



**Universidade de  
Aveiro**

**Ano 2014**

Departamento de Ambiente e Ordenamento

**LILIANA AVERINI  
RODEIA**

**IMPACTO DOS ESPORÕES NO TRANSPORTE  
SEDIMENTAR - FORMULAÇÕES E MODELOS**





**Universidade de  
Aveiro**

**Ano 2014**

Departamento de Ambiente e Ordenamento

**LILIANA AVERINI  
RODEIA**

**IMPACTO DOS ESPORÕES NO TRANSPORTE  
SEDIMENTAR - FORMULAÇÕES E MODELOS**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências do Mar e das Zonas Costeiras, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.



Dedico este trabalho a Nonna Wanda.



## **o júri**

presidente

**Prof<sup>a</sup>. Doutora Filomena Maria Cardoso Pedrosa Ferreira Martins**  
professor associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho**  
professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

**Prof<sup>a</sup>. Doutora Raquel Castro Alves Ferreira da Silva**  
Investigadora pós-doutoramento do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto





## **agradecimentos**

Um agradecimento especial ao meu Pai, que foi quem mais contribuiu para que eu chegasse aqui e quem me acompanha afincadamente. Pela sua compreensão, companheirismo, apoio incondicional, paciência e incentivo para a realização deste trabalho.

À minha Mãe, Irmão, Avó Isabel, Tia Margarida e Rui por terem estado sempre presentes e me terem apoiado sempre que precisei.

À Maria Leal Coelho, Irene Viola, Mariana Coelho, Ana Rocha e Pedro David Morais que pelo grande laço de amizade que nos liga foram o meu grande apoio e incentivo, ajudando-me a ultrapassar os momentos mais difíceis. A Carolina Menezes e Sofia Teles, para além do apoio, tornaram possível a minha estadia em Aveiro.

Aos meus amigos e familiares que estão longe, mas que mesmo assim foram fonte de incentivo e apoio.

Ao Miguel Souto do EMEPC pela disponibilidade e contribuição para o esclarecimento de algumas dúvidas na área da programação.

Ao meu orientador, Professor Carlos Coelho, pela sua compreensão, disponibilidade e ajuda ao longo da realização deste trabalho.

Muito obrigada!



**palavras-chave**

Esporão, linha de costa, LTC, Pelnard-Considère

**resumo**

As zonas costeiras são palco de processos complexos, conferindo-lhes uma dinâmica intensa que origina uma constante mutabilidade, dificultando a respetiva gestão. Por serem zonas extremamente dinâmicas e de grande concentração da atividade antrópica, torna-se necessário lidar com a problemática do recuo da linha de costa. Desta forma, é fundamental a prevenção, defesa e estabilização das zonas costeiras.

As obras de defesa costeira pretendem defender as zonas costeiras, em particular as frentes urbanas e, conseqüentemente, a economia e o bem-estar das populações residentes. A estrutura de defesa costeira mais comum em Portugal é o esporão, classicamente perpendicular à linha de costa que tem como principal objetivo reter a barlamar os sedimentos transportados pela deriva litoral de forma a condicionar a evolução da linha de costa. No entanto, a distribuição de sedimentos nas imediações desta estrutura não está perfeitamente compreendida, gerando alguma dúvida sobre a perda de sedimentos para grandes profundidades ou a sua transposição após enchimento do esporão.

As ferramentas frequentemente utilizadas na tentativa de compreender os processos envolvidos na evolução da posição da linha de costa são os modelos numéricos, permitindo simular e prever possíveis cenários de evolução da linha de costa, bem como compreender o peso dos parâmetros envolvidos no processo.

Esta dissertação pretende contribuir para o conhecimento e compreensão da evolução da linha de costa nas imediações de um esporão, avaliando o impacto dos esporões através da comparação do desempenho de uma formulação teórica e de um modelo numérico, designadamente, de Pelnard-Considère e o modelo LTC.



**keywords**

Groin, shoreline, LTC, Pelnard-Considère

**abstract**

Coastal zones are the stage of complex processes, giving them an intensive dynamic that originates a constant mutability, making respective management more difficult. For being extremely dynamic zones and due to the big anthropic concentration, it is necessary to deal with the shoreline retreat. Therefore, the prevention, defence and stabilization of coastal zones are fundamental.

Coastal defence interventions intent to protect coastal zones, in particular the urban fronts and consequently, the economics and the well being of the resident populations. The groin is the more common coastal defence structure in Portugal, usually perpendicular to the shoreline and its main goal is to retain the sediments updrift, carried by the littoral drift, in order to condition shoreline evolution. Although the sediment distribution in the structure surroundings is not perfectly understood, it creates some doubts about the sediment loss for higher depths or in their structure transposition after the filling.

The tools frequently used in order to understand the processes involved in the shoreline position evolution are numeric models, allowing the simulation and prediction of possible scenarios of shoreline evolution as well the understanding of the influence parameters involved in the process.

The intent of this dissertation is to contribute to the knowledge and understanding of the shoreline in the groin surroundings. It evaluates the groins impact through a performance comparison of a theoretical formulation and a numeric model, namely Pelnard-Considère and LTC model.



# ÍNDICES





---

**ÍNDICE**

ÍNDICE DE FIGURAS .....	xv
ÍNDICE DE TABELAS .....	xix
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xxi
1. INTRODUÇÃO .....	3
1.1. Enquadramento .....	3
1.2. Objetivos e Metodologia.....	5
2. ESTRUTURAS DE DEFESA COSTEIRA: ESPORÃO.....	9
2.1. Tipos de esporão .....	9
2.2. Vantagens e desvantagens .....	11
2.3. Impactos na morfologia .....	12
2.4. Condições de dimensionamento .....	16
3. MODELOS DE AVALIAÇÃO MORFOLÓGICA DO IMPACTO DO ESPORÃO .	21
3.1. Formulação numérica: Pelnard-Considère.....	23
3.2. Modelo numérico: LTC .....	25
4. APLICAÇÃO DOS MODELOS: PELNARD-CONSIDÈRE E LTC .....	31
4.1. Caso de estudo .....	31
4.2. Agitação Marítima .....	34
4.3. Aplicação dos modelos .....	36
5. ANÁLISE DE RESULTADOS .....	41
5.1. Formulação de Pelnard-Considère.....	41
5.1.1. Tempo de enchimento do esporão.....	41
5.1.2. Posição da linha de costa.....	44

5.2.	Modelo LTC: Posição da Linha de costa.....	52
5.2.1.	Esporão de 100 metros .....	52
5.2.2.	Esporão com 200 metros .....	54
5.2.3.	Esporão com 300 metros .....	56
5.3.	Comparação dos resultados de Pelnard-Considère e LTC.....	58
5.3.1.	Posição da linha de costa para um esporão com 100 metros.....	58
5.3.2.	Posição da linha de costa para um esporão com 200 metros.....	61
5.3.3.	Posição da linha de costa para um esporão com 300 metros.....	63
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	69
6.1.	Conclusões .....	69
6.2.	Desenvolvimentos Futuros .....	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	75

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1: Esquema ilustrativo da geometria em planta (Coelho, 2005) .....	10
Figura 2: Secção transversal de um esporão executado em blocos de enrocamento.....	10
Figura 3: Perfil longitudinal de um esporão executado em blocos de enrocamento. ....	11
Figura 4: Esporão de madeira.....	11
Figura 5: Impacto de um esporão, representando por acreção a barlar e erosão a sotamar. ....	13
Figura 6: Perfil assimétrico resultante da construção de um esporão (adaptado de Bakker <i>et al.</i> , 1970).....	13
Figura 7: Configuração típica de uma praia com campo de esporões (adaptado de CPM, 2002).....	14
Figura 8: Campo de esporões na Costa da Caparica .....	15
Figura 9: 1- Alterações da linha de costa para um esporão comum; 2- Desenvolvimento da corrente de retorno num campo de esporões; 3- Influência da junção Y a um esporão comum (adaptado de Silvester, 1974) .....	15
Figura 10: Impacto de um campo de dois esporões em T (Ozolçer <i>et al.</i> , 2006).....	16
Figura 11: Efeito de um esporão no transporte de caudal sólido longitudinal (adaptado de Oliveira, 1997 e Coelho, 2005) .....	18
Figura 12: Esquema ilustrativo da formulação de Pelnard-Considère .....	24
Figura 13: Esquema do caso de estudo.....	32
Figura 14: Esquema do perfil transversal do caso de estudo.....	33
Figura 15: Rosa de rumos com a representação das classes de direção de ondulação (Coelho, 2005).....	35
Figura 16: Tempos de enchimento em função do comprimento do esporão.....	42
Figura 17: Posição da linha de costa para um esporão de 100 metros, para uma onda com 1 metro de altura.....	45
Figura 18: Posição da linha de costa para um esporão de 100 metros, para uma onda com 3 metros de altura .....	45
Figura 19: Posição da linha de costa para um esporão de 100 metros, para uma onda com 6 metros de altura .....	46

Figura 20: Posição da linha de costa para um esporão de 200 metros, para uma onda com 1 metro de altura .....	47
Figura 21: Posição da linha de costa para um esporão de 200 metros, para uma onda com 3 metros de altura .....	48
Figura 22: Posição da linha de costa para um esporão de 200 metros, para uma onda com 6 metros de altura .....	49
Figura 23: Posição da linha de costa para um esporão de 300 metros, para uma onda com 1 metro de altura .....	50
Figura 24: Posição da linha de costa para um esporão de 300 metros, para uma onda com 3 metros de altura .....	51
Figura 25: Posição da linha de costa para um esporão de 300 metros, para uma onda com 6 metros de altura .....	51
Figura 26: Posição da linha de costa para um esporão de 100 metros, para uma onda com 1 metro de altura (LTC).....	53
Figura 27: Posição da linha de costa para um esporão de 100 metros, para uma onda com 3 metros de altura (LTC) .....	54
Figura 28: Posição da linha de costa para um esporão de 200 metros, para uma onda com 1 metro de altura (LTC).....	55
Figura 29: Posição da linha de costa para um esporão de 200 metros, para uma onda com 3 metros de altura (LTC) .....	56
Figura 30: Posição da linha de costa para um esporão de 300 metros, para uma onda com 1 metro de altura (LTC).....	57
Figura 31: Posição da linha de costa para um esporão de 300 metros, para uma onda com 3 metros de altura (LTC) .....	57
Figura 32: Comparação dos resultados obtidos para um esporão de 100 metros e para uma onda de 1 metro, ao fim de 10 anos .....	58
Figura 33: Comparação dos resultados obtidos para um esporão de 100 metros e para uma onda de 3 metros, ao fim de 10 anos .....	59
Figura 34: Comparação dos resultados obtidos para um esporão de 200 metros e para uma onda de 1 metro, ao fim de 10 anos .....	62
Figura 35: Comparação dos resultados obtidos para um esporão de 200 metros e para uma onda de 3 metros, ao fim de 10 anos .....	62

Figura 36: Comparação dos resultados obtidos para um esporão de 300 metros e para uma onda de 1 metro, ao fim de 10 anos ..... 64

Figura 37: Comparação dos resultados obtidos para um esporão de 100 metros e para uma onda de 3 metros, ao fim de 10 anos ..... 64



**ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos esporões.....	12
Tabela 2: Valor adotados para definição do terreno da área de estudo .....	33
Tabela 3: Valores de agitação (altura e rumo) e de comprimento do esporão assumidos na simulação .....	36
Tabela 4: Valores assumidos nos parâmetros para aplicação de Pelnard-Considère e do modelo LTC.....	37
Tabela 5: Tempo de enchimento (em dias) para H=1m, H=3m, H=6m e $\alpha_b=10^\circ$ , $\alpha_b=20^\circ$ , $\alpha_b=30^\circ$ , para esporões com comprimento até 300m .....	42
Tabela 6: Posição de $x$ para $y=5\%$ de $L_g$ e respectivos tempos de enchimento, $t_f$ (dias) .....	43
Tabela 7: Resultados para um esporão de 100 metros, para $x=2500$ m, para 10 anos .....	46
Tabela 8: Resultados para um esporão de 200 metros, para $x=2500$ m, para 10 anos de simulação .....	49
Tabela 9: Resultados para um esporão de 300 metros, para $x=2500$ m, para 10 anos de simulação .....	51
Tabela 10: Média ( $\bar{X}$ ) das distâncias entre resultados, para um esporão de 100m.....	61
Tabela 11: Média ( $\bar{X}$ ) das distâncias entre resultados, para um esporão de 200m.....	63
Tabela 12: Média ( $\bar{X}$ ) das distâncias entre resultados, para um esporão de 300m.....	65





## LISTA DE SÍMBOLOS

### *Abreviaturas*

<i>LC</i>	Linha de Costa
<i>NMM</i>	Nível Médio do Mar
<i>PC</i>	Pelnard-Considère
<i>A</i>	Coefficiente dimensional
<i>B</i>	Altura da berma acima do nível médio do mar (berma emersa)
<i>C<sub>gb</sub></i>	Velocidade do grupo de ondas na rebentação
<i>H</i>	Altura da onda na rebentação
<i>K</i>	Coefficiente de proporcionalidade empírico e adimensional, aplicado na fórmula CERC
<i>L<sub>g</sub></i>	Comprimento do esporão
<i>Q<sub>i</sub></i>	Volume potencial de sedimentos que atravessa uma secção transversal à costa, em determinada unidade de tempo
<i>Q<sub>s</sub></i>	Transporte sólido longitudinal
<i>T<sub>p</sub></i>	Período do pico das ondas
<i>Y</i>	Comprimento do esporão (na formulação de Pelnard-Considère)
<i>Y</i>	Posição da linha de costa
<i>d<sub>50</sub></i>	Dimensão média dos sedimentos
<i>g</i>	Aceleração da gravidade (9.8 ms <sup>-2</sup> )

$h_c$	Profundidade ativa do perfil transversal ou profundidade de fecho
$k$	Coefficiente adimensional de proporcionalidade entre a razão do potencial de transporte sedimentar longitudinal e a razão de transporte de peso imerso
$k_b$	Índice de rebentação (relação entre a altura e a profundidade de rebentação)
$m_p$	Inclinação da praia
$m$	Fator de forma dos perfis transversais, função do tipo de dissipação da praia
$n$	Porosidade dos sedimentos (aproximadamente 0.4)
$t$	Tempo passado após o início de enchimento do esporão
$t_f$	Tempo total de enchimento do esporão
$t_2$	Tempo passado após o enchimento do esporão
$x$	Abcissa da posição da linha de costa, nos modelos de configuração de linha de costa em planta
$y$	Ordenada da posição da linha de costa, nos modelos de configuração de linha de costa em planta
$z$	Profundidade
$\alpha_b$	Ângulo entre a crista da onda na rebentação e a linha de costa (rumo)
$\varepsilon$	Parâmetro interveniente no cálculo do tempo de enchimento de um esporão
$\sigma$	Desvio padrão
$\pi$	Número adimensional (3.14)
$\rho$	Densidade da água ( $1027 \text{ kgm}^{-3}$ )
$\rho_s$	Densidade dos sedimentos ( $2650 \text{ kgm}^{-3}$ )
$\bar{X}$	Média aritmética

- $\Delta t$  Intervalo de tempo no cálculo da variação de volume no trecho  $\Delta y$ , no modelo LTC
- $\Delta V$  Variação de volume no trecho  $\Delta y$  e no intervalo de tempo  $\Delta t$ , no modelo LTC
- $\Delta x$  Espaçamento da malha no eixo das abcissas, no modelo LTC
- $\Delta y$  Espaçamento da malha no eixo das ordenadas, no modelo LTC
- $\Delta z$  Variação uniforme da cota em toda a largura ativa do perfil transversal, no modelo LTC



*Capítulo 1*

**INTRODUÇÃO**

*"GRATA SUPERVENIET QUAE NON SPERABITUR HORA"*

*Orazio - Epistole - Livro I-V*



## **1. INTRODUÇÃO**

As zonas costeiras correspondem à fronteira entre a terra e o mar. São sistemas altamente dinâmicos e complexos, constituindo ecossistemas únicos e irreconstituíveis à escala humana, resultantes de uma longa evolução, de muitos milhões de anos (Dias, 2005).

Por serem zonas extremamente dinâmicas, torna-se necessário lidar com a problemática da erosão costeira. A erosão e acreção sempre existiram, alterando constantemente a morfologia da linha de costa. No entanto, ao longo dos anos a erosão intensificou-se devido ao aumento da atividade antrópica junto das mesmas (van Rijn, 2011). Desta forma, torna-se necessária a prevenção, defesa e estabilização das zonas costeiras. As obras de defesa costeira pretendem defender as zonas costeiras, em particular as frentes urbanas e, conseqüentemente, a economia e o bem-estar das populações aí residentes.

A costa Portuguesa estende-se por mais de 900 km e é caracterizada por uma grande diversidade morfológica, transformando-a num dos melhores recursos naturais da Europa (Dias *et al.*, 2000). A maioria da população concentra-se nas zonas costeiras, nas quais se encontram as maiores cidades portuguesas (adjacentes a rios e lagunas), bem como importantes polos turísticos. Por serem zonas economicamente importantes, Dias *et al.* (2000) referem que é necessária a implementação de medidas de gestão adequada para preservação das zonas costeiras.

### **1.1. Enquadramento**

As zonas costeiras são palco de processos complexos, conferindo-lhes uma dinâmica muito intensa, que origina uma constante mutabilidade, dificultando a respetiva gestão. Dias (2005) refere que com frequência, uma pequena alteração num dos parâmetros pode provocar grandes modificações em todo o sistema e acrescenta que, o facto de constituírem sistemas abertos, conduz a uma elevada dependência e suscetibilidade a influências exteriores.

Apesar de serem sistemas profundamente complexos e dinâmicos, tendem constantemente para o equilíbrio, que por norma não é atingido (Dias e Ferreira, 1997). No entanto, poderão adaptar-se naturalmente, desde que se garanta a entrada ou chegada de sedimentos ao litoral, tendendo a reagir à escala de tempo necessária, à influência das condições de

agitação marítima (ondulação, correntes e marés) e à influência das condições climáticas (vento). As maiores forças que condicionam as zonas costeiras são as ondas e as marés, regulando e modificando constantemente a paisagem costeira.

De uma forma geral, existem grandes movimentações sedimentares, longitudinais e transversais. Estas são induzidas, principalmente pelas ondas incidentes, embora fatores como o vento e as correntes locais também possam assumir um papel importante. Estas movimentações sedimentares ocorrem constantemente nas zonas costeiras e são fundamentais para a preservação do próprio litoral, bem como para a manutenção das suas potencialidades intrínsecas. Sempre que algum fator exógeno dificulte as movimentações mencionadas, a generalidade do sistema entra em rutura e os valores naturais começam a perder-se.

A erosão costeira deriva destas movimentações, associada a balanços sedimentares negativos, levando à necessidade de defesa das frentes urbanas, recorrendo a intervenções de defesa costeira. Estas podem ser de diversos tipos, no entanto têm em comum o facto de tentar mitigar problemas de dimensão local ou regional, que se verificam geralmente por efeito da erosão (Coelho, 2005).

Segundo Coelho (2005), as possibilidades de intervenção de defesa costeira em zonas muito vulneráveis incluem obras perpendiculares à costa (esporões), paralelas à costa (estruturas aderentes e quebra-mares destacados), alimentações artificiais com areias (a cotas positivas e/ou negativas), a ripagem de areias e a execução/reconstrução de dunas artificiais, bem como soluções mistas. Todas estas possibilidades devem ser bem avaliadas antes de utilizadas, pois qualquer uma delas representa uma interferência com o meio e conseqüentemente terá resultados que muitas vezes ultrapassam o conhecimento atual.

Baptista *et al.* (2014) referem que os modelos numéricos de evolução da linha de costa são ferramentas úteis para determinar tendências e previsões de cenários de evolução da linha de costa para escalas temporais na casa das décadas. Terão sido propostos vários modelos de evolução da linha de costa, baseados no balanço de volume de sedimentos para determinados períodos de tempo, tais como Coelho *et al.* 2004; Hanson and Kraus, 1989; Pelnard-Considère, 1956; Steetzel *et al.*, 2000. Estes modelos tipicamente simulam a evolução da linha costeira com resposta limitada à escala intra-anual. Sendo que a maior



dificuldade nesta aplicação é estabelecer as condições de fronteira, calibrando os coeficientes e parâmetros associados, com variáveis que representam a realidade do sistema costeiro, corrigindo a sua contribuição para o processo de modelação.

Por tudo o que foi referido, o conhecimento relativo ao transporte sedimentar é um dos temas básicos da Engenharia Costeira, estando diretamente vinculado ao impacto ambiental produzido pelas obras costeiras e portuárias (Araújo e Alfredini, 2001).

## **1.2. Objetivos e Metodologia**

Esta dissertação pretende contribuir para o conhecimento e compreensão da evolução da linha de costa nas imediações de um esporão, avaliando o impacto dos esporões, através da comparação do desempenho de uma formulação teórica e de um modelo numérico, nomeadamente a formulação de Pelnard-Considère e o modelo LTC.

Relativamente à metodologia, a dissertação começa por uma abordagem genérica sobre o comportamento dos esporões e apresentação de alguns dos impactos na linha costa. Posteriormente, procedeu-se à pesquisa de algumas formulações de quantificação de volume de sedimentos em transporte, bem como da formulação teórica a ser aplicada e modelo numérico a ser utilizado.

Para a elaboração deste trabalho foi necessária a criação de um caso de estudo que será apresentado no capítulo 4, para o qual foi feita uma breve análise e pesquisa para os parâmetros a introduzir na aplicação da formulação teórica e do modelo numérico.

Recorrendo ao *software* MATLAB procedeu-se ao cálculo e aplicação da formulação de Pelnard-Considère. Posteriormente, procedeu-se à simulação e análise do caso de estudo com o modelo LTC. Para ambos os casos, foi elaborada uma análise em função de diferentes condições de agitação e diferentes comprimentos de esporão.

Numa fase final, realizou-se à análise dos resultados obtidos a partir dos dois modelos (Pelnard-Considère e LTC), para diferentes comprimentos de esporão e diferentes climas de agitação. Esta comparação permitiu a discussão da forma como são interpretados os comportamentos morfológicos da vizinhança dos esporões.



*Capítulo 2*

**ESTRUTURAS DE DEFESA COSTEIRA:  
ESPORÃO**

*"Escreve, a tinta se esvai, o mar se expande"*

*Giorgos Seferis*



## **2. ESTRUTURAS DE DEFESA COSTEIRA: ESPORÃO**

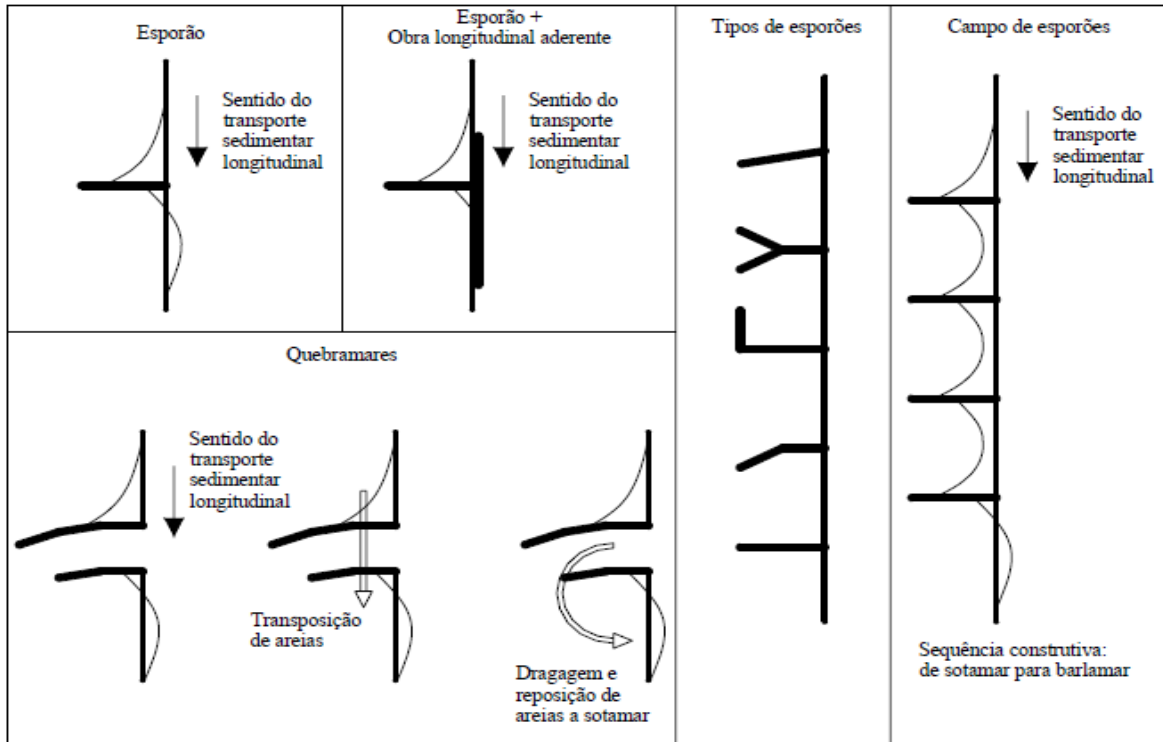
Os esporões são estruturas de defesa costeira perpendiculares à costa que, têm como principal função a retenção do transporte longitudinal de sedimentos, formando praias por depósito de areias (Coelho, 2005). Estas obras são construídas com o objetivo de reter a barlar os sedimentos transportados pela deriva litoral, de forma a condicionar a evolução da linha de costa. Desta forma, os esporões criam uma barreira que provoca alterações na evolução do perfil da linha de costa na vizinhança da estrutura, nomeadamente, deposição de sedimentos e avanço da linha de costa a barlar, e erosão e recuo da linha de costa a sotamar. No entanto, a distribuição dos sedimentos nas imediações do esporão não está perfeitamente compreendida, gerando alguma dúvida sobre a perda de sedimentos para grandes profundidades ou a sua transposição após o enchimento do esporão.

Sendo projetados com o objetivo de retenção de sedimentos, quanto mais compridos forem, maior será a sua eficácia a barlar (Coelho, 2005). No entanto, os impactos negativos a sotamar também serão maiores, os quais poderão ser permanentes e irreversíveis ou temporários e reversíveis se após alguns anos, o transporte longitudinal for retomado por “saturação” do esporão.

Os esporões podem ser permeáveis, ajustáveis ou de alta ou baixa cota. Sucintamente, os esporões permeáveis permitem a passagem de água e de sedimentos. No que diz respeito aos esporões de cota alta ou baixa, significa que a cota permite ou não o transporte sedimentar de barlar para sotamar da estrutura. Relativamente aos esporões ajustáveis, estes contêm painéis entre os pilares, os quais podem ser removidos/ajustados consoante a quantidade de sedimento que se pretende reter ou deixar passar (SPM, 1973).

### **2.1. Tipos de esporão**

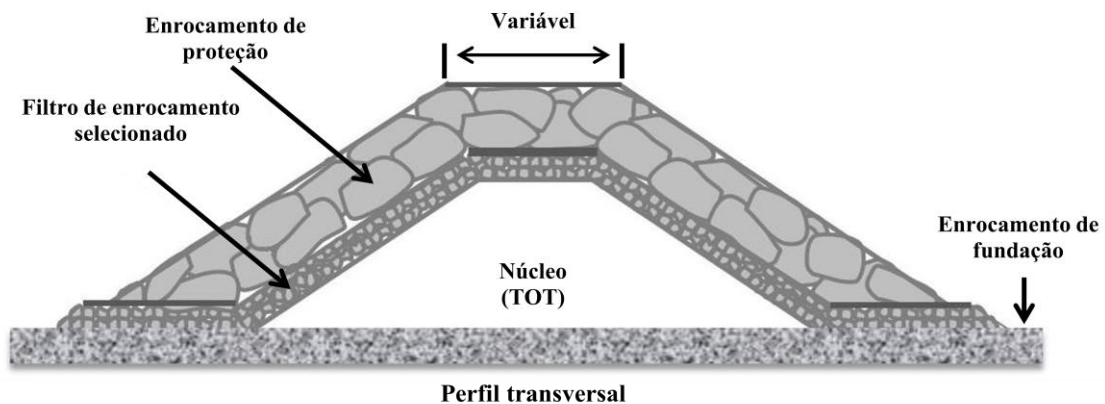
Nesta secção pretende-se descrever a geometria em planta e o perfil transversal dos esporões, bem como, os materiais usados para a respetiva construção. Tal como já foi referido, os esporões são estruturas perpendiculares à costa. No entanto, podem ter diferentes orientações e formas, de acordo com a seguinte geometria em planta (Figura 1):



**Figura 1:** Esquema ilustrativo da geometria em planta (Coelho, 2005)

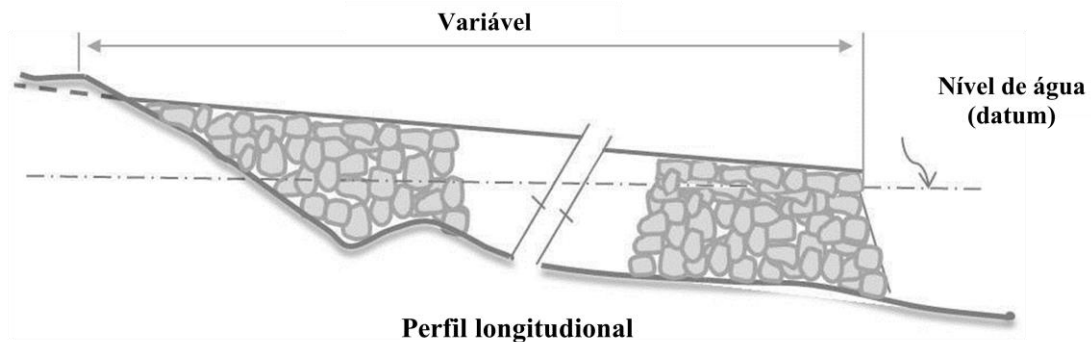
Por outro lado, os esporões podem ser caracterizados, principalmente, pela permeabilidade (em função dos materiais e da cota de coroamento), altura e comprimento.

Os materiais normalmente utilizados para a construção de um esporão são: pedra, madeira, betão e aço. Associadas a estes diferentes tipos de materiais, estão vários tipos de estruturas, executadas em blocos de enrocamento (Figura 2 e Figura 3), blocos de betão, cortinas de estacas-prancha metálicas ou em madeira (Figura 4).



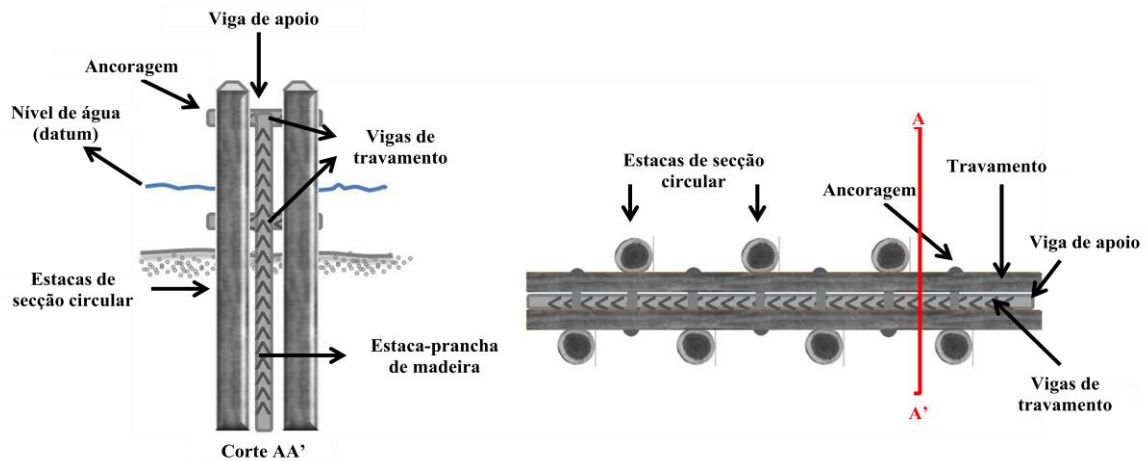
**Figura 2:** Secção transversal de um esporão executado em blocos de enrocamento.

Na Figura 2 pode observar-se o perfil transversal de um esporão típico da costa portuguesa, ao contrário do tipo de esporão representado na Figura 4.



Dimensão e pormenores determinados pelas condições específicas da localização.

**Figura 3:** Perfil longitudinal de um esporão executado em blocos de enrocamento.



**Figura 4:** Esporão de madeira.

## 2.2. Vantagens e desvantagens

A implementação de esporões tem algumas limitações e, por isso, é necessário ter em consideração alguns fatores, nomeadamente:

- A adequabilidade ao fornecimento sedimentar natural, de forma a garantir que a função do esporão seja realizada como desejado;
- A adequabilidade do enraizamento dos esporões, para prevenir os galgamentos na raiz do esporão;

- Extensão até à qual poderá ser afetada erosão de material.

Por outro lado, é necessário ter em conta as vantagens e desvantagens associadas à utilização dos esporões (Tabela 1).

**Tabela 1:** Vantagens e desvantagens dos esporões

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
- Acreção a barlamar	- Erosão a sotamar
- Defesa da frente urbana	- Impacto visual negativo
- Estabilização da linha de costa	- Custos significativos
- Controlo da localização da linha de costa devido à retenção de sedimentos	- Só é eficaz quando há sedimentos em transporte.

Tendo em conta as vantagens, desvantagens e limitações, apenas se justifica a implementação de um esporão após uma análise custo-benefício. No entanto, este tipo de análise é complexa devido à própria complexidade das variáveis envolvidas.

### **2.3. Impactos na morfologia**

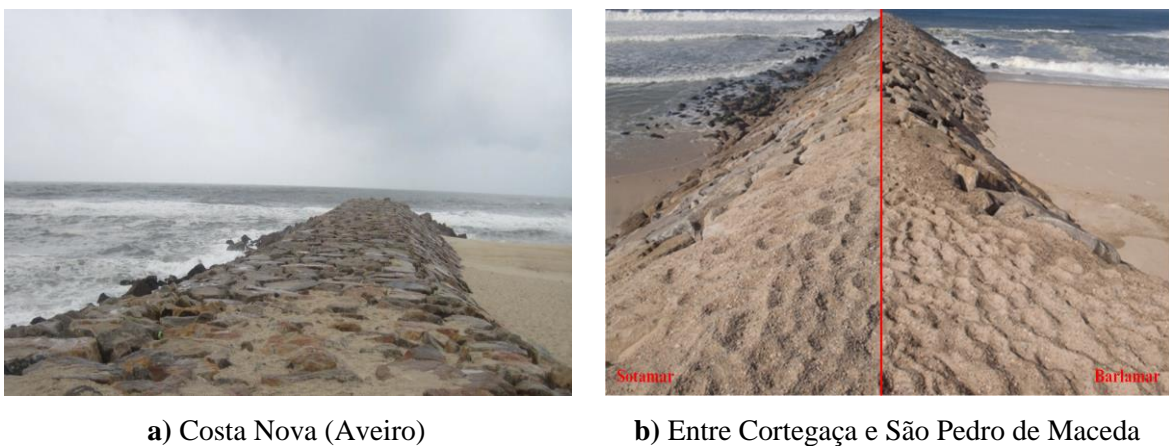
Os sistemas costeiros são ambientes dinâmicos que compreendem três principais componentes interligadas: morfologia, sedimentos e forçamentos. É amplamente aceite o facto de que após determinada escala espacial e temporal, as componentes de qualquer sistema costeiro tenderão para o equilíbrio. Contudo, podem surgir condições que podem alterar este equilíbrio, quando há alguma alteração em termos de entrada de energia no sistema ou quando há alteração do balanço sedimentar, gerada por atividades antrópicas ou morfológicas (Cooper *et al.*, 2001). O principal agente para a média anual de perda de sedimentos na linha de costa, formando um sistema aberto, é o transporte litoral. Por isso um aspeto crucial é o conhecimento da hidrodinâmica nos setores da linha de costa (Raudkivi e Dette, 2002).

As estruturas costeiras em praias arenosas provocam, usualmente, alterações na topografia e na posição da linha de costa. Em ambos os casos, estas alterações e deformações globais

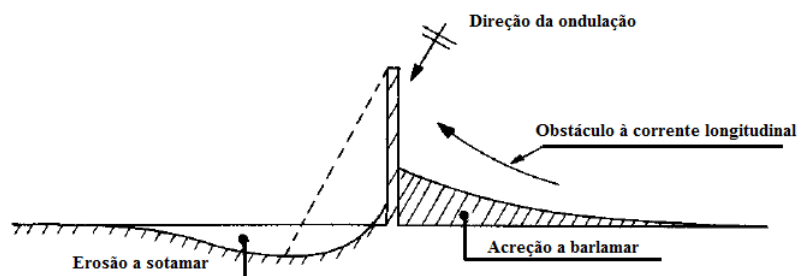


e locais podem ser geralmente observadas (Leont'yev, 1999). As primeiras ocorrem em escalas espaciais superiores às dimensões da estrutura e podem ser interpretadas como a tendência da evolução morfológica a longo prazo, devido a uma perturbação do fluxo sedimentar paralelo à costa (deriva litoral). Por exemplo, a interrupção do transporte longitudinal de sedimentos por um campo de esporões pode originar a erosão a sotamar que se faz notar ao longo de centenas de metros ou até mesmo quilómetros (Leont'yev, 1999). A nível local as deformações estão relacionadas com as alterações das correntes geradas pela ondulação e relacionadas com a movimentação sedimentar junto às estruturas e a sua escala espacial pode ser comparada com as dimensões da estrutura (Leont'yev, 1999).

Estudos sobre a interação entre os esporões e o campo hidrodinâmico, mostraram que a circulação a sotamar pode afetar o transporte sedimentar (Pattiaratchi *et al.*, 2009). O principal impacto na morfologia é a retenção a barlamar e a erosão a sotamar (Figura 5).



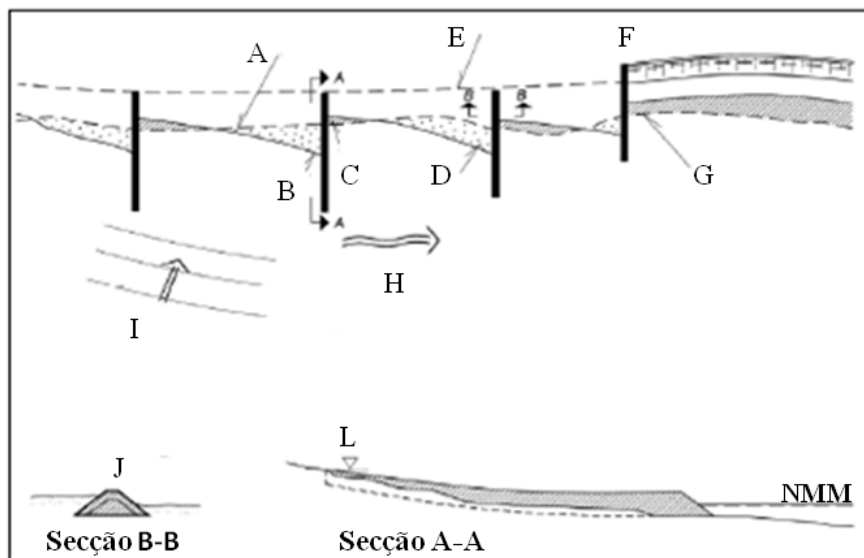
**Figura 5:** Impacto de um esporão, representando por acreção a barlamar e erosão a sotamar.



**Figura 6:** Perfil assimétrico resultante da construção de um esporão (adaptado de Bakker *et al.*, 1970)

Leont'yev (1997), refere que a acreção a barlamar do esporão dá origem a um avanço da linha de costa, enquanto a erosão a sotamar dá origem a um recuo da linha de costa, o que por sua vez origina um aspeto do tipo assimétrico, ou seja, o desenvolvimento de uma costa assimétrica (Figura 6).

Na Figura 7, pode observar-se a configuração típica de uma praia com um campo de esporões, de acordo com o CPM (2002).



**Legenda:**

A - Linha de costa original; B - Linha de costa ajustada; C - Erosão; D - Acreção; E - Limite de galgamento; F - Obra longitudinal; G - Erosão a sotamar; H - Direção da deriva litoral; I - Direção da ondulação em regime de tempestade; J - Diferença de cotas entre barlamar e sotamar; L - Nível máximo de espraçamento.

**Figura 7:** Configuração típica de uma praia com campo de esporões (adaptado de CPM, 2002)

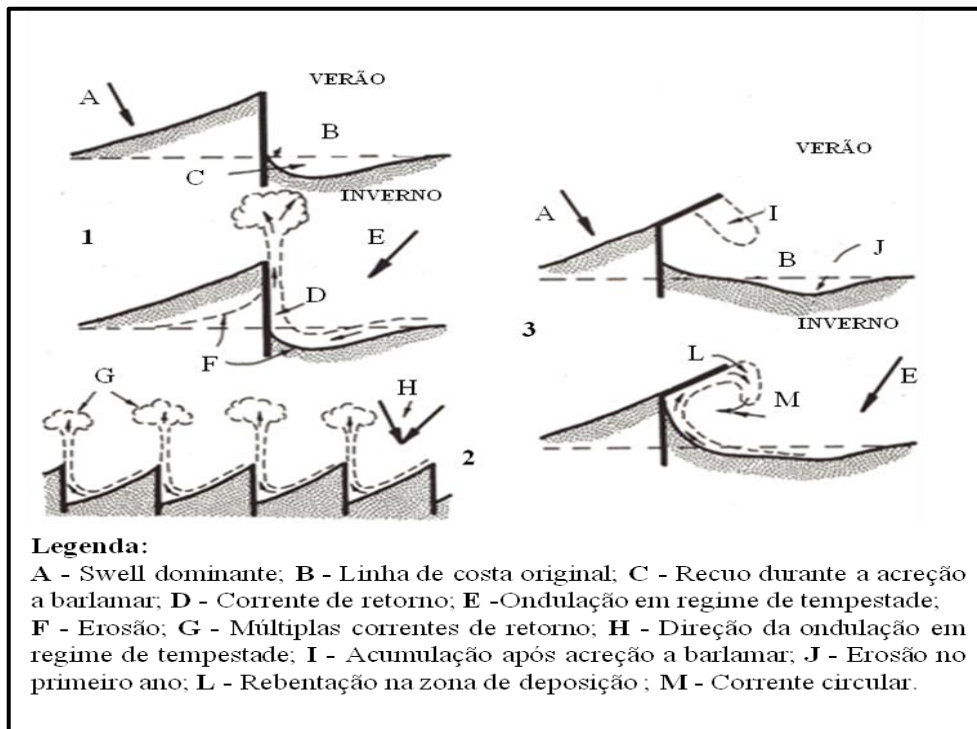
De acordo com Bakker (1968), a variação do ângulo de incidência da onda provoca alterações batimétricas nas imediações de um esporão, sendo que a maior influência faz-se sentir mais acentuadamente no primeiro esporão de um campo de esporões, o que gerará movimentação de sedimentos na praia com curtos períodos (Figura 8).

Tal como já foi referido um dos objetivos de um esporão é reter sedimentos a barlamar. Alguns impactos estão esquematizados na Figura 9. Num certo período de tempo, a acumulação de sedimentos devido à estrutura é pequena, no entanto a erosão é mais

pronunciada. As zonas afetadas pela construção, barlar e sotamar, alternam dependendo da direção do fluxo de sedimentos que, por sua vez, é controlada pelas condições de tempestade (Leont'yev, 1997).



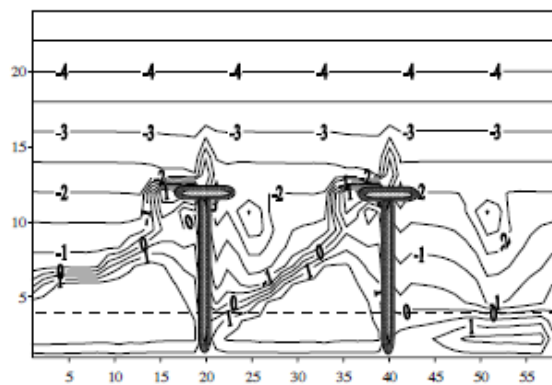
**Figura 8:** Campo de esporões na Costa da Caparica



**Figura 9:** 1- Alterações da linha de costa para um esporão comum; 2- Desenvolvimento da corrente de retorno num campo de esporões; 3- Influência da junção Y a um esporão comum (adaptado de Silvester, 1974)

Vários autores têm estudado os perfis de praia e a sua evolução morfológica: sedimentação ou erosão (Shepard, 1948; Ingle, 1966). Komar (1976), utilizou outra terminologia, empregando os termos: perfis de tempestade e perfis de "bom tempo" que claramente evidenciam a ligação entre esses perfis e as condições de ondulação (Bouzidi *et al.*, 2004).

Relativamente aos esporões em T, Ozolçer *et al.* (2006) referem que de forma a obter maior acreção, o comprimento da cabeça deve ser o maior possível. Um campo de esporões com dois esporões em T é mais eficiente que um esporão sozinho, em termos de proteção costeira e de extensão de praias (Figura 10).



**Figura 10:** Impacto de um campo de dois esporões em T (Ozolçer *et al.*, 2006)

De qualquer forma, uma estrutura introduzida no sistema perturba o equilíbrio dinâmico do transporte sedimentar e, conseqüentemente, altera a morfologia costeira. A fim de minimizar os possíveis efeitos indesejados resultantes desta alteração é necessário investigar conseqüentes alterações na morfologia costeira (Avdeev *et al.*, 2009).

#### **2.4. Condições de dimensionamento**

O dimensionamento da geometria dos esporões, ou seja, o comprimento, altura e orientação a adotar, depende das características intrínsecas do local onde se pretende efetuar a intervenção, nomeadamente, da agitação marítima local, marés e volume de sedimentos em transporte.

O comprimento do esporão é determinado pela distância à zona de profundidade típica de rebentação da ondulação e pela quantidade de areia que se pretende reter. O esporão deve ter o comprimento necessário para interromper material suficiente de forma a criar a

estabilização da linha de costa ou acreção desejadas. No entanto, é necessário ter em conta os possíveis impactos a sotamar (SPM, 1973).

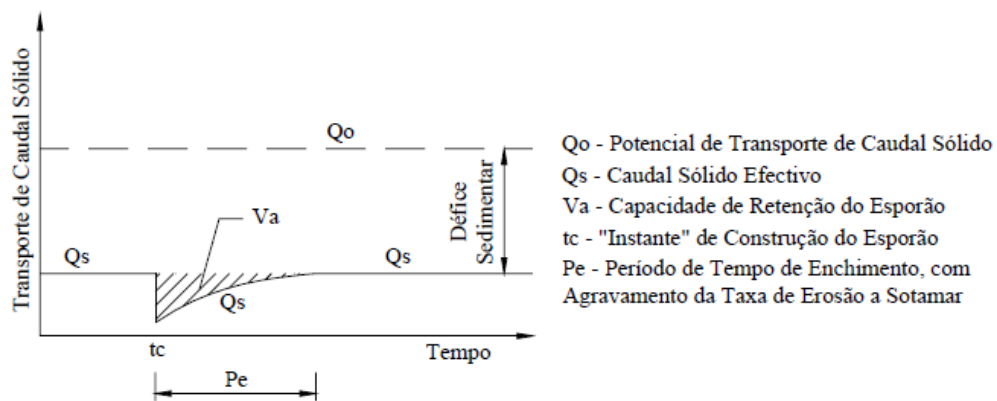
Por norma, os esporões são implementados em zonas onde o fornecimento da deriva litoral é menor que a capacidade de transporte. Nestas áreas, a estabilização da linha de costa através destas estruturas não reduzirá a taxa de fornecimento sedimentar, apenas reduzirá perdas sedimentares adicionais (SPM, 1973).

Em sistemas cuja capacidade de fornecimento satisfaz a capacidade de transporte, a implementação de um esporão reduzirá a mesma ao longo da costa. Desta forma, a sotamar os impactos negativos serão maiores (SPM, 1973).

White (1998), refere que o transporte sedimentar é um fator importante na maioria do dimensionamento de estruturas. As taxas, líquida e bruta, do transporte sedimentar longitudinal são provavelmente os fatores mais importantes (e maioritariamente desconhecidos) para o dimensionamento de qualquer estrutura que impeça substancialmente o fluxo de sedimentos ao longo da costa. A taxa de transporte transversal é necessária para o dimensionamento da estrutura de proteção da praia contra galgamentos e praia para uso balnear. Porém, Falqués (2006), refere que o transporte transversal de sedimentos é, por norma, explicitamente desprezado. No entanto, o transporte transversal está implicitamente presente através da redistribuição de sedimentos que é necessária para alcançar o perfil de equilíbrio da praia após as alterações resultantes do transporte longitudinal.

A previsão do transporte sedimentar nas zonas costeiras tem ainda uma série de incertezas (Sánchez-Arcilla *et al.*, 2001). Além disso, a presença de uma estrutura costeira modifica o padrão da circulação e do transporte sedimentar nas suas imediações, afetando a morfodinâmica na sua área de influência. O problema torna-se ainda mais complexo, quando as estruturas são porosas, de baixa cota ou a combinação de ambas, uma vez que para o seu estudo, além do empolamento, refração e difração, existem outros fenómenos a ter em conta, como o galgamento e transmissão de ondas através da estrutura (Sánchez-Arcilla *et al.*, 2006). Estes processos são, raramente, considerados quando se estuda a morfodinâmica nas imediações de uma estrutura (Sierra *et al.*, 2010).

Segundo Oliveira (1997), um esporão tem uma capacidade limite de acumulação sedimentar. Esgotada a capacidade limite, o esporão deixa de constituir um obstáculo à passagem de caudal sólido e o déficit sedimentar que existe a sotamar volta a ser igual ao déficit sedimentar de barlar. Por isso, o agravamento do processo erosivo a sotamar manifesta-se apenas durante o período de enchimento do esporão e decresce progressivamente no tempo. Porém, se o esporão for extenso em termos relativos, ainda que saturado, os sedimentos que passarão a contornar a sua cabeça poderão ficar a profundidades relativas tais que as ondas de pequena e média energia não têm capacidade de transportar os sedimentos para as praias imediatamente a sotamar. Quanto muito, essa reposição verificar-se-á a distâncias consideráveis do esporão (Figura 11).



**Figura 11:** Efeito de um esporão no transporte de caudal sólido longitudinal (adaptado de Oliveira, 1997 e Coelho, 2005)

*Capítulo 3*

**MODELOS DE AVALIAÇÃO MORFOLÓGICA DO  
IMPACTO DO ESPORÃO**

*"O mar não é um obstáculo: o mar é o caminho"*

*Arthur Klink*





### **3. MODELOS DE AVALIAÇÃO MORFOLÓGICA DO IMPACTO DO ESPORÃO**

Os modelos morfodinâmicos de zonas costeiras são usados para prever alterações batimétricas, a curto prazo (horas a dias) e a médio prazo (semanas a meses), associadas a características costeiras, tais como esporões, quebramares e canais (Nicholson *et al.*, 1997).

À medida que as ondas se propagam, as características das mesmas vão sofrendo alterações, assumindo comportamentos diferentes ao largo e junto à costa. Associadas a estas, geram-se correntes de deriva litoral que por sua vez originam o transporte sedimentar ao longo da costa. A ação das ondas incidentes movimenta a areia ao longo da praia, na direção da onda. Quando há retorno ou refluxo, a água e os sedimentos são arrastados na direção de maior inclinação, perpendicular à praia. Este processo é no entanto difícil de traduzir em volume de areia transportada (Coelho, 2005).

A modelação matemática e numérica sobre a resposta morfológica à influência destas estruturas permite estudar e caracterizar o comportamento dinâmico nas imediações dos esporões, tendo em conta a agitação local predominante e o transporte sedimentar associado.

No entanto, White (1998), refere que nos modelos físicos de transporte sedimentar, é difícil evitar a violação de leis de escala. Os modelos numéricos que não tenham sido calibrados com dados de campo para um determinado local, diferem nos resultados entre si e em medições no protótipo por ordem de magnitude (Schoonees e Theron, 1995; White, 1996).

O tratamento teórico do problema baseia-se no princípio de conservação da massa, relacionando as alterações da profundidade no talude da praia ao longo do tempo com os gradientes espaciais de descarga de sedimentos. De acordo com determinados pressupostos relativos às propriedades do fluxo de sedimentos, a equação do balanço de massa pode ser transformada em equação da difusão, onde a incógnita é a posição da linha de costa (Leont'yev, 1997).

Leont'yev (1997) refere que assumindo que o gradiente do fluxo sedimentar paralelo à costa deve-se apenas às alterações do ângulo de incidência das ondas ao longo da costa, Pelnard-Considère (1956) derivou uma solução analítica do problema (modelo linear). No entanto, esta abordagem tem sido desenvolvida por Bakker (1968), Le Mehaute e Soldate

(1980), Perlin e Dean (1985). Nestes estudos, o transporte sedimentar transversal também é considerado e, além disso, a evolução de algumas alterações de fundo são calculadas (modelos bi e multi-lineares). As alterações da linha de costa causadas por campos de esporões foram simuladas numericamente por Hanson (1989) e Kraus *et al.* (1994). Os modelos lineares são os mais utilizados para este tipo de estudos porque são menos dispendiosos a ser executados. O seu pressuposto fundamental é que o perfil de praia não se altera ao longo do tempo e pode ser sempre descrito em termos de perfil de equilíbrio, implicando um aumento constante da profundidade com a distância a partir da costa (Hanson, 1989). Desta forma, os modelos deste tipo operam com batimetrias imaginárias.

No entanto, qualquer estrutura absorve uma determinada fração do total de sedimentos transportados longitudinalmente. A dificuldade do problema está em determinar a quantidade de sedimentos em transporte nas imediações da estrutura, onde a reflexão e a difração das ondas têm de ser consideradas. Os cálculos da ondulação nesta zona, são possíveis de realizar apenas com um tratamento consideravelmente simplificado dos fenómenos acima referidos (Leont'yev, 1997).

Kumar *et al.* (2003) referem que a corrente longitudinal gerada pela ondulação oblíqua incidente desempenha um papel importante no transporte sedimentar na zona de rebentação e que a taxa de transporte sedimentar longitudinal é, geralmente, calculada através de equações semiempíricas, as quais se baseiam maioritariamente em dados laboratoriais (SPM, 1984).

Uma das formas mais antigas, porém um dos métodos de mais sucesso na determinação potencial de transporte sedimentar longitudinal, é a fórmula CERC (equação 1). Esta assume que a rebentação das ondas se dá em águas pouco profundas, relacionando de forma empírica o potencial de transporte e o fluxo de energia da onda na rebentação (Coelho, 2005).

Esta equação permite calcular o volume do transporte sólido longitudinal, que atravessa uma determinada secção transversal à costa, num determinado período de tempo.

$$Q = K \left[ \frac{\rho \sqrt{g}}{(\rho_s - \rho)(1 - n)16k_b^{\frac{1}{2}}} \right] H^{\frac{5}{2}} \text{sen}(2\alpha_b) \quad (1)$$

Outra equação que é importante referir, é a equação de Kamphuis (Coelho, 2005) que, além dos fatores da equação 1, considera ainda a inclinação de fundo e a granulometria dos sedimentos, e é dada por:

$$Q = 7.3H^4 T_p^{1.5} m^{0.75} d_{50}^{-0.25} \text{sen}^{0.6}(2\alpha_b) \quad (2)$$

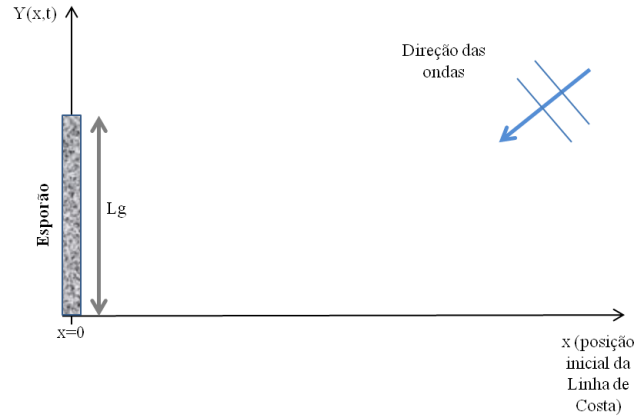
Em que  $m$  corresponde à inclinação do fundo e  $d_{50}$  à dimensão mediana dos sedimentos.

### 3.1. Formulação numérica: Pelnard-Considère

Avdeev *et al.* (2009) referem que Pelnard-Considère, terá proposto pela primeira vez, em 1956, um modelo de difusão linear para descrever o tempo de evolução da posição da linha de costa. Pelnard-Considère assume que o perfil da linha de costa permanece sempre em equilíbrio, pelo que basta apenas considerar uma linha de costa. Despreza as correntes, assume que a direção das ondas é constante, com um ângulo de incidência pequeno e uma relação linear entre o ângulo de incidência das ondas e a deriva litoral, apresentando, assim, uma solução analítica para a evolução simplificada da linha de costa, a barlar de um esporão impermeável ao transporte longitudinal de sedimentos, sob influência de um regime de agitação constante (CPM, 2002).

O perfil de praia assumido nesta formulação é um perfil retilíneo, sujeito a transporte longitudinal resultante da ondulação, com um esporão impermeável numa das extremidades (Figura 12).

De acordo com Rosati *et al.* (2002), as experiências laboratoriais de Pelnard-Considère verificaram ainda outras duas situações: a evolução da costa no caso de existir transposição de areias para sotamar do esporão e a evolução da costa no caso de alimentação instantânea de areias na praia.



**Figura 12:** Esquema ilustrativo da formulação de Pelnard-Considère

De acordo com o modelo de Pelnard-Considère, pode-se obter a posição da linha de costa, antes do enchimento do esporão a partir da seguinte equação:

$$Y = 2\sqrt{\varepsilon t} \tan \alpha_b \left[ \frac{1}{\sqrt{x}} e^{\left[-\left(\frac{x}{2\sqrt{\varepsilon t}}\right)^2\right]} - \frac{x}{2\sqrt{\varepsilon t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\varepsilon t}}\right) \right] \quad \text{para } t < t_f \quad (3)$$

Em que  $\alpha_b$  é o ângulo formado pela linha de rebentação das ondas e a linha de costa e  $t_f$  corresponde ao tempo de enchimento do esporão, dado por:

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

Em relação ao parâmetro  $\varepsilon$ , este é dado por:

$$\varepsilon = \frac{kH^2 C_{gb}}{8} \left( \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \right) \left( \frac{1}{1-n} \right) \left( \frac{1}{B + h_c} \right) \quad (5)$$

Em que:

- $k$  = coeficiente adimensional de proporcionalidade entre a razão do potencial de transporte sedimentar longitudinal e a razão de transporte de peso imerso;

- $n$  = porosidade dos sedimentos;
- $H$  = altura das ondas na rebentação;
- $B$  = altura da berma acima do nível médio da água do mar;
- $h_c$  = profundidade ativa do perfil transversal ativo;
- $C_{gb}$  = velocidade do grupo de ondas na linha de rebentação, a qual pode ser obtida a partir a seguinte equação:

$$C_{gb} = \sqrt{gB} = \left(g \frac{H}{k_b}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

E  $erf()$  é a função erro dada por:

$$erf(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} \quad (7)$$

Após o enchimento do esporão, a posição da linha de costa é determinada a partir de:

$$y = Yerfc\left(\frac{x}{2\sqrt{et_2}}\right) \quad \text{para } t > t_f \quad (8)$$

Em que:

$$t_2 = t - 0.38t_f \quad (9)$$

E  $erfc()$  é a função complementar da função erro definida como:

$$erfc(z) = 1 - erf(z) \quad (10)$$

### 3.2. Modelo numérico: LTC

LTC (*Long-Term Configuration*), é um programa elaborado para tentar prever o comportamento da configuração da linha de costa e da morfologia da zona costeira ao longo do tempo (larga escala), por análise de uma série de conceitos associados ao

transporte de sedimentos, mas que ainda corresponde a um grau de incerteza muito elevado (Coelho, 2005).

O programa está elaborado para praias arenosas (sedimentos não coesivos). Considerando que o transporte sedimentar longitudinal, condicionado pelas ondas, níveis de água, natureza dos sedimentos e sua fonte, juntamente com as condições de fronteira nos extremos da grelha modelada são as principais causas das alterações na zona costeira. O programa possibilita a projeção de cenários de evolução da linha de costa, apoiando a escolha de soluções de engenharia mais adequadas em termos técnicos, ambientais e socioeconómicos, para fazer face aos problemas de defesa costeira. Os resultados só podem ser entendidos como indicadores do comportamento de interação entre o mar e o meio terrestre, na fronteira entre estes (Coelho, 2005).

A formulação de base consiste no balanço de volumes, considerando a equação de continuidade dos volumes de areia envolvidos no processo. Admite que a variação de volume de areia, ao longo de um comprimento infinitesimal da linha de costa é igual à variação de caudal sólido em transporte nesse comprimento, adicionada ou subtraída de eventuais caudais sólidos exteriores (fontes aluvionares, alimentações artificiais, dragagens, extrações de areias, etc.) distribuídos por esse comprimento infinitesimal, num instante  $dt$ , ou seja (Coelho, 2005):

$$\frac{\partial V}{\partial y} = \left( \frac{\partial Q}{\partial y} + q_{ext} \right) dt \quad (11)$$

Para a análise ao longo da linha de costa para trechos de comprimento  $\Delta y$ , o tempo é discretizado em intervalos de tempo  $\Delta t$ , permitindo relacionar a variação no tempo dos caudais sólidos em transporte (Coelho, 2005):

$$\Delta V = (Q_i - Q_{i-1} + Q_{ext})\Delta t = (\Delta Q + Q_{ext})\Delta t \quad (12)$$

Considera que  $Q_{ext} = q_{ext}\Delta y$  e que a variação de volume de areia  $\Delta V$  no comprimento  $\Delta y$  é distribuída uniformemente em toda a largura activa do perfil transversal, representando uma variação de cota dos pontos do perfil igual a  $\Delta z$ . Desta forma, o cálculo da alteração no perfil transversal representativo do trecho  $\Delta y$ , por variação do volume de areia  $\Delta V$ , é dado por (Coelho, 2005):

$$\Delta z = \frac{\Delta V}{(\text{largura ativa})\Delta y} \quad (13)$$

A variação do caudal sólido em transporte no comprimento  $\Delta y$  resulta da diferença entre os volumes que entram ( $Q_i$ ) e que saem ( $Q_{i-1}$ ) do trecho de comprimento  $\Delta y$  em cada intervalo de tempo  $\Delta t$ . No entanto, é importante referir que os volumes sólidos em transporte no intervalo  $\Delta t$  dependem essencialmente das características da onda na rebentação (altura e orientação) sendo calculados para cada comprimento de linha de costa  $\Delta y$ , de acordo com o critério definido pelo utilizador (Coelho, 2005).

Este modelo considera o ajuste do perfil ativo com as zonas adjacentes, pelo que a variação da posição da linha de costa depende de  $\Delta z$  e da batimetria e topografia associada a cada perfil transversal (Coelho, 2005). Em situação de acreção, quando o talude de cálculo tem uma inclinação superior ao ângulo de atrito que caracteriza as areias, é considerado o deslizamento das areias para zonas mais profundas. Na zona emersa, a acumulação de sedimentos prolonga a praia na horizontal, ou com um declive definido pelo utilizador. Em situações de erosão, para evitar a escavação continuada na zona da largura ativa, o volume que aprofundaria o perfil é, na prática, subtraído da zona mais alta do mesmo. Nesta zona, caso existam taludes de cálculo com inclinação superior ao ângulo de atrito das areias, dá-se também o deslizamento, com conseqüente correção das formas do perfil. Em qualquer das situações citadas, na correção da forma do perfil, é mantida a variação de volume, pelo que se respeita sempre a equação de continuidade dos volumes. Estes processos de correção da forma dos perfis transversais estão ainda pouco estudados e devem ser continuamente verificados. Note-se que o intervalo de tempo  $\Delta t$  a considerar para cada iteração do cálculo não deve ser muito grande para que não resultem variações de volume elevadas que possam introduzir instabilidade numérica no cálculo (Coelho, 2005).





*Capítulo 4*

**APLICAÇÃO DOS MODELOS:  
PELNARD-CONSIDÈRE E LTC**

*"Isso, Isso!"*

*Antônio M. Medeiros*



#### 4. APLICAÇÃO DOS MODELOS: PELNARD-CONSIDÈRE E LTC

Como já foi referido o presente trabalho pretende contribuir para o conhecimento e compreensão da evolução da linha de costa nas imediações de um esporão.

Oliveira (2005) citando Crowell *et al.* (1991) refere que a linha de costa é uma linha móvel, cuja posição é variável a todas as escalas, quer sejam espaciais ou temporais. Os critérios que definem a linha de costa devem ser por isso rigorosos, de forma a tornar comparáveis os resultados obtidos.

Neste capítulo apresenta-se o caso de estudo criado, critérios e parâmetros definidos para a elaboração do presente trabalho.

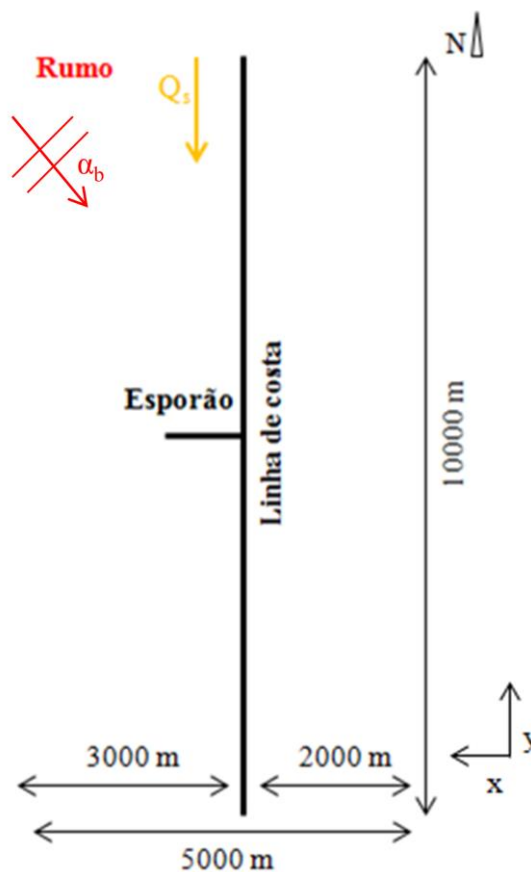
##### 4.1. Caso de estudo

Segundo Costa (1997), a formulação de Pelnard-Considère permite uma solução analítica para o problema, tendo como base a equação da difusão em uma dimensão, obtida através da equação da continuidade aplicada aos sedimentos na zona de rebentação. É um modelo unidimensional e para obter uma solução analítica o autor colocou as seguintes hipóteses:

- O processo dominante na movimentação de sedimentos é o transporte longitudinal;
- O transporte longitudinal é considerado proporcional ao ângulo que a onda, na rebentação, faz com a linha de costa ( $\alpha_b$ );
- O ângulo de incidência da onda na rebentação é considerado pequeno;
- O transporte longitudinal ocorre ao longo do perfil transversal até uma profundidade limite, denominada profundidade de fecho e a partir dessa posição a batimetria é fixa.
- O perfil da praia é assumido sempre em equilíbrio dinâmico e evolui sempre paralelamente à posição anterior;
- Considera-se que há disponibilidade de material compatível com a capacidade de transporte do escoamento;
- No domínio do problema não existem fontes ou sumidouros.

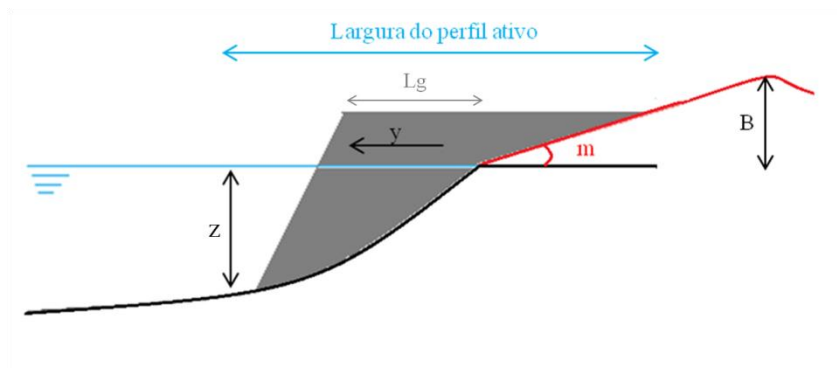
Considerando estas hipóteses propostas, para a formulação de Pelnard-Considère, definiu-se que o domínio da praia teria 5000 metros de extensão e como condição fronteira, a introdução de um esporão cujo comprimento iria variar entre os 100 e os 300 metros.

Para o modelo LTC, foi necessário criar um perfil de praia completo porque no caso deste modelo é necessário introduzir uma malha de pontos com definição da batimetria e topografia do terreno. De forma a ser compatível com a praia retilínea considerada na formulação de Pelnard-Considère, foi criada uma praia hipotética cuja extensão total corresponde a 10000 metros (eixo  $xx$ ) e 5000 metros de perfil transversal, dos quais 3000 metros correspondem a zona submersa e 2000 metros correspondem à parte terrestre (Figura 13). Nesta mesma praia, colocou-se um esporão perpendicular à linha de costa a meio da extensão longitudinal do domínio.



**Figura 13:** Esquema do caso de estudo

Para proceder à simulação numérica do comportamento do esporão foi criada uma malha de pontos com coordenadas (x, y, z) com espaçamento entre pontos, em ambas as direções, de 50 metros e respectivas profundidades as quais foram determinadas a partir das seguintes equações e baseadas do esquema da Figura 14.



**Figura 14:** Esquema do perfil transversal do caso de estudo

$$\text{Terra: } z = m_p y \quad (m) \quad (14)$$

$$\text{Mar: } z = Ay^m \quad (m) \quad (15)$$

Na expressão 14,  $m_p$  referente ao declive da praia. Na expressão 15,  $z$  é a profundidade à distância  $y$  da linha costeira,  $A$  é um coeficiente dimensional e  $m$  é um parâmetro que pode tomar diversos valores dependendo do tipo de praia de dissipação energética da praia em análise (Bruun, 1954).

Para este caso de estudo assumiram-se os seguintes valores na aplicação das equações 14 e 15 (Tabela 2):

**Tabela 2:** Valor adotados para definição do terreno da área de estudo

<i>Terra</i>		
$m_p$	3%	$z = 0.03y \quad (m)$
<i>Mar</i>		
$A$	0.127	$z = 0.127y^{\frac{2}{3}} \quad (m)$
$m$	2/3	

Analisando os valores utilizados para a criação da malha, para o caso da zona acima do NMM, a qual foi denominada na Tabela 2 e na Figura 14 como *Terra*, foi utilizada uma inclinação de 3% (Coelho *et al.*, 2013). Relativamente ao valor de  $A$ , é um parâmetro diretamente ligado à dimensão dos sedimentos, podendo ser calculado da seguinte forma (Mendes e Pinto, 2008):

$$A = 2.25 \times \sqrt[3]{\left(\frac{w_s^2}{g}\right)} \quad (16)$$

Em que  $w_s$  é a velocidade de sedimentação da areia.

Para o caso de estudo foi escolhido o valor apresentado na Tabela 2, por ser o valor característico dos sedimentos das praias do noroeste português.

Quanto ao valor  $m=2/3$ , foi o valor proposto por Bruun (1954), o qual foi baseado em numerosas observações efetuadas em praias da Dinamarca e da Califórnia. Desta forma a praia criada para o caso de estudo, ficou classificada como praia intermédia. Porém, existem outros valores propostos, como por exemplo  $m=4/5$  para praias refletivas e  $m=2/5$  para praias dissipativas.

#### **4.2. Agitação Marítima**

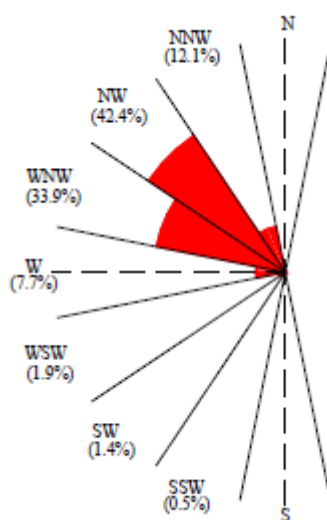
A capacidade de transporte sedimentar depende da agitação marítima local, isto é, a rebentação das ondas ao longo da costa induz uma corrente longitudinal que por sua vez provoca o transporte sedimentar ao longo da mesma. Neste trabalho, são considerados ângulos de incidência da onda (rumos de ondas) e alturas da onda, pelo que foi necessário abordar alguns conceitos e definir que tipo de agitação se iria introduzir no caso de estudo.

Uma onda é uma oscilação periódica da camada superficial do oceano gerada pela transferência de energia cinética transferida da massa de ar (Langa, 2003). De uma forma geral, as ondas definem-se através de três fatores: comprimento (distância entre duas cristas), altura (distância vertical entre a crista e a cava) e período (tempo que medeia a passagem entre duas cristas).

As ondas propagam-se longe da zona onde foram geradas, sendo por isso mais regulares devido a um efeito natural de "filtro" (Coelho, 2005).

A costa oeste portuguesa é caracterizada por um regime de agitação intenso e segundo Carvalho e Barceló (1966), citado em Coelho (2005), as alturas significativas mais frequentes são de 1 a 2 metros, que correspondem a 45% das ocorrências. A frequência de valores superiores a 3 metros corresponde a 15% e 2% para alturas superiores a 6 metros. No que diz respeito ao período significativo da onda, os valores mais frequentes variam entre os 9 e 11 segundos, sendo o valor mínimo observado de 6 segundos e o máximo de 18 segundos.

Relativamente ao ângulo de incidência da onda (rumo), Coelho (2005) citando Carvalho e Barceló (1966) refere que o rumo predominante é NW e de acordo com Veloso-Gomes *et al.* (2006), baseado em dados recolhidos na boia de Leixões, refere que as direções NW, NNW e WNW ocorrem num total de 73% do tempo, o que as caracteriza como regime de ondas representativo.



**Figura 15:** Rosa de rumos com a representação das classes de direção de ondulação (Coelho, 2005)

Coelho (2005) refere que a frequência de ocorrência de rumos do setor NW é aproximadamente 45% e que o conjunto de quadrantes NNW, NW e WNW ultrapassam os 90% de ocorrências. No entanto, nos registos recolhidos entre 1993 e 2003, nos últimos anos foi-se notando uma ligeira rotação de tendência de proveniência de rumos mais para WNW, retirando alguma importância aos rumos de NW e NNW (Figura 15).

De acordo com o que foi referido, as alturas das ondas escolhidas para o caso de estudo foram 1, 3 e 6 metros e rumos de 10°, 20° e 30°.

Quanto à maré, dado que é um parâmetro que não é considerado na formulação de Pelnard-Considère, sendo apenas considerado no modelo LTC, as oscilações resultantes da maré não foram consideradas.

### 4.3. Aplicação dos modelos

Em função da análise apresentada, foram admitidos vários cenários de agitação e de comprimentos de esporão, de acordo com a conjugação dos valores apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3:** Valores de agitação (altura e rumo) e de comprimento do esporão assumidos na simulação

Altura da onda	Rumo	Comprimento do esporão
H=1m	$\alpha_b=10^\circ$	$L_g=100\text{m}$
H=3m	$\alpha_b=20^\circ$	$L_g=200\text{m}$
H=6m	$\alpha_b=30^\circ$	$L_g=300\text{m}$

O objetivo foi variar todos estes parâmetros alternadamente e ver a resposta que os dois modelos, Pelnard-Considère e LTC, teriam a cada uma das combinações efetuadas. Numa primeira fase é apresentada uma análise individual a cada modelo e, posteriormente, uma comparação dos resultados comuns obtidos, nomeadamente a posição da linha de costa ao fim de dez anos.

Para a formulação de Pelnard-Considère recorreu-se ao *software MATLAB*, criando rotinas para as análises que iriam ser efetuadas. Tal como foi referido na alínea 3.1 do capítulo 3, esta formulação trabalha com o parâmetro tempo de enchimento do esporão,  $t_f$ . Como tal, realizou-me um programa simples com as equações 4, 5 e 6, para analisar o comportamento deste parâmetro, consoante a variação de altura da onda, ângulo de incidência da onda e comprimento do esporão. Relativamente à equação 6, que permitiu calcular a velocidade do grupo de ondas foi utilizada a igualdade:  $C_{gb} = \sqrt{gB}$



Após esta análise, foi determinado o valor de  $x$  para quando  $y$  fosse 5% do comprimento do esporão. Neste caso, fez-se uma adaptação da rotina criada para o cálculo dos tempos de enchimento do esporão. Determinados todos estes parâmetros, criou-se a rotina que efetivamente simulou a evolução da posição da linha de costa ao longo de dez anos, com saída de resultados de dois em dois anos.

Relativamente ao modelo LTC, foram introduzidos a malha de pontos da grelha a modelar e todos os dados anteriormente referidos. A formulação de Pelnard-Considère, estuda o impacto apenas a barlamar da estrutura, o que levou a que para os resultados obtidos a partir do LTC, também só se procedesse à representação apenas dessa zona de impacto, ou seja, excluíram-se os resultados o impacto da estrutura a sotamar.

Na Tabela 4 apresentam-se os valores adotados para os diferentes parâmetros intervenientes no cálculo.

**Tabela 4:** Valores assumidos nos parâmetros para aplicação de Pelnard-Considère e do modelo LTC

PC		LTC	
$K$	0.77	$K$	0.39
$h_c (m)$	12	$d_{50} (mm)$	0.3
$\rho (kgm^{-3})$	1027	$\rho (kgm^{-3})$	1027
$\rho_s (kgm^{-3})$	2650	$\rho_s (kgm^{-3})$	2650
$N$	0.4	$n$	0.4
$B(m)$	4	$v (ms^{-1})$	$1.36 \times 10^{-6}$
$k_b$	0.78	$k_b$	0.78



*Capítulo 5*

**ANÁLISE DE RESULTADOS**

*"No mar não há primavera nem outono.  
No mar o tempo não morre."*

*Sophia de Mello BreynerAndersen*



## **5. ANÁLISE DE RESULTADOS**

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos e respectiva análise. Tal como já foi referido, para a elaboração deste trabalho foi criado um caso de estudo com uma praia com batimetria e topografia regular, cuja linha de costa representa uma reta alinhada com o Norte. A meio da extensão desta praia foi colocado um esporão, cujo comprimento variou consoante o cenário admitido, entre os 100 e os 300 metros. Os forçamentos externos que contribuem para a alteração do perfil da praia foram baseados em dados reais, bem como os dados relativos à caracterização do tipo de sedimentos da praia.

### **5.1. Formulação de Pelnard-Considère**

Procedeu-se a uma análise do tempo de enchimento e posterior evolução da linha de costa ao longo de dez anos, com saídas de resultados de dois em dois anos.

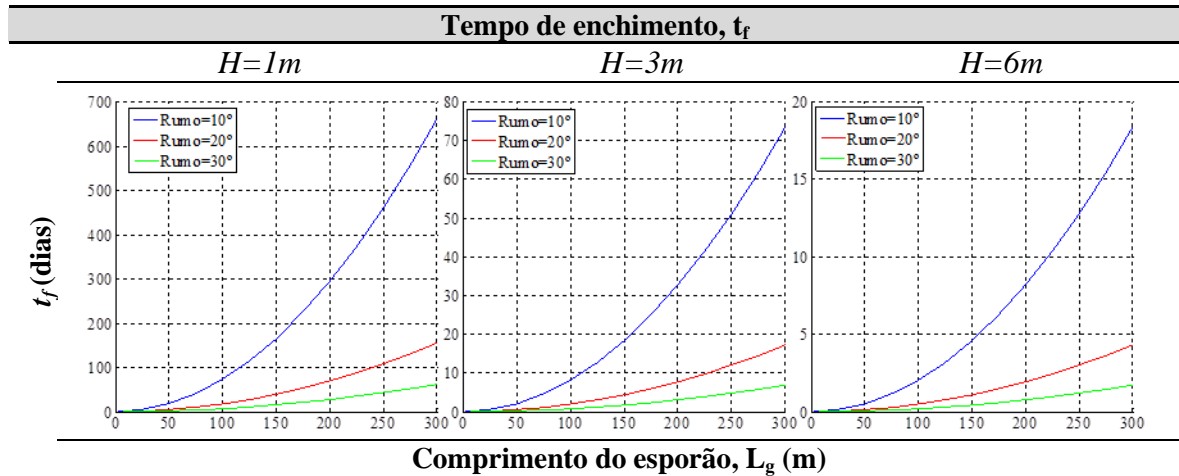
#### **5.1.1. Tempo de enchimento do esporão**

O tempo de enchimento do esporão, como referido, é o tempo que decorre até haver acumulação de sedimentos nas imediações da cabeça do esporão. Tal como referido no capítulo 3.1, de acordo com a formulação de Pelnard-Considère a posição da linha de costa varia consoante o tempo considerado após a construção do esporão e difere para o caso deste ser maior ou menor que o tempo de enchimento.

Pelos motivos anteriormente referidos e por ser um parâmetro que depende da altura da onda,  $H$ , do ângulo de incidência da onda,  $\alpha_b$ , e do comprimento do esporão,  $L_g$ , foram calculados os tempos de enchimento para os vários cenários de estudo. Para uma melhor compreensão do comportamento do tempo de enchimento e influência dos parâmetros intervenientes no cálculo, foram avaliados cenários de esporões com um comprimento máximo de 300 metros, variando de 25 em 25 metros.

Analisando a Figura 16, pode-se constatar que, para as três alturas de onda analisadas, quanto maior o comprimento do esporão, maior será o tempo de enchimento, variando significativamente a ordem de grandeza do tempo necessário para o enchimento. Relativamente ao ângulo de incidência da onda, constatou-se que quanto menor for, maior será o tempo necessário para o enchimento. De uma forma geral, independentemente da

altura da onda considerada também se pode constatar uma diminuição acentuada do tempo de enchimento quando o ângulo da onda incidente é alterado de 10° para 20°. No entanto ao alterar o ângulo de 20° para 30°, apesar de se verificar o mesmo comportamento, apresenta uma diminuição mais ligeira.



**Figura 16:** Tempos de enchimento em função do comprimento do esporão

**Tabela 5:** Tempo de enchimento (em dias) para H=1m, H=3m, H=6m e  $\alpha_b=10^\circ$ ,  $\alpha_b=20^\circ$ ,  $\alpha_b=30^\circ$ , para esporões com comprimento até 300m

		$\alpha_b=10^\circ$			$\alpha_b=20^\circ$			$\alpha_b=30^\circ$		
$H (m)$		1	3	6	1	3	6	1	3	6
$L_g (m)$	25	4.60	0.51	0.13	1.08	0.12	0.03	0.43	0.05	0.01
	50	18.40	2.04	0.51	4.32	0.48	0.12	1.72	0.19	0.05
	75	41.40	4.60	1.15	9.72	1.08	0.27	3.86	0.43	0.11
	<b>100</b>	<b>73.61</b>	<b>8.18</b>	<b>2.04</b>	<b>17.28</b>	<b>1.92</b>	<b>0.48</b>	<b>6.87</b>	<b>0.76</b>	<b>0.19</b>
	125	115.01	12.78	3.19	26.99	3.00	0.75	10.73	1.19	0.30
	150	165.61	18.40	4.60	38.87	4.32	1.08	15.45	1.72	0.43
	175	225.42	25.05	6.26	52.90	5.88	1.47	21.03	2.34	0.58
	<b>200</b>	<b>294.42</b>	<b>32.71</b>	<b>8.18</b>	<b>69.10</b>	<b>7.68</b>	<b>1.92</b>	<b>27.46</b>	<b>3.05</b>	<b>0.76</b>
	225	372.63	41.40	10.35	87.46	9.72	2.43	34.76	3.86	0.97
	250	460.04	51.12	12.78	107.97	12.00	3.00	42.91	4.77	1.19
275	556.65	61.85	15.46	130.64	14.52	3.63	51.92	5.77	1.44	
<b>300</b>	<b>662.46</b>	<b>73.61</b>	<b>18.40</b>	<b>155.48</b>	<b>17.28</b>	<b>4.32</b>	<b>61.79</b>	<b>6.87</b>	<b>1.72</b>	

Na Tabela 5 estão apresentados os valores que foram apresentados graficamente na Figura 16, com o objetivo de realizar uma análise mais aprofundada das relações entre os parâmetros responsáveis pelo cálculo do tempo de enchimento.

A relação entre o tempo de enchimento e o ângulo de incidência das ondas é independente da altura da onda. Fazendo uma análise percentual, relacionando os resultados obtidos foi possível verificar que para uma onda de 1 metro de altura, no caso do comprimento do esporão ser igual a 100 metros, ao rodar o ângulo de incidência de 10° para 20°, existe um decréscimo do tempo de enchimento de cerca de 76.5%, percentagem esta que passa para aproximadamente 90.7%, quando o ângulo é rodado de 10° para 30°. Assim, ao rodar o ângulo de incidência de 20° para 30°, o tempo de enchimento teve um decréscimo de aproximadamente 14.2%. O mesmo tipo de análise foi feita para alturas de onda de 3 e 6 metros e para esporões de 200 e 300 metros, tendo sido possível verificar que, independentemente dos casos, o decréscimo do tempo de enchimento em termos percentuais é sempre igual.

#### - Posição de $x$ para $y=5\%$ de $L_g$

Tentando avaliar a extensão da zona de influência do esporão no instante igual ao tempo de enchimento, procedeu-se ao cálculo da posição  $x$  para quando a posição  $y$  correspondesse a 5% do comprimento do esporão. Para todos os casos estudados, os resultados são apresentados e analisados a partir da Tabela 6.

**Tabela 6:** Posição de  $x$  para  $y=5\%$  de  $L_g$  e respetivos tempos de enchimento,  $t_f$  (dias)

$L_g$ (m)	$x$ (m)	$H=1m$	$H=3m$	$H=6m$	Rumo
	1097	73.61	8.17	2.04	
<b>100</b>	531	17.28	1.91	0.47	$\alpha_b=10^\circ$
	335	6.87	0.76	0.19	
<b>200</b>	2194	294.42	32.71	8.18	$\alpha_b=20^\circ$
	1063	69.1	7.67	1.91	
	670	27.46	3.05	0.76	
<b>300</b>	3291	662.46	73.61	18.4	$\alpha_b=30^\circ$
	1594	155.48	17.27	4.32	
	1005	61.79	6.87	1.72	
$t_f$ (dias)					

De acordo com os resultados apresentados, pôde-se verificar que para um esporão de um determinado comprimento, a posição  $x$  é independente da altura da onda, variando com o ângulo de incidência. A influência da altura da onda faz-se sentir no tempo de enchimento do esporão, que diminui à medida que se aumenta a altura da onda. Também se pôde verificar que para os três comprimentos de esporão, quanto menor for o ângulo de incidência da onda, maior será o valor da posição  $x$ , representando maior extensão de impacto para menores ângulos.

### **5.1.2. Posição da linha de costa**

Tal como já foi referido, Pelnard-Considère assumiu uma praia com perfil retilíneo sujeita ao transporte longitudinal resultante da ondulação, com um esporão impermeável numa das extremidades, permitindo assim estudar a evolução da posição da linha de costa ao longo do tempo, baseada numa solução analítica simplificada.

Nesta alínea apresentam-se os resultados obtidos para a simulação proposta com o objetivo de compreender como poderá evoluir a posição da linha de costa baseada nesta formulação. Nos resultados que se seguem, apresenta-se graficamente o caso de estudo, mostrando a evolução da linha de costa ao longo de dez anos, de dois em dois anos, ou seja, para os instantes  $t=2$  anos,  $t=4$  anos,  $t=6$  anos,  $t=8$  anos e  $t=10$  anos.

#### **5.1.2.1. Esporão com 100 metros**

Ao observar a Figura 17 pode-se verificar, a posição da linha de costa correspondente ao tempo de enchimento recua à medida que o ângulo de incidência ( $\alpha_b$ ) e a altura da onda aumentam ( $H$ ).

Para o primeiro caso apresentado (Figura 17), nomeadamente para uma onda  $H=1\text{m}$ , pode-se verificar que de acordo com esta formulação a posição linha de costa ao longo do tempo, vai evoluindo paralelamente ao perfil anterior.

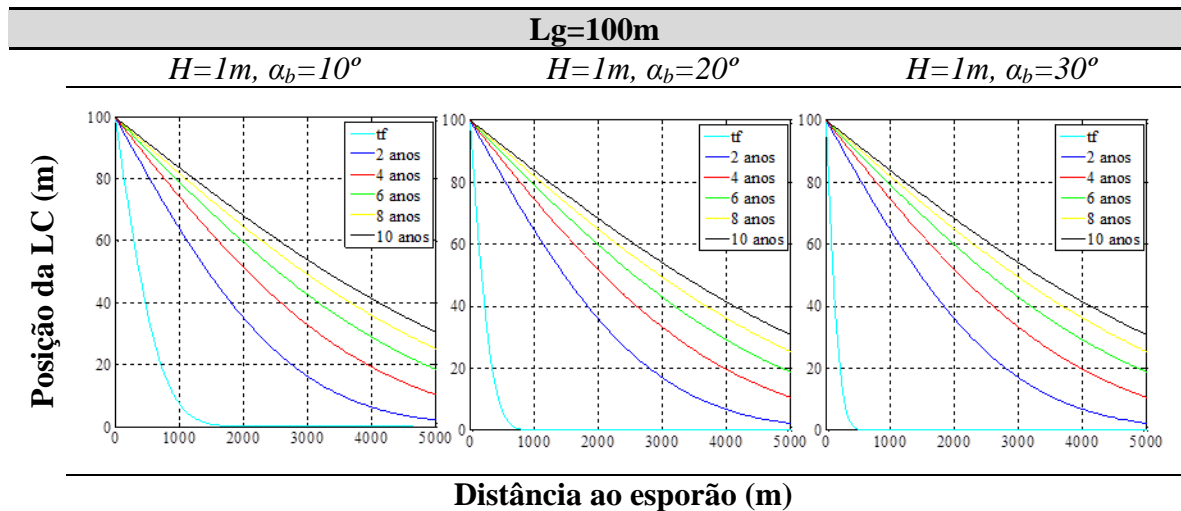
No que diz respeito à altura da onda  $H=3\text{m}$  (Figura 18), verifica-se que ao alterar a altura da onda de 1 metro para 3 metros altera, existe um avanço mais rápido da linha de costa.

As diferenças apontadas para o caso anterior, podem ser verificadas para uma onda de 6 metros de altura (Figura 19). Note-se que à medida que a altura da onda aumenta, a linha de costa vai rodando mais rapidamente, aproximando-se também mais rapidamente do

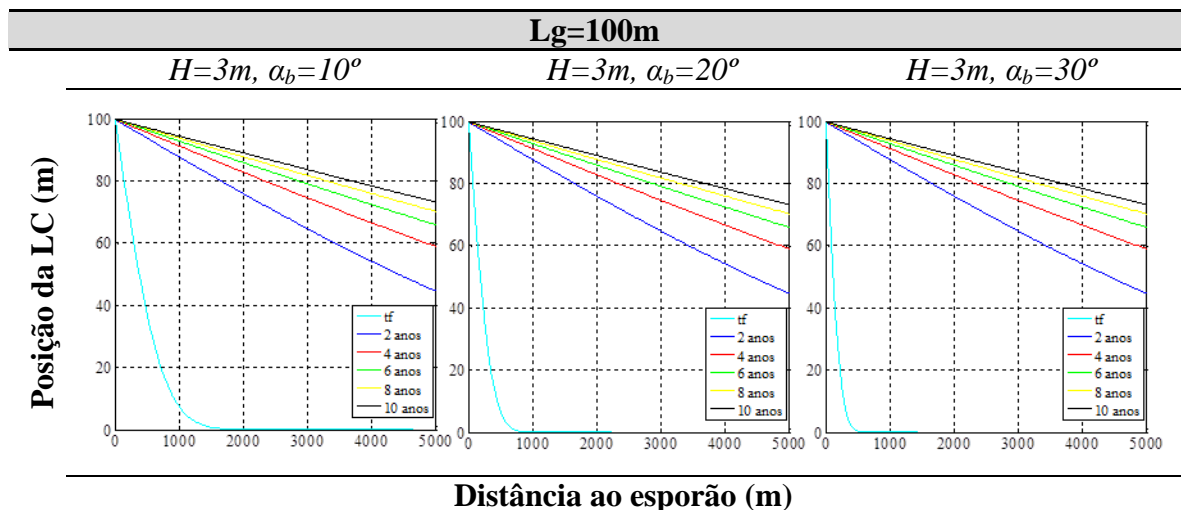


aspecto retilíneo assumido para a posição da linha de costa proposta pelo autor, ou seja, terá tendência para se tornar paralela à posição inicial, mas alinhada pela cabeça do esporão.

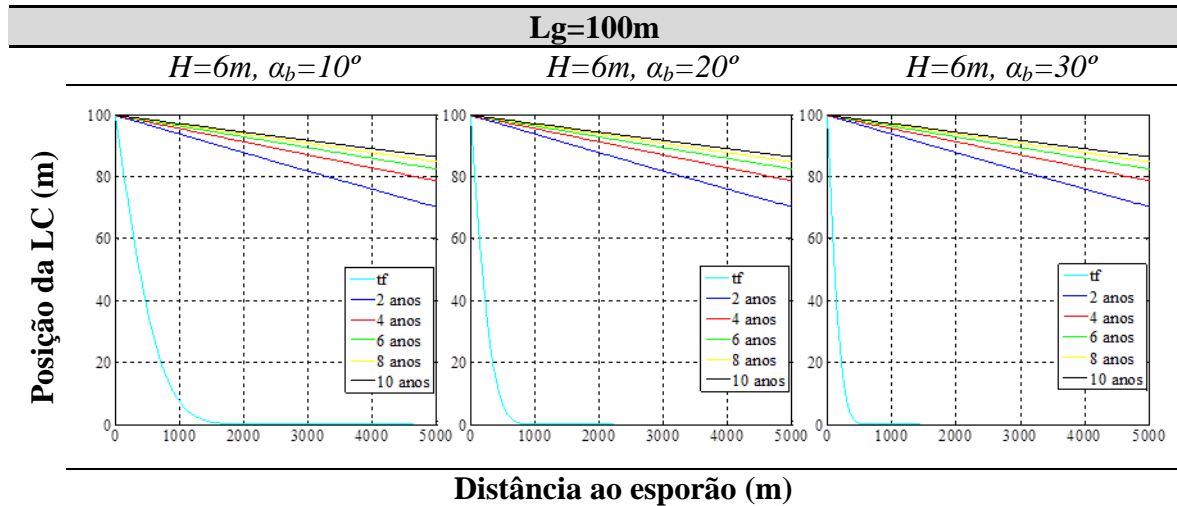
Comparando os três casos, pode-se verificar que existe avanço da linha de costa mais rápido para ondas de 3 e 6 metros, o que mostra que à medida que a ondulação aumenta a capacidade de transporte também aumenta, o que faz com que a linha de costa, a barlar, avance mais rapidamente.



**Figura 17:** Posição da linha de costa para um esporão de 100 metros, para uma onda com 1 metro de altura



**Figura 18:** Posição da linha de costa para um esporão de 100 metros, para uma onda com 3 metros de altura



**Figura 19:** Posição da linha de costa para um esporão de 100 metros, para uma onda com 6 metros de altura

Ao variar o ângulo de incidência da onda, a posição da linha de costa para tempos superiores ao tempo de enchimento, não apresenta nenhuma variação graficamente visível. Para controlo desta posição, foi escolhida a célula a meio domínio,  $x=2500m$ , para verificação dos valores obtidos (Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9) através da formulação, de forma a verificar se de facto existia alguma variação para posição da linha de costa ao alterar o ângulo de incidência da onda.

**Tabela 7:** Resultados para um esporão de 100 metros, para  $x=2500 m$ , para 10 anos

$L_g=100m$	$H_b=1m$			$H_b=3m$			$H_b=6m$		
	$tf$ (dias)	$t_2$ (dias)	$y$ (m)	$Tf$ (dias)	$t_2$ (dias)	$y$ (m)	$tf$ (dias)	$t_2$ (dias)	$y$ (m)
$x=2500m$									
$\alpha_b=10^\circ$	73.6	3622.0	61.609	8.2	3646.9	86.772	2.0	3649.2	93.365
$\alpha_b=20^\circ$	17.3	3643.4	61.713	1.9	3649.3	86.776	0.5	3649.8	93.366
$\alpha_b=30^\circ$	6.9	3647.4	61.732	0.8	3649.7	86.777	0.2	3649.9	93.366

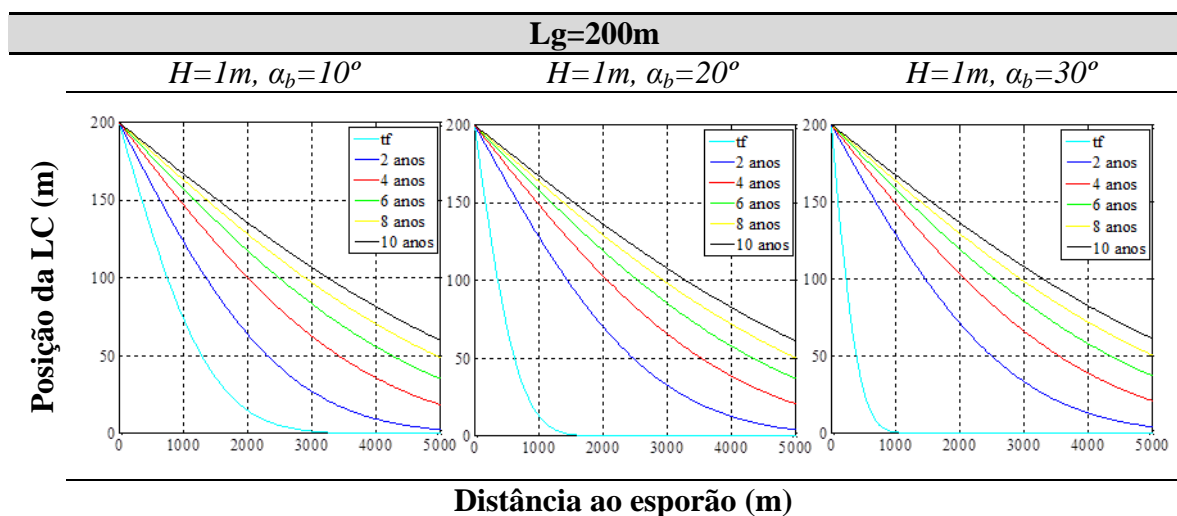
Tal como foi referido, a formulação de Pelnard-Considère assume duas equações distintas, uma para instantes inferiores ao tempo de enchimento (equação 3) e outra para instantes iguais ou superiores ao mesmo (equação 8). Nos estudos apresentados verifica-se que o tempo de enchimento é sempre inferior aos instantes para os quais se está a simular a evolução da linha de costa, o que implica que o para cálculo da posição da linha de costa seja utilizada a equação 8. Nesta equação, o ângulo de incidência da onda não entra diretamente no cálculo, pelo que o ângulo de incidência após o tempo enchimento do

esporão acaba por perder peso no cálculo da posição da linha de costa para todos os instantes superiores ao mesmo, o que faz com que o seu impacto não seja relevante para os resultados.

Ainda analisando a Tabela 7, pode-se verificar que de facto o parâmetro com maior peso é a altura da onda e que, independentemente do ângulo de incidência, à medida que a altura da onda aumenta, a posição da linha de costa avança. Com base nos valores apresentados verifica-se que ao aumentar a altura da onda de 1 para 3 metros (o triplo) a posição da linha de costa avança aproximadamente 25 metros. No entanto, aumentando a altura da onda de 3 metros para o dobro, ou seja para 6 metros, o avanço da linha de costa é aproximadamente 7 metros.

### 5.1.2.2. Esporão com 200 metros

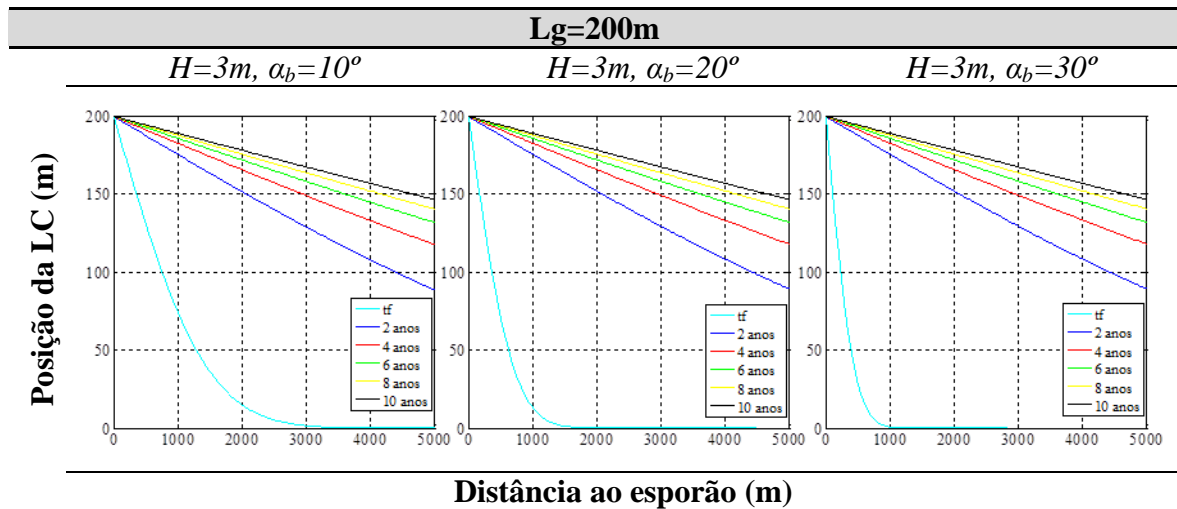
O tempo de enchimento diminui e a posição da linha de costa correspondente recua à medida que o ângulo de incidência aumenta. No entanto, após o tempo de enchimento o comportamento dos resultados obtidos é semelhante (Figura 20).



**Figura 20:** Posição da linha de costa para um esporão de 200 metros, para uma onda com 1 metro de altura

No resultado obtido para a posição da linha de costa ao fim de 2 anos, é possível notar uma diferença ao rodar o ângulo de incidência de  $10^\circ$  para  $20^\circ$ . Recorrendo à Tabela 8 verifica-se que ao fazer esta alteração no ângulo de incidência a posição da linha de costa avança mais 1 metro. Porém, o mesmo não se verifica ao rodar o ângulo de  $20^\circ$  para  $30^\circ$ , sendo que neste caso é uma variação decimal.

No que diz respeito a uma onda com 3 metros de altura, já não se verifica a diferença assinalada na posição de linha de costa ao fim de 2 anos para uma onda de 1 metro. No entanto, pode verificar-se que ao rodar o ângulo de incidência, apesar dos resultados não apresentarem alterações visíveis na posição da linha de costa, à medida que o ângulo aumenta a diferença entre a acumulação de sedimentos para os três casos apresentados também aumenta, o que demonstra que a capacidade de transporte também aumenta.



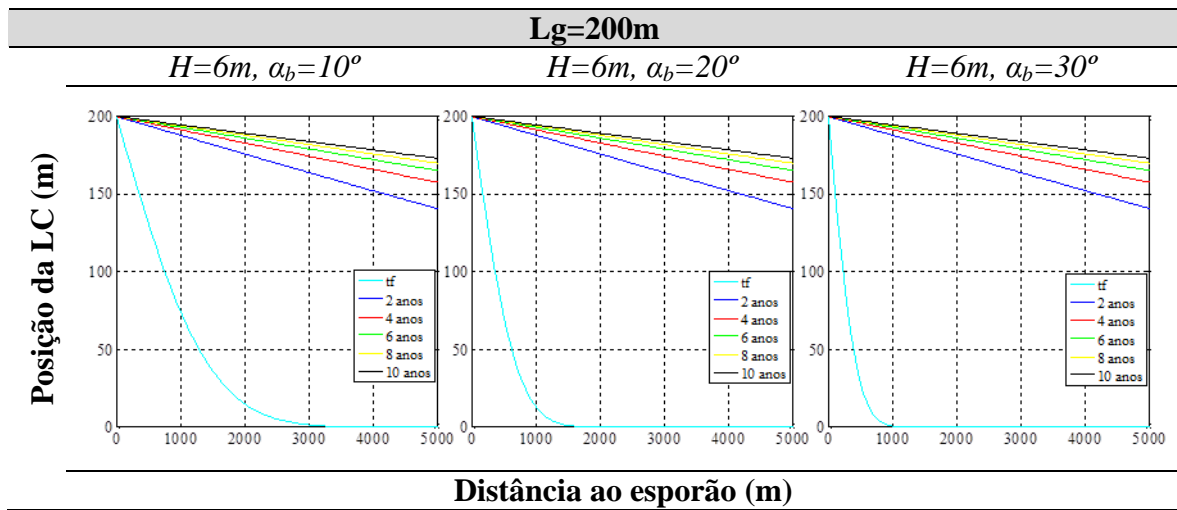
**Figura 21:** Posição da linha de costa para um esporão de 200 metros, para uma onda com 3 metros de altura

Na Figura 22, a situação referida anteriormente mantém-se e os resultados continuam a mostrar que ao aumentar a altura da onda de 3 para 6 metros a posição da linha de costa tende a ficar paralela à posição inicial. Pode também verificar-se que à medida que se vai aumentando a altura da onda, graficamente as linhas vão-se aproximando entre si o que demonstra que está a haver menor acumulação de sedimentos a barlamar do esporão e a linha de costa está mais próxima da posição de equilíbrio.

Na Tabela 8 pode-se verificar que a 2500 metros do esporão, ao aumentar a altura da onda de 1 para 3 metros, a posição da linha de costa avança aproximadamente 51 metros e que aumentando a altura da onda de 3 para 6 metros o avanço da linha de costa é aproximadamente 13 metros.

Comparando os resultados da Tabela 8 com os da Tabela 7, comprova-se que o comprimento do esporão tem influência na posição da linha de costa. É possível verificar que aumentando o esporão de 100 para 200 metros, dará origem a uma maior acumulação

de sedimentos nas imediações do esporão. O que fará com que ao fim de 10 anos, para um esporão de 200 metros a praia tenha mais 90 metros de largura.



**Figura 22:** Posição da linha de costa para um esporão de 200 metros, para uma onda com 6 metros de altura

**Tabela 8:** Resultados para um esporão de 200 metros, para  $x=2500$  m, para 10 anos de simulação

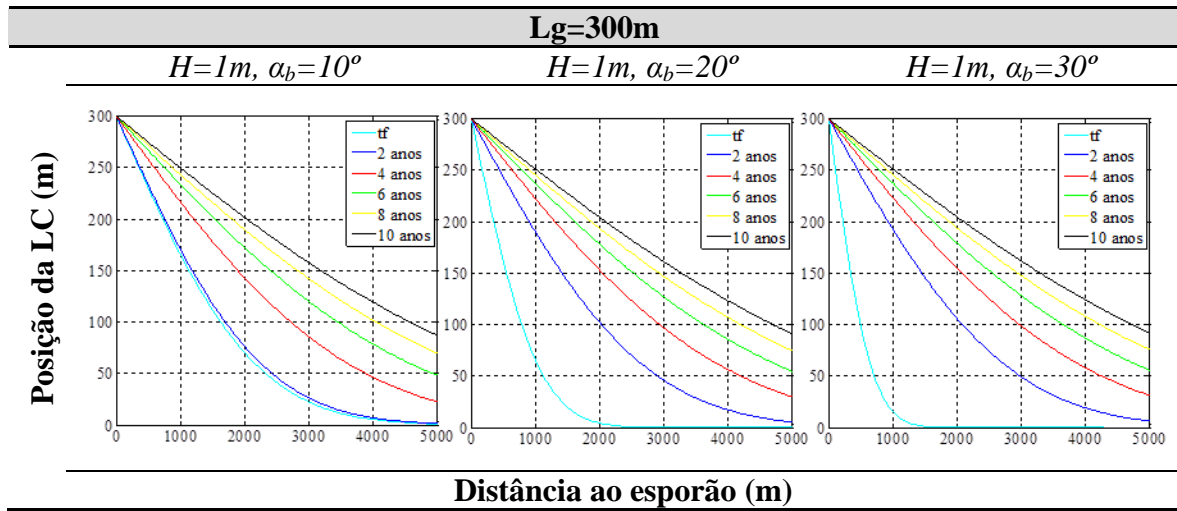
$L_g=200m$	$H_b=1m$			$H_b=3m$			$H_b=6m$		
$x=2500m$	$t_f$ (dias)	$t_2$ (dias)	$y$ (m)	$T_f$ (dias)	$t_2$ (dias)	$y$ (m)	$t_f$ (dias)	$t_2$ (dias)	$y$ (m)
$\alpha_b=10^\circ$	294.4	3538.1	122.388	32.7	3637.6	173.510	8.2	3646.9	186.726
$\alpha_b=20^\circ$	69.1	3623.7	123.235	7.7	3647.1	173.544	1.9	3649.3	186.730
$\alpha_b=30^\circ$	27.5	3639.6	123.389	3.1	3648.8	173.550	0.8	3649.7	186.731

### 5.1.2.3. Esporão com 300 metros

Ao observar a Figura 23, verifica-se que quando o ângulo de incidência da onda é igual a  $10^\circ$ , a posição da linha de costa para o tempo de enchimento do esporão e ao fim de 2 anos estão muito próximas, como também se pode verificar com base da Tabela 5.

Também se verifica que ao rodar o ângulo de  $10^\circ$  para  $20^\circ$ , a posição da linha de costa ao fim de 2 anos é diferente. No entanto ao rodar de  $20^\circ$  para  $30^\circ$ , não são visíveis alterações na posição da linha de costa. Ao consultar a Tabela 9 verifica-se que ao fim de 10 anos, ao

rodar o ângulo de  $10^\circ$  para  $20^\circ$ , haverá um aumento de aproximadamente 3 metros na largura da praia, a 2500 metros do esporão.



**Figura 23:** Posição da linha de costa para um esporão de 300 metros, para uma onda com 1 metro de altura

Tal como nos resultados que foram apresentados anteriormente, na Figura 24 não se verificam diferenças na posição da linha de costa para os maiores tempos de simulação à medida que se vai rodando o ângulo de incidência de agitação. No entanto, continua a verificar-se que à medida que se aumenta o comprimento do esporão, maior será a largura da praia a barlar da estrutura.

No que diz respeito aos resultados relativos a uma onda de 6 metros de altura (Figura 19, Figura 22 e Figura 25), verifica-se que, de facto, para qualquer comprimento de esporão, o comportamento dos resultados é praticamente o mesmo. A posição da linha de costa tende a ficar paralela à posição inicial e a proximidade das linhas obtida mostra que, para a mesma capacidade de transporte, para o mesmo intervalo de tempo, o volume de sedimentos acumulados tende a diminuir e o que poderá indicar que está a haver passagem de sedimentos para sotamar.

Tal como já foi referido, de acordo com Oliveira (1997), os esporões têm uma capacidade limite de acumulação sedimentar que ao esgotar, faz com que o esporão deixe de servir como obstáculo à passagem de caudal sólido. Como tal, de acordo com os autores Pelnard-Considère (1954) e Oliveira (1997), pode-se afirmar que possivelmente o facto de haver menor acumulação sedimentar no mesmo intervalo de tempo, deve-se ao facto de o esporão estar a atingir a sua capacidade limite.

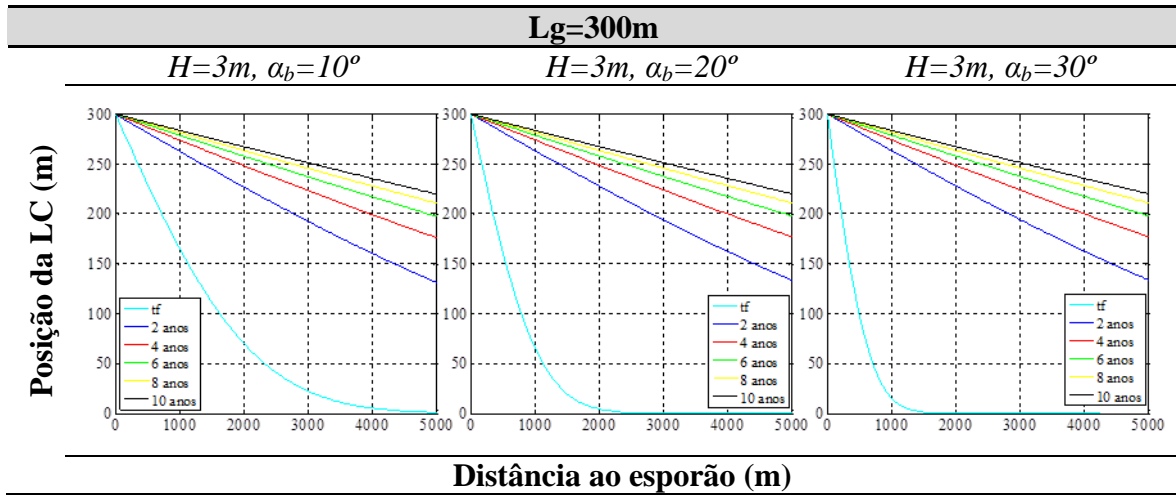


Figura 24: Posição da linha de costa para um esporão de 300 metros, para uma onda com 3 metros de altura

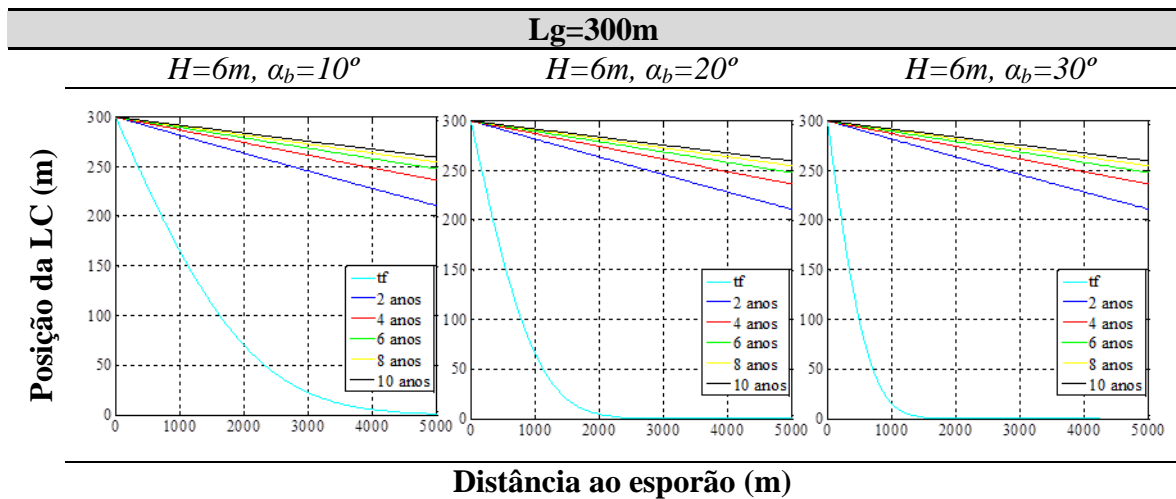


Figura 25: Posição da linha de costa para um esporão de 300 metros, para uma onda com 6 metros de altura

Tabela 9: Resultados para um esporão de 300 metros, para  $x=2500$  m, para 10 anos de simulação

$L_g=300m$	$H_b=1m$			$H_b=3m$			$H_b=6m$		
$x=2500m$	$t_f$ (dias)	$t_2$ (dias)	$y$ (m)	$T_f$ (dias)	$t_2$ (dias)	$y$ (m)	$t_f$ (dias)	$t_2$ (dias)	$y$ (m)
$\alpha_b=10^\circ$	662.5	3398.3	181.413	73.6	3622.0	260.180	18.4	3643.0	280.078
$\alpha_b=20^\circ$	155.5	3590.9	184.371	17.3	3643.4	260.296	4.3	3648.4	280.093
$\alpha_b=30^\circ$	61.8	3626.5	184.894	6.9	3647.4	260.317	1.7	3649.3	280.095

Relativamente à Tabela 9 pode-se verificar que ao aumentar a altura da onda de 1 para 3 metros a posição da linha de costa avança aproximadamente 79 metros. No entanto,

umentando a altura da onda de 3 metros para o dobro, ou seja para 6 metros, o avanço da linha de costa é aproximadamente 20 metros.

## **5.2. Modelo LTC: Posição da Linha de costa**

Nesta alínea deste capítulo apresentam-se os resultados obtidos para a simulação da evolução da posição da linha de costa realizada recorrendo ao modelo LTC. Tal como na situação anterior, procedeu-se a uma análise da evolução da posição da linha de costa ao longo de dez anos, com saídas de resultados de dois em dois anos, tendo sido representados graficamente a posição inicial e os instantes  $t=2$  anos,  $t=4$  anos,  $t=6$  anos,  $t=8$  anos e  $t=10$  anos.

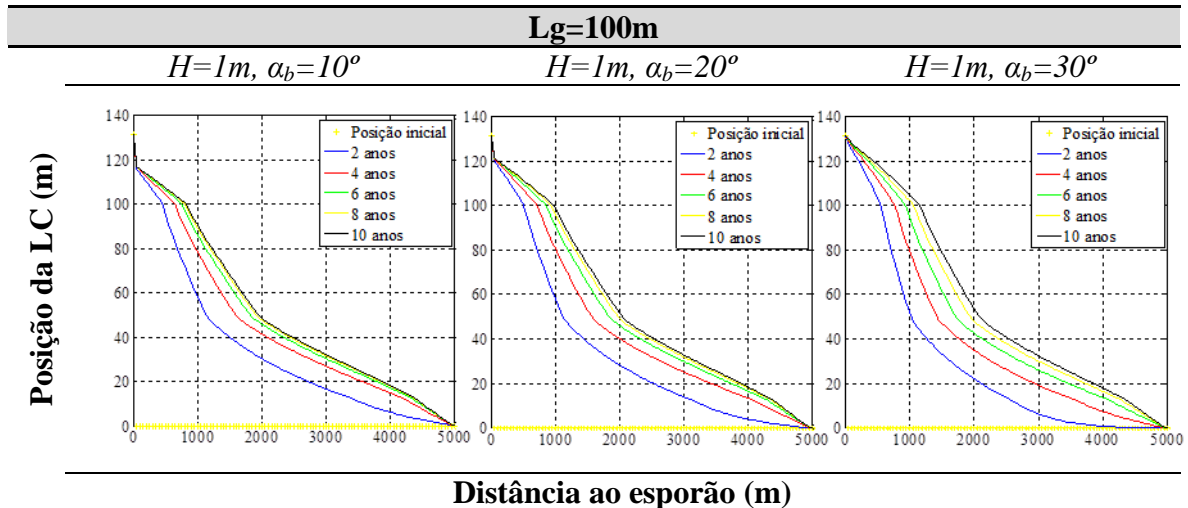
Os resultados apresentados correspondem a comprimentos de esporão de 100, 200 e 300 metros, ângulos de incidência de  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  e  $30^\circ$  e alturas de onda de 1 e 3 metros. Relativamente a ondas de 6 metros, no LTC o transporte sedimentar associado a esta altura de onda é demasiado elevado, criando instabilidades numéricas e não permitindo a obtenção de resultados considerados válidos.

### **5.2.1. Esporão de 100 metros**

Analisando a Figura 26 verifica-se que no caso do LTC, os resultados demonstram que o ângulo de incidência tem influência na evolução da posição da linha de costa.

Ainda na Figura 26 pode-se verificar que nos dois primeiros anos, para o ângulo de incidência de  $10^\circ$ , a linha de costa avança mais rapidamente que para os ângulos de  $20^\circ$  e  $30^\circ$ . Comparando as linhas referentes aos quatro anos, ainda se nota a diferença referida. Para  $t=6$  anos, quando  $x=2000$  metros, verifica-se que para os ângulos de  $10^\circ$  e  $20^\circ$ , as posições estão praticamente iguais, ao contrário do que acontece para o ângulo de incidência igual a  $30^\circ$ . É a partir dos seis anos que se começa a notar que para um ângulo de  $10^\circ$  a acumulação de sedimentos começa a diminuir, comparativamente aos outros ângulos de incidência, atrasando a evolução da posição da linha de costa. Pode, também, verificar-se uma maior tendência para o perfil de equilíbrio para o ângulo de incidência de  $10^\circ$ . Para uma onda de 1 metro verifica-se que existe uma evolução progressiva à medida que se vai rodando o ângulo de incidência.

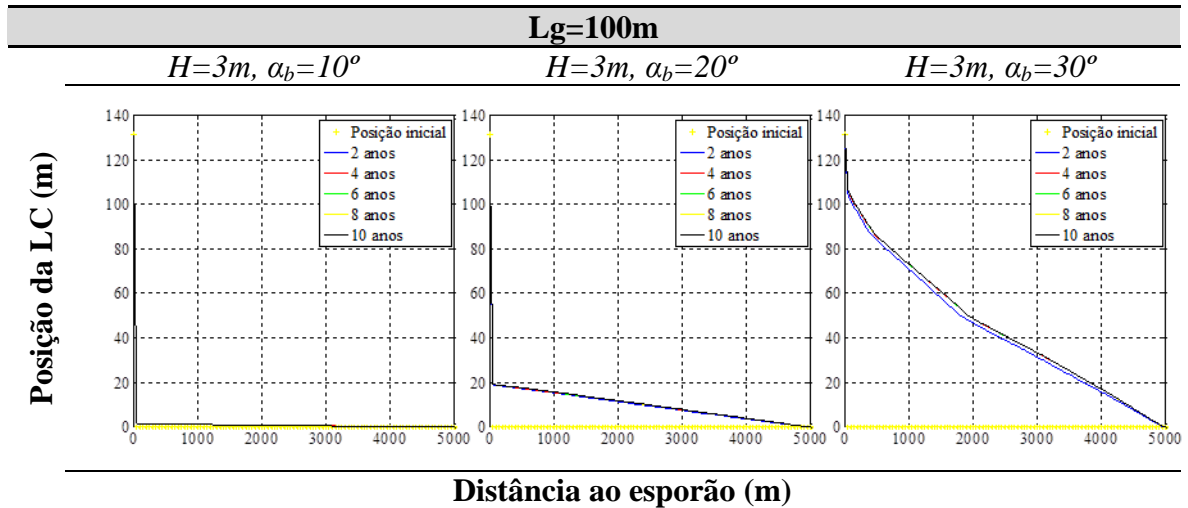




**Figura 26:** Posição da linha de costa para um esporão de 100 metros, para uma onda com 1 metro de altura (LTC)

À medida que uma onda se aproxima da costa, a velocidade de fase diminui, passando a sentir o fundo, a onda é refratada porque a velocidade de fase depende de  $\sqrt{h}$  e a frente de onda tenderá a ficar paralela às batimétricas. Outra característica importante referir é que o rumo registado ao largo, vai-se alterando à medida que se aproxima da costa. Os resultados obtidos podem estar relacionados com o facto com 1 metro de altura, entrar em contacto com o fundo muito perto da costa e ao refratar apenas perto da zona de rebentação, a altura poderá aumentar. Relativamente ao ângulo de incidência, independentemente do que foi registado na origem, a onda ao refratar tão perto da costa chega com praticamente o mesmo ângulo na origem e prolongando o fenómeno de refração por uma maior extensão.

Relativamente à Figura 27, verifica-se que a alteração da altura da onda para 3 metros tem impacto na evolução da posição da linha de costa. No caso do ângulo de incidência igual a  $10^\circ$ , o perfil ao fim de 10 anos mantém-se praticamente igual à posição inicial, notando-se uma pequena acumulação entre os 1000 e 3000 metros de extensão. O ângulo ao ser rodado para  $30^\circ$  verifica-se que existe um aumento de acumulação de sedimentos, indicando um aumento de capacidade de transporte. No último caso apresentado na Figura 27 pode verificar-se que houve um avanço notável da posição da linha de costa, o que indica novamente um aumento de capacidade de transporte. Nos três casos, de uma forma geral, verifica-se que as linhas referentes a cada ano representado estão sobrepostas, ou praticamente sobrepostas, indicando que foi atingida a posição de equilíbrio e que a linha de costa tenderá a não avançar mais.



**Figura 27:** Posição da linha de costa para um esporão de 100 metros, para uma onda com 3 metros de altura (LTC)

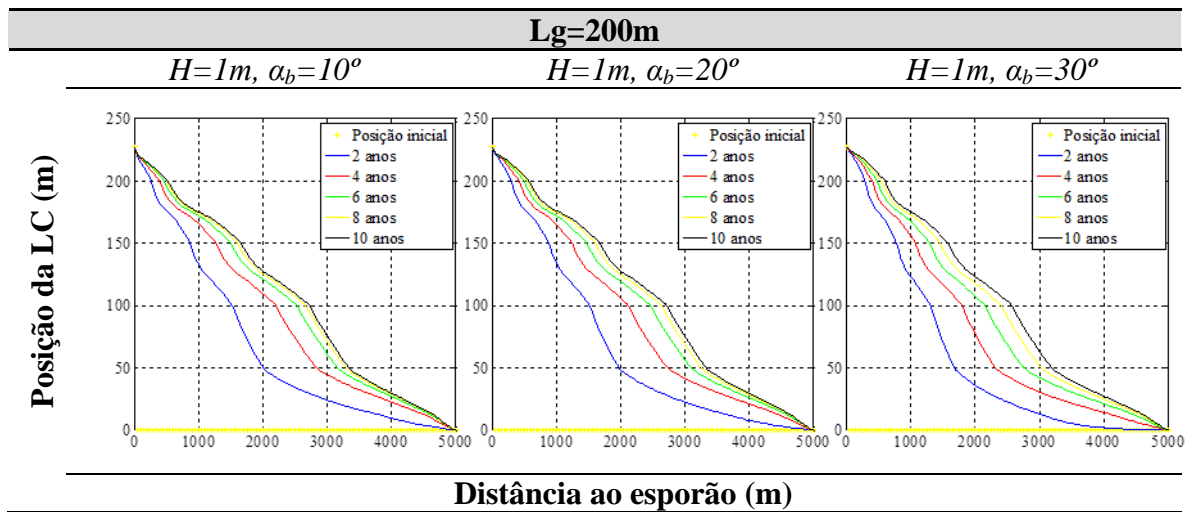
Relativamente à evolução registada para uma onda com 3 metros de altura, estas começam a refratar a uma distância da costa superior à onda de 1 metro O que poderá dar origem a uma maior rotação da frente de onda à medida que o ângulo de incidência aumenta e por consequência diminuição da velocidade.

### 5.2.2. Esporão com 200 metros

Para um esporão de 200 metros de comprimento, na Figura 28 pode-se verificar que aos 2000 metros de extensão a posição da linha de costa para o ângulo de incidência igual a  $30^\circ$  está recuada comparativamente aos ângulos de  $10^\circ$  e  $20^\circ$ . Tal como no caso do esporão com 100 metros de comprimento, para um ângulo de incidência de  $10^\circ$  ao fim de dois anos a posição da linha de costa avançou mais rapidamente que para os outros dois casos apresentados. O mesmo se verifica ao fim de quatro e seis anos, no entanto o comportamento da posição da linha de costa para um ângulo de incidência igual a  $20^\circ$  vai-se aproximando dos resultados obtidos para o ângulo de  $10^\circ$ . Neste caso também se verifica que para um ângulo de incidência igual a  $30^\circ$ , apesar de continuar a ter um maior avanço entre as posições, indicando que ainda continua a ter uma acumulação significativa, ao fim de dez anos a posição da linha de costa está mais recuada que para os outros ângulos.

Relativamente à Figura 28, verificou-se que o comportamento da evolução da posição da linha de costa apresenta características iguais ao caso anterior, podendo também ser

explicado a partir da deformação que a onda sofre à medida que a onda se aproxima da costa.

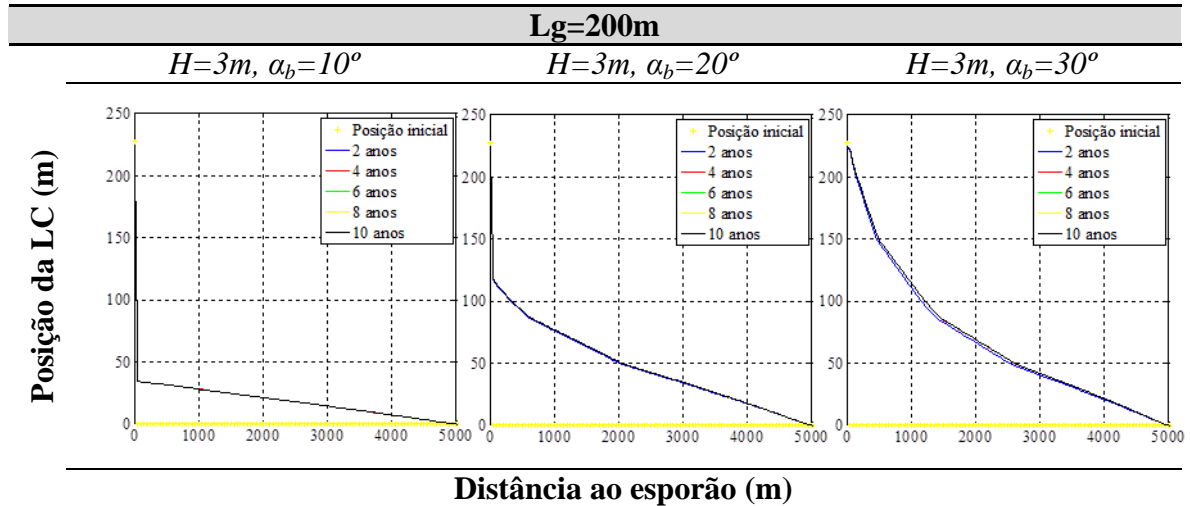


**Figura 28:** Posição da linha de costa para um esporão de 200 metros, para uma onda com 1 metro de altura (LTC)

No que diz respeito à Figura 29, comparando com a Figura 27, em que a única alteração que existe entre uma simulação e outra é relativa ao comprimento do esporão, que passou a ter o dobro do comprimento, pode-se verificar que de facto o comprimento do esporão tem impacto na evolução da posição da linha de costa. No caso do esporão com 200 metros de comprimento, verifica-se uma maior acumulação nas imediações da estrutura, resultando num avanço da posição da linha de costa quando comparado com o caso do esporão de comprimento igual a 100 metros.

Tal como no caso de esporão para 100 metros, para um esporão de 200 metros de comprimento (Figura 29) verifica-se que a alteração da altura da onda para 3 metros tem impacto na evolução da posição da linha de costa. No caso do ângulo de incidência igual a  $10^\circ$ , observa-se que o ângulo do perfil se aproxima do valor do ângulo de incidência. O ângulo ao ser rodado para  $30^\circ$  verifica-se que existe um aumento de acumulação de sedimentos, indicando um aumento de capacidade de transporte associado a este rumo. Verifica-se que para os ângulos de incidência iguais a  $20^\circ$  e  $30^\circ$ , o ângulo do perfil tende a aproximar-se dos valores dos ângulos em estudo. No último caso apresentado na Figura 29 pode-se verificar que para um esporão houve um avanço notável da posição da linha de costa, o que indica novamente um aumento de capacidade de transporte. Nos três casos, de uma forma geral, verifica-se que as linhas referentes a cada ano representado estão

sobrepostas, ou praticamente sobrepostas, indicando que foi atingida a posição de equilíbrio e que a linha de costa tenderá a não avançar mais.



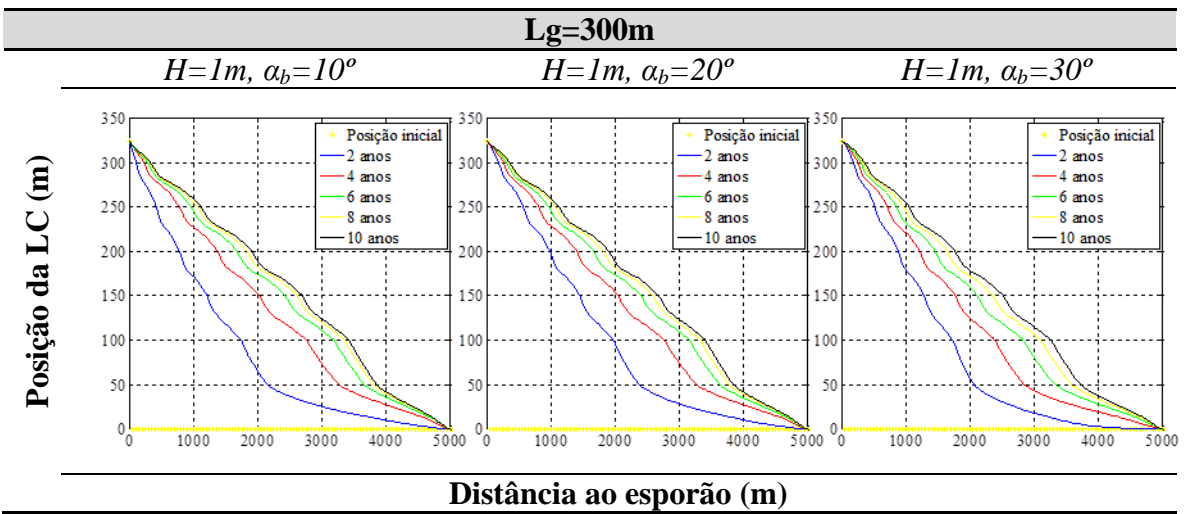
**Figura 29:** Posição da linha de costa para um esporão de 200 metros, para uma onda com 3 metros de altura (LTC)

Relativamente à refração ao aproximar-se da costa, o comportamento deverá ser igual ao caso apresentado para um esporão de comprimento igual a 100 metros, dado que as condições de agitação marítima são as mesmas. Porém, para um esporão de 200 metros de comprimento verifica-se que a posição da linha de costa, relativamente ao caso anterior avançou cerca de 100 metros. Perante, esta diferença pode-se colocar a hipótese que para o caso anterior o esporão tinha atingido a sua capacidade limite e que eventualmente haverá transposição de sedimentos para sotamar.

### 5.2.3. Esporão com 300 metros

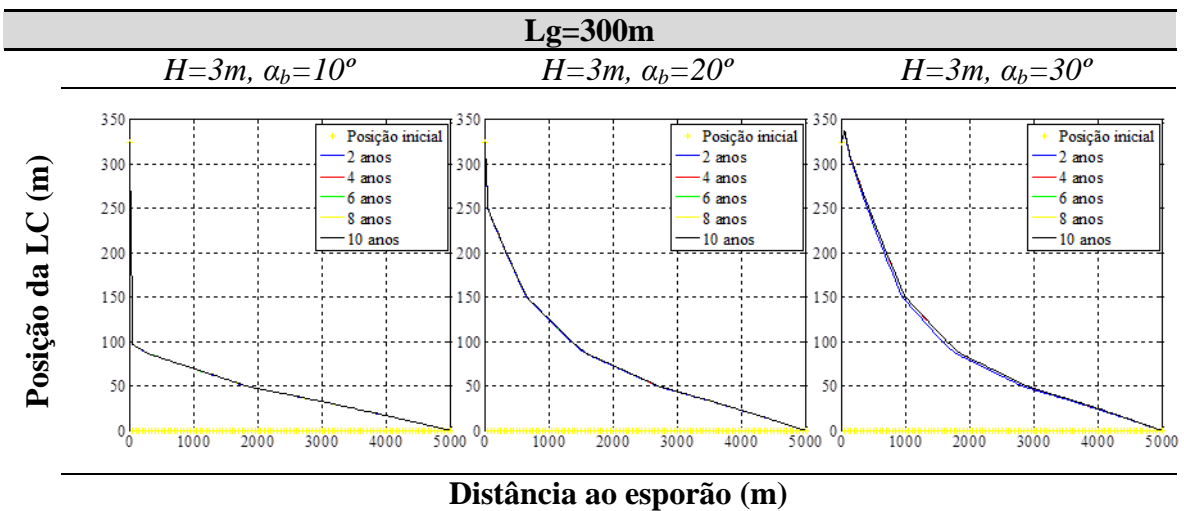
Na Figura 30 pode-se verificar que para um ângulo de incidência igual a  $20^\circ$  a posição da linha de costa, nos dois primeiros anos, evolui mais rapidamente.

Para os ângulos de  $10^\circ$  e  $20^\circ$ , pode verificar-se que ao fim de quatro anos a posição da linha de costa é a mesma, ao contrário do que acontece para um ângulo igual a  $30^\circ$ . Verifica-se que ao aumentar o comprimento do esporão, a posição da linha de costa tenderá a avançar mais, aumentando assim a área da praia. Verifica-se também que ao fim de 10 anos, para um ângulo de incidência igual a  $30^\circ$  a posição da linha de costa, em certos trechos, está mais recuada relativamente aos outros dois casos.



**Figura 30:** Posição da linha de costa para um esporão de 300 metros, para uma onda com 1 metro de altura (LTC)

Na Figura 31, comparando com as Figuras 27 e 28, pode verificar-se a evolução do impacto que o comprimento do esporão tem na posição da linha de costa. À medida que se vai aumentando o comprimento do esporão, para as mesmas condições de agitação, a posição da linha de costa vai avançando, indicando que a estrutura está de facto a condicionar o transporte sedimentar, retendo mais sedimentos que no caso dos esporões de 100 e 200 metros.



**Figura 31:** Posição da linha de costa para um esporão de 300 metros, para uma onda com 3 metros de altura (LTC)

Para os três comprimentos de esporão estudados, verificou-se que para ondas de 1 metro, o comportamento é semelhante (Figuras 26, 28 e 30) o que mostra que a refração fará com que a onda na rebentação tenha características muito parecidas, independentemente da

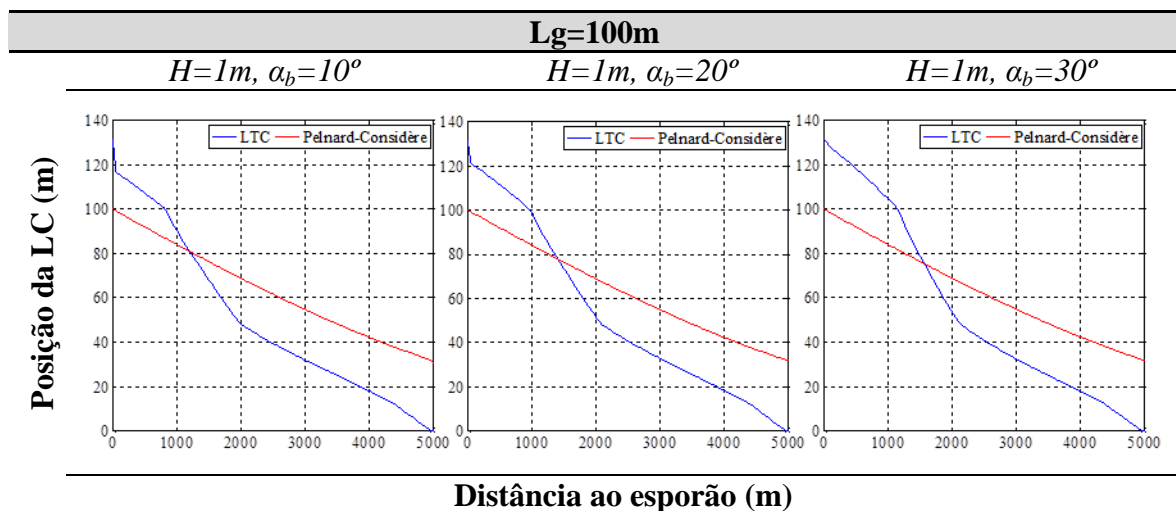
direção ao largo. No entanto, para ondas de 3 metros (Figuras 27, 29 e 31), a rebentação ocorre a maiores profundidades e as ondas ainda apresentam uma orientação bem distinta, com impacto na orientação na linha de costa.

As diferenças da evolução da posição da linha de costa apresentadas nesta alínea devem-se à deformação que a onda sofre à medida que se aproxima da costa, dado que as cristas do grupo de ondas tende a alinhar-se com as batimétricas e, neste caso, com a linha de costa. O grupo de ondas à medida que se aproxima da costa e entra na zona de águas pouco profundas, tendem a perder velocidade proveniente do atrito resultante do contacto com o fundo.

### 5.3. Comparação dos resultados de Pelnard-Considère e LTC

Nas alíneas anteriores foi feita uma análise individual dos resultados obtidos a partir da formulação de Pelnard-Considère e do modelo LTC. Nesta alínea, apresenta-se uma comparação dos resultados obtidos para os dez anos de simulação, para os três comprimentos de esporão (100, 200 e 300 metros) e para alturas de onda de 1 e 3 metros.

#### 5.3.1. Posição da linha de costa para um esporão com 100 metros

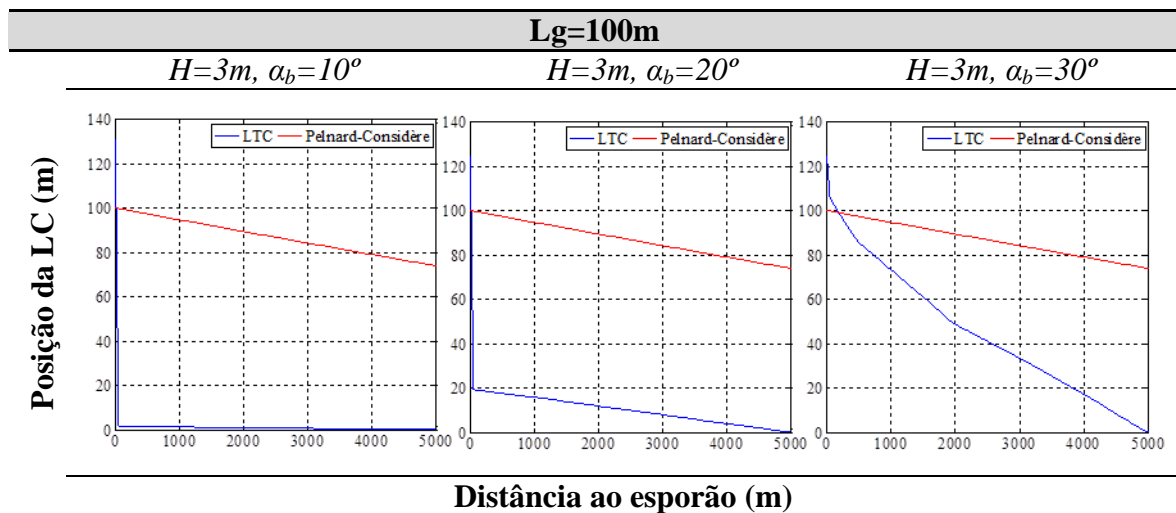


**Figura 32:** Comparação dos resultados obtidos para um esporão de 100 metros e para uma onda de 1 metro, ao fim de 10 anos

Na Figura 32, pode-se verificar que os resultados obtidos a partir duma formulação analítica e de um modelo numérico diferem visivelmente. Verifica-se que nos três casos as linhas têm em comum um único ponto localizado entre os 1000 e os 2000 metros do esporão e com perto dos 80 metros de largura. Pode também verificar-se que os resultados

obtidos para os três ângulos de incidência a partir da formulação de Pelnard-Considère têm sempre o mesmo tipo de comportamento. Com base nos resultados obtidos a partir do LTC, o ângulo de incidência tem de facto influência na evolução da posição da linha de costa.

Analisando a Figura 33, verifica-se o mesmo que na alínea anterior. De acordo com os resultados obtidos com Pelnard-Considère, independentemente do ângulo de incidência, da altura da onda e do comprimento do esporão, a posição da linha de costa vai sempre avançando tendendo a ficar paralela à posição inicial, mas o mesmo já não se verifica para os resultados obtidos a partir do LTC, nos quais são visíveis os impactos de todos os parâmetros envolvidos e em estudo.



**Figura 33:** Comparação dos resultados obtidos para um esporão de 100 metros e para uma onda de 3 metros, ao fim de 10 anos

Para uma melhor compreensão das diferenças presentes nos resultados obtidos, procedeu-se ao cálculo da média das distâncias entre as posições da linha costa referentes aos dois métodos. Foi necessário dividir o domínio em cinco trechos:

- **A:** 0 - 1000 metros
- **B:** 1000 - 2000 metros
- **C:** 2000 - 3000 metros
- **D:** 3000 - 4000 metros
- **E:** 4000 - 5000 metros

No cálculo foram excluídos os valores referentes à célula correspondente ao esporão. Analisando a Figura 32 pode-se verificar que para Pelnard-Considère, tal como a formulação devido à condição fronteira em  $x=0$  após o tempo de enchimento do esporão ser  $y(0, t_f) = L_g$ , o valor é fixado no valor correspondente ao comprimento do esporão. Comparando com os resultados obtidos com o LTC verifica-se que nesse mesmo ponto  $y$  assume um valor superior ao comprimento do esporão. Esta diferença foi verificada ao longo da realização deste trabalho e para qualquer ano simulado, nomeadamente a posição inicial, o modelo assume sempre um valor diferente do valor de comprimento do esporão introduzido. Esta diferença de valores, deve-se ao facto de o modelo, na zona da cabeça do esporão fazer uma interpolação que pode ser explicada a partir da Figura 14. No caso deste trabalho estes valores poderiam ir até aos 50 metros, devido ao espaçamento da malha considerado.

Analisando a Tabela 10 pode-se verificar que para uma onda de 1 metro de altura e para os três ângulos de incidência, onde os resultados apresentam em média uma menor diferença na posição da linha de costa e se aproximam mais é no trecho B. Relativamente a uma onda com altura igual a 3 metros, já se nota uma diferença acentuada entre os resultados. Neste caso verifica-se também que as menores diferenças entre os resultados acontecem quando o ângulo de incidência é igual a  $30^\circ$ , sendo que a menor diferença observada ocorre no trecho A.

Nesta tabela, apresenta-se também a distância entre os resultados obtidos para a posição,  $x=2500\text{m}$ , de forma a comparar um ponto que foi analisado noutra alínea. Pode-se verificar que para uma onda de 1 metro, à medida que se aumenta o ângulo de incidência da onda, para esta posição a diferença entre as distâncias também aumenta. Ao contrário do que acontece para uma onda de 3 metros, cujas distâncias diminuem à medida que o ângulo de incidência aumenta.

Estes resultados mostram a importância da batimetria e da refração na evolução da posição da linha de costa. As diferenças entre as distâncias ser menor para ondas de 1 metro pode ser explicada pelo facto de entrar em contacto com o fundo muito perto da costa, o que poderá prolongar a refração.



**Tabela 10:** Média ( $\bar{X}$ ) das distâncias entre resultados, para um esporão de 100m

Lg=100m							
Altura da onda	H=1m			H=3m			
Rumo	10°	20°	30°	10°	20°	30°	
Trecho	A	14.3	19.1	25.9	95.9	79.2	11.3
	B	9.6	8.1	9.9	90.9	77.7	31.6
	C	22.0	20.8	20.7	85.9	76.4	46.0
	D	23.4	22.9	23.5	81.0	75.2	56.6
	E	27.5	27.5	59.5	76.2	74.3	68.2
$x=2500m$		12.9	13.9	20.2	155.8	131.2	120.5

### 5.3.2. Posição da linha de costa para um esporão com 200 metros

Na Figura 34 verifica-se que nos três casos as linhas têm em comum um único ponto localizado entre os 1000 e os 2000 metros do esporão e com perto dos 150 metros de largura.

Relativamente aos resultados apresentados na Figura 34, também demonstra que o ângulo de incidência da onda tem influência na evolução da posição da linha de costa. Essa influência torna-se mais evidente para ondas com 3 metros de altura (Figura 35).

Tal como já foi referido, as diferenças apresentadas na Figura 35 devem-se ao facto de a formulação de Pelnard-Considère não considerar a batimetria e consequentemente a refração. O que para os casos de ondas com 3 metros de altura faz com o que existam grandes diferenças na evolução da posição da linha costa, havendo, em média, uma diferença entre as distâncias até 146 metros.

Analisando a Tabela 11, verifica-se novamente que para uma onda de 1 metro de altura e para os três ângulos de incidência, onde os resultados apresentam em média uma menor diferença na posição da linha de costa e se aproximam mais é no trecho B. No diz respeito a uma onda com 3 metros de altura, do caso anterior para este a diferença acentuada entre

os resultados mantêm-se, apresentando a maior média de distâncias no trecho A, para ondas com um ângulo de incidência igual a  $10^\circ$ . No entanto, é também neste trecho que apresenta o valor mais baixo, mas para o ângulo de incidência igual a  $30^\circ$ .

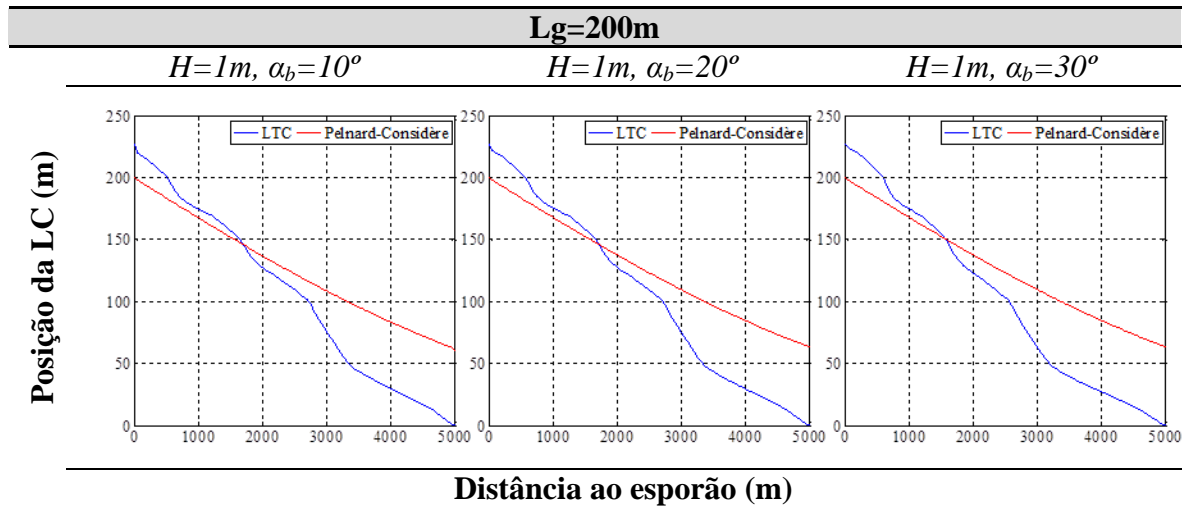


Figura 34: Comparação dos resultados obtidos para um esporão de 200 metros e para uma onda de 1 metro, ao fim de 10 anos

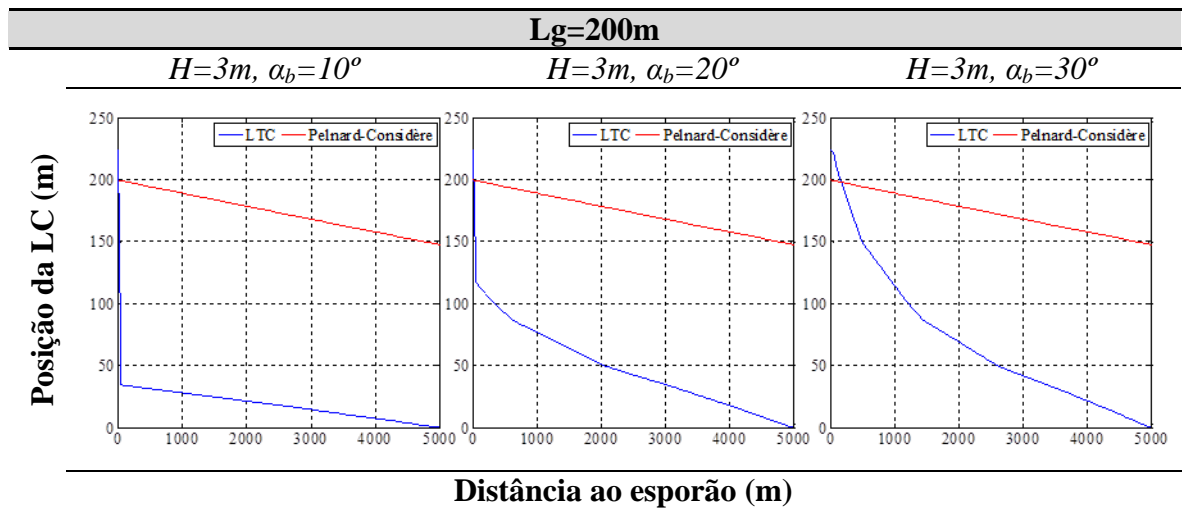


Figura 35: Comparação dos resultados obtidos para um esporão de 200 metros e para uma onda de 3 metros, ao fim de 10 anos

Relativamente à posição  $x=2500m$ , verifica-se o mesmo comportamento que no caso apresentado para um esporão com 100 metros de comprimento.

**Tabela 11:** Média ( $\bar{X}$ ) das distâncias entre resultados, para um esporão de 200m

Lg=200m							
Altura da onda	H=1m			H=3m			
Rumo	10°	20°	30°	10°	20°	30°	
Trecho	A	14.4	16.7	18.0	163.3	111.0	41.5
	B	6.3	6.6	7.4	159.4	125.9	97.3
	C	16.1	17.2	25.8	155.7	133.5	120.0
	D	49.3	50.8	56.3	152.3	140.0	131.6
	E	56.8	58.2	75.3	149.3	146.1	142.4
$x=2500m$		12.9	13.9	20.2	155.8	131.2	120.5

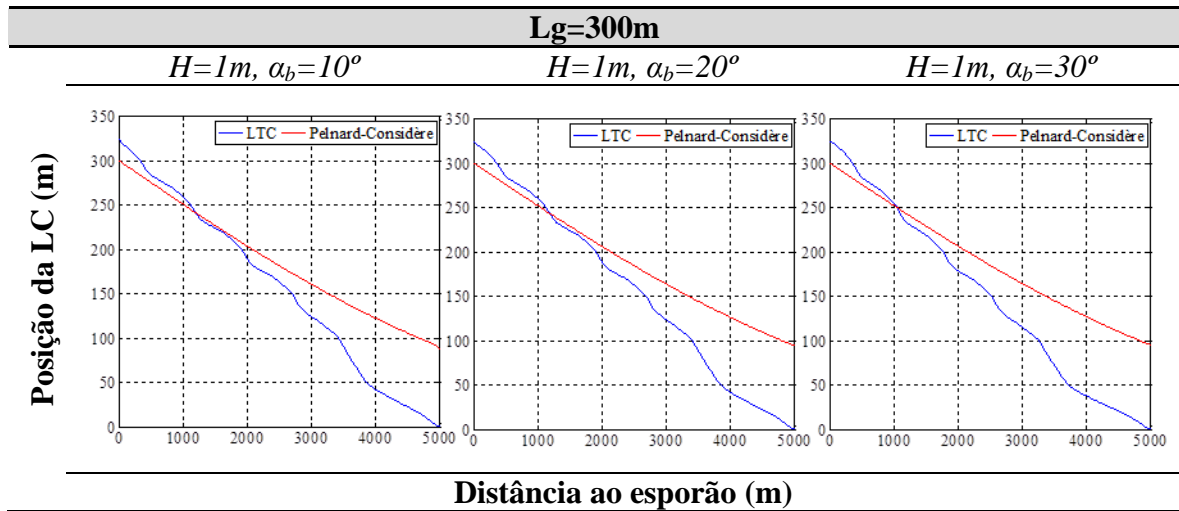
### 5.3.3. Posição da linha de costa para um esporão com 300 metros

Na Figura 36 verifica-se que para um esporão com 300 metros de comprimento, para os ângulos de incidência 10° e 20°, existe um ponto comum localizado entre os 1000 e os 2000 metros do esporão e com perto dos 250 metros de largura. No entanto, para um ângulo de incidência igual a 30°, o ponto onde os resultados se cruzam dista 1000 metros do esporão.

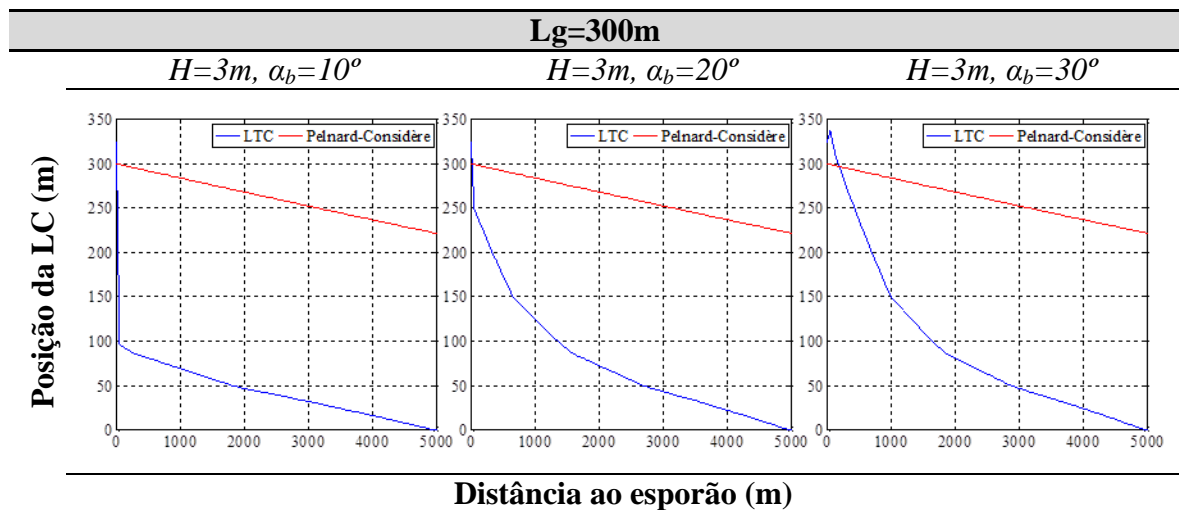
Na Figura 36 pode verificar-se que aumentando o esporão para 300 metros, nos trechos A e B, verifica-se uma aproximação dos resultados obtidos para os dois modelos. Para uma onda de 1 metro de altura, à medida que se vai aumentando o comprimento do esporão de 100 para 300, os resultados nestes trechos começam a aproximar-se. O que poderá pôr a hipótese que ao fim de 10 anos, ao aumentar o comprimento do esporão os resultados obtidos a partir dos dois modelos poderão entrar em concordância, atingindo a capacidade limite de enchimento e conseqüente perfil de equilíbrio.

No caso da Figura 37, as diferenças entre os resultados obtidos ainda são consideráveis. No entanto, pode verificar-se que para um esporão com 300 metros de comprimento os resultados obtidos com o LTC confirmam a influência do ângulo de incidência. Mostra também que o aumento o comprimento do esporão para ondas com 3 metros de altura a

posição da linha de costa aumenta, comparativamente a esporões aos casos apresentados anteriormente.



**Figura 36:** Comparação dos resultados obtidos para um esporão de 300 metros e para uma onda de 1 metro, ao fim de 10 anos



**Figura 37:** Comparação dos resultados obtidos para um esporão de 100 metros e para uma onda de 3 metros, ao fim de 10 anos

Analisando a Tabela 12, ao contrário dos casos anteriores, verifica-se que para um esporão com 300 metros de comprimento, para uma onda de 1 metro de altura e para os ângulos de incidência iguais a  $10^\circ$  e  $20^\circ$ , as menores diferenças observadas correspondem ao trecho B. Relativamente ao ângulo de  $30^\circ$  a menor distância média observada corresponde ao trecho A, verificando-se o mesmo para uma onda com 3 metros de altura. Os restantes valores obtidos mantêm o comportamento apresentado anteriormente. Bem como, os valores obtidos para  $x=2500m$ .

**Tabela 12:** Média ( $\bar{X}$ ) das distâncias entre resultados, para um esporão de 300m

<b>Lg=300m</b>							
<b>Altura da onda</b>	<b>H=1m</b>			<b>H=3m</b>			
<b>Rumo</b>	10°	20°	30°	10°	20°	30°	
<b>Trecho</b>	<b>A</b>	12.9	14.7	12.7	210.4	152.3	63.2
	<b>B</b>	4.8	5.9	13.8	218.7	193.9	165.3
	<b>C</b>	23.1	25.7	37.4	220.7	208.3	197.5
	<b>D</b>	55.7	58.2	72.1	220.3	214.2	209.3
	<b>E</b>	84.2	88.0	91.1	221.2	220.1	217.5
<b>x=2500m</b>		18.3	21.1	33.2	220.8	204.0	197.1

De uma forma geral, verifica-se que à medida que se aumenta o comprimento do esporão, as diferenças entre as distâncias da posição da linha de costa obtida para 10 anos de simulação também aumenta.



*Capítulo 6*

**CONSIDERAÇÕES FINAIS**

*"O mar é a religião da natureza"*

*Fernando Pessoa*





## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho pretende contribuir para o conhecimento e compreensão da evolução da linha de costa nas imediações de um esporão. Procedeu-se à avaliação do impacto dos esporões, avaliando o desempenho de uma formulação teórica e de modelo, designadamente, Pelnard-Considère e o modelo LTC.

Sendo a formulação de Pelnard-Considère, uma formulação teórica recorreu-se ao *software* MATLAB de forma a obter resultados proceder à comparação com o modelo LTC. Foram criadas rotinas simples de forma que fosse possível estudar o comportamento de alguns parâmetros individualmente e a evolução da posição da linha de costa ao longo de dez anos.

### 6.1. Conclusões

Para Pelnard-Considère, o presente trabalho mostrou a importância do conhecimento do tempo de enchimento do esporão, o qual independentemente da altura da onda o tempo de enchimento diminui à medida que se aumenta o ângulo de incidência da onda. Também foi possível constatar que para uma determinada onda e um determinado ângulo de incidência, quanto maior for o comprimento do esporão, maior será o tempo de enchimento. Verificou-se que, independentemente da altura da onda e do comprimento do esporão, ao rodar o ângulo de incidência de 10° para 20°, o decréscimo era mais acentuado (76.5%) que ao rodar de 20° para 30° (14.2%).

Na avaliação da zona de influência do esporão para o instante igual ao tempo de enchimento para a posição  $x$  quando a posição  $y$  corresponde a 5% do comprimento do esporão, verificou-se que esta é independente da altura da onda, variando consoante o ângulo de incidência da onda. E que à medida que o ângulo de incidência da onda diminui, maior será o valor da posição  $x$ , representando maior extensão de impacto para menores ângulos.

Relativamente à evolução da posição da linha de costa, os resultados obtidos mostraram que para uma determinada altura de onda, quando o tempo é superior ao tempo de enchimento, na equação assumida para o cálculo, o ângulo de incidência perde peso o que faz com que não existem diferenças significativas.

Verificou-se que de acordo com a formulação de Pelnard-Considère, a posição da linha de costa vai evoluindo paralelamente à posição anterior e que à medida que a altura da onda aumenta a posição da linha de costa avança rapidamente tendendo a ficar paralela à posição inicial. Também se constatou, para a mesma capacidade de transporte e para o mesmo intervalo de tempo, que à medida que se vai aumentando a altura da onda, graficamente as linhas vão-se aproximando entre si mostra que o volume de sedimentos acumulados tende a diminuir. Podendo indicar que o esporão atingiu a sua capacidade limite e que está a haver passagem de sedimentos para sotamar.

No entanto, a formulação de Pelnard-Considère, para escalas temporais grandes e superiores ao tempo de enchimento poderá apresentar resultados que poderão não se aproximar da realidade porque verificou-se que no caso de estudo apresentado o ângulo de incidência da onda não tem impacto na evolução da posição da linha de costa.

Relativamente aos resultados obtidos com o modelo LTC, tal como nos resultados obtidos para Pelnard-Considère, verificou-se que quanto maior for o esporão maior será a acumulação de sedimentos nas imediações do mesmo.

O LTC mostrou a importância do impacto da batimetria e conseqüente refração das ondas para a evolução da linha de costa. Foi possível verificar, ao contrário dos resultados obtidos para Pelnard-Considère, para ondas de 3 metros de altura, as diferenças entre os comportamentos resultantes da rotação do ângulo de incidência. Mostrando que de facto o ângulo de incidência tem influência na evolução da posição da linha de costa.

Ambos os modelos apresentaram concordância quanto à influência da altura da onda na evolução da posição da linha de costa.

## **6.2. Desenvolvimentos Futuros**

As zonas costeiras são sistemas altamente dinâmicos e, por isso, constantemente sujeitos a alterações morfológicas. Ao longo das últimas décadas a problemática da erosão costeira tem vindo a ganhar cada vez mais importância devido ao seu agravamento. O litoral Português tem sido especialmente afetado, sofrendo um agravamento no recuo da linha de costa considerável provocando danos e perdas nas frentes urbanas adjacentes. Desta forma,

torna-se necessário procurar soluções que permitam condicionar a evolução da linha de costa.

Por norma, as soluções passam pela implementação de estruturas artificiais com o objetivo de defender as zonas afetadas. Se por um lado as estruturas implementadas cumprem a sua função de defesa costeira, por outro lado a estas intervenções vêm associados impactos negativos. Como no caso dos esporões que ao serem implementados cumprem a sua a função de retenção de sedimentos a barlar. Porém têm como impacto negativo, a erosão a sotamar.

Para proceder a intervenções de defesa costeira, como é o caso dos esporões, é necessário compreender o meio em que se pretende intervir e os impactos associados a essa intervenção.

Desta forma, torna-se importante e essencial o desenvolvimento de ferramentas que permitam, simular e prever possíveis cenários de evolução da linha de costa a longo prazo., bem como compreender todos os parâmetros e fenómenos associados.

No presente trabalho surgiram algumas dificuldades em termos de resultados e interpretação dos mesmos, pelo que no seguimento do mesmo poder-se-ia proceder a uma avaliação do comportamento do LTC, para alturas de onda diferentes, para uma determinada orientação, no sentido de perceber a influência da refração em função da altura da onda. Outro parâmetro que deverá ser introduzido é a maré, durante um ciclo de maré o comportamento das correntes altera-se, o que terá impacto na direção, alturas e velocidade de propagação.

O comprimento do esporão tem impacto na evolução da posição da linha de costa, acreção a barlar e erosão a sotamar, pelo que poderá também ser considerada uma análise do comportamento do modelo para várias orientações e para diferentes configurações da estrutura, de forma a compreender qual a orientação e configuração adequadas para um impacto negativo menor.

Para o que foi acima descrito, torna-se também necessária a simulação para configurações de praia diferentes, batimétricas mais irregulares de forma a compreender o comportamento da refração.



## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ARAÚJO, R. N., ALFREDINI, P. (2001).** "O Cálculo Do Transporte De Sedimentos Litorâneo: Estudo De Caso Das Praias De Suarão E Cibratel (Município De Itanhaém, São Paulo), *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 6- n°2, 15-28 pp.

**AVDEEV, A. V., GORIOUNOV, E. V., LAVRENTIEV JR, M. M, SPIGLER, R. (2009).** "A Behavior-Oriented Model For Long-Term Coastal Profile Evolution: Validation, Identification And Prediction", *Journal of Applied Mathematical Modelling* 33, 3981-3996.

**BAPTISTA, P., COELHO, C., PEREIRA, C., BERNARDES, C., VELOSO-GOMES, F. (2014).** "Beach morphology and shoreline evolution: Monitoring and Modelling medium-term responses (Portuguese NW coast study site" *Coastal Engineering* 84, 23-37pp.

**BAKKER, W. T., (1968),** "The Dynamics Of A Coast With A Groyne System", *Coastal Engineering*, Capítulo 31, 492-517 pp.

**BAKKER, W.T., BRETELER, E.H J. K., ROOS, A. (1970).** "The dynamics of a coast with a groyne system", Coastal Research Department, Rijkswaterstaat The Hague, Netherlands, Chapter 64, 1001-1020.

**BOUZIDI, R. E. L., LABRAIMI, M., ZOURARAH, B., (2004).** "Morphological Evolution And Spatio-Temporal Variability Of The Longshore Drift System In The Bay Of Tangier (Morocco), *Journal of Africa Earth Sciences* 39, 527-534 pp.

**BRUUN, P. (1954).** "Coast erosion and the development of beach profiles". *Beach Erosion Board Technical Memorandum 44*. US Army Corps of Engineers, Washington DC, 79 pp.

**CARVALHO, J.K.R., BARCELÓ, J. P. (1966).** "Agitação Marítima na Costa Oeste de Portugal Metropolitano - Contribuição Para o Seu Estudo", Memória nº 290, Ministério das Obras Públicas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

**COELHO, C., TAVEIRA-PINTO, F., VELOSO-GOMES, F., (2004).** "Coastal evolution and coastal works in the southern part of Aveiro lagoon inlet, Portugal". *Proceedings of the 29th International Conference on Coastal Engineering*, Lisboa, Portugal, 4, pp. 3914–3926.

**COELHO, C. D. (2005).** “Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira”. *Dissertação de doutoramento*, Universidade de Aveiro, Secção Autónoma de Engenharia Civil, 404 pp.

**COELHO, C., LIMA, M., VELOSO-GOMES (2013).** "Relationship Between Crossshore Active Profile And One-Line Shoreline Evolution Models Performance", *Journal of Coastal Research*, 65, 2107-2112 pp.

**COOPER, N. J., HOOKE, J. M., BRAY, M. J. (2001).** “Predicting Coastal Evolution Using A Sediment Budget Approach: A Case Study From Southern England”. *Ocean and Coastal Management* 44. 711-728.

**COSTA, A.T. (1997).** "Modelo Matemático de linha de costa da Praia do Futuro - Fortaleza/CE", Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

**CPM (2002).** “Coastal Protection Manual”, U.S. Army Coastal Engineering Research Center.

**CROWELL, M., LEATHERMAN, S.P, BUCKLEY, M. K (1991).** “Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy.” *Journal of Coastal Research*, Vol. 7, Nº 3, 839-852pp.

**DIAS, J.A., FERREIRA, Ó (1997).** “Gestão Costeira E Conhecimento Científico: Uma Perspetiva Integrada ”. *Coletânea de ideias sobre a zona costeira de Portugal*, Associação EUROCAST - Portugal, Porto, 2-28 pp.

**DIAS, J.A., FERREIRA, O., TABORDA, R. (2000).** “Implications Of Accelerated Sea Level Rise (ASLR) For Portugal”. *Proceeding of SURVAS Expert Workshop on European Vulnerability and adaptation to Impacts os Accelerated Sea-Level Rise (ASLR)*, p. 97, Hamburg, Germany.



- DIAS, J.A. (2005).** “Evolução Da Zona Costeira Portuguesa: Forçamentos Antrópicos E Naturais”. *Revista Encontros Científicos, Turismo, Gestão e Fiscalidade, Faro*, 8-28 pp.
- FALQUÉS, A. (2006).** "Wave Driven Alongshore Sediment Transport And Stability Of The Dutch Coastline", *Journal of Coastal Engineering* 53, 243-254 pp.
- HANSON, H., (1989).** "GENESIS: a generalized shoreline change numerical model". *J. Coastal Res.*, 5: 1-27.
- HANSON, H., KRAUS, N.C., (1989).** "GENESIS — generalized model for simulating shoreline change". *Technical References. , vol. 1. Army Corps of Engineers* (247 pp.).
- INGLE, J.C., (1966).** "The movement of beach sand. Development in Sedimentology (5) An analysing using fluorescent gains." *Elsevier publication compilation*, 211 p.
- KOMAR, P.D., (1976).** "Beach Processes and Sedimentation", *Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ*, 429 p.
- KRAUS, N.C., HANSON, H., BLOMGREN, S.H., (1994).** "Modem functional design of groin systems". *In: 24th Int. Conf. Eng. Kobe*, pp. 1327- 1342.
- KUMAR, V. SANIL, ANAND, N. M., CHANDRAMOHAN, P., NAIK, G. N. (2003).** "Longshore Sediment Transport Rate - Measurement And Estimation, Central West Coast Of India", *Journal of Coastal Engineering* 48, 95-109 pp.
- LANGA, J. (2003).** "Erosão Costeira na Cidade de Maputo. Causas. Considerações Sobre Intervenções de Defesa". *Tese de Mestrado, Universidade do Porto*.
- LE MEHAUTE, B., SOLDATE, M., (1980).** "A numerical model for prediction of shoreline changes. CERC Misc. Rep". *Coastal Eng. Res. Center. US Army Corps of Engineers*.
- LEONT'YEV, I.O. (1997).** "Short-Term Shoreline Changes Due To Cross-Shore Structures: A One Line Numerical Model", *Journal of Coastal Engineering* 31, 59-75 pp.
- LEONT'YEV, I.O. (1999).** “Modelling Of Morphological Changes Due To Coastal Structures”; *Journal of Coastal Engineering* 38; 143-166 pp.

**MENDES, J. N. V., PINTO, J. L. S. (2008).** "Erosão Costeira - Metodologias Para A Sua Quantificação", Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, n. 33, 139-150 pp.

**NICHOLSON, J., BROKER, I., ROELVINK, J. A., PRICE, D., TANGUY, J. M., MORENO, L., (1997).** "Intermparion Of Coastal Area Morphodynamic Models", *Journal of Coastal Engineering* 31, 97-12 pp.

**OLIVEIRA, I. B. M. (1997).** "Proteger Ou Não Proteger Ou Sobre A Viabilidade De Diferentes Opções Face À Erosão Da Costa Oeste Portuguesa"; *Colectânea de Ideias Sobre a Zona Costeira de Portugal*, Associação Eurocoast-Portugal, 205-227 pp (citado em Coelho, 2005).

**OLIVEIRA, S. (2005).** "Evolução da linha de costa no troço costeiro Forte Novo - Garrão (Algarve), Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 115pp.

**OZOLÇER, I.H., KOMURCU, M. I., BIRBEN, A. R., YUKSEK, O., KARASU, S. (2006).** "Effects Of T-Shape Groin Parameters On Beach Accretion". *Ocean Engineering* 33, 382-403.

**PATTIARATCHI, C., OLSSON, D., HETZEL, Y., LOWE, R. (2009).** "Wave-Driven Circulation Patterns In The Lee Of Groynes". *Continental Shelf Research* 29, 1961-1974.

**PELNARD-CONSIDÈRE, R., (1956).** "Essai de théorie de l'évolution des formes de rivages en plage de sable et de galets". *Quatrième journées de l'hydraulique, les énergies de la mer, question III.* 289–298 (Rapport n. 1), Paris.

**PERLIN, M., DEAN, R.G., (1985).** "3-D model of bathymetric response to structures". *J. Waterw. Port Coast Ocean Eng.* ASCE, 11: 153-170.

**RAUDKIVI, A. J., DETTE, H. (2002).** "Reduction Of Sand Demand For Shore Protection". *Coastal Engineering* 45, 239-259.

**ROSATI, J. D., WALTON, T., BODGE, K. (2002).** "Longshore Sediment Transport"; *Coastal Engineering Manual, Part III, Coastal Sediment Processes, Chapter III-2, Engineer Manual 1110-2-1100*, Morang, A. (editor), U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 113 p (citado em Coelho, 2005).

**SÁNCHEZ-ARCILLA, A., SIERRA, J.P., MÖSSO, C., (2001).** "2DV beach profile modeling. Results and limitations". In: *Proceedings of the 2nd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, Obihiro, Japan, pp. 325e334.

**SÁNCHEZ-ARCILLA, A., SIERRA, J.P., CÁCERES, I., GONZÁLEZ-MARCO, D., ALSINA, J.M., MONTOYA, F., GALOFRÉ, J.,(2006).** "Beach dynamics in the presence of a low crested structure". *The Altafulla case. Journal of Coastal Research* SI 39, 759-764pp.

**SCHOONEES, J.S., THERON, A.K., (1995).** "Evaluation of 10 cross-shore sediment transport/morphological models". *Coastal Engr.* 25, 1–41.

**SHEPARD,F.P., (1948).** "Submarine Geology", Harper J. Brothers Publishers, New York, 348p.

**SIERRA, J.P., GONZALEZ-MARCO, D., MESTRES, M., GIRONELLA, X., OLIVEIRA, T. C. A., CÁCERES, I., MÖSSO, C. (2010).** "Numerical Model For Wave Overtopping And Transmisson Trhough Permeable Coastal Structures", *Journal of Environmental Modelling & Software* 25, 1897-1904pp.

**SILVESTER, R. (1974).** "Sedimentation, Estuaries, Tides, Effluents And Modeling"Coastal Engineering, II, Developments in Geotechnical Engineering 4B. 338pp.

**SPM (1973).** "Shore Protection Manual", vol II, U.S. Army Corps of Engineering, Coastal Engineering Research Center,

**SPM (1984).** "Shore Protection Manual", vol. II, U.S. Army Corps of Engineering, Coastal Engineering Center.

**STEETZEL, H.J., DE VROEG, H., VAN RIJN, L.C., STAM, J.-M., (2000).** "Long-term modelling of the Holland coast using a multi-layer model". *Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering. ASCE*, Sydney, Australia, pp. 2942–2955.

**VAN RIJN, L.C. (2011).** "Coastal Erosion And Control". *Ocean and Coastal Management xxx*, 1-21.

**VELOSO-GOMES, F., TAVEIRA-PINTO, F., NEVES, L., PAIS BARBOSA, J. (2006).** "*Pilot Site of River Douro - Cape Mondego and Studies of Estela, Aveiro, Caparica, Vale do Lobo e Azores*", Eursion, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

**WHITE, T.E., (1996).** "Field tests of five suspended-load transport theories used in numerical models". *Proc. 25th ICCE*, Orlando. ASCE, NY.

**WHITE, T. E. (1998).** "Status Of Measurement Techniques For Coastal Sediment Transport", *Journal of Coastal Engineering* 35, 17-45pp.