



**Daniel Nunes  
de Jesus Bastos**

**Relação Entre o Transporte Sólido Longitudinal e o  
Clima de Agitação**





**Daniel Nunes  
de Jesus Bastos**

**Relação Entre o Transporte Sólido Longitudinal e o  
Clima de Agitação**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizado sob a orientação científica do Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.



## **o júri**

presidente

Prof.<sup>a</sup> Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa  
Professora Associada no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Tiago André Martins de Azevedo Abreu  
Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia do Porto

Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho  
Professor Auxiliar no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

A todas as pessoas que me apoiaram, incentivaram e estiveram comigo ao longo do desenvolvimento deste trabalho e durante o meu percurso académico.

À minha família, nomeadamente aos meus avós pelo apoio e pela força que me deram em paralelo com o meu pai.

À minha mãe que infelizmente não me viu terminar o curso, mas que sem dúvida foi a pessoa que mais se empenhou para que conseguisse ingressar no ensino superior.

Ao meu orientador, Professor Carlos Coelho, pela sua prestabilidade, ajuda, partilha de conhecimentos e apoio durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao João David e ao António de Vasconcelos pela amizade e pelo otimismo que me transmitiram na fase final do curso.





## resumo

Esta dissertação aborda o tema da erosão costeira, assunto que se torna problemático principalmente na época do Inverno. A erosão costeira relaciona-se com a evolução da linha de costa, que por sua vez está diretamente relacionada com o transporte sólido longitudinal e o clima de agitação. A erosão costeira é um fenómeno que pode resultar em estragos na zona litoral, colocando em risco pessoas e bens materiais, o que significa problemas e prejuízos para as populações.

Para prevenir os problemas de erosão costeira, é importante ter capacidade de previsão da posição da linha de costa ao longo do tempo, em função do clima de agitação. No entanto, analisar uma quantidade grande de registos ao longo de vários anos pode ser uma tarefa complexa. Assim, caracterizar um clima de agitação equivalente torna mais fácil e mais cómodo realizar modelação numérica, de forma a que os meios de planeamento adequem o seu trabalho em função das projeções futuras.

A avaliação do transporte sólido longitudinal pode ser estimada com recurso a formulações numéricas. São diversas as formulações que se podem encontrar na literatura, pelo que neste trabalho se identificaram 4 formulações, tendo-se avaliado o desempenho entre elas. Após uma análise de sensibilidade das formulações, consideraram-se registos reais de agitação marítima e procedeu-se ao estudo e avaliação estatística da base de dados do clima de agitação da série de registos da boia ondógrafo de Leixões, tentando estimar o transporte sólido longitudinal que ocorre ao longo do litoral português, através do clima ou climas de agitação equivalentes. Os climas de agitação equivalentes que se obtiveram, têm a mesma capacidade de transporte sólido longitudinal em ano médio e foram utilizados na modelação numérica da evolução da linha de costa. Recorrendo ao programa LTC (*Long-Term Configuration*), aplicaram-se 3 cenários de agitação, correspondentes à onda equivalente, a classes de onda e ao ano representativo. Conhecendo o transporte sólido longitudinal, foi possível para uma zona costeira genérica, analisar o efeito destes cenários em termos de evolução da posição da linha de costa. Apesar dos cenários estudados terem a mesma capacidade de transporte sólido longitudinal, não evoluíram para posições de linha de costa iguais, apresentando alguma concordância entre o cenário da onda equivalente e das classes de onda. Não se verificou o mesmo para o ano representativo, tendo-se obtido maiores valores de recuo da posição da linha de costa neste cenário.



## abstract

This dissertation approaches the theme of coastal erosion, a subject that becomes problematic mainly during the Winter season. Coastal erosion is related to the evolution of the coastline, which in turn is directly related to solid longitudinal transport and the agitation climate. Coastal erosion is a phenomenon that may result in damage to the coastal zone, putting at risk people and material goods, which means problems and damage to the population.

To prevent the problems of coastal erosion, it is important to be able to predict the position of the coastline over time, depending on the climate of agitation. However, analyzing a large number of data records over several years may result a complex task. Thus, characterizing an equivalent atmosphere of agitation makes it easier and more comfortable to perform numerical modeling, so that the planning means adapt their work to future projections.

The longitudinal solid transport evaluation can be estimated using numerical formulations. There are several formulations that can be found in the literature, so that in this work 4 formulations were identified, and the performance among them was evaluated. After a sensitivity analysis of the formulations, actual records of sea agitation were considered and the statistical study of the agitation climate database of the Leixões` directional wave buoy register series was carried out, trying to estimate the solid longitudinal transport that occurs along the Portuguese coast, through the equivalent climate or climates of agitation. The equivalent agitation climates that were obtained have the same solid longitudinal transport capacity in average year and were used in the numerical modeling of the evolution of the coastline. Using the LTC (*Long-Term Configuration*) program, three shaking scenarios were applied, corresponding to the equivalent wave, to wave classes and to the representative year. Knowing the solid longitudinal transport, it was possible for a generic coastal zone to analyze the effect of these scenarios in terms of evolution of the coastline position. Although the studied scenarios have the same longitudinal solid transport capacity, they did not evolve to equal coastline positions, presenting some proximity of results between the equivalent wave scenario and the wave classes. The same was not observed for the representative year, with higher values of retreat of the coastline position in this scenario.



---

## ÍNDICE GERAL

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>3</b>
1.1	Enquadramento	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Metodologia	5
<b>2</b>	<b>Clima de agitação</b>	<b>9</b>
2.1	Agitação equivalente	10
2.1.1	Espectro de ondas	10
2.1.2	Classes de ondas	11
2.1.3	Onda simples	14
2.2	Registos de agitação de Leixões	17
<b>3</b>	<b>Transporte sólido longitudinal</b>	<b>25</b>
3.1	Processos de transporte	25
3.2	Formulações de estimativa do transporte sólido longitudinal	26
3.2.1	Inman e Bagnold	27
3.2.2	CERC	28
3.2.3	Kamphuis	29
3.2.4	Bayram	30
3.3	Análises de sensibilidade	30
3.4	Síntese de resultados	36
<b>4</b>	<b>Caudais sólidos no nw português e clima de agitação equivalente</b>	<b>41</b>
4.1	Caudais de transporte sedimentar	43
4.2	Onda simples	49
4.3	Classes de onda	50

<b>5</b>	<b>Aplicação do LTC</b>	<b>53</b>
5.1	Caracterização da zona de estudo	54
5.2	Resultados	55
<b>6</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>65</b>
6.1	Conclusões	65
6.2	Desenvolvimentos futuros	68
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>71</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Comparação entre espectros de JONSWAP e Pierson-Moskowitz (CEM, 2002).....	11
Figura 2.2: Definição de variáveis numa praia sob ação de uma onda com um ângulo de incidência na praia, $\theta$ (Oliveira, 2008). ....	15
Figura 2.3: Nomenclatura que caracteriza as ondas (Coelho, 2012). ....	18
Figura 2.4: Frequência da proveniência das ondas por quadrante, ao longo do tempo (dados do Instituto Hidrográfico para a boia de Leixões). ....	20
Figura 2.5: Frequência de alturas de ondas por classe de altura, ao longo do tempo (dados do Instituto Hidrográfico para a boia de Leixões). ....	21
Figura 3.1: Caudal sólido longitudinal, para $\alpha=10^\circ$ , $m=2\%$ e $d_{50}=0,3\text{mm}$ . ....	32
Figura 3.2: Caudal sólido longitudinal, para $H=2\text{m}$ , $m=2\%$ e $d_{50}=0,3\text{mm}$ . ....	33
Figura 3.3: Caudal sólido longitudinal, para $Q1$ em função de $H$ , quando $m=2\%$ e $\alpha=10^\circ$ . ....	33
Figura 3.4: Caudal sólido longitudinal para $Q1$ em função de $\alpha$ , quando $m=2\%$ e $H=2\text{m}$ . ....	34
Figura 3.5: Caudal sólido longitudinal para $Q4$ em função de $H$ , quando $m=2\%$ e $\alpha=10^\circ$ . ....	34
Figura 3.6: Caudal sólido longitudinal para $Q4$ em função de $\alpha$ , quando $m=2\%$ e $H=2\text{m}$ . ....	35
Figura 3.7: Caudal sólido longitudinal para $Q3$ em função de $H$ , quando $d_{50}=0,3\text{mm}$ e $\alpha=10^\circ$ . ....	36
Figura 3.8: Caudal sólido longitudinal para $Q3$ em função de $\alpha$ , quando $d_{50}=0,3\text{mm}$ e $H=2\text{m}$ . ....	36
Figura 4.1: Comparação de caudais ente as 4 formulações. ....	48
Figura 4.2: Caudais da média de registos por ano. ....	49
Figura 5.1: Evolução da linha de costa para 10 anos de simulação.....	56
Figura 5.2: Pormenor da evolução da linha de costa para 10 anos de simulação, focalizado na zona norte (km 10) .....	57
Figura 5.3: Recuo da linha de costa modelando a onda equivalente no LTC. ....	58

Figura 5.4: Recuos da linha de costa relativamente aos 3 cenários no km mais a norte  
(km 10). ..... 59

Figura 5.5: Recuos da linha de costa relativamente aos 3 cenários no km 8. .... 60

Figura 5.6: Recuos da linha de costa relativamente aos 3 cenários no km 6. .... 60



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Clima de agitação equivalente, definido por Barata <i>et al.</i> (1996) para o litoral Noroeste de Portugal.....	12
Tabela 2.2: Cenários de alturas de onda para caracterização de um ano típico de agitação, definido por Coelho (2005), com base em registo em Leixões.....	13
Tabela 2.3: Cenários de rumos de ondulação definida por Coelho (2005), para caracterização de um ano típico de agitação marítima. *Esta direção é expressa em graus, medida no sentido dos ponteiros do relógio, a partir do Norte geográfico (90-Este; 180-Sul; 270-Oeste; 360-Norte).....	13
Tabela 2.4: Frequências de ocorrências de ondulação em ano médio (%), definido por Coelho (2005).....	14
Tabela 2.5: Clima de agitação à entrada do porto da Figueira da Foz para uma profundidade de 12m ( $z=-10$ m ZH) extraído de LNEC (2000) apresentado em Oliveira (2008). Número de ocorrências 1984-96 (13357 no total).....	15
Tabela 2.6: Resumo da análise de registos do clima de agitação em Leixões, entre 1993 a 2003 e de 2009 a 2014.....	19
Tabela 3.1: Valores adotados nos parâmetros comuns às diversas fórmulas.....	31
Tabela 3.2: Valores estimados, para aplicação em algumas fórmulas.....	31
Tabela 4.1: Valores adotados nos parâmetros presentes nas fórmulas, para homogeneização de resultados entre formulações.....	42
Tabela 4.2: Valores necessários a algumas fórmulas para homogeneização de resultados.....	42
Tabela 4.3: Transporte sedimentar longitudinal no sentido sul-norte ( $\times 10^6$ m <sup>3</sup> /ano).....	44
Tabela 4.4: Transporte sedimentar longitudinal no sentido norte-sul ( $\times 10^6$ m <sup>3</sup> /ano).....	45
Tabela 4.5: Transporte sedimentar longitudinal líquido ( $\times 10^6$ m <sup>3</sup> /ano).....	46
Tabela 4.6: Transporte sedimentar longitudinal bruto ( $\times 10^6$ m <sup>3</sup> /ano).....	47
Tabela 4.7: Onda isolada que tem o mesmo efeito médio ao fim de um ano.....	49
Tabela 4.8: Frequências de classes onda que levam ao mesmo transporte.....	50
Tabela 4.9: Caudais tidos como referência para definir as classes de onda ( $\times 10^6$ m <sup>3</sup> /ano).....	50



## Lista de Símbolos

$A$	Parâmetro de forma	$[m^{1/3}]$
$C$	Velocidade do movimento aparente das cristas	$[m/s]$
$C_{gb}$	Velocidade do grupo de ondas na rebentação	$[m/s]$
$D^*$	Parâmetro adimensional de dimensão dos sedimentos	$[-]$
$E_b$	Energia das ondas na rebentação	$[kg/s^2]$
$H_0$	Altura de onda a grandes profundidades	$[m]$
$H_b$	Altura de onda	$[m]$
$L$	Comprimento de onda	$[m]$
$L_0$	Comprimento de onda a grandes profundidades	$[m]$
$K$	Número de onda	$[m^{-1}]$
$K$	Parâmetro baseado no estudo por Komar e Inman em 1970 (normalmente 0,39)	$[-]$
$K_b$	Constante adimensional com base em dados de campo por Komar em 1998 (normalmente 0,25)	$[-]$
$K_r$	Coefficiente de refração	$[-]$
$K_s$	Coefficiente de empolamento	$[-]$
$T$	Período de onda	$[s]$
$T_P$	Período do pico de onda	$[s]$
$U_W$	Velocidade orbital da onda	$[m/s]$
$W_S$	Velocidade de queda dos sedimentos	$[m/s]$
$c_f$	Coefficiente de fricção	$[-]$
$d$	Profundidade	$[m]$
$d_{50}$	Dimensão média dos sedimentos	$[mm]$
$g$	Aceleração da gravidade (9,81 m <sup>2</sup> /s)	$[m^2/s]$
$H$	Altura da onda	$[m]$

$m$	Inclinação da praia	[m/m]
$n$	Porosidade dos sedimentos (aproximadamente igual a 0.4)	[-]
$s$	Relação entre as massas volúmicas dos sedimentos e da água do mar	[-]
$\alpha$	Ângulo entre a crista da onda e a linha de costa	[°]
$\alpha_0$	Ângulo entre a crista da onda ao largo e a linha de costa	[°]
$\alpha_b$	Ângulo entre a crista da onda na rebentação e a linha de costa	[°]
$\gamma_b$	Profundidade de rebentação (0,78)	[-]
$\epsilon$	Coefficiente que representa a eficiência das ondas em manter os grãos de areia em suspensão	[-]
$\pi$	Número adimensional (3,14)	[-]
$\rho$	Massa volúmica da água do mar	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	Massa volúmica dos sedimentos	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\nu$	Coefficiente de viscosidade cinemática da água do mar	[m <sup>2</sup> /s]
$\bar{v}$	Média da velocidade da corrente ao longo da costa (medida na zona de rebentação)	[ms <sup>-1</sup> ]
<i>LTC</i>	Long Term Configuration	
<i>DoC</i>	Profundidade de fecho	[m]
<i>Runup</i>	Ponto máximo de espraiamento	[m]

## **Capítulo 1**

### **INTRODUÇÃO**



# 1 INTRODUÇÃO

A erosão costeira é um problema generalizado, com repercussões a nível económico, político e social, ao qual estão associados custos elevados, sendo inúmeras as frentes urbanas em risco. O défice sedimentar por efeito da redução de fontes aluvionares e as alterações climáticas, que integram a subida generalizada do nível médio da água do mar e a previsível alteração nas frequências de rumos, períodos e alturas de onda e do regime de temporais, resultam num risco acrescido de erosão e inundação. Nos últimos anos, a comunidade científica internacional tem desenvolvido especial esforço na investigação de aspetos que possam contribuir para a compreensão, de forma quantitativa e qualitativa, do comportamento e evolução a médio e longo prazo das zonas costeiras (Silva *et al.*, 2009).

Nesta perspetiva, a modelação de casos genéricos de diferentes cenários de agitação para avaliar o impacto na posição de equilíbrio da linha de costa é importante sob o ponto de vista do planeamento e de projeto das intervenções de defesa costeira. Este é o principal pressuposto que serviu de base à elaboração deste trabalho. Pretende-se avaliar as condições de definição de um clima de agitação equivalente e a importância da sequência de agitação na evolução da linha de costa, com base na capacidade de transporte sedimentar longitudinal. A partir de formulações, modelos numéricos e registos reais de agitação marítima, é possível avaliar o transporte sólido longitudinal que ocorre ao longo das zonas costeiras, através de um clima ou climas de agitação mais simples que equivalem à sequência real que se observa na natureza. Este procedimento poderá simplificar os processos de modelação.

## 1.1 Enquadramento

As zonas costeiras são sistemas complexos e heterogéneos resultantes de uma evolução ao longo de milhões de anos, cujas características foram e são estabelecidas de forma dinâmica, dependendo das alterações das ações hidromorfológicas do meio envolvente. A configuração e posição da linha de costa apresenta grande variabilidade e está associada a um conjunto de ações dinâmicas como a agitação marítima, as marés astronómicas e as marés

meteorológicas, os ventos e as correntes de diferentes origens (Coelho, 2005). A elevação do nível médio global do mar relaciona-se com a variabilidade climatológica natural da Terra e com as perturbações induzidas pelas atividades humanas, principalmente devido à expansão térmica do oceano, causado pelo aumento do volume de água induzido pelo aumento da temperatura atmosférica. A diminuição da quantidade de sedimentos que alimenta o sistema costeiro pode ser explicada pelas muitas atividades humanas em zonas ribeirinhas ou no interior, das quais se destacam as barragens, as dragagens e a extração de inertes. A destruição das estruturas naturais deve-se à degradação antropogénica das formas costeiras naturais, induzidas pela sua ocupação com construções. As obras pesadas de engenharia criam desequilíbrios locais, causando perturbações nos trechos costeiros em que são inseridas: as estruturas transversais (esporões), interrompem o trânsito litoral de areias e provocam acumulação de areias de um lado do esporão e deficit de outro; as estruturas longitudinais têm como principal consequência a inibição das trocas de sedimentos entre as dunas e as praias (Mendes e Pinho, 2008). Além de todos os aspetos referidos, a costa oeste portuguesa está exposta às condições marítimas do Oceano Atlântico. Este é particularmente influenciado pelas tempestades que ocorrem no Atlântico Norte e pela ação do vento, que originam uma ondulação predominante de Noroeste. Estes fatores fazem com que toda a costa oeste possua condições de agitação marítima e características com alguma constância (Pereira, 2008). Interessa perceber o impacto de diferentes regimes de agitação na capacidade de transporte sedimentar e se esses regimes de agitação podem ser representados de forma simples, por um clima de agitação equivalente. Assim pode-se comparar vários cenários de agitação e ver se produzem o mesmo efeito em termos de evolução da linha de costa, recorrendo ao programa LTC (Long Term Configuration).

## 1.2 Objetivos

O tema da dissertação aborda a questão da relação entre o transporte sólido longitudinal e o clima de agitação. O principal objetivo é compreender se o transporte sólido longitudinal que ocorre ao longo das zonas costeiras pode ser avaliado através de formulações e modelos numéricos, essencialmente em função das características do clima de agitação ou climas de agitação equivalentes, mais simples. A consideração de simplificações no clima de agitação



é atrativa porque facilita os processos de modelação numérica e consequentemente, a análise de diferentes cenários de transporte sedimentar e de evolução da posição da linha de costa. Analisaram-se também registos de agitação, para reproduzir o seu efeito em termos de transporte sólido e depois verificar o impacto na modelação da evolução da linha de costa, através de cenários simples de agitação ou reproduzindo os registos de onda observados na boia ondógrafo de Leixões.

### **1.3 Metodologia**

Em função do objetivo apresentado, pretendeu-se com o desenvolvimento desta dissertação:

1. Identificar e comparar as diferentes formulações para estimar o transporte sólido longitudinal, em função das características de agitação;
2. Estudar e avaliar estatisticamente a base de dados do clima de agitação da série de registos da boia ondógrafo de Leixões;
3. Definir classes de ondas e respetivas frequências de ocorrência, temporais e sequência de agitação representativas do clima de agitação registado em Leixões;
4. Definir a capacidade de transporte em ano médio de agitação, a capacidade de transporte de diferentes ondas consideradas isoladamente e a estimativa de um clima de agitação equivalente;
5. Modelar casos genéricos de diferentes cenários de agitação, com recurso ao modelo de evolução de linha de costa LTC, para avaliar o impacto que cada cenário tem na posição de equilíbrio da linha de costa.

Em função destes objetivos específicos, a estrutura da dissertação divide-se em 6 capítulos. Neste primeiro capítulo procede-se ao enquadramento do tema em estudo e à apresentação dos objetivos propostos. No segundo capítulo define-se clima de agitação e apresenta-se a agitação equivalente e registos de agitação de Leixões. O terceiro capítulo faz referência ao transporte sólido longitudinal (processos de transporte, formulações e análises de sensibilidade). No quarto capítulo faz-se uma estimativa de caudais sólidos através do registo real de agitação de Leixões, através de onda simples e classes de onda. De seguida, no quinto capítulo aplica-se o programa LTC para perceber a evolução da linha de costa, comparando

os vários cenários de agitação. Por último, o sexto capítulo apresenta as considerações finais sobre o trabalho realizado, pretendendo-se destacar as principais conclusões desta dissertação e propor possíveis desenvolvimentos futuros que contribuam para a melhoria e continuidade deste trabalho e para o aprofundamento do estudo deste tema.

## **Capítulo 2**

### **CLIMA DE AGITAÇÃO**



## 2 CLIMA DE AGITAÇÃO

A superfície do mar tem uma configuração muito complexa, irregular e variável de instante para instante. O estado do mar, num dado local e em dado momento, é definido pelo conjunto das características das ondas nesse local e nesse momento. A agitação marítima engloba um conjunto de fatores dos quais fazem parte a ação das marés, tempestades, movimentação de navios, seichas, vagas e ondas. Neste trabalho dá-se ênfase à relação entre o clima de agitação e o transporte sedimentar longitudinal e o efeito que as características da agitação provoca na posição da linha de costa ao longo do tempo.

A agitação pode ser considerada, na sua forma mais simplista, pressupondo a uniformidade das características das várias ondas individuais, isto é, como agitação regular e de uma forma mais realista, uma vez que em situações reais o conceito de onda regular deixa de ter sentido. Como agitação irregular, as ondas podem ser analisadas através do seu espectro. A consideração da agitação marítima como regular constitui a mais simples abordagem da agitação, pressupondo que esta é puramente bi-dimensional e de pequena amplitude. São ondas facilmente geradas em laboratório, de forma sinusoidal, com altura, período e direção constantes. A análise da agitação como irregular procura descrever as “reais” características aleatórias tridimensionais da agitação, considerando, portanto, a superfície livre como um conjunto de ondas de características aleatórias. Parâmetros como a altura da onda, o período ou a direção são considerados como grandezas estatísticas, uma vez que a superfície livre do mar é considerada como composta por ondas de variadas alturas e períodos, movendo-se nas mais variadas direções. Esta análise é apenas possível se existirem dados em quantidade (após um período de observação suficientemente longo) e qualidade (com garantias de bom funcionamento do equipamento de medição, com o registo efetuado de forma sistemática e sem falhas) suficientes. Esta consideração, apesar de mais representativa da realidade, vem aumentar a complexidade das análises (Pinto e Neves, 2003).

## 2.1 Agitação equivalente

A necessidade de especificar um número reduzido de ondas como condições de fronteira de um sistema de modelos matemáticos de simulação da dinâmica sedimentar obriga à seleção de um conjunto de ondas representativas do clima de agitação marítima de uma região, de forma a que a dinâmica sedimentar seja bem reproduzida. O clima de agitação pode ser registado ou aproximado por classes de ondas ou uma onda simples.

Para o cálculo da distribuição do transporte litoral ao longo de um perfil transversal afastado de efeitos bidimensionais e do respetivo transporte total anual, é feito o cálculo do transporte produzido pela totalidade das ondas do clima de agitação marítima durante um ano. Em seguida, seleciona-se um conjunto de ondas que produzam o mesmo transporte e a mesma distribuição (classes de onda) ou uma só onda que produza o mesmo efeito (onda simples). Com base nas ondas representativas selecionadas é possível a simulação do regime de correntes de maré induzidas pelas ondas do transporte litoral, tendo em conta a interação entre as correntes geradas pelas ondas e as correntes de maré, e as características granulométricas dos sedimentos.

### 2.1.1 Espectro de ondas

Em geral, a forma do espectro de ondas varia consideravelmente de acordo com a velocidade do vento, período de tempo que o vento sopra (duração), etc. Com a intenção de se obter um espectro de ondas esperado para as diversas condições de mar, embora nem sempre isto seja possível, diversos autores propõem formulações baseando-se em análises teóricas juntamente com ajustes empíricos (Pinho, 2003).

Para representar o espectro em frequência são propostos vários modelos empíricos ou semi-empíricos que são ajustados às observações realizadas no oceano. Um dos espectros empíricos mais utilizados é o de JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*) que resultou de uma campanha de medições na costa oeste da Alemanha. O espectro JONSWAP é semelhante ao apresentado por Pierson-Moskowitz, apesar de representar o pico do espectro mais “afiado” (Holthuijsen, 2007).

$$E(f) = \frac{\alpha \cdot g^2}{(2\pi)^4 \cdot f^5} \exp \left[ -1.25 \left( \frac{f_p}{f} \right)^4 \right] \gamma \exp \left[ \frac{-\left( \frac{f}{f_p} - 1 \right)^2}{2\sigma^2} \right] \quad 2.1$$

$\longleftrightarrow$   
 Espectro de Pierson-Moskowitz  
 $\longleftrightarrow$   
 Espectro de JONSWAP

Na equação 2.1,  $f_p$  é a frequência de pico espectral,  $\alpha$  a constante de Philips,  $\gamma$  o parâmetro de elevação do pico e  $\sigma$  o coeficiente que traduz a assimetria do espectro. Na figura 2.1, pode-se ver a comparação entre os dois espectros.

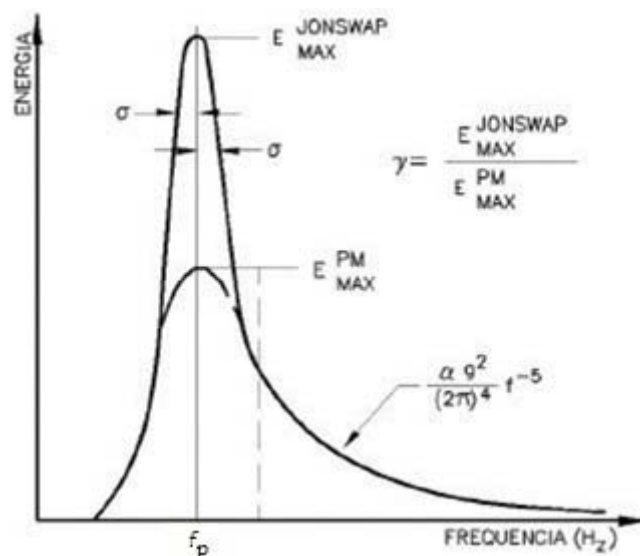


Figura 2.1: Comparação entre espectros de JONSWAP e Pierson-Moskowitz (CEM, 2002).

### 2.1.2 Classes de ondas

A conjugação das diversas variáveis que caracterizam os estados do mar permite a geração de uma infinidade de cenários. A criação de um número de classes ou estados de agitação permitem a geração desses cenários e representar a generalidade das hipóteses. Como exemplo, pode-se referir o trabalho de Pereira *et al.* (2015), que fizeram uma caracterização do regime de ondulação entre 2010 e 2015 e efetuaram-na recorrendo aos resultados numéricos do modelo WAN operado pelos “Puertos de Espana” para um ponto junto à

Figueira da Foz. A comparação dos resultados numéricos deste modelo com os registados na boia de Leixões mostraram que existe uma boa concordância. A vantagem de considerarem estes valores para caracterizar o regime de agitação ao largo face aos da boia ondógrafo de Leixões residiu no fato de não existirem interrupções nos dados e por se referirem a um ponto localizado mais próximo da Figueira da Foz. Para realizarem estudos sobre as características da propagação da agitação marítima e da morfodinâmica na região em análise definiram um ano representativo da agitação marítima ao largo ou um regime de agitação equivalente. No âmbito desse trabalho consideraram o regime de ondulação equivalente anual estabelecido por Barata *et al.* (1996). Esse regime foi constituído por 6 condições de onda e foi estabelecido no pressuposto que produz um transporte longilitoral anual que é equivalente ao obtido com o regime de agitação medido ao largo da Figueira da Foz. A altura significativa da onda aumenta desde a onda 1 até à onda 5. A percentagem de ocorrência de cada onda está indicada na última linha da tabela 2.1.

Tabela 2.1: Clima de agitação equivalente, definido por Barata *et al.* (1996) para o litoral Noroeste de Portugal.

#	1	2	3	4	5	6
Hs(m)	1,75	2,25	3,75	4,75	6,25	3,75
T(s)	12	12	12	15	15	12
Direção(°)	315	303,75	326,25	315	315	281,25
%	50	30,02	9,8	1,64	1	7,54

Coelho (2005) também aplicou um clima de agitação, definido como ondas com determinadas frequências de ocorrência. Para a projeção de cenários, Coelho (2005) criou um número de classes ou estados de agitação representativas da generalidade do clima de agitação registado. Como se pode ver na tabela 2.2, foram admitidas cinco classes, com maior discretização para as menores alturas de onda (mais frequentes) e classes mais largas para alturas de onda superior, mas menos frequentes. Para cada uma destas classes de alturas de onda foram adotados como representativos a altura significativa média e o período médio.



Tabela 2.2: Cenários de alturas de onda para caracterização de um ano típico de agitação, definido por Coelho (2005), com base em registo em Leixões.

Classe de $H_s$ (m)	Ocorrência	$H_s$ (m)	$T_{H_s}$ (s)
$\leq 1$	15,2%	0,8	7,6
1-2	41,6%	1,5	8,7
2-3	21,8%	2,4	10,2
3-6	19,5%	4,2	12,1
$>6$	1,9%	6,8	13,9

Coelho (2005) conjugou estes cinco cenários com classes de rumos de agitação. Definiu cada quadrante com uma abertura de  $22,5^\circ$ , representado pelo seu valor médio, como exposto na tabela 2.3. Cinco tipos de ondas com sete direções distintas, eleva para 35 o número de classes de agitação definidas. Na última coluna da tabela 2.3 são apresentadas as percentagens de ocorrência de cada rumo (Coelho, 2005).

Tabela 2.3: Cenários de rumos de ondulação definida por Coelho (2005), para caracterização de um ano típico de agitação marítima. \*Esta direção é expressa em graus, medida no sentido dos ponteiros do relógio, a partir do Norte geográfico (90-Este; 180-Sul; 270-Oeste; 360-Norte).

Quadrante	Ângulo da onda com o Norte *	Ocorrências
NNW	$337,5^\circ$	12,4%
NW	$315,0^\circ$	42,0%
WNW	$292,5^\circ$	34,0%
W	$270,0^\circ$	7,7%
WSW	$247,5^\circ$	1,9%
SW	$225,0^\circ$	1,5%
SSW	$202,5^\circ$	0,5%

Para cada relação de classes de alturas de onda significativa e rumos de ondulação foram identificadas as frequências de ocorrência. Assim, as probabilidades de ocorrência de cada classe são visualizadas na tabela 2.4 e representam um ano médio de agitação. A ordenação lógica destes cenários ou estados de agitação poderá criar um ano típico de agitação. A

simulação a longo prazo do clima de agitação poderá recorrer à aplicação destes anos de agitação típica. Conhecendo um ano médio de agitação, podem também ser criados cenários de agitação atípica, valorizando determinados rumos ou alturas de onda (Coelho, 2005).

Tabela 2.4: Frequências de ocorrências de ondulação em ano médio (%), definido por Coelho (2005).

Classe de $H_s$ (m)	Rumos							$\Sigma$
	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SSW	
$\leq 1$	2,4	6,0	5,1	1,2	0,3	0,1	0,1	15,2
1-2	7,0	17,7	12,4	3,1	0,6	0,6	0,2	41,6
2-3	2,4	9,1	7,2	1,7	0,6	0,6	0,2	21,8
3-6	0,6	8,4	8,5	1,4	0,4	0,2	0,0	19,5
$> 6$	0,0	0,8	0,8	0,3	0,0	0,0	0,0	1,9
$\Sigma$	12,4	42,0	34,0	7,7	1,9	1,5	0,5	100

### 2.1.3 Onda simples

O conceito de onda simples consiste em saber qual o conjunto de condições que deve ser utilizado para a obtenção de resultados idênticos (mesmo transporte sólido longitudinal) aos que se obteriam no caso de serem realizadas simulações baseadas nas séries temporais completas de climas de agitação. Os critérios aplicados para a determinação do conjunto de condições representativas e dos fatores de ponderação dos resultados, devem ser baseados nos dois efeitos mais proeminentes da agitação marítima sobre o transporte sedimentar: a taxa potencial de transporte sólido longitudinal e a capacidade de remobilização de sedimentos do fundo (Silva, 2010). Steijn (1992) sugere um procedimento para a seleção de conjuntos de condições representativas. Este conceito, também designado por “onda equivalente” é uma metodologia, adequada para redução de dados de entrada de agitação marítima em modelos de evolução da morfologia costeira a médio e a longo prazo.

Oliveira (2008) baseou-se num clima de agitação marítima médio anual obtido em frente ao porto da Figueira da Foz, para uma profundidade de 12m, correspondente à base da praia, extraído de LNEC (2000). Numa das aplicações a metodologia é utilizada para a determinação de um “clima equivalente” com 5 “ondas” e numa outra aplicação é

determinada uma única “onda equivalente”. Apresenta-se de seguida a aplicação que permite a obtenção da “onda equivalente”.

Partindo do clima inicial (tabela 2.5), calcularam-se as frequências de ocorrência por classes de altura de onda e de ângulo de incidência, medidos em relação ao eixo de referência  $OX$ , figura 2.2.

Tabela 2.5: Clima de agitação à entrada do porto da Figueira da Foz para uma profundidade de 12m ( $z=-10m$  ZH) extraído de LNEC (2000) apresentado em Oliveira (2008). Número de ocorrências 1984-96 (13357 no total).

$H_s$ (m)	$\alpha_f$ (°)								
	35	25	15	5	-5	-15	-25	-35	-45
0,75	54	12	38	46	137	279	1126	523	616
1,5	26	92	77	173	568	2472	1593	668	359
2,5	1	24	82	153	1028	979	315	113	98
3,5		5	22	48	469	453	53	5	15
4,5			1	17	210	192	8		
5,5			1	11	74	42	1	1	
6,5					26	20			
7,5			1		11	2			
8,25					17				

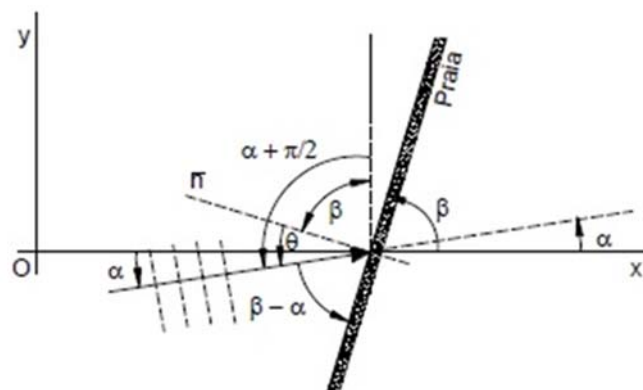


Figura 2.2: Definição de variáveis numa praia sob ação de uma onda com um ângulo de incidência na praia,  $\theta$  (Oliveira, 2008).

Seguidamente determinam-se os somatórios do membro da direita da equação 2.2, o que permite o cálculo da direção da onda equivalente ( $\alpha = -11,6^\circ$ ). Através de uma das expressões 2.3 ou 2.4 estima-se a altura de onda equivalente ( $H = 2,21 \text{ m}$ ).

$$\tan(2\alpha)_R = \frac{\sum_{i=1}^N f_i H_i^{2,4} \sin 2\alpha_i}{\sum_{i=1}^N f_i H_i^{2,4} \cos 2\alpha_i} \quad 2.2$$

$$\sum_{k=1}^M f_k H_K^{2,4} \sin 2\alpha_k = \sum_{i=1}^N f_i H_i^{2,4} \sin 2\alpha_i \quad 2.3$$

$$\sum_{k=1}^M f_k H_K^{2,4} \cos 2\alpha_k = \sum_{i=1}^N f_i H_i^{2,4} \cos 2\alpha_i \quad 2.4$$

Considerando  $\rho = 1027 \text{ kgm}^{-3}$ ,  $\rho_s = 2650 \text{ kgm}^{-3}$ ,  $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ ,  $\gamma_b = 1$  e  $n = 0,4$  na expressão 2.5, obtém-se o valor de  $K_1$ .

$$K_1 = \frac{\rho \sqrt{g/\gamma_b}}{16(\rho_s - \rho)(1 - n)} \quad 2.5$$

Admitindo que a constante empírica toma o valor 0,2, (Schoonees e Theron, 1993), que a orientação da linha de costa é  $\beta = 76^\circ$  (aproximadamente a orientação média da linha de costa no sector localizado entre Espinho e o Cabo Mondego), que  $\theta = \alpha + \frac{\pi}{2} - \beta$  (Figura 2.2) e que a “onda equivalente” atua continuamente durante 1 ano, obtém-se, através da expressão 2.6 e recorrendo à expressão 2.7, o valor da taxa potencial de transporte longitudinal sólido  $Q = 1049242 \text{ m}^3/\text{ano}$ .

$$Q = K K_1 H_f^{2,4} (DoC)^{0,1} (1 - C_1 \theta_f^2)^{0,2} \sin 2\theta_f \quad (\text{m}^3 \text{ s}^{-1}) \quad 2.6$$

O parâmetro DoC representa a profundidade de fecho,  $H_f$  a altura da onda para a profundidade de fecho e  $\theta_f$  o ângulo de incidência da onda para a profundidade de fecho.

$$C_1 = \frac{1}{2} \left( 1 - \left( \frac{H_f}{DoC} \right)^{0,8} \right) \quad 2.7$$

Por outro lado, o saldo do caudal sólido pode ser calculado com base no clima de agitação original, através da expressão 2.8, obtendo-se  $Q_n = 1026688 \text{ m}^3/\text{ano}$ . As duas taxas potenciais de transporte longitudinal, apenas diferem entre si em cerca de 2%. Assim, a

metodologia proposta por Oliveira (2008), que não foi referida nas fórmulas de transporte sólido identificada no capítulo 3, para além de bastante simples, mostra-se adequada à estimativa de uma “onda equivalente” ou de um “clima de agitação equivalente” em termos de transporte longitudinal.

$$Q_{vn} = \frac{Q_n}{KK_1 D(DoC)^{0,1}} = \sum_{i=1}^N f_i H_{fi}^{2,4} (1 - C_{1i} \theta_{fi}^2)^{0,2} \sin 2\theta_{fi} \quad 2.8$$

Silva (2010), também adotou o sistema de onda simples para realizar uma simulação de 10 anos, tendo considerado a geração aleatória de rumos no intervalo  $(11,25;168,25)^\circ N$ , mas uma altura de onda constante calculada de acordo com a expressão 2.9:

$$H^{2,5} = \sum_{j=1}^J H_j^{2,5} / J \quad 2.9$$

em que  $J$  é o número total de alturas de onda geradas numa simulação de 1 ano.

O valor de altura de onda dado pela equação 2.9 resultaria numa taxa de transporte sólido potencial ao fim de 1 ano equivalente à soma das contribuições das taxas de transporte induzidas por cada uma das ondas individuais, se o rumo se mantivesse constante.

## 2.2 Registos de agitação de Leixões

O registo de agitação pode ser feito através de ondógrafos. Estes ondógrafos são boias que permitem fazer a recolha de dados em relação à avaliação da altura das ondas, do período de ondulação e a direção média (pico) de proveniência. Na figura 2.3 apresentam-se algumas das principais grandezas relacionadas com a caracterização das ondas:

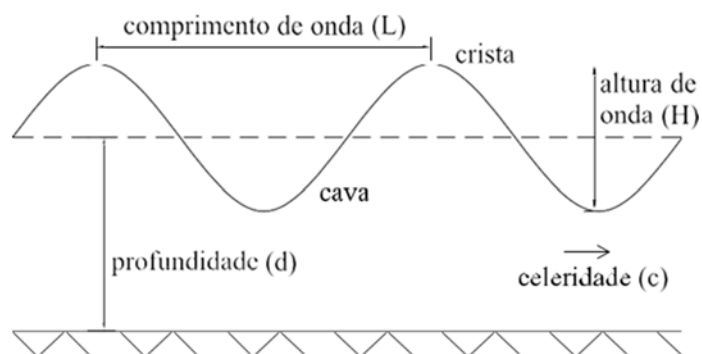


Figura 2.3: Nomenclatura que caracteriza as ondas (Coelho, 2012).

O comprimento de onda ( $L$ ) representa a distância entre cristas ou cavas consecutivas. O período de onda ( $T$ ) corresponde ao intervalo de tempo definido pela passagem de duas cristas sucessivas por um ponto fixo, ou, intervalo de tempo correspondente ao movimento aparente de uma crista ao longo de um comprimento de onda. A altura de onda ( $H$ ) é a distância vertical entre a crista e a cava.

O Instituto Hidrográfico dispõe de boias ondógrafo localizadas ao longo do litoral Português. No caso deste trabalho foram analisados dados de registos de ondas através do ondógrafo de Leixões, desde o ano 1993 até ao ano 2014, com a exceção dos anos de 2004 a 2008, cujos registos não foram disponibilizados devido a serem anos que apresentam maiores lacunas com falhas frequentes na sequência de dados. Reparações, danos de origem natural ou humana ou dificuldade de comunicação telemétrica podem dar origem a essas lacunas. O ondógrafo regista valores de 3 em 3 horas, resultando num total de 8 registos por dia. Só em casos de tempestade é que o ondógrafo faz registos mais frequentes. Para não evidenciar esses períodos de tempestade, e consequentemente não influenciar os resultados finais, foram eliminados registos nos dias em que havia mais de 8, tentando manter-se as horas de registo em condições normais, ou seja, às 0h, 3h, 6h, 9h, 12h, 15h, 18h e 21h. Também não se considerou os registos que possuíam dados insuficientes para uma correta análise, como por exemplo casos em que faltava o período de onda ou o rumo. A tabela 2.6 resume os 17 anos de registos, mostrando os números de registos de ondas consideradas e a respetiva altura média das ondas e rumo médio. O número total de ondas consideradas e analisadas foi de 33170 dando uma média de 1951 ondas por ano, a altura média das ondas durante estes anos foi de 2,01 metros e o rumo de 304,31 graus, o que corresponde a uma direção das ondas predominantemente entre noroeste e oés-noroeste. Tal como foi referido anteriormente, o

ondógrafo faz registos de 3 em 3 horas, dando um total de 8 registos por dia correspondendo a 2848 registos por ano. Este número está longe de ser alcançado, isto devido, como já foi referido anteriormente, a diversos tipos de lacunas. Apesar de 1993 e 1995 ter um número muito baixo de registos, contabilizou-se para a análise, para ampliar o intervalo de anos considerados, já que só foi possível obter dados de 17 anos. Esta decisão, poderá ter impacto no aumento da altura média das ondas.

Tabela 2.6: Resumo da análise de registos do clima de agitação em Leixões, entre 1993 a 2003 e de 2009 a 2014.

Anos	Nº de registos de ondas consideradas	H <sub>média</sub> das ondas(m)	Rumo <sub>médio</sub> (°)
1993	385	2,49	308,43
1994	1341	2,05	308,92
1995	168	2,39	313,88
1996	1685	1,84	301,88
1997	1646	1,85	296,09
1998	2192	1,92	304,41
1999	2403	1,96	306,63
2000	937	2,08	305,06
2001	1438	1,44	305,64
2002	2185	2,19	303,21
2003	2771	1,89	301,11
2009	2604	2,03	301,00
2010	2517	1,87	298,01
2011	2693	2,00	306,87
2012	2648	1,87	303,86
2013	2786	2,08	304,82
2014	2771	2,22	303,45
Média	1951	2,01	304,31

De acordo com a tabela 2.6, pode-se concluir que 1993 foi o ano que teve uma maior altura de onda média, seguidamente de 1995 com uma altura de onda de 2,5 e 2,4 metros, respetivamente. Em 2001 verificou-se que foi o ano com a média das alturas de onda mais baixas, com apenas 1,4 metros. No entanto, estes anos apresentam um número de registos pouco equilibrado ao longo do ano. A altura média das ondas dos anos 1993 e 1995 é mais alta devido à existência de mais registos no inverno do que no verão. Estes dois anos são os que menos registos apresentam. Por outro lado, em 2001 a altura da onda média é mais baixa, porque há mais registos no verão.

O rumo registado pela boia ondógrafo de Leixões corresponde à direção medida desde o norte cartográfico, no sentido dos ponteiros do relógio, formando assim um ângulo medido em graus. Esse ângulo foi dividido posteriormente em classes de  $22,5^\circ$ , traduzindo-se essas divisões no eixo das abcissas da figura 2.4. De acordo com a figura 2.4, as ondas provenientes de nor-noroeste até oés-noroeste são mais abundantes. 1995 foi o ano que registou um maior número de ondas de nor-noroeste até noroeste, sendo seguido do ano de 1993. Em 2014 predominou a direção entre noroeste até oés-noroeste seguidamente de 1994. O ano que mais se distinguiu de oés-noroeste até oeste foi 1997, que também foi o ano mais repartido entre nor-noroeste até oeste. Em relação à média dos rumos das ondas dos anos recolhidos (1993-2003 e 2009-2014), as direções correspondem ao setor NO-ONO. À medida que o sentido das ondas avança para o rumo OSO (oés-sudoeste) até S (sul), há uma diminuição do número de registos, sendo praticamente inexistentes na direção SSO-S.

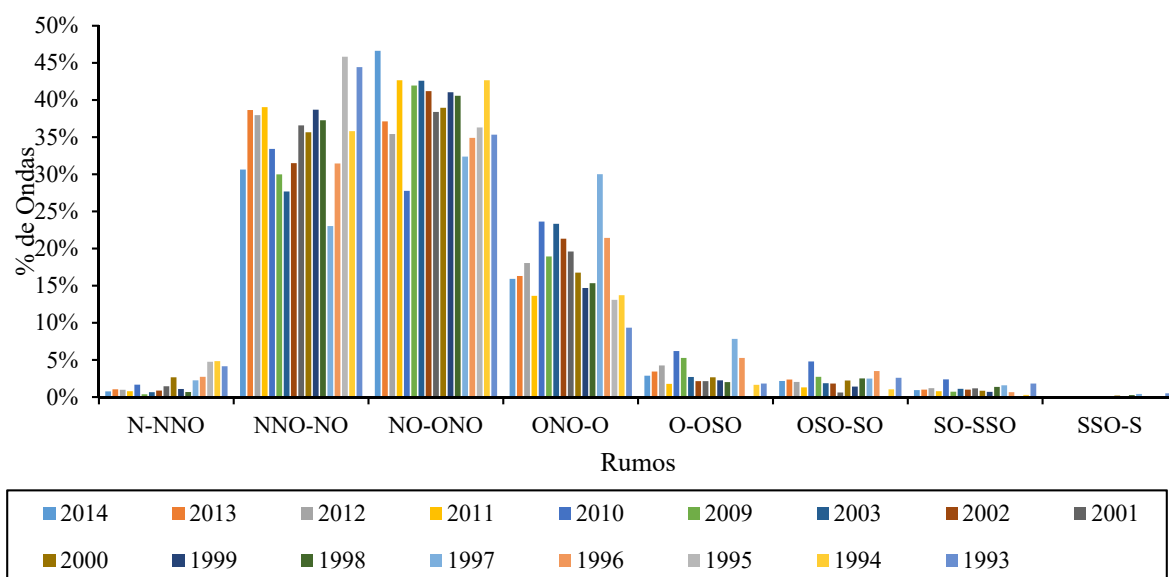


Figura 2.4: Frequência da proveniência das ondas por quadrante, ao longo do tempo (dados do Instituto Hidrográfico para a boia de Leixões).

Na figura 2.5, verifica-se que as ondas inferiores ou iguais a 2 metros de altura apresentam uma maior frequência de ocorrência. As ondas entre 2 a 4 metros de altura também possuem um número elevado de registos, enquanto que as ondas superiores a 4 metros praticamente só em casos pontuais, como tempestades, é que ocorrem, e daí terem percentagens de registos baixas. 2001 foi o ano em que ocorreu uma maior percentagem de ondas iguais ou inferiores a 2 metros, pois a maior parte dos registos ocorreu na época do Verão. Em 1993 e 1995, a



frequência de ocorrência de ondas entre 2 a 4 metros é bastante maior em comparação com os restantes anos, devido à maior parte dos registos de ondas ter sido realizado no Inverno. Relativamente à média das alturas de onda dos 17 anos analisados, verifica-se uma altura correspondente a 2,01 metros.

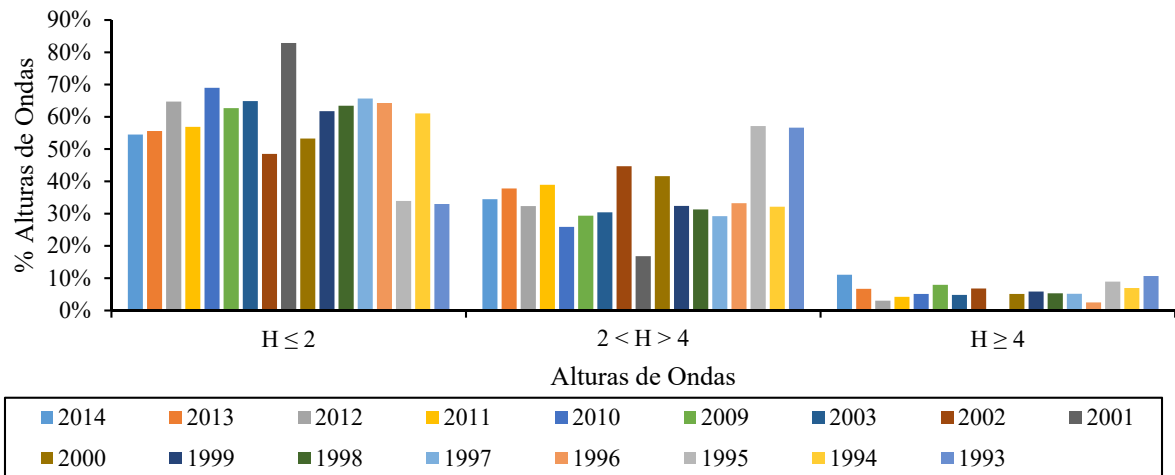


Figura 2.5: Frequência de alturas de ondas por classe de altura, ao longo do tempo (dados do Instituto Hidrográfico para a boia de Leixões).



## **Capítulo 3**

# **TRANSPORTE SÓLIDO LONGITUDINAL**



### 3 TRANSPORTE SÓLIDO LONGITUDINAL

Neste capítulo, identificam-se e abordam-se algumas das expressões de estimativa do transporte sólido longitudinal existentes na literatura e verifica-se a sua adequabilidade na apresentação de valores comuns à realidade do litoral noroeste português, fazendo análises de sensibilidade genérica, comparando as fórmulas de Inman e Bagnold, CERC, Kamphuis e Bayram. Primeiro fez-se uma introdução aos processos de transporte, depois uma descrição sobre as formulações de estimativa do transporte sólido longitudinal consideradas neste estudo e por último, para avaliar o desempenho dessas formulações, fez-se uma análise de sensibilidade aos resultados das formulações, por comparação de diferentes alturas de onda, declives da praia, dimensões médias dos sedimentos e ângulos de incidência da agitação com a linha de costa.

#### 3.1 Processos de transporte

Os processos de transporte proporcionam o ajuste ao longo do tempo da relação morfodinâmica entre a topografia e a dinâmica dos fluidos (Cowell *et al.*, 1999).

Existem várias formas de avaliar o transporte sólido, podendo o mesmo ser dividido nas componentes de transporte sólido transversal e longitudinal, que podem também ser analisadas segundo as parcelas em suspensão ou junto ao fundo, sendo que neste trabalho aborda-se apenas a componente do transporte sólido longitudinal, englobando em simultâneo e como um todo, as parcelas de transporte em suspensão e junto ao fundo.

Relativamente ao transporte sólido transversal, um perfil transversal de praia em equilíbrio pode ser conseguido num tanque de ondas em laboratório, com a ação das ondas mantida constante (ondas regulares, com a mesma altura, período e rumo). As praias naturais, sob a ação de ondas irregulares e para diferentes estados energéticos e rumos de agitação, tendem para perfis de equilíbrio dinâmico, associáveis a estados e sequências de agitação. No entanto, em termos de estudos, modelação e simulação, os perfis de praia só poderão ser entendidos em termos de equilíbrio entre ondas, correntes e sedimentos que compõem a praia

(Komar, 1976). Os perfis transversais de praia têm comportamentos sazonais tipificados. As ondas de menor altura, com maior probabilidade de ocorrência no Verão, movimentam a areia ao longo do perfil transversal, depositando sedimentos na praia e geralmente alargando a praia. Pelo contrário, durante períodos de tempestade, em que a altura das ondas e a sua capacidade energética é elevada, podem registrar-se fortes erosões em curtos espaços de tempo. Geralmente, nos finais das tempestades, quando a altura das ondas diminui mas mantém ainda longos períodos, existe remoção da areia da praia e formação de bermas submersas, por migração das areias para zonas mais profundas (Kraus, 1992). Assim, a análise do comportamento dos perfis transversais relaciona-se fundamentalmente com evoluções a curto prazo e relação entre comportamentos Verão/Inverno, ou em períodos de tempestade. Outra análise dos perfis transversais poderá ser realizada na perspetiva de erosões ou acreções persistentes durante um longo período de tempo, originada pela alteração das condições de transporte sedimentar, até que se atinja um novo equilíbrio (Coelho, 2005).

Em praias arenosas a evolução da linha de costa a médio e longo prazo é essencialmente controlada pelo transporte sólido longitudinal, induzido pela agitação marítima na sua aproximação oblíqua junto à rebentação (Silva *et al.*, 2009). A ação das ondas incidentes movimenta a areia ao longo da praia, na direção da onda. Quando há o 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. A avaliação do potencial de transporte de sedimentos relaciona o volume de sedimentos com poucos parâmetros de ondas e da praia. A calibração de dados fica assim mais simples de conseguir, mas as respostas são menos sofisticadas (Coelho, 2005).

### **3.2 Formulações de estimativa do transporte sólido longitudinal**

São diversas as formulações existentes na literatura que permitem estimar o potencial de transporte sólido longitudinal com base nas características dos sedimentos, da água e do clima de agitação.

Para avaliação dos caudais sólidos longitudinais recorre-se às expressões de Inman e Bagnold, a fórmula CERC, a expressão de Kamphuis e de Bayram. Estas expressões são homogêneas em termos de unidades, sendo os resultados uma relação do volume de sedimentos que atravessa uma secção transversal à costa em determinada unidade de tempo.

### 3.2.1 Inman e Bagnold

Inman e Bagnold (1963), propuseram uma teoria, segundo a qual a energia das ondas mobiliza e coloca os sedimentos em suspensão, enquanto uma corrente média sobreposta ao movimento orbital, devido às ondas, transporta os sedimentos, causando uma deriva no sentido de propagação dessa corrente. Na equação 3.1 está deduzida a estimativa da taxa de transporte proposta pelos autores:

$$Q_1 = \frac{K_b}{(\rho_s - \rho)g(1 - n)} E_b c_{gb} \cos \alpha_b \left( \frac{\bar{V}}{U_w} \right) \quad 3.1$$

em que  $U_w$  corresponde à amplitude da velocidade orbital junto ao fundo e  $K_b$  uma constante adimensional, à qual é atribuído o valor de 0,25, com base em dados recolhidos em diversas praias dos Estados Unidos e do Japão (Komar, 1998) e onde derivam as fórmulas 3.2 a 3.9:

$$E_b = \frac{1}{8} \rho g H_b \quad 3.2$$

( $E_b$ ) representa a energia das ondas na rebentação, ( $\rho$ ) a massa volúmica da água do mar, ( $g$ ) a aceleração da gravidade cujo valor é 9,81 m<sup>2</sup>/s e ( $H_b$ ) representa a altura de onda.

$$C_{gb} = \sqrt{g \frac{H}{\gamma_b}} \quad 3.3$$

( $C_{gb}$ ) representa a velocidade do grupo de ondas na rebentação e  $\gamma_b$  é um parâmetro indicador entre a altura da onda e a profundidade na rebentação que toma o valor de (0,78) de acordo com a bibliografia.

$$\bar{V} = \frac{5}{32} \frac{\pi \gamma_b \sqrt{g}}{c_f} A^{3/2} \sin \alpha_b \quad 3.4$$

$(\bar{V})$  corresponde à média da velocidade da corrente ao longo da costa (medida na zona de rebentação),  $(c_f)$  corresponde ao coeficiente de ficção e  $(A)$  é um parâmetro de forma.

$$A = \frac{9}{4} \left( \frac{w_s^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad 3.5$$

onde  $(w_s)$  representa a velocidade de queda dos sedimentos.

$$w_s = \frac{\nu}{d_{50}} [(10,36^2 + 1,049D_*^3)^{0,5} - 10,36] \quad 3.6$$

$(\nu)$  trata-se do coeficiente de viscosidade cinemática da água do mar,  $(d_{50})$  corresponde à dimensão média dos sedimentos e  $(D_*)$  é um parâmetro adimensional de dimensão dos sedimentos.

$$D_* = d_{50} \left[ \frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad 3.7$$

onde  $(s)$  é dado pela relação entre as massas volúmicas dos sedimentos e da água do mar e  $\rho_s$  corresponde à massa volúmica dos sedimentos.

$$s = \frac{\rho_s}{\rho} \quad 3.8$$

### 3.2.2 CERC

A fórmula de CERC (1984) é um dos métodos mais antigos e de maior sucesso para avaliar o transporte sólido potencial, sendo adotada inicialmente em 1966 e posteriormente atualizada pelo Engineers (1977 e 1984), (*Shore Protection Manual*). A fórmula assume que a rebentação das ondas se dá em águas pouco profundas e relaciona de uma forma empírica o potencial de transporte e o fluxo de energia da onda na rebentação. O método do fluxo de energia traduz uma forma de avaliação do potencial de transporte sólido longitudinal existente em determinada secção da costa. A fórmula mais geral é a que se encontra na equação 3.9:

$$Q_2 = k \left( \frac{\rho \sqrt{g}}{16\gamma_b^{1/2} (\rho_s - \rho)(1 - n)} \right) H_b^{5/2} \sin(2a_b) \quad 3.9$$



em que  $k$  é um parâmetro baseado no estudo por Komar e Inman (1970), normalmente 0,39 e  $\alpha_b$  corresponde ao ângulo entre a crista da onda na rebentação e a linha de costa. A linha de costa depende do que se considera. A variação do nível de maré implica a consideração de uma cota, em princípio correspondente com o nível médio das águas do mar. A linha de costa regista variações de direção ao longo da sua extensão. Podem considerar-se a aproximação de uma linha média em determinada extensão de costa, ou a divisão por trechos, ou ainda a consideração da direção para a qual convergem as ondas na rebentação, mas estas considerações conduzem a diferenças significativas nos resultados finais (Coelho, 2005).

### 3.2.3 Kamphuis

Kamphuis *et al.* (1986), basearam-se em dados de campo e de laboratório e apresentaram uma expressão empírica para estimativa do transporte sólido longitudinal que além dos parâmetros da ondulação inclui também a inclinação dos fundos ( $m$ ) e a dimensão dos sedimentos ( $d_{50}$ ).

Mais tarde, Kamphuis (1991), modifica a fórmula inicial com base em séries de estudos laboratoriais e reavaliação dos dados de campo, adicionando a influência de período de pico das ondas ( $T_p$ ). Então a fórmula de Kamphuis resulta na equação 3.10. Contudo, segundo Wang *et al.* (2002), essa fórmula modificada rediz valores de potencial de transporte sedimentar mais baixos que a fórmula CERC. Para ondas com altura de rebentação inferior a um metro, os valores típicos de resultados da expressão de Kamphuis (1991), são 1,5 a 3,5 vezes inferiores aos da fórmula CERC.

$$Q_3 = 7,3H_b^4 T_p^{1.5} m^{0.75} d_{50}^{-0.25} \sin^{0.6}(2\alpha_b) \quad 3.10$$

Para estimativa do período de pico das ondas em função da altura da onda na rebentação, considerou-se neste trabalho a relação expressa através da fórmula 3.11:

$$T_p = 1,21H_b + 6,92 \quad 3.11$$

### 3.2.4 Bayram

Bayram *et al.* (2007), procuraram desenvolver uma nova fórmula para o cálculo da taxa de transporte longitudinal, que permitisse que algumas das limitações encontradas nas fórmulas apresentadas fossem ultrapassadas, por exemplo, através da inclusão da contribuição das correntes induzidas pelo vento para a taxa de transporte longitudinal, cuja importância foi sustentada por Ciavola *et al.* (1997) e Masselink (1998). A nova fórmula devia: possibilitar a inclusão de outras correntes que não apenas as induzidas pelas ondas, como as induzidas pelo vento e pelas marés; incorporar os parâmetros mais importantes intervenientes no processo de transporte longitudinal sólido; ser validada com uma extensiva base de dados, que cobrisse uma grande variedade de condições. Para o desenvolvimento da fórmula, Bayram *et al.* (2007), assumem que o modo de transporte sedimentar dominante na zona de rebentação é o transporte em suspensão. Assumem que as ondas na rebentação mobilizam os sedimentos do fundo colocando-os em suspensão e mantendo uma determinada concentração no interior da zona de rebentação. A proposta resulta na equação 3.12:

$$Q_4 = \frac{\epsilon}{(\rho_s - \rho)gW_s(1 - \lambda)} (E_b C_{gb} \cos \alpha)_b \bar{V} \quad 3.12$$

O valor de  $E_b$ ,  $C_{gb}$ ,  $\bar{V}$ ,  $W_s$  podem ser estimados pelas equações já apresentadas anteriormente (3.2, 3.3, 3.4 e 3.6, respetivamente) e  $\epsilon$  pela equação seguinte, 3.13:

$$\epsilon = \left( 9,0 + 4,0 \frac{H_{sb}}{W_s T_p} \right) 10^{-5} \quad 3.13$$

### 3.3 Análises de sensibilidade

Para avaliação do desempenho das formulações apresentadas no subcapítulo 3.2, procedeu-se ao estudo do transporte sólido em função de alguns parâmetros e à análise e comparação dos resultados das diversas fórmulas. Assim, fizeram-se análises de sensibilidade genérica, com diferentes alturas e direções da onda, de forma a comparar resultados entre as fórmulas.

Para o cálculo do caudal sedimentar longitudinal em todas as situações analisadas, foram considerados os valores apresentados na tabela 3.1 para representar características da água e dos sedimentos.

Tabela 3.1: Valores adotados nos parâmetros comuns às diversas fórmulas.

$\gamma_b$	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$v$ (m <sup>2</sup> /s)	$K_b$	$n$	$k$
0,78	9,81	1027	2650	$1 \times 10^{-6}$	0,25	0,4	0,39

Com base nos parâmetros adotados na tabela 3.1, resultaram valores para alguns parâmetros, apresentados na tabela 3.2:

Tabela 3.2: Valores estimados, para aplicação em algumas fórmulas.

$D^*$	$W_s$ (m/s)	$s$	$\epsilon$	$A$ (m <sup>1/3</sup> )	$C_f$
7,48	0,043	2,58	$2,9 \times 10^{-4}$	0,13	0,005

Para teste do comportamento das formulações em função da altura de onda definiram-se sete alturas de onda, variando entre 2 e 8 metros e com ângulo de incidência sobre a linha de costa igual a 10°. Além destes cenários, considerou-se uma altura de onda constante, de 2 metros, fazendo-se variar o ângulo de incidência sobre a linha de costa entre 10 e 40 graus, com intervalos de 5 graus. Quando requerido, considerou-se um declive da praia de 0,02m/m e a dimensão dos sedimentos ( $d_{50}$ ), de 0,3mm, permanecendo estes valores constantes em todos os cenários.

De acordo com as formulações apresentadas no subcapítulo anterior, o caudal sólido representado por Q1 corresponde à formulação de Inman e Bagnold (1963), Q2 à formulação de CERC (1984), Q3 à formulação de Kamphuis (1991) e Q4 à formulação de Bayram *et al.* (2007).

Na figura 3.1 verifica-se que o transporte sedimentar longitudinal aumenta para as quatro fórmulas com o aumento da altura de onda. Na fórmula Q3, a altura da onda é a que mais impacto tem no resultado. Para uma altura de onda de 8 metros, o caudal sólido longitudinal Q3 é pouco mais de 2 vezes maior do que Q1 e cerca de 12 vezes maior do que Q4.

Todas as formulações têm um comportamento similar em relação à altura de onda, com a exceção da fórmula Q3, que tende a aumentar os valores de transporte sólido com a altura de onda de forma mais significativa, tomando os valores menores para alturas de onda de 2m, mas passando a ser a formulação com resultados mais altos para ondas superiores a 6 metros.

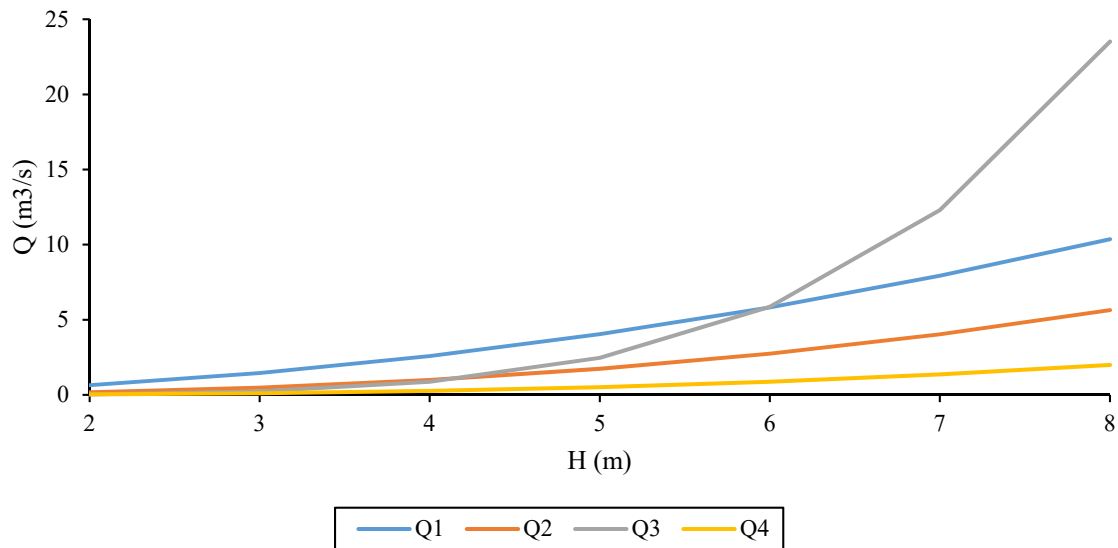


Figura 3.1: Caudal sólido longitudinal, para  $\alpha=10^\circ$ ,  $m=2\%$  e  $d_{50}=0,3\text{mm}$ .

Na figura 3.2, visualiza-se o efeito do ângulo de incidência da onda, considerando uma altura de 2 metros. Todas as formulações resultam num maior caudal sólido quando se aumenta o ângulo de incidência da onda. A fórmula que mais impacto teve com essa variação foi a fórmula Q1, aumentando cerca de 3 vezes o caudal de transporte sedimentar com o aumento do ângulo de  $10^\circ$  para  $40^\circ$ . Contudo, tanto Q2 como Q4, também aumentaram cerca de 3 vezes o caudal como o mesmo aumento do ângulo de incidência, apesar do impacto ser inferior devido aos valores dos caudais serem menores. Para a fórmula Q3, traduziu-se num aumento inferior, cerca de 2 vezes com o aumento do ângulo de  $10^\circ$  para  $40^\circ$ . Os valores dos caudais são mais baixos para a Q2, Q3 e Q4, daí o aumento do ângulo não influenciar o resultado de forma tão significativa. Para um ângulo de  $40^\circ$ , Q1 é cerca de 4 vezes maior que Q2, Q2 é cerca de 7 vezes maior do que Q3, e Q4 um pouco mais do que 1 vez maior do que Q3.

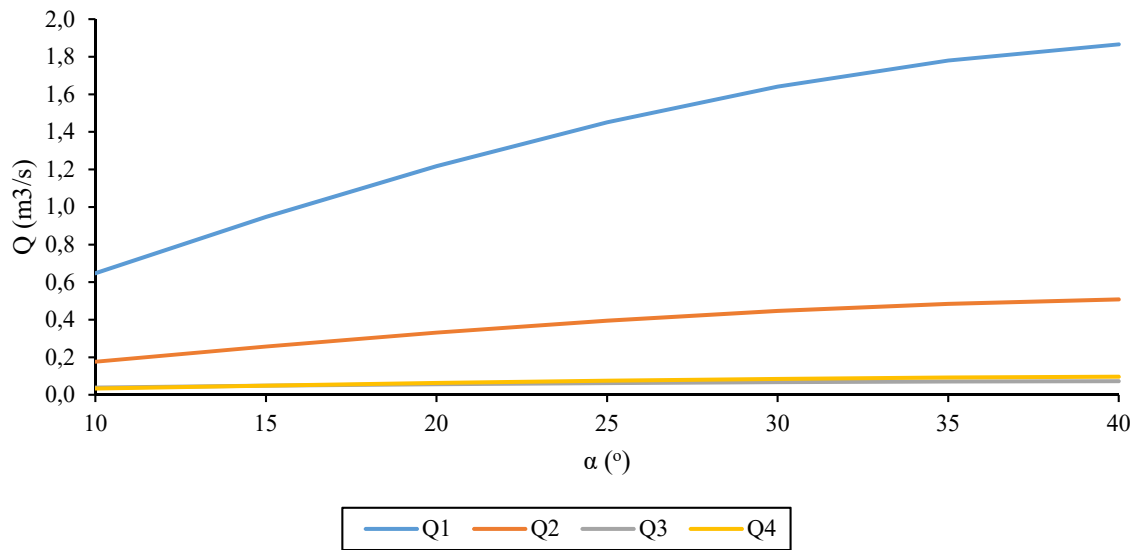


Figura 3.2: Caudal sólido longitudinal, para  $H=2\text{m}$ ,  $m=2\%$  e  $d_{50}=0,3\text{mm}$ .

A fórmula de Inman e Bagnold (Q1) é dependente do  $d_{50}$ . Assim, considerando o mesmo declive das análises anteriores e um ângulo contante de  $10^\circ$  em função da altura, pode-se ver na figura 3.3, que com o aumento do  $d_{50}$ , o caudal de transporte sedimentar também aumenta, tornando-se mais expressivo o valor quando a altura da onda é maior. Para o mesmo declive e altura contante de 2 metros, os resultados em função do ângulo de incidência da onda estão apresentados na figura 3.4. Verificou-se que à medida que o  $d_{50}$  aumenta, aumenta também o transporte sedimentar, com o aumento do ângulo de incidência da onda sobre a linha de costa.

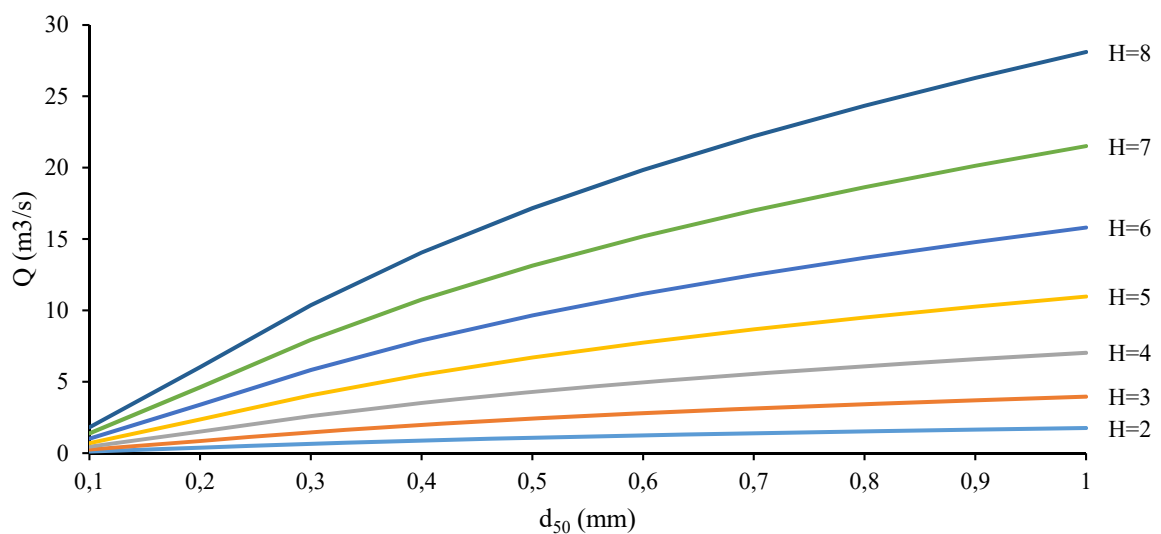


Figura 3.3: Caudal sólido longitudinal, para Q1 em função de H, quando  $m=2\%$  e  $\alpha=10^\circ$ .

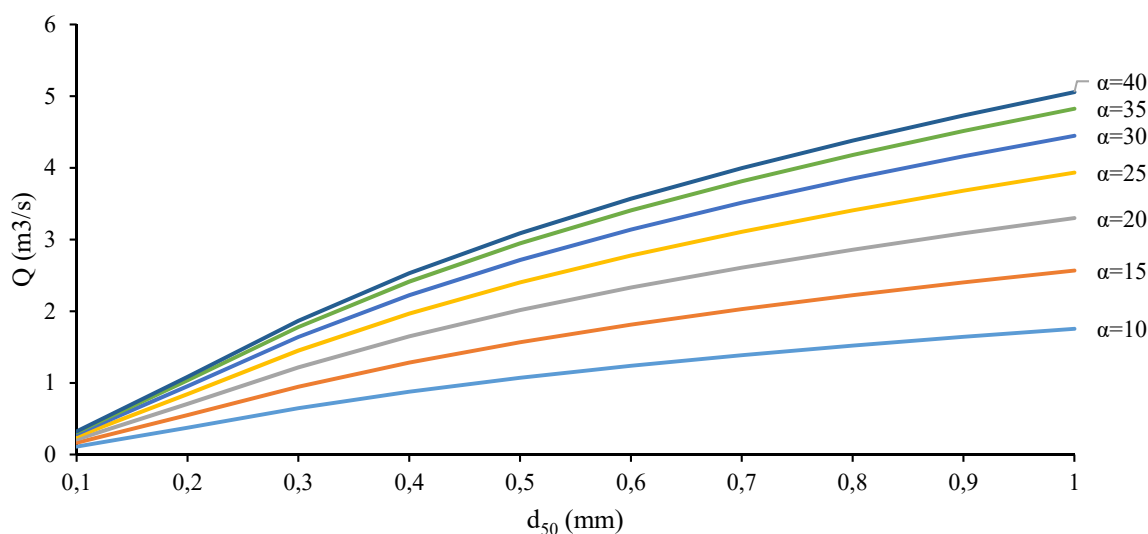


Figura 3.4: Caudal sólido longitudinal para Q1 em função de  $\alpha$ , quando  $m=2\%$  e  $H=2m$ .

Para a fórmula Q4, de Bayram *et al.* (2007), considerando o mesmo declive e ângulo adotados na análise à fórmula de Inman e Bagnold (1963), os resultados do comportamento do caudal sólido em função do  $d_{50}$  foram opostos. Neste caso, com o aumento do  $d_{50}$ , o caudal sólido diminuiu, tornando-se mais expressiva a diferença na capacidade de transporte quando a altura da onda é maior, como se pode ver na figura 3.5. Quando se considerou o comportamento da formulação Q4 em função do ângulo de incidência da onda na rebentação, os resultados também foram opostos a Q1. Com a diminuição do ângulo de incidência da onda sobre a linha de costa, o transporte sedimentar diminuiu, mas diminuiu também com o aumento do  $d_{50}$  (figura 3.6).

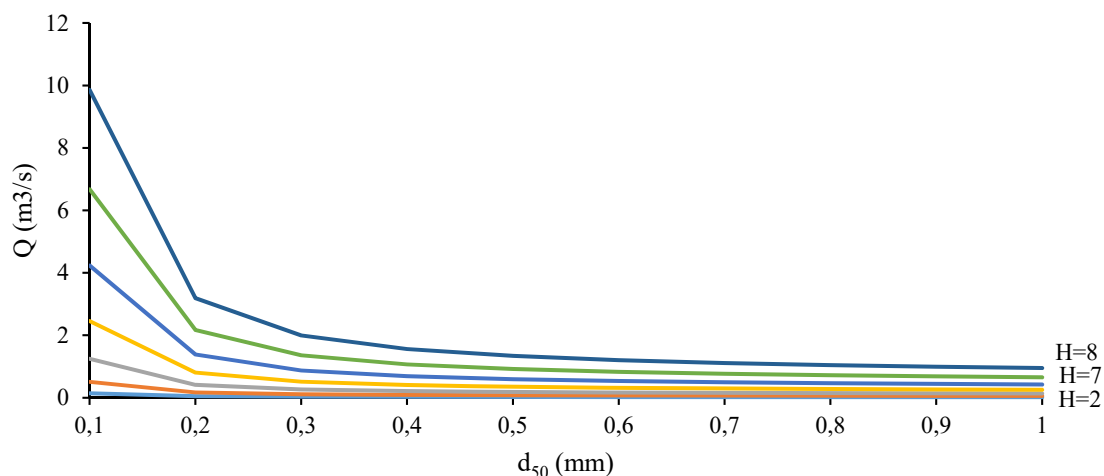


Figura 3.5: Caudal sólido longitudinal para Q4 em função de  $H$ , quando  $m=2\%$  e  $\alpha=10^\circ$ .

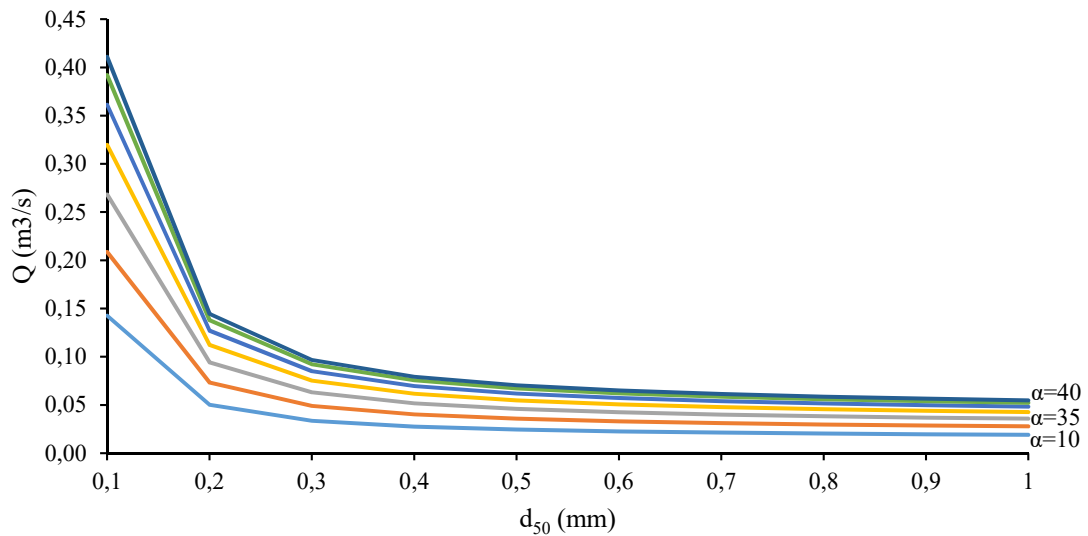


Figura 3.6: Caudal sólido longitudinal para Q4 em função de  $\alpha$ , quando  $m=2\%$  e  $H=2m$ .

Apesar das semelhanças entre a figura 3.3 e a figura 3.4 e entre a figura 3.5 e a figura 3.6, é de notar que as escalas representadas são muito diferentes. A ordem de grandeza dos resultados para as condições analisadas diferem significativamente, pelo que na Figura 3.5, considerando um  $d_{50}$  de 0,1mm, o caudal sólido longitudinal é 69% maior para uma onda de 8 metros em relação a uma altura de 2 metros. Na figura 3.6, considerando um  $d_{50}$  também de 0,1mm, o caudal sólido longitudinal é cerca de 3 vezes superior para um  $\alpha=40^\circ$  em relação a um  $\alpha=10^\circ$ .

Analisando a fórmula de Kamphuis (Q3), com um  $d_{50}$  de 0,3mm e ângulo de incidência de  $10^\circ$ , o transporte sedimentar aumentou com o aumento do declive, ganhando evidência para alturas de onda iguais ou superiores a 5 metros. Para uma altura de 8 metros com um declive de 0,1m/m, o caudal é cerca de 2 vezes e 4 vezes superior do que para uma altura de onda de 7 e 6 respetivamente e cerca de 9 vezes maior do que para 5 metros. No entanto, esta altura é cerca de 3, 10 e 64 vezes maior do que para uma altura de 4, 3 e 2 metros respetivamente. Considerando uma onda de 4 metros de altura e um declive de 0,1m/m, o caudal sólido longitudinal aumenta quase 6 vezes em relação a um declive de 0,01m/m como mostra a figura 3.7.

No caso de se considerar a altura de onda constante de 2 metros e o  $d_{50}$  de 0,3mm, o caudal sólido em transporte aumenta com o aumento do declive da praia, e este aumento é maior

quanto maior é o ângulo de incidência da onda sobre a linha de costa, como se pode ver na figura 3.8.

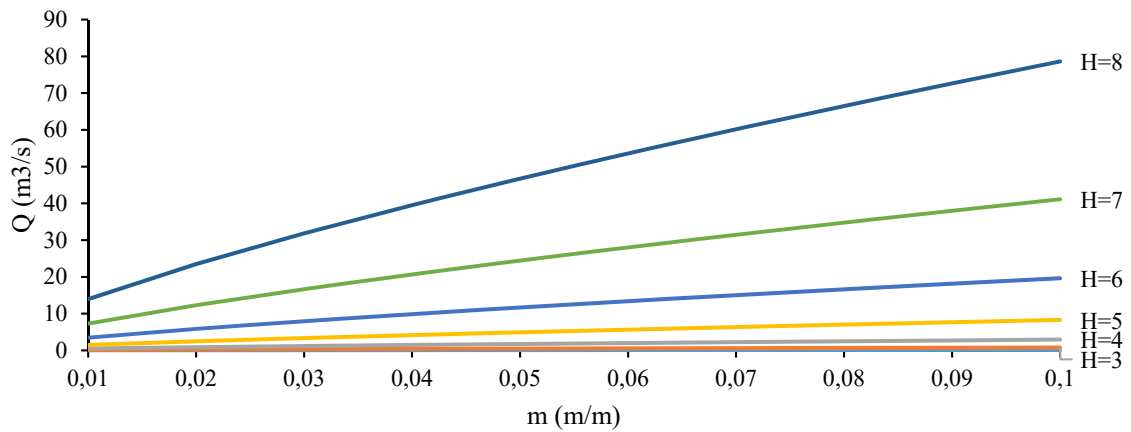


Figura 3.7: Caudal sólido longitudinal para Q3 em função de H, quando  $d_{50}=0,3mm$  e  $\alpha=10^\circ$ .

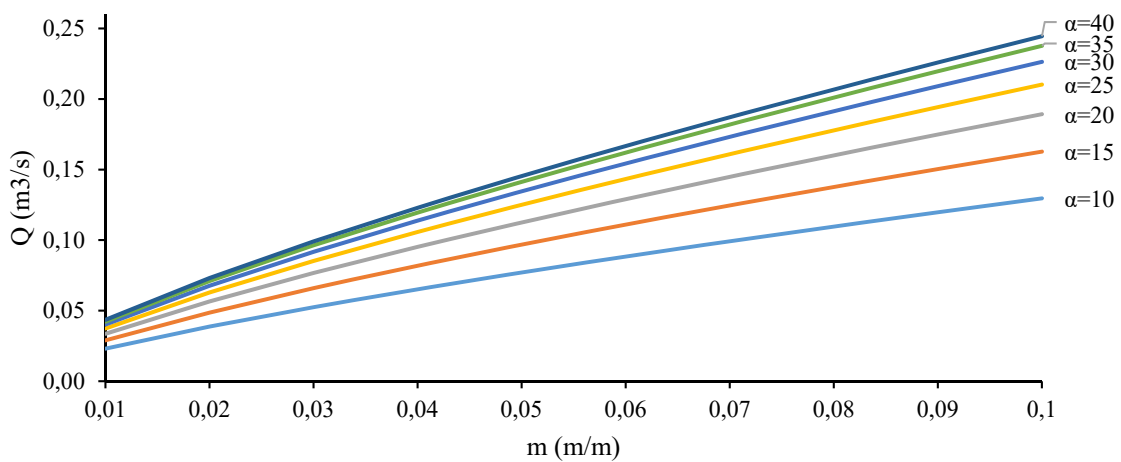


Figura 3.8: Caudal sólido longitudinal para Q3 em função de  $\alpha$ , quando  $d_{50}=0,3mm$  e  $H=2m$ .

### 3.4 Síntese de resultados

Foram identificadas 4 fórmulas para estimar o transporte sólido longitudinal. Numa análise genérica, o transporte aumenta com a altura de onda e com o ângulo de incidência da agitação, mas a ordem de grandeza dos resultados difere significativamente entre as



formulações. Em relação à altura da onda, a fórmula Q3 é a que tende a aumentar os valores de transporte sólido com a altura de onda de forma mais significativa, enquanto que, em relação ao ângulo de incidência, com o seu aumento, a fórmula que mais impacto teve foi a fórmula Q1.

O comportamento das formulações que consideram o  $d_{50}$  e o  $m$  é diferente, pelo que a resposta do caudal sólido a estas variáveis não é consensual.



## **Capítulo 4**

# **CAUDAIS SÓLIDOS NO NW PORTUGUÊS E CLIMA DE AGITAÇÃO EQUIVALENTE**



## 4 CAUDAIS SÓLIDOS NO NW PORTUGUÊS E CLIMA DE AGITAÇÃO EQUIVALENTE

Após identificadas as formulações de estimativa de transporte sólido longitudinal e o seu comportamento genérico em função da altura de onda e do ângulo de incidência da agitação, procedeu-se à sua aplicação ao clima de agitação registado na boia de Leixões, para avaliar o comportamento dos caudais sólidos no NW português.

Para tal, procedeu-se em primeiro lugar a uma revisão da literatura, para conhecer os valores indicativos dos caudais sólidos registados ao longo do litoral NW. A quantificação do transporte sedimentar associado aos rios que atinge as zonas costeiras é de importância crucial para a compreensão dos fenómenos de erosão (ou de migração das praias para o interior) bem como para a previsão da evolução desses fenómenos ao longo das próximas décadas (Coelho, 2005). Após a análise dos volumes de dragagens à entrada do porto de Leixões no período de 1953 a 1978, foi estimado que ao porto de Leixões e proveniente da costa a Norte chegaria um valor médio na ordem dos 150000 m<sup>3</sup>/ano a 180000 m<sup>3</sup>/ano (HP, 1981a). Segundo Bettencourt (1997), o fornecimento de sedimentos às áreas litorais diminuiu drasticamente nos últimos 30 anos, indicando os valores de 1.5 a 2 milhões m<sup>3</sup>/ano de sedimentos transportados pelo Douro até à foz, em regime natural e que esse valor é atualmente inferior a 250000 m<sup>3</sup>/ano. A retenção de sedimentos nas barragens associada ao à alteração do regime hidrológico dos rios é uma explicação que tem sido muito empregada. Analisando os dados de Oliveira (1990), mostra que o rio Douro perdeu cerca de 86% da sua capacidade de alimentação do litoral devido à construção das barragens. Por este motivo, a bacia que drena para o mar através do Douro diminuiu de forma muito significativa.

Procedeu-se a uma avaliação simplificada do efeito dos fenómenos de propagação da onda desde Leixões (considerados valores representativos ao largo do NW Português) até à zona de rebentação. Para tal, considerou-se o empolamento e a refração e adotou-se a profundidade de rebentação ( $\gamma_b$ ) igual a 0,78. A orientação da linha de costa foi de 15°.

Foram aplicadas as 4 formulações anteriormente apresentadas ao registo real de agitação de Leixões, para todos os anos disponíveis (1993-2003 e 2009-2014) e procedeu-se a uma

homogeneização do resultado líquido (transporte anual no sentido N-S, descontando o que ocorre no sentido S-N) dos caudais sedimentares para cada ano através da alteração de valores de alguns parâmetros presentes nas fórmulas Q1, Q2, Q3 e Q4. O objetivo deste procedimento teve em vista que os resultados líquidos dos caudais fossem o mais idêntico possível entre essas fórmulas, para cada ano analisado e se aproximassem dos valores referidos na literatura para o NW português ( $\approx 1,8 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano de caudal líquido). Chegou-se à conclusão que os valores constantes dos parâmetros seriam os presentes na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Valores adotados nos parâmetros presentes nas fórmulas, para homogeneização de resultados entre formulações.

$\gamma_b$	g (m/s <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	v (m <sup>2</sup> /s)	$K_b$	n	k
0,78	9,81	1027	2650	$1 \times 10^{-6}$	$4,2 \times 10^{-4}$	0,4	0,09

Tendo em consideração os resultados anteriores, foram também usados os valores da tabela 4.2 necessários a algumas fórmulas.

Tabela 4.2: Valores necessários a algumas fórmulas para homogeneização de resultados.

D*	Ws (m/s)	s	$\epsilon$	A (m <sup>1/3</sup> )	$C_f$	d <sub>50</sub> (mm)	m(m/m)
8,73	0,051	2,58	$2,6 \times 10^{-4}$	0,15	0,005	0,35	0,0005

Pela análise da tabela 4.1 e da tabela 4.2, conclui-se que os valores dos parâmetros adotados diferem por comparação aos valores dos parâmetros usados no subcapítulo 3.3, referidos habitualmente na bibliografia. Em termos físicos, considerou-se o  $d_{50}=0,35$ mm, com impacto direto no D\* e Ws e por sua vez no A. Considerou-se a inclinação da praia igual a 0,05%, valor menor do que o habitualmente admitido para o NW português. Os valores de  $K_b$  e k foram ajustados para controlar os resultados finais e consequentemente conseguir uniformizar os valores de caudais líquidos obtidos pelas 4 formulações em estudo, considerando-se que os parâmetros que foram alterados, poderiam ser modificados sem que com isso os resultados ficassem comprometidos, pelo que se estima aceitável que sejam utilizados os valores presentes na tabela 4.1 e na tabela 4.2.

## 4.1 Caudais de transporte sedimentar

Devido à alternância dos rumos da agitação, o transporte sedimentar tanto se pode dar no sentido N-S, como S-N, pelo que foi considerado cada um dos sentidos de transporte, bem como a soma dos dois (transporte total bruto) e a diferença dos dois (transporte sedimentar líquido). Para todos os anos fez-se uma proporção do número de registos de ondas para desta forma representar um ano completo, estimando-se a média dos caudais nos dois sentidos (N-S) e (S-N) e dos caudais brutos e líquido. Da tabela 4.3 à tabela 4.6 mostram-se os resultados obtidos.

Chegou-se à conclusão que 1993 foi o ano com maior transporte sedimentar, à exceção do sentido sul-norte, cujo ano 2010 foi mais elevado. Este resultado está relacionado com a direção das ondas. Como foi visto no capítulo 2, 1995 e 1993 foram os anos que registaram um maior número de ondas do quadrante nor-noroeste até noroeste, tendo sido estes dois anos os que transportaram maior caudal sedimentar líquido. O ano de 2001, obteve uma maior percentagem de ondas iguais ou inferiores a 2 metros de acordo com o capítulo 2, e conseqüentemente, também foi o ano que obteve um menor valor de caudal sedimentar líquido. As fórmulas menos conservativas variam consoante o ano em análise, mas são sempre a Q1 e Q3 que resultaram em valores maiores.

A tabela 4.3 mostra o caudal sedimentar no sentido sul-norte. O ano representativo (com valor mais próximo da média dos resultados anuais das 4 formulações) segundo este sentido de transporte, foi o ano 2003. 2010 obteve o caudal mais elevado e 1995 o menor. Olhando para todos os anos de registos, a fórmula Q1 foi a que obteve o caudal maior e também uma média mais alta, e por sua vez, o registo mínimo mais alto a par da fórmula Q3. Apesar de Q3, ser a fórmula cuja média de todos os anos deu um caudal mais baixo, e um valor máximo também mais pequeno, relativamente ao mínimo não foi a menor, tendo sido a fórmula Q2 e Q4 as que tiveram um registo mais baixo, com apenas  $0,01 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ .

Tabela 4.3: Transporte sedimentar longitudinal no sentido sul-norte ( $\times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ ).

<b>Ano</b>	<b>Q1</b>	<b>Q2</b>	<b>Q3</b>	<b>Q4</b>	<b>Média</b>
<b>1993</b>	0,31	0,28	0,14	0,29	0,26
<b>1994</b>	0,14	0,14	0,17	0,15	0,15
<b>1995</b>	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01
<b>1996</b>	0,37	0,34	0,23	0,33	0,32
<b>1997</b>	0,42	0,37	0,25	0,36	0,35
<b>1998</b>	0,15	0,13	0,12	0,12	0,13
<b>1999</b>	0,14	0,12	0,05	0,11	0,11
<b>2000</b>	0,16	0,13	0,03	0,12	0,11
<b>2001</b>	0,09	0,06	0,02	0,05	0,06
<b>2002</b>	0,32	0,32	0,40	0,37	0,35
<b>2003</b>	0,23	0,21	0,13	0,21	0,20
<b>2009</b>	0,27	0,23	0,11	0,21	0,21
<b>2010</b>	0,47	0,42	0,22	0,42	0,38
<b>2011</b>	0,18	0,16	0,08	0,16	0,15
<b>2012</b>	0,19	0,15	0,05	0,14	0,13
<b>2013</b>	0,32	0,29	0,20	0,32	0,28
<b>2014</b>	0,18	0,17	0,17	0,19	0,18
<b>Média</b>	0,23	0,21	0,14	0,21	0,20
<b>Máximo</b>	0,47	0,42	0,40	0,42	0,38
<b>Mínimo</b>	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01

Como se pode ver na tabela 4.4, o ano de 1993 é maior em termos de caudal sólido no sentido norte-sul. Por outro lado, 2001 teve o registo mais baixo, com apenas  $0,71 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ . Relativamente aos registos dos vários anos, a fórmula Q1 foi a que deu um valor maior em termos de média e mínimo, mas em termos de caudal máximo, a fórmula Q4 foi a que deu um valor mais elevado. Q3, resultou num caudal com a média mais baixa e por sua vez num valor mínimo mais pequeno.



Tabela 4.4: Transporte sedimentar longitudinal no sentido norte-sul ( $\times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano).

<b>Ano</b>	<b>Q1</b>	<b>Q2</b>	<b>Q3</b>	<b>Q4</b>	<b>Média</b>
<b>1993</b>	3,70	3,77	3,56	3,92	3,74
<b>1994</b>	2,41	2,40	2,71	2,54	2,52
<b>1995</b>	3,23	3,12	2,68	3,22	3,06
<b>1996</b>	1,49	1,32	8,17	1,27	1,22
<b>1997</b>	1,19	1,07	7,94	1,05	1,03
<b>1998</b>	1,89	1,78	1,72	1,81	1,80
<b>1999</b>	2,00	1,85	1,49	1,84	1,80
<b>2000</b>	2,40	2,35	2,47	2,30	2,38
<b>2001</b>	1,03	0,81	0,32	0,69	0,71
<b>2002</b>	1,74	1,56	1,27	1,49	1,52
<b>2003</b>	1,54	1,45	1,52	1,52	1,51
<b>2009</b>	2,26	2,32	2,74	2,55	2,47
<b>2010</b>	1,59	1,50	1,34	1,61	1,51
<b>2011</b>	2,13	1,97	1,57	1,93	1,90
<b>2012</b>	1,87	1,70	1,10	1,63	1,58
<b>2013</b>	2,16	2,07	1,88	2,15	2,06
<b>2014</b>	2,64	2,75	3,84	3,09	3,08
<b>Média</b>	2,07	1,99	1,87	2,04	1,99
<b>Máximo</b>	3,70	3,77	3,84	3,92	3,74
<b>Mínimo</b>	1,03	0,81	0,32	0,69	0,71

Relativamente ao transporte sedimentar líquido, a tabela 4.5 mostra que o ano mais próximo da média foi o ano 2013, considerando-se esse ano como o ano representativo. O ano de 1993 foi mais uma vez o que originou o caudal sólido mais alto, enquanto que 1997 e 2001 foram os anos com registos de caudais mais baixos. Em termos de resultados dos caudais sólidos dos anos referentes, a fórmula Q1 foi novamente a que deu um caudal superior relativamente à média e ao mínimo e Q3 o oposto.

Tabela 4.5: Transporte sedimentar longitudinal líquido ( $\times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano).

<b>Ano</b>	<b>Q1</b>	<b>Q2</b>	<b>Q3</b>	<b>Q4</b>	<b>Média</b>
<b>1993</b>	3,38	3,49	3,43	3,63	3,48
<b>1994</b>	2,27	2,26	2,54	2,39	2,37
<b>1995</b>	3,21	3,11	2,67	3,21	3,05
<b>1996</b>	1,12	9,80	0,58	0,93	0,90
<b>1997</b>	0,77	0,70	0,55	0,69	0,68
<b>1998</b>	1,73	1,66	1,60	1,70	1,67
<b>1999</b>	1,86	1,74	1,44	1,72	1,69
<b>2000</b>	2,24	2,22	2,44	2,18	2,27
<b>2001</b>	0,94	0,74	0,29	0,64	0,65
<b>2002</b>	1,42	1,24	0,88	1,12	1,16
<b>2003</b>	1,30	1,24	1,39	1,31	1,31
<b>2009</b>	1,99	2,09	2,63	2,34	2,26
<b>2010</b>	1,12	1,08	1,12	1,19	1,13
<b>2011</b>	1,94	1,81	1,49	1,76	1,75
<b>2012</b>	1,68	1,55	1,05	1,49	1,44
<b>2013</b>	1,84	1,78	1,68	1,83	1,78
<b>2014</b>	2,45	2,59	3,67	2,90	2,90
<b>Média</b>	1,84	1,78	1,73	1,83	1,79
<b>Máximo</b>	3,38	3,49	3,67	3,63	3,48
<b>Mínimo</b>	0,77	0,70	0,29	0,64	0,65

A tabela 4.6 faz referência ao caudal sedimentar bruto, onde 1993 registou o valor máximo e 2001 o mínimo. Fazendo uma comparação entre as formulações, analisando todos os anos de registos, Q1 foi uma vez mais a fórmula cujo caudal deu maior em relação à média e ao mínimo e Q3 a fórmula com caudal médio e mínimo mais baixo.

Resumindo, os resultados dos valores das tabelas em termos de caudais máximos e mínimos são muito semelhantes, tendo sido sempre 1993 o ano que registou valores mais elevados e 2001 o ano que registou valores de caudais mais baixos, excetuando o sentido de transporte sul-norte, em que 2010 foi ano que registou o máximo e 1995 o mínimo. Como visto no capítulo 2, em 1993 e 1995 foram contabilizados poucos registos (falta de dados devido ao ondógrafo não ter efetuado o registo durante o ano completo), em comparação com os restantes anos, e para além disso, esses registos foram contabilizados em época de inverno, o que levou a um acréscimo das alturas de onda. Sendo assim, estes dois anos poderiam ter sido anulados, uma vez que estão a empolar os resultados.

Tabela 4.6: Transporte sedimentar longitudinal bruto ( $\times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano).

<b>Ano</b>	<b>Q1</b>	<b>Q2</b>	<b>Q3</b>	<b>Q4</b>	<b>Média</b>
<b>1993</b>	4,01	4,04	3,70	4,21	3,99
<b>1994</b>	2,55	2,54	2,89	2,69	2,67
<b>1995</b>	3,24	3,14	2,70	3,24	3,08
<b>1996</b>	1,87	1,66	1,05	1,60	1,54
<b>1997</b>	1,60	1,43	1,04	1,41	1,37
<b>1998</b>	2,04	1,91	1,84	1,93	1,93
<b>1999</b>	2,15	1,97	1,53	1,95	1,90
<b>2000</b>	2,56	2,47	2,51	2,42	2,49
<b>2001</b>	1,11	0,87	0,34	0,74	0,77
<b>2002</b>	2,06	1,88	1,67	1,87	1,87
<b>2003</b>	1,77	1,66	1,65	1,73	1,70
<b>2009</b>	2,53	2,54	2,86	2,76	2,67
<b>2010</b>	2,06	1,91	1,56	2,03	1,89
<b>2011</b>	2,31	2,13	1,64	2,09	2,04
<b>2012</b>	2,06	1,85	1,15	1,78	1,71
<b>2013</b>	2,48	2,37	2,07	2,47	2,35
<b>2014</b>	2,82	2,92	4,01	3,27	3,26
<b>Média</b>	2,31	2,19	2,01	2,25	2,19
<b>Máximo</b>	4,01	4,04	4,01	4,21	3,99
<b>Mínimo</b>	1,11	0,87	0,34	0,74	0,77

Na figura 4.1, são apresentados 4 gráficos, comparando os caudais no sentido N-S e S-N, e os caudais brutos e líquidos, com as 4 formulações apresentadas anteriormente. Comparativamente aos valores dos caudais brutos, líquidos e no sentido N-S, as 4 formulações apresentam resultados muito semelhantes, distinguindo-se um pouco os valores dos caudais líquidos, que apresentam em alguns anos resultados menos consistentes. Isto significa que o sentido de transporte maioritário ocorre de Norte para Sul, uma vez que atentando ao gráfico do caudal no sentido S-N, apresenta valores muito mais baixos comparando com os outros gráficos. A fórmula Q3 é a que apresenta valores mais baixos para os 4 tipos de caudais, e as fórmulas Q2 e Q4 são as que estão mais adjacentes.

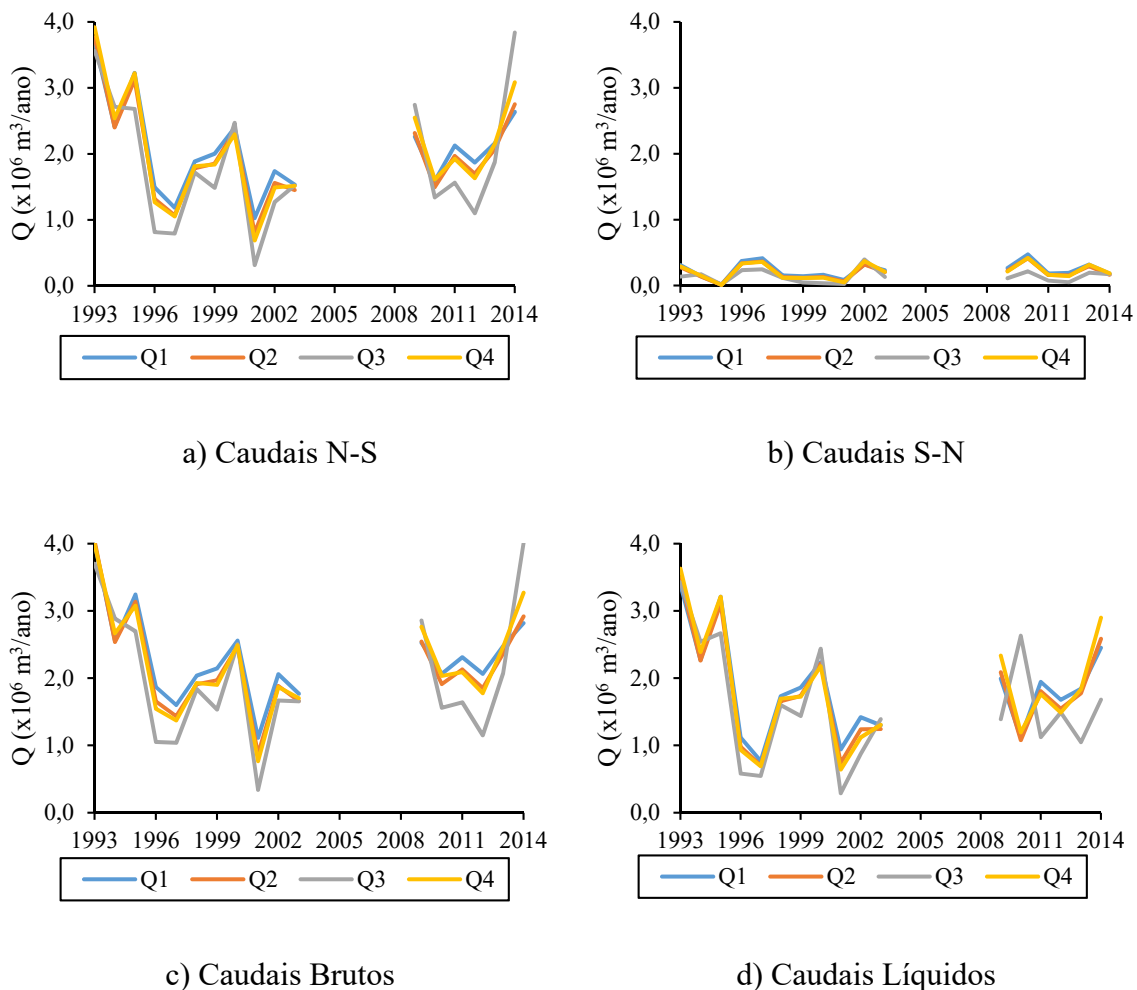


Figura 4.1: Comparação de caudais ente as 4 formulações.

Na figura 4.2, apresentam-se os caudais sólidos que resultam da média aritmética obtida da aplicação das 4 formulações em estudo. Pode visualizar-se que o caudal sólido no sentido sul-norte apresenta valores abaixo dos  $0,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ , com peso reduzido, porque normalmente as ondas não ocorrem nesta direção e consequentemente não transportam sedimentos para norte.

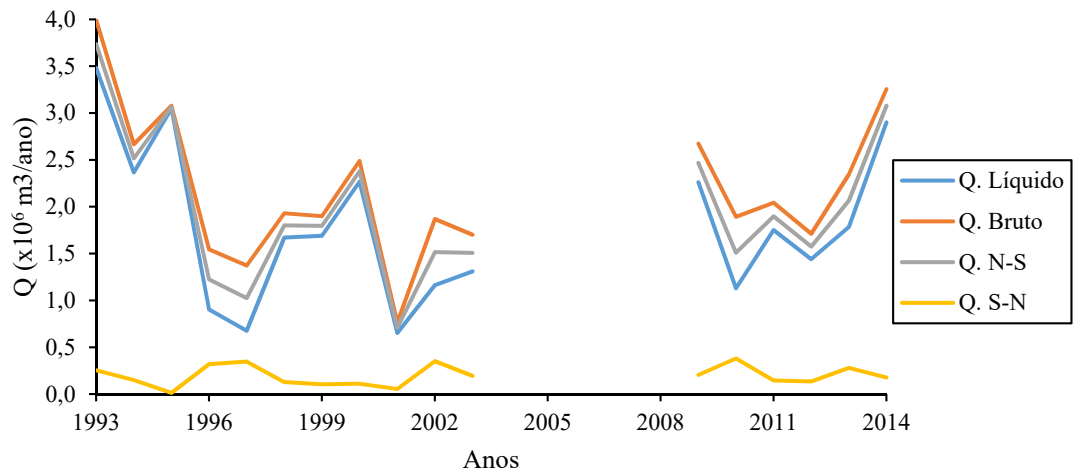


Figura 4.2: Caudais da média de registos por ano.

## 4.2 Onda simples

No sentido de obter o valor médio líquido do caudal sólido equivalente ao exposto na secção anterior com recurso apenas a uma onda simples, considerou-se uma onda isolada que ao fim de um ano produzisse o mesmo efeito médio de transporte sedimentar líquido.

Nas quatro formulações adotou-se um ângulo de incidência da agitação com a linha de costa de 10 graus e igualando o resultado de cada fórmula ao valor da média das médias do caudal sedimentar líquido, obtiveram-se as alturas de onda presentes na tabela 4.7:

Tabela 4.7: Onda isolada que tem o mesmo efeito médio ao fim de um ano.

Fórmula	Q1	Q2	Q3	Q4
H (m)	2,05	2,28	3,90	2,60

A fórmula Q1 foi a que originou numa onda mais baixa para chegar aos  $1,79 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  (valor da média dos resultados anuais das 4 formulações referente ao transporte sedimentar longitudinal líquido) e a fórmula Q3 a que resultou numa onda mais alta para chegar à mesma quantidade de transporte por ano. Conclui-se portanto, que uma onda entre 2,05 e 2,6 metros de altura consegue produzir os mesmos efeitos ao fim de um ano, à exceção da fórmula Q3, que é necessária uma onda de 3,9 metros. Estes resultados vão ao encontro da análise de sensibilidades efetuada no capítulo 3, onde a fórmula Q1 é a que possui valores de transporte

sólido maiores para alturas de onda até 6 metros e a fórmula Q3 a par da Q4 são as que possuem valores de transporte sólido menores, para alturas de onda na ordem dos 2 metros.

### 4.3 Classes de onda

Num processo similar ao apresentado na secção anterior, mas considerando 3 ondas e duas direções (permitindo representar transporte em ambos os sentidos), avaliaram-se as classes de onda representativas do clima de agitação de Leixões. Foi possível obter os mesmos resultados das médias dos caudais nas direções norte-sul e sul-norte e caudais líquidos e brutos. Definiu-se 3 ondas, uma com 1 metro de altura, outra com 4 e outra com 5 metros a atuarem na direção de 10, -5 e 10 graus respetivamente. Encontraram-se as percentagens de ocorrência representativas dos valores médios pretendidos, como mostra a tabela 4.8:

Tabela 4.8: Frequências de classes onda que levam ao mesmo transporte.

H (m)	$\alpha$ (o)	Q1 (%)	Q2 (%)	Q3 (%)	Q4 (%)
1	10	79,5%	80,4%	48,7%	72,7%
4	-5	5,6%	5,4%	15,2%	7,3%
5	10	15,0%	14,3%	36,1%	20,0%

Todos os climas de agitação com as respetivas frequências de ocorrência, garantem os valores dos caudais considerados representativos (tabela 4.9).

Tabela 4.9: Caudais tidos como referência para definir as classes de onda ( $\times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ ).

Q <sub>N-S</sub>	Q <sub>S-N</sub>	Q <sub>líquido</sub>	Q <sub>bruto</sub>
1,99	0,19	1,79	2,19

De acordo com a tabela 4.8, a onda com 1 metro de altura e 10 graus de incidência com a linha de costa, é a que possuiu frequências de ocorrência maiores enquanto que a onda de 4 metros de altura e com um ângulo de incidência de -5 graus possui frequências mais baixas, como era esperado.

## **Capítulo 5**

### **APLICAÇÃO DO LTC**





## 5 APLICAÇÃO DO LTC

O modelo LTC (Long Term Configuration) é um modelo numérico de simulação da evolução da fisiografia costeira a médio prazo, para apoio à gestão e ao planeamento das zonas costeiras. Como refere Coelho (2005), é um modelo de projeção de evolução da costa num horizonte de dezenas de anos, com o objetivo de auxiliar os órgãos de planeamento na tomada de decisões e os projetistas na compreensão do comportamento de intervenções de defesa costeira propostas. Trata-se de um modelo sensível a diferentes tipos de intervenções humanas (quebramares, esporões, obras longitudinais aderentes, alimentação artificial com areias, dragagens) e com a possibilidade de considerar diversos cenários de combinação de ações naturais dinâmicas (marés, ondulação, variação do nível médio do mar, fluxos sedimentares).

Este modelo possibilita a leitura de um ficheiro para caracterização do clima de agitação, de acordo com o definido por um código introduzido pelo utilizador. O código permite ao utilizador traduzir a simulação do efeito de uma onda de características constantes ao longo do processo de cálculo ou então, ondas de características variáveis de acordo com um ano típico de agitação (seguindo um espectro pré-definido). Uma terceira hipótese permite definir um clima de agitação aleatório, gerado num intervalo de alturas de onda limitado pelos valores mínimo e máximo e com a proveniência das ondas também limitada ao quadrante escolhido pelo utilizador. O utilizador do modelo também pode optar por introduzir um clima de agitação efetivamente registado em determinado local, através da reprodução dos registos de uma base de dados de uma boia ondógrafo. Em todos os casos, estas características das ondas são consideradas ao largo e iguais em toda a extensão litoral a modelar, pelo que no processo de cálculo se procede à transformação das características da agitação, durante a sua propagação até à costa (Coelho, 2005). O modelo LTC permite estimar o volume potencial de transporte de sedimentos por aplicação da fórmula de CERC ou da fórmula de Kamphuis *et al.* (1986), com base nas características da agitação na rebentação.

A utilização do modelo numérico pretende testar o efeito dos diferentes climas de agitação que resultaram das análises anteriores, de maneira a avaliar a posição da linha de costa ao longo do tempo num horizonte temporal de 10 anos.

## 5.1 Caracterização da zona de estudo

Para avaliação do efeito na posição da linha de costa de climas de agitação semelhantes em termos de capacidade de transporte sólido, definiu-se um trecho costeiro genérico. Optou-se por considerar no modelo a fórmula de CERC (equação 3.9) que apenas obriga ao conhecimento dos parâmetros da onda na rebentação. Para a formulação de Kamphuis *et al.* (1986), seria necessário estimar a inclinação dos fundos e as características dos sedimentos na zona em estudo, o que introduziria mais variáveis e incertezas nos resultados.

Realizaram-se 3 cenários de simulações, variando o clima de agitação. Primeiro fez-se a modelação no LTC para a altura de onda representativa (onda simples) da fórmula de CERC, com uma altura de 2,28 metros, presente na tabela 4.7. Depois consideraram-se as frequências de classes de onda que levam ao mesmo transporte da tabela 4.8 e por fim usou-se o clima real de agitação marítima registado no ano considerado representativo em termos de transporte sólido longitudinal (2013). Na simulação feita para as classes de onda, houve a necessidade de simplificar os rumos e as alturas de onda, uma vez que o programa não permite introduzir de forma detalhada pormenorizadas classes de alturas e rumos, e respetivas frequências de ocorrência, de acordo com o critério livre do utilizador. O programa gera ondas aleatórias dentro dos quadrantes de rumo, e o mesmo acontece para as alturas de onda, por isso considerou-se um regime equivalente em termos médios, distribuindo 59% das ondas no quadrante W e 41% no quadrante WNW.

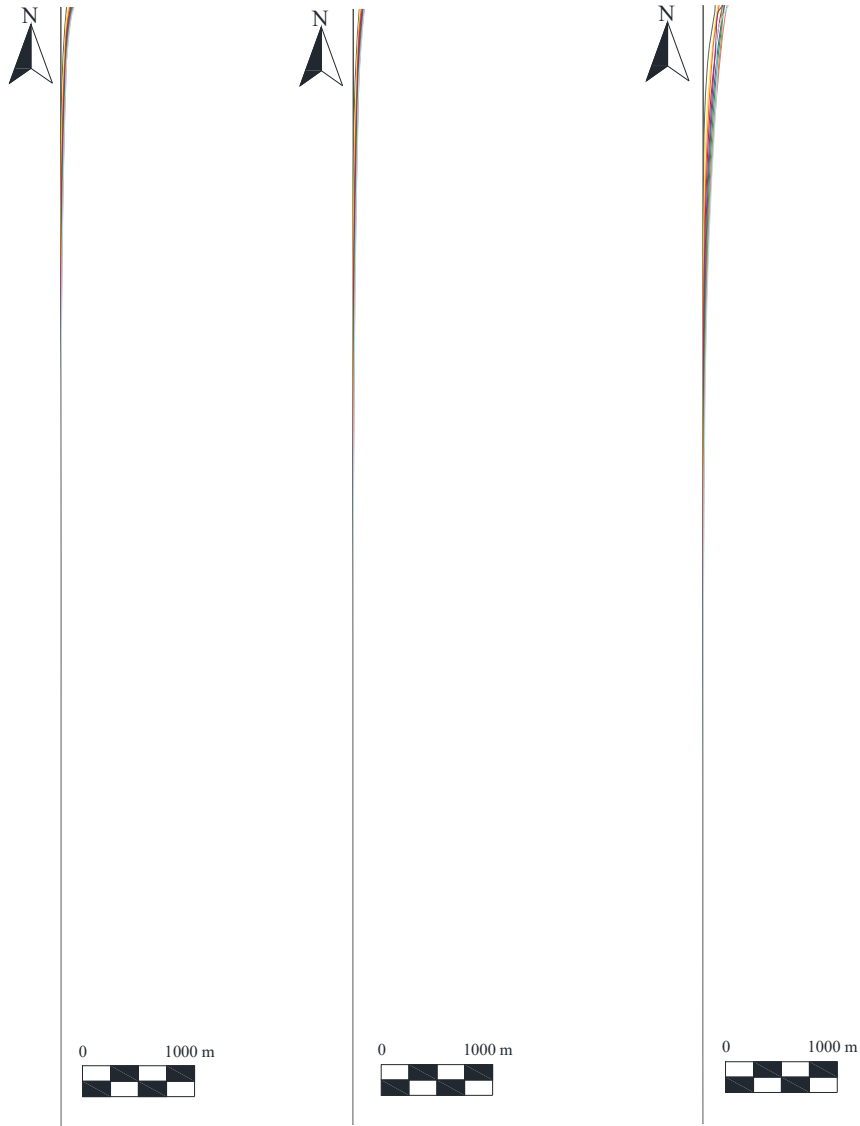
Nas simulações realizadas no modelo, os valores dos parâmetros adotados foram os que resultaram da homogeneização feita no capítulo 4. Considerou-se a aceleração da gravidade igual a  $9,81\text{m/s}^2$ , o coeficiente empírico igual a 0,09, a massa volúmica da água do mar de  $1027\text{kg/m}^3$ , a massa volúmica dos sedimentos igual a  $2650\text{kg/m}^3$ , uma porosidade dos sedimentos de 0,4, um índice de rebentação de 0,78, um coeficiente de viscosidade cinemática de  $1 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$  e um diâmetro mediano efetivo igual a 0,35mm. Para representar

a zona de estudo, adotou-se uma malha de pontos de  $20 \times 20 \text{m}^2$  e respetiva dimensão do trecho em análise de  $8 \times 10 \text{km}^2$ . O nível de maré e da superfície livre da água do mar considerou-se constante e relativamente às condições fronteira, assumiu-se que a norte, o volume de sedimentos a entrar na área modelada era nulo e a sul, o volume que sai da área de simulação corresponde ao que resulta do transporte gerado pela agitação marítima na zona vizinha. Durante a simulação dos 3 cenários considerou-se um valor constante para a profundidade de fecho (DoC) e para o ponto de máximo espraiamento (Runup), admitindo-se um valor de 17m e 7m, respetivamente.

## 5.2 Resultados

Nesta secção são apresentados os resultados referentes às 3 simulações efetuadas através do programa LTC. Para cada cenário foi representada a posição da linha de costa bem como os recuos da zona costeira ao longo de 10 anos de simulação, e procedeu-se à comparação da posição da linha de costa obtida em cada cenário, com o objetivo da procura de semelhanças de resultados.

Na figura 5.1, apresenta-se a configuração da linha de costa para os 3 cenários simulados, ao longo dos 10 km de extensão do litoral. Por comparação da evolução da linha de costa para os 3 cenários, tanto para a onda equivalente como para as classes de onda, o recuo da costa é muito semelhante. Todavia, relativamente aos resultados obtidos para o ano representativo, este apresenta alguma variabilidade e recuos da posição da linha de costa com uma ordem de grandeza superior. Constata-se também, que à medida que se avança para sul, a linha de costa permanece mais constante e cada vez mais próxima do ano inicial.



a) Onda equivalente    b) Classes de onda    c) Ano representativo (2013)

Figura 5.1: Evolução da linha de costa para 10 anos de simulação.

A figura 5.2 compara em planta, a evolução da linha de costa para os 10 anos em que foi efetuada a modelação no programa LTC e para os 3 cenários apresentados. Para alcançar mais detalhe em relação à posição da linha de costa e analisar o recuo ao longo do tempo, evidenciou-se os primeiros 500m na zona norte, já que foi neste troço que houve mais variabilidade e taxas de recuo superiores.

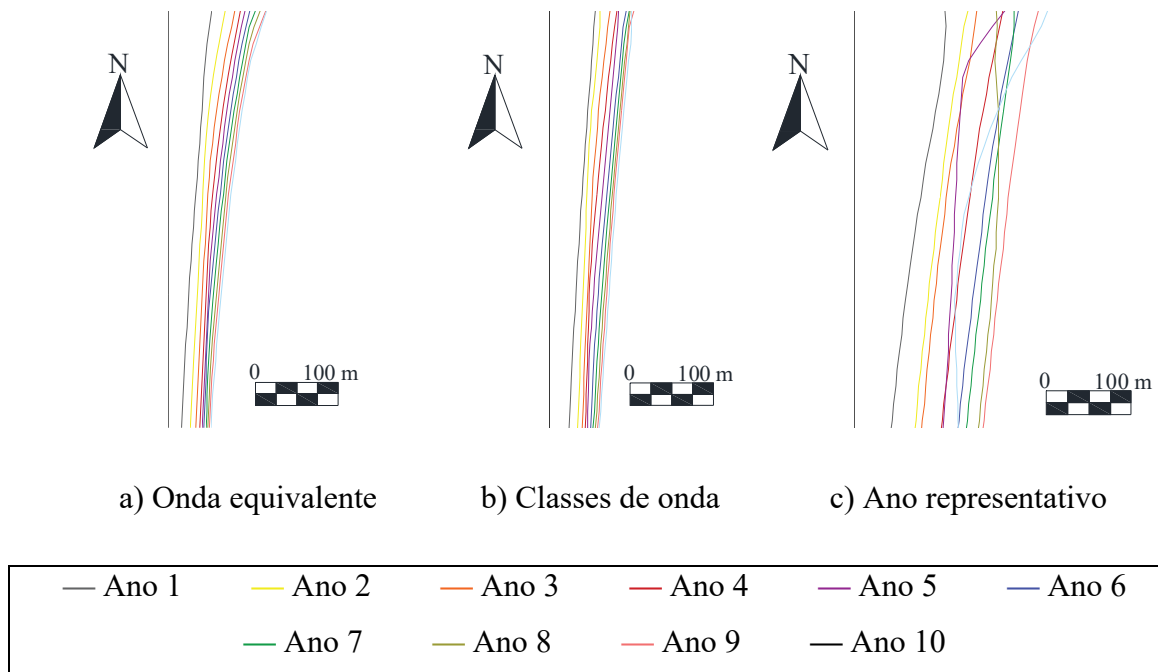


Figura 5.2: Pormenor da evolução da linha de costa para 10 anos de simulação, focalizado na zona norte (km 10)

Comparando a posição da linha de costa obtida nos cenários com a onda equivalente e com as classes de onda, efetivamente há uma grande semelhança nos resultados, apesar de ao km 10, o recuo registado ser superior na simulação que resulta das classes de onda. O ano representativo, apresenta uma grande variabilidade na posição da linha de costa ao longo do tempo e taxas de recuo superiores aos dos outros 2 cenários.

Assim, apesar do clima de agitação ser equivalente em termos de capacidade de transporte longitudinal, desde logo se verifica que o impacto na posição da linha de costa é diferente. Na figura 5.3 é apresentado o recuo da linha de costa em função do tempo. Foi feita a divisão da extensão da linha de costa em trechos de 2 em 2km, sendo apresentados os resultados aos 6km, 8km e 10km. Ao longo dos 10 anos, verifica-se um aumento do recuo da posição da linha de costa, apresentando valores de recuo maiores quanto mais a norte se estiver a proceder a análise.

Para a onda equivalente, o quilómetro 10, situado mais a norte, é o mais crítico, apresentando já no primeiro ano um recuo de cerca de 53m, e aumentando gradualmente com o tempo chegando ao ano 10 com um avanço de 119m em relação à posição inicial. Ao quilómetro 8, a variação da posição da linha de costa também apresenta alguma deformação,

evidenciando-se mais no ano 10, com um recuo de 15m. A partir desse trecho para sul, não se verificam grandes alterações na posição da linha de costa, apresentando recuos muito pouco significativos.

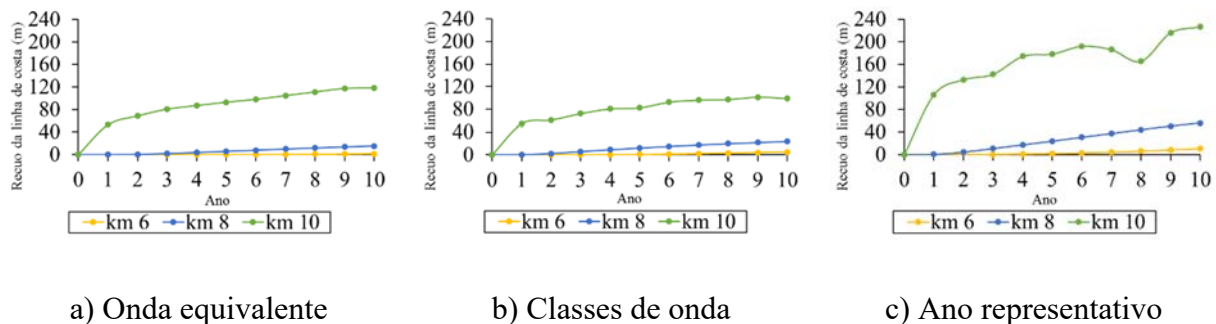


Figura 5.3: Recuo da linha de costa modelando a onda equivalente no LTC.

A Figura 5.3b mostra o recuo da linha de costa no tempo, para a simulação do cenário de classes de ondas. Os resultados mostram que o recuo evolui ao longo dos 10 anos, sendo mais uma vez a zona norte (km 10) a mais afetada, com cerca de 55m de avanço no primeiro ano, evoluindo até 98m no ano 10. Nota-se que o recuo máximo atingido não foi obtido no último ano de simulação, mas sim no nono. A regressão do recuo entre estes dois anos foi de cerca de 3m. A secção transversal à linha de costa ao km 8 possui uma variação significativa e ao km 6, o aumento do recuo foi constante, sem grandes alterações na linha de costa com o tempo. No ano 10, a linha de costa recuou cerca de 24 e 5 metros, para o km 8 e 6 respetivamente.

A figura 5.3c, correspondente ao recuo da linha de costa relativa à modelação do ano representativo. Ao km 10, o recuo apresenta grandes irregularidades no tempo, havendo anos em que a posição da linha de costa se deslocou de uma forma mais rápida do que noutros anos, como é exemplo entre o ano 3 e 4 e o ano 8 e 9. Neste cenário, houve taxas de recuo significativas, chegando a cerca de 230m na zona mais a norte, no ano 10. No trecho referente ao km 8 e km 6, os recuos estimados estão na ordem dos 56 e 10m respetivamente, ou seja, valores bem superiores aos dos 2 cenários anteriores. Na zona a sul da secção transversal situada ao km 6, a linha de costa mantém praticamente a posição inicial.

Com vista a uma comparação mais clara entre os 3 cenários, a figura 5.4 mostra os recuos da posição da linha de costa de cada cenário ao longo do tempo. Tanto os resultados da onda

equivalente, como os das classes de onda, têm taxas de recuo muito semelhantes, sendo o cenário relativo à onda equivalente o mais regular. O ano representativo é aquele que se evidencia mais, apresentando um comportamento mais irregular no tempo e valores superiores, com recuos quase duas vezes maiores do que para os outros 2 cenários. Todos os cenários vão aumentando gradualmente os recuos ao longo dos anos. O recuo médio da linha de costa no cenário da onda equivalente, classes de onda e ano representativo para a zona mais a norte é de 12, 10 e 23 metros por ano respetivamente.

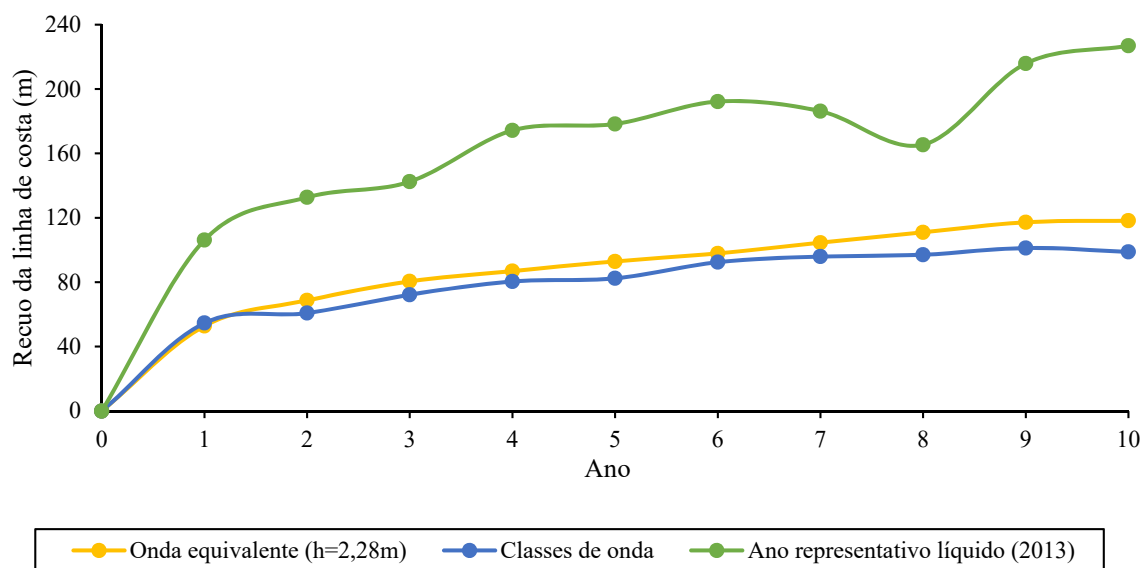


Figura 5.4: Recuos da linha de costa relativamente aos 3 cenários no km mais a norte (km 10).

A figura 5.5 representa a comparação dos 3 cenários ao km 8 relativamente aos recuos da posição da linha de costa. A relação entre cada cenário nesta secção transversal está mais próxima entre si, mas apresentando algumas diferenças. Todos os cenários aumentam o recuo da posição da linha de costa de uma forma linear, no entanto a onda equivalente evidencia-se mais, com recuos cerca de 2 vezes superiores ao cenário das classes de onda e cerca de 4 vezes superiores ao cenário do ano representativo. O recuo médio da linha de costa no cenário da onda equivalente, classes de onda e ano representativo na zona do quilómetro 8 é de 1,5, 2,4 e 5,5 metros por ano, respetivamente.

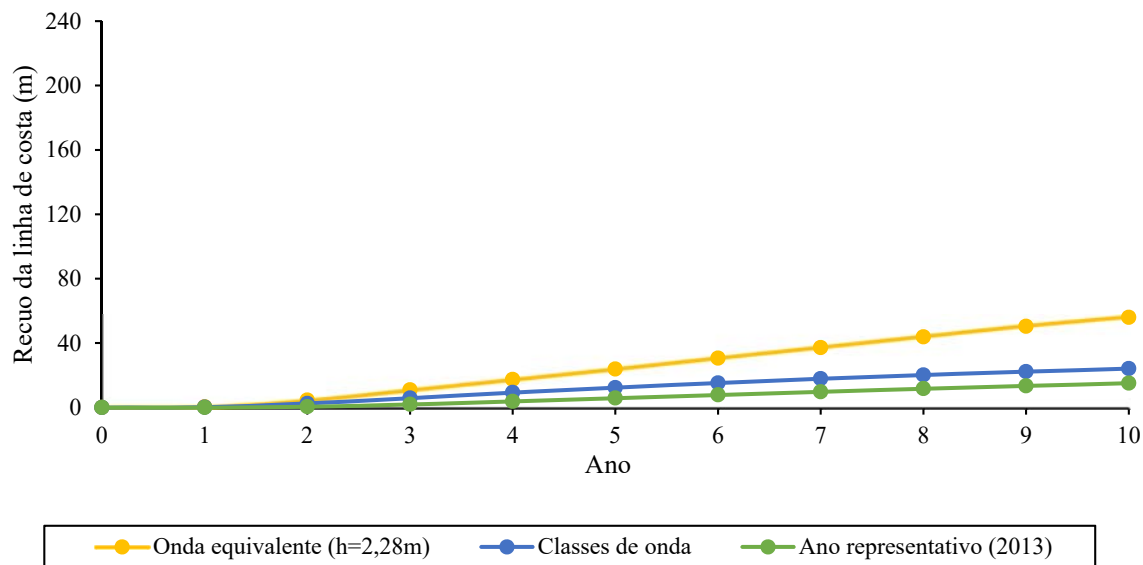


Figura 5.5: Recuos da linha de costa relativamente aos 3 cenários no km 8.

Relativamente ao recuo da linha de costa ao km 6, a figura 5.6 mostra que os 3 cenários tornam-se mais semelhantes entre si, evidenciando-se mais o cenário referente ao ano representativo no tempo. A posição da linha de costa só evolui a partir do ano 9 para o cenário da onda equivalente, enquanto que para os outros 2 cenários, a posição da linha de costa começa a ser afetada no ano 3. As médias de recuos da linha de costa por ano ao quilómetro 6 é muito baixa, e varia entre 0,14 metros para o cenário da onda equivalente e 1 metro para o ano representativo. O cenário referente às classes de onda, possui uma média de recuos de cerca de 0,5 metros por ano.

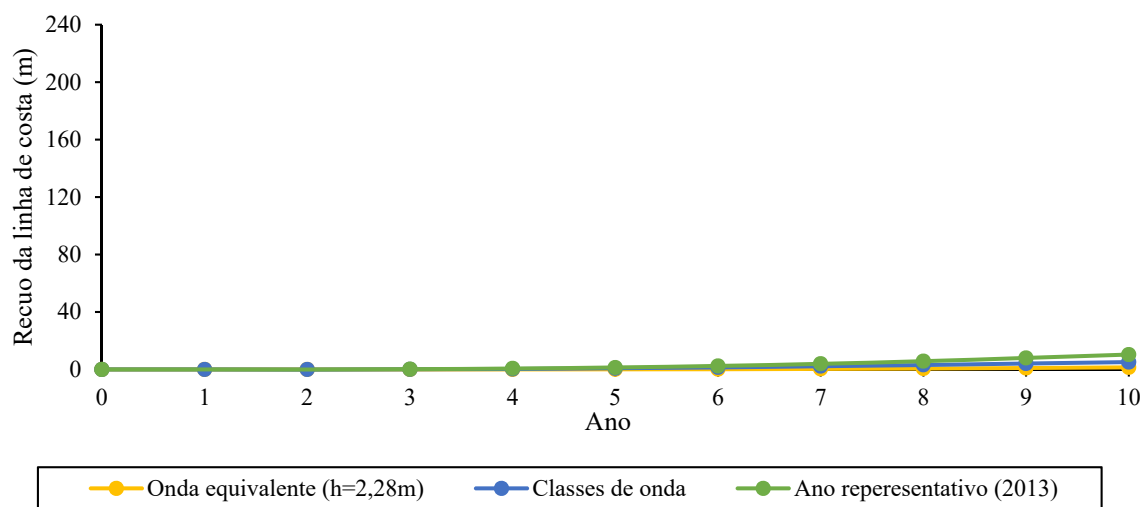


Figura 5.6: Recuos da linha de costa relativamente aos 3 cenários no km 6.



Para os 3 cenários analisados, recorrendo ao LTC, foi possível modelar a linha de costa para um período de 10 anos. A posição da linha de costa referente ao ano representativo foi o que apresentou maiores instabilidades e recuos mais significativos ao km 10 e ao km 6, devido ao seu clima de agitação. No entanto, ao km 8, o cenário referente à onda equivalente, evidenciou-se mais. Tanto o clima de agitação referente à onda simples como às classes de onda, foram muito semelhantes exprimindo recuos muito próximos entre si. Os 3 cenários estudados, são equivalentes em termos de capacidade de transporte longitudinal como visto no capítulo 4, apesar de não evoluírem para posições de linha de costa iguais. De facto, em relação à onda equivalente e às classes de onda, os valores apresentam alguma concordância, o mesmo não se verificou para o ano representativo.



## **Capítulo 6**

### **CONSIDERAÇÕES FINAIS**



## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este capítulo apresenta um resumo de todo o trabalho desenvolvido, destacando as principais conclusões e propostas de desenvolvimentos futuros.

Nesta dissertação comparam-se diferentes formulações para estimar o transporte sólido longitudinal em função das características de agitação. Procedeu-se ao estudo e avaliação estatística da base de dados do clima de agitação da série de registos da boia ondógrafo de Leixões. Foram definidas classes de onda e respetivas frequências de ocorrência, temporais e sequência de agitação representativas do clima de agitação registado em Leixões. Obtiveram-se climas de agitação equivalente, com a mesma capacidade de transporte sólido longitudinal em ano médio, classes de onda e onda equivalente, com vista a simplificar a análise de resultados de vários anos de simulações numéricas. Com esses 3 cenários, modelou-se recorrendo ao programa LTC a evolução da linha de costa para um troço genérico com 10 km de extensão e avaliou-se o impacto que cada cenário tem na posição da linha de costa.

### **6.1 Conclusões**

O principal pressuposto que serviu de base à elaboração deste trabalho, foi a modelação de casos genéricos de diferentes cenários de agitação, para avaliar o impacto na posição de equilíbrio da linha de costa. Esta modelação considera-se importante sob o ponto de vista do planeamento e de projeto das intervenções de defesa costeira. Com a simplificação da agitação real dos registos da boia ondógrafo de Leixões, foi possível chegar ao mesmo caudal de transporte sólido longitudinal, através de climas de agitação equivalentes. Percebeu-se o impacto de diferentes regimes de agitação na capacidade de transporte sedimentar e esses regimes de agitação foram representados de forma simples, por um clima de agitação equivalente, comparando-se vários cenários para ver se produziam o mesmo efeito em termos de evolução da linha de costa, recorrendo ao programa LTC.

Através da boia ondógrafo de Leixões, procedeu-se à recolha de dados relativos à altura de ondas, período de ondulação e direção de proveniência. Considerou-se 17 anos, entre 1993 a 2003 e de 2009 a 2014, e foram analisadas 33170 ondas, dando uma média de 1951 ondas por ano. A altura média das ondas durante estes anos foi de 2,01 metros e o rumo 304,31 graus, correspondendo a uma direção predominante entre noroeste e oés-noroeste. Os anos de 1993 e 1995 apresentaram alturas de onda médias muito elevadas, e isto deve-se ao facto de para além de haver poucos registos nesses anos, estes corresponderem à época do inverno, o que empola os resultados. A razão destes dois anos não terem sido retirados da análise efetuada, foi para permitirem que mais dados fossem estudados, uma vez que os registos disponibilizados pelo ondógrafo de Leixões, corresponderem apenas a 17 anos. O ano de 2001 foi o que apresentou uma altura média de onda mais baixa. Verificou-se também, que ao longo do tempo, as alturas de onda inferiores ou iguais a 2 metros de altura são mais frequentes e a partir de 4 metros só ocorrem em casos pontuais, como tempestades.

Verificou-se a adequabilidade das formulações de Inman e Bagnold (1963), CERC (1984), Kamphuis (1991) e Bayram *et al.* (2007) para estimativa do transporte sólido longitudinal, fazendo-se uma análise de sensibilidade genérica com diferentes alturas e direções da onda de forma a comparar os resultados entre as fórmulas. Numa análise genérica, o transporte aumenta com a altura de onda e com o ângulo de incidência da agitação, mas a ordem de grandeza dos resultados difere significativamente entre as formulações. Em relação à altura da onda, a fórmula de Kamphuis (1991) é a que tende a aumentar os valores de transporte sólido com a altura de onda de forma mais significativa, enquanto que, em relação ao ângulo de incidência, a fórmula que mais influencia sofre com o aumento do ângulo é a fórmula de Inman e Bagnold (1963). O comportamento das formulações que consideram o  $d_{50}$  e o  $m$  é diferente, pelo que a resposta do caudal sólido a estas variáveis não é consensual.

Aplicaram-se as 4 formulações identificadas anteriormente, de estimativa de transporte sólido longitudinal ao clima de agitação registado na boia ondógrafo de Leixões, para avaliar o comportamento dos caudais sólidos no NW português e procedeu-se a uma homogeneização do resultado líquido dos caudais sedimentares para cada ano, ajustando os valores de  $k_b$  e  $k$ , e considerando uma inclinação da praia um pouco menor do que o habitual. Este processo, resultou em caudais líquidos idênticos entre as formulações com o objetivo de se aproximarem dos valores referidos na literatura para o NW português ( $\approx 1,8 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano

de caudal líquido). Através deste método obtiveram-se resultados de caudais sólidos máximos e mínimos muito semelhantes. O ano de 1993 registou valores mais elevados (devido a haver poucos registos, e os que existem serem referentes maioritariamente à época de inverno) e 2001 o ano que registou valores de caudais mais baixos, excetuando o sentido de transporte sul-norte, em que 2010 foi o ano que registou o máximo e 1995 o mínimo. Também se concluiu que o sentido de transporte sedimentar no litoral português ocorre a maior parte das vezes no sentido norte-sul, e o sentido oposto apresenta caudais muito inferiores. A fórmula de Kamphuis (1991), foi a que apresentou valores mais baixos para os caudais N-S, S-N, brutos e líquidos, e as fórmulas de CERC (1984) e de Bayram *et al.* (2007) são as que deram resultados mais parecidos.

No sentido de obter o valor médio líquido do caudal sólido equivalente (média das 4 formulações relativo aos 17 anos analisados –  $1,79 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ ), recorreu-se a uma onda simples para produzir o mesmo caudal de transporte e obteve-se para as fórmulas de Inman e Bagnold (1963), CERC (1984), Kamphuis (1991) e Bayram *et al.* (2007) uma altura de onda de 2,05, 2,28, 3,90 e 2,60 metros, respetivamente. Estes resultados vão ao encontro da análise de sensibilidades genérica efetuada, onde a fórmula de Inman e Bagnold (1963) é a que possui valores de transporte sólido maiores para alturas de onda até 6 metros e a fórmula de Kamphuis (1991) a par da fórmula Bayram *et al.* (2007) são as que possuem valores de transporte sólido menores, para alturas de onda na ordem dos 2 metros.

Recorrendo a classes de onda, definiu-se a frequência de ocorrência de 3 ondas com alturas de 1, 4 e 5 metros com 10, -5 e 10 graus respetivamente, permitindo representar transporte em ambos os sentidos com um resultado equivalente ao clima de agitação de Leixões (para a média das 4 fórmulas ao longo dos anos nos sentidos N-S e S-N, caudais líquidos e brutos). Para a correta reprodução dos resultados, a onda considerada com 1 metro de altura e 10 graus de incidência com a linha de costa, é a que apresenta frequências de ocorrência maiores, enquanto que a onda de 4 metros de altura e com um ângulo de incidência de -5 graus possui frequências mais baixas.

Por último, realizou-se a modelação numérica da configuração da linha de costa, recorrendo ao programa LTC, aplicado a uma zona costeira genérica. Comparou-se a evolução da linha de costa para 10 anos e para 3 cenários: onda equivalente, classes de onda e ano representativo. Um dos objetivos nesta dissertação, para além de modelar a posição da linha

de costa no LTC, era avaliar se caudais sólidos equivalentes resultavam em posições da linha de costa o mais coincidentes possíveis entre os 3 cenários, e assim produzir recuos na linha de costa semelhantes. Comparando o cenário relativo à onda equivalente com as classes de onda, efetivamente há uma grande semelhança nos resultados, apesar de na secção mais a norte, o recuo seja superior nas classes de onda do que na onda equivalente. Quanto ao cenário relativo ao ano representativo, este apresenta uma grande variabilidade na posição das linhas de costa e taxas de recuo cerca de 2 vezes superiores aos dos outros 2 cenários. À medida que se avançou para sul, a linha de costa permanece mais constante e cada vez mais próxima da posição inicial. Todos os cenários aumentaram gradualmente os recuos ao longo do tempo. Os 3 cenários estudados, são equivalentes em termos de capacidade de transporte longitudinal, mas registaram diferenças de valores referentes aos recuos entre os 3 cenários. De facto, em relação à onda equivalente e às classes de onda, os valores apresentam alguma concordância, o mesmo não se verificou para o ano representativo.

## 6.2 Desenvolvimentos futuros

Nesta secção são apresentadas propostas de melhoramento e complementação de novas tarefas, com vista a que o tema desta dissertação possa ser mais aprofundado no futuro. Neste sentido, sugere-se fazer uma análise complementar através de ensaios laboratoriais e utilizando outro modelo numérico para além do LTC, de forma a poder comparar resultados, já que a variedade de formulações existentes e a disparidade entre comportamentos das diversas metodologias, comprova a incerteza associada aos resultados da posição da linha de costa obtidos.

Ao longo deste trabalho foram consideradas 4 fórmulas para estimativa do transporte sólido longitudinal, mas existem mais formulações na literatura, pelo que em futuros trabalhos a análise pode ser estendida a outras fórmulas. Em relação à previsão do comportamento da configuração da linha de costa ao longo do tempo, o caudal sólido disponível é um dos fatores mais determinantes. Assim, é fulcral verificar a adequabilidade das expressões de estimativa do transporte sólido longitudinal e confirmar se os valores indicativos dos caudais sólidos registados ao longo do litoral NW presentes na literatura estão ainda atualizados.



Os dados fornecidos pelo ondógrafo de Leixões continham algumas lacunas e falta de registos e devido a isso comprometeram-se de certa forma os resultados, pois houve anos em que havia mais registos de Inverno do que no Verão, podendo empolar as alturas de onda e conseqüentemente o transporte sólido longitudinal. Seria interessante comparar os registos de Leixões com séries completas modeladas para o ponto que fosse mais próximo do ondógrafo de Leixões e avaliar se há muita discrepância nos valores de altura e direção de onda com implicação nos resultados do transporte sólido longitudinal. A utilização de séries de registos de agitação, provenientes de outras boias ondógrafo colocadas em diferentes zonas da costa, poderá ser utilizado para avaliar a capacidade de transporte sólido aplicada a outras zonas do país.

Outra hipótese de estudo a desenvolver no futuro poderia considerar o aumento do número de climas de agitação equivalentes utilizando outras alturas e direções de onda, bem como considerar mais classes de ondas. A comparação destes novos cenários iria ajudar a consolidar informações importantes, nomeadamente as implicações nos resultados da aplicação do programa de modelação da linha de costa (LTC).

Relativamente ao LTC, seria interessante aplicar o programa a uma zona costeira em concreto, em zonas específicas do país, e não a um caso genérico como foi feito. Também seria vantajoso fazer uma simulação a longo prazo, num horizonte temporal superior a 10 anos, para analisar se a posição da linha de costa evolui para a mesma posição de equilíbrio apesar de tomar diferentes posições ao longo do tempo.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barata, M., Teles, M. e Vieira, J. (1996). "Seleção de Ondas Representativa da Agitação Marítima para Efeito da Avaliação do Transporte Litoral." *Recursos Hídricos* 17: pp. 43-73.
- Bayram, A., Larson, M. e Hanson, H. (2007). A New Formula for the Total Longshore Sediment Transport Rate. "Coastal Engineering". pp. 700-710.
- Bettencourt, P. (1997). "Notas para uma Estratégia de Gestão da Orla Costeira". *Colectânea de Ideias Sobre a Zona Costeira de Portugal*, Associação Eurocoast-Portugal. pp. 265-283.
- CEM (2002) "Coastal Engineering Manual." U.S. Army Corps of Engineers, Part III, Coastal Sediment Processes.
- CERC (1984). "Shore protection manual." 1: pp. 656.
- Ciavola, O., Taborda, R., Ferreira, O. e Dias, J. A. (1997). "Field Measurements of Longshore Sand Transport and Control Processes on a Steep Meso-tidal Beach in Portugal." *Journal of Coastal Research*: pp. 1119–1129.
- Coelho, C. (2005). "Riscos de exposição de frentes urbanas para diferentes intervenções de defesa costeira". Tese de doutoramento, Universidade de Aveiro: pp. 404.
- Coelho, C. (2012). "Apontamentos da unidade curricular Engenharia Costeira e Portuária". Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. pp. 40.
- Cowell, P. J., Meleo, J. F. e Hanslow, D. J. (1999). *The Shoreface. "Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics"*. University of Sydney, Australia. pp. 39-71.
- Engineers, U. A. C. o. (1977 e 1984). "Shore Protection Manual". Washington, DC, Department of the Army. pp. 652.
- Holthuijsen, L. H. (2007) "Waves in Oceanic and Coastal Waters." New York, Cambridge University Press.

HP (1981a) "Leixões - Cabo Mondego, Problemas Litorais." Regime Litoral, Tomo 1 - Texto e Quadros, Hidrotécnica Portuguesa, Ministério dos Transportes e Comunicações, Direcção Geral de Portos, Vol. 3.

Inman e Bagnold (1963). Beach and Nearshore Processes - Part 2, Littoral processes. The Sea - Ideas and Observations on Progress in the Study of the Sea, New York and London: pp. 529-553.

Kamphuis, J. W. (1991). "Alongshore Sediment Transport Rate." Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE 117(6): pp. 624-641.

Kamphuis, J. W., Davies, M. H., Nairn, R. B. e Sayao, O. J. (1986). Calculation of Littoral Sand Transport Rate. Coastal Engineering: pp. 1-21.

Komar, P. D. (1976). "Beach Processes and Sedimentation". Universidade de Michigan. pp. 429.

Komar, P. D. (1998). "Beach Processes and Sedimentation". New Jersey, USA. pp. 544.

Komar, P. D. e Inman, D. L. (1970). "Longshore sand transport on beaches." Journal of Geophysical Research 75: pp. 14.

Kraus, N. C. (1992) "Engineering Approaches to Cross-Shore Sediment Transport Processes." ICCE 1992 local organising committee.

LNEC (2000) "Porto da Figueira da Foz. Estudo do Melhoramento das Condições Actuais de Navegabilidade. Estudos de Agitação Marítima. Regime Geral e Regime de Extremos na Zona Marítima Adjacente ao Porto." Lisboa: 12/00-NPP.

Masselink, G. (1998). The Effect of Sea Breeze on Beach Morphology, Surf Zone Hydrodynamics and Sediment Resuspension. "Marine Geology". pp. 115-135.

Mendes, J. e Pinho, J. (2008). "Erosão Costeira – Metodologias para a sua Quantificação." pp. 139-150.

Oliveira, I. (2008) "Equilíbrio da Linha Litoral sob acção da Agitação Marítima." Recursos Hídricos - Revista da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos.

- Oliveira, I. B. M. (1990). "Erosão Costeira no Litoral Norte: Considerações Sobre a Sua Génese e Controlo". Actas do 1º Simpósio Sobre a Protecção e Revalorização da Faixa Costeira do Minho ao Liz, Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos, Porto. pp. 201-221.
- Pereira, A. S. (2008). "Modelação da Agitação Marítima em Zonas Costeiras". Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa: pp. 80.
- Pereira, C., Coelho, C., Bouzas, A. F., Ferreira, C., Dias, J. M., Vaz, N., Silva, P. A., Pinto, A., Bernardes, C., Terres, L., Pinheiro, L. M., Baptista, P. R. e Abreu, T. (2015) "Estudo da Dinâmica Sedimentar na Embocadura da Barra do Porto da Figueira da Foz."
- Pinho, U. F. d. (2003). "Caracterização dos estados de mar na bacia de campos". Tese de mestrado, Universidade federal do Rio de Janeiro: pp. 123.
- Pinto, F. T. e Neves, A. C. (2003). "A Importância da Consideração do Carácter Irregular da Agitação Marítima no Dimensionamento de Quebramares de Taludes." Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: pp. 95-111.
- Schoonees, J. S. e Theron, A. K. (1993). Review of the Field-data Base for Longshore Sediment Transport. "Coastal Engineering". 19: pp. 1-25.
- Silva, R., Taveira-Pinto, F. e Veloso-Gomes, F. (2009). "Modelação Física 3D com Fundos Móveis para Avaliação de Parâmetros Associados à Evolução da Linha de Costa". FEUP. Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente: pp. 11.
- Silva, R. F. d. (2010). "Avaliação Experimental e Numérica de Parâmetros Associados a Modelos de Evolução da Linha de Costa". Tese de doutoramento, Universidade do Porto: pp. 488.
- Steijn, R. C. (1992). Input Filtering Techniques for Complex Morphological Models. Delft Hydraulics Laboratory. Volume 824 de H: Waterloopkundig Laboratorium: pp. 100.
- Wang, P., Ebersole, B. A. e Smith, E. R. (2002). Longshore Sand Transport – Initial Results from Large-Scale Sediment Transport Facility. "Coastal Sediments 2015". ERDC/CHL CHETN-II-46: pp. 3000.