Custo e benefício para $H_s=2,0m$ e $R=80^\circ$ ($\times 10^6\text{€}$)

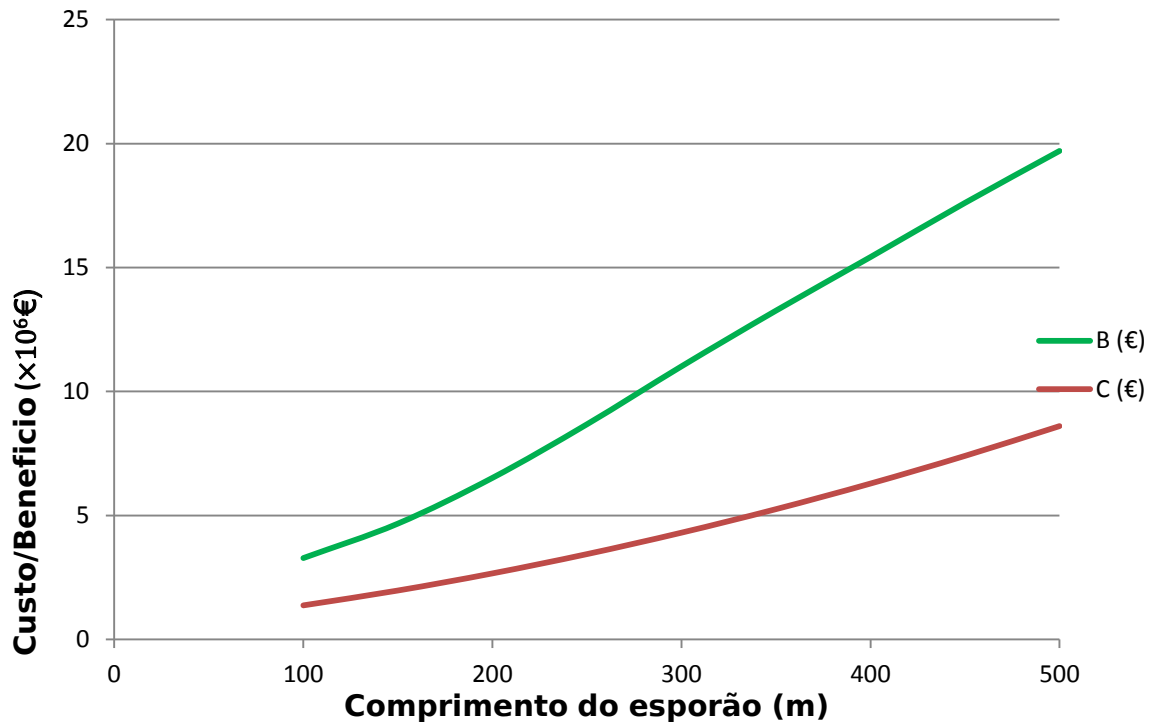


Figura 7 – Gráfico de Custo e benefício para $H_5=2,5\text{m}$ e $R=80^\circ$ ($\times 10^6\text{€}$)