



**Universidade de Aveiro** Departamento de Física  
2015

**Caroline Costa  
Ferreira**

**Estudo da dinâmica sedimentar no troço  
costeiro entre o Cabo Mondego e a Praia da  
Leirosa**





**Universidade de Aveiro** Departamento de Física  
2015

**Caroline Costa  
Ferreira**

**Estudo da dinâmica sedimentar no troço  
costeiro entre o Cabo Mondego e a Praia da  
Leirosa**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia e Oceanografia Física, realizada sob a orientação científica do Doutor Paulo Manuel Cruz Alves Da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro e coorientação científica do Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.



**o júri**

**o presidente**

**Professor Doutor José Manuel Henriques Castanheira**

Professor Auxiliar, Departamento de Física da Universidade de Aveiro

**Doutora Filipa Simões de Brito Ferreira de Oliveira**

Investigadora Auxiliar, Departamento de Hidráulica e Ambiente do  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

**Professor Doutor Paulo Manuel Cruz Alves da Silva**

Professor Auxiliar, Departamento de Física da Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

Esta tese representa a reta final do meu percurso acadêmico, em que foi investido muito trabalho e dedicação, no entanto, sem a colaboração de todos os que estiveram presente nesta jornada, este trabalho não teria chegado a bom porto.

Ao meu orientador científico, professor Paulo Silva, agradeço por todos os conhecimentos transmitidos, essenciais para o desenvolvimento do trabalho, bem como total dedicação e auxílio.

Ao professor Carlos Coelho agradeço toda a disponibilidade, como coorientador, e contributos para o desenvolvimento e enriquecimento do meu trabalho.

Ao Aimar Kanpistegi agradeço toda a assistência e paciência prestadas com o modelo Delft3D e a Angela Bouzas pelo apoio.

A todos os que participaram nas campanhas de campo, agradeço toda a vivacidade e empenho no decorrer destas.

Aos meus amigos agradeço todo o apoio ao longo desta etapa, trocas de conhecimentos e companheirismo. Obrigada pelos momentos bons e menos bons, porque juntos conseguimos chegar mais longe.

Agradeço à Administração do Porto da Figueira da Foz pela disponibilização dos dados.

Por fim, agradeço à minha família por todo o incentivo, suporte, carinho e paciência no decorrer desta jornada.

Muito obrigada.





**palavras-chave**

Dinâmica sedimentar, campanhas de campo, modelação, Delft3D, morfodinâmica, Figueira da Foz

**resumo**

O porto da Figueira da Foz localiza-se no estuário do rio Mondego e comunica com o oceano através de um canal de navegação fixado por dois molhes convergentes. Em situações de agitação marítima energética (tempestades) este sistema é afetado pela acreção de sedimentos na barra submersa junto ao molhe norte, condicionando o acesso dos navios ao porto. O objetivo desta dissertação é caracterizar a dinâmica sedimentar no trecho costeiro entre o Cabo Mondego e a praia da Leirosa, bem como descrever a morfodinâmica na embocadura do rio Mondego.

Primeiramente efetuou-se uma pesquisa bibliográfica com o intuito de conhecer a zona de estudo, seguida do desenvolvimento da componente de monitorização e modelação.

Realizaram-se campanhas de campo em diferentes transeptos, entre o Cabo Mondego e a praia da Leirosa. O transporte sólido em suspensão foi estimado e caracterizada a agitação marítima junto à costa. Os resultados mostram que a intensidade da velocidade média na componente longitudinal e transversal aumenta de norte para sul, isto é, da praia do Cabedelo para a praia da Leirosa, e os fluxos sedimentares longitudinais variam em função da agitação marítima incidente e aumentam para o setor mais a sul.

A aplicação do modelo numérico Delft3D permitiu efetuar simulações da componente hidrodinâmica, morfodinâmica e sedimentar da região em estudo. Foi efetuado a validação das duas primeiras componentes e um estudo de sensibilidade dos resultados do módulo sedimentar. Por fim, foram impostas na fronteira um conjunto de ondas regulares representativas do clima de agitação marítima daquela região, de forma a estudar as correntes de deriva litoral e os transportes médios.

Os valores simulados para a deriva litoral são coerentes com os resultados das campanhas, e aproximam-se dos valores encontrados na literatura, nomeadamente nas praias situadas a sul da embocadura ( $1.0 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ ).

Na componente morfodinâmica verificou-se que, para um evento de temporal, o modelo simula a acreção de sedimentos na barra submersa com valores da ordem de grandeza dos observados.



**keywords**

Sediment dynamics, field campaigns, modelling, Delft3D, morphodynamics, Figueira da Foz

**abstract**

The Figueira da Foz's port is located at mouth of Mondego river and communicates with the ocean through a main channel fixed by two converging jetties. Under energetic wave conditions (storms) this system is affected by the accretion of sediments on sandbar formed close to the north breakwater, which limits the navigation to the port. The aim of this work is to characterize the sediment dynamics in the coastal stretch between the Mondego Cape and Leirosa beach, and describe the morphodynamics at the mouth of the Mondego river.

Firstly, a bibliographic research was carried out followed by the development of monitoring and modeling components.

The field campaigns were carried out in different transects, between the Mondego Cape and Leirosa beach, which allowed to estimate the suspended sediment transport and characterized the waves near the coast. The results show that the intensity of the longitudinal and transverse velocity component increases from north to south, i.e., from the Cabedelo beach to Leirosa beach. The longitudinal sediment fluxes depend on the incoming waves and increases towards the southern sectors.

The implementation of numerical model Delft3D of *Deltares*, allowed to perform simulations of the hydrodynamic, morphodynamic and sedimentary component of the study area. The calibration of the first two components was made as well as a sensitivity study of the sediment module results. Finally a set of regular waves representative of the wave climate of that region was imposed on the boundaries to study the mean longitudinal currents and transports.

The simulated values are consistent with the results of the campaigns and similar to the values found in the literature, on the beaches located southward of the mouth ( $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ ). The simulation of the morphodynamic changes induced by a storm event has shown that the model simulates accretion of sediment at the sandbar with an order of magnitude similar to the observations.



# Índice

Índice.....	i
Índice de Figuras .....	iii
Índice de Tabelas.....	vi
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1 – Enquadramento.....	1
1.2 – Objetivos .....	2
1.3 – Estrutura da Dissertação .....	2
Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos.....	5
2.1 – Propagação de Ondas.....	5
2.2 – Processos de Transformação.....	5
2.3 – Corrente de Retorno .....	6
2.4 – Corrente Litoral .....	7
Capítulo 3 – Características da Agitação Marítima e Dinâmica Sedimentar na Zona de Estudo....	9
3.1 - Introdução.....	9
3.1.1 - Localização .....	9
3.1.2 - Caracterização Morfológica.....	10
3.1.3 - Obras de Proteção Costeira .....	11
3.2 - Enquadramento Histórico .....	11
3.3 – Agitação Marítima .....	12
3.3.1 - Agitação ao Largo.....	12
3.3.2 – Agitação Local.....	13
3.4 – Maré .....	14
3.5 – Caudal Fluvial.....	14
3.6 – Dinâmica Sedimentar .....	15
3.6.1 - Costa Portuguesa .....	15
3.6.2 - Área de Estudo .....	16
3.7 – Evolução Morfológica da Embocadura 2010-2014 .....	17
Capítulo 4 – Campanhas de Campo .....	21
4.1 – Instrumentos .....	22
4.1.1 – Transdutor de Pressão.....	22
4.1.2 – Sensor Ótico .....	22
4.1.3 – Correntómetro Eletromagnético.....	25
4.1.4 – Caudais Sólidos em Suspensão.....	26
4.2 – Campanha 1 – 5 a 9 de Novembro 2014.....	28

4.2.1 – Maré .....	29
4.2.2 – Agitação Marítima ao Largo .....	29
4.2.3 – Agitação Marítima Local e Concentração de Sedimentos em Suspensão .....	30
4.2.4 – Caudal Sólido .....	34
4.3 - Campanha 2 – 21 a 24 de Maio 2015.....	36
4.3.1 – Maré .....	38
4.3.2 – Agitação Marítima ao Largo .....	38
4.3.3 – Agitação Marítima Local e Concentração de Sedimentos em Suspensão .....	39
4.3.4 – Caudal Sólido .....	41
Capítulo 5 – Modelação da Hidrodinâmica e Morfodinâmica .....	45
5.1 – Introdução .....	45
5.2 – Modelo Delft3D .....	46
5.2.1 – Componente Hidrodinâmica .....	46
5.2.2 – Componente de Agitação Marítima.....	46
5.2.3 – Componente de Transporte Sedimentar e Morfodinâmica.....	47
5.2.3.1 – Transporte em Suspensão.....	48
5.2.3.2 – Transporte por Arrastamento .....	48
5.2.3.3 – Morfodinâmica.....	50
5.3 – Implementação do Modelo .....	50
5.3.1 – Módulo Delft3D-FLOW .....	50
5.3.2 – Módulo Delft3D-WAVE.....	52
5.3.2.1 – Definição da Malha.....	52
5.3.3 – Módulo Delft3D-MOR e SED .....	54
5.4 – Validação do Modelo.....	55
5.4.1 – Validação Delft3D-WAVE.....	55
5.4.2 – Validação Delft3D-MOR e Estudo de Sensibilidade .....	57
5.5 – Resultados .....	60
5.5.1 – Hidrodinâmica Costeira .....	60
5.5.2 – Fluxos Sedimentares e Morfodinâmica.....	63
Capítulo 6 - Considerações Finais.....	69
6.1 - Conclusões .....	69
6.2 – Desenvolvimentos Futuros.....	70
Referências.....	73

# Índice de Figuras

## Capítulo 2:

<b>Figura 2.1:</b> Refração da onda induzida pela alteração da profundidade à esquerda (Fonte: Stack Exchange) e refração das ondas apresentada pelas ortogonais das ondas sobre topografia de complexidade intermédia, associada a uma série de baías e cabos à direita (Davidson-Arnott, 2010). .....	6
<b>Figura 2.2:</b> Distribuição da velocidade de escoamento associada à propagação de uma onda regular (Okayasu et al., 1986). .....	7
<b>Figura 2.3:</b> Padrão geral de distribuição da velocidade da corrente litoral na zona de rebentação em um perfil plano para ondas regulares sem mistura lateral (linha reta e linha de rebentação) e de ondas irregulares (linha curva e zona de rebentação das ondas) (Adaptado de Davidson-Arnott, 2010). .....	7

## Capítulo 3:

<b>Figura 3.1:</b> Planta do porto e da barra da Figueira da Foz em 1855 (canto superior esquerdo), em 1857 (canto superior direito) e 1915 (em baixo) (Fonte: YouTube). .....	9
<b>Figura 3.2:</b> Embocadura do porto da Figueira da Foz e área de estudo: intervenções de defesa costeira associadas (Universidade de Aveiro, 2015). .....	10
<b>Figura 3.3:</b> Caudal médio diário ( $m^3/s$ ) referente ao Açude Ponte Coimbra, entre 1988 e 2015. ....	15
<b>Figura 3.4:</b> Batimetrias da embocadura do Mondego: a) 16 de março de 2010; b) 7 de março de 2011; c) 27 de fevereiro de 2012; d) 25 de fevereiro de 2013; e) 12 de março de 2014 (Universidade de Aveiro, 2015). .....	18
<b>Figura 3.5:</b> Mapas da variação de cota para os períodos: a) 20 de junho a 11 outubro 2012; b) de 11 a 19 dezembro 2012; c) de 19 dezembro a 8 janeiro 2013; d) de 8 de janeiro a 28 fevereiro 2013 (Universidade de Aveiro, 2015). .....	19
<b>Figura 3.6:</b> Regime de ondulação medido na bóia de Leixões. Os quatro quadrados A-D delimitam os quatro períodos em análise (Silva et al., 2015). .....	20

## Capítulo 4:

<b>Figura 4.1:</b> Instrumentos utilizados nas campanhas de campo, sensor de pressão (Fonte: Fondriest Environmental, Inc.), seguido de sensor ótico (Fonte: Campbell Scientific, Inc.) e por fim um correntómetro eletromagnético (Fonte: JFE Advantech Co., Ltd). .....	21
<b>Figura 4.2:</b> Tripé para a instalação dos instrumentos, seguida de um transdutor de pressão (Level Troll 500), sensor ótico (Campbell) e correntómetro eletromagnético (Infinity) na Campanha de novembro 2014. ....	21
<b>Figura 4.3:</b> Estrutura utilizada para a calibração das sondas OBS (esquerda) e exemplificação da calibração (direita), (Calibração Carrilho, 2013). .....	23
<b>Figura 4.4:</b> Voltagem (mV) em função da concentração de sedimentos (g/L) em médias de 2 minutos para o OBS3. ....	23
<b>Figura 4.5:</b> Retas de calibração dos sensores OBS: OBS1 (canto superior esquerdo), OBS2 (canto superior direito) e OBS3 (em baixo) (Carrilho, 2013). .....	24
<b>Figura 4.6:</b> Concentração de sedimentos em suspensão para as diferentes retas de calibração, OBS3 (zoom da zona de espraio). ....	24
<b>Figura 4.7:</b> Sistema de referência considerado para as componentes da velocidade $V_x$ e $V_y$ . ..	25

<b>Figura 4.8:</b> Bússola para medição do ângulo entre o sensor de temperatura do ECM e o norte magnético.....	25
<b>Figura 4.9:</b> Esquema do posicionamento dos instrumentos na coluna de água e respetivas alturas de influência dos OBS.....	27
<b>Figura 4.10:</b> Sobreposição dos sinais medidos do PT (m - azul), ECM: $V_x$ (m/s - vermelho) $V_y$ (m/s - verde) e OBS (g/L - preto), na zona do espraio para o dia 7 de novembro de 2014. ....	27
<b>Figura 4.11:</b> Localização das estações de recolha de dados da campanha de novembro de 2014, na secção sul (esquerda) e norte (direita) (Fonte: Google Earth, 2015).....	28
<b>Figura 4.12:</b> Maré observada no porto da Figueira da Foz para os dias da 1ª campanha (5 – 9 novembro 2014).....	29
<b>Figura 4.13:</b> Altura significativa da onda ( $H_s$ ), do período de pico ( $T_p$ ) e direção (Dir) das ondas observadas na boia ondógrafo de Leixões nos dias da campanha. As caixas representam o período das medições das campanhas de campo. ....	30
<b>Figura 4.14:</b> Espectro de potência calculados em função da frequência para as estações localizadas na praia da Figueira da Foz (esquerda): EST1 (preto); EST3 (verde); EST4 (vermelho); EST5 (azul) e nas praias a sul da embocadura (direita): EST6 (azul); EST8 (preto) sendo as linhas representadas a verde as estações da praia da Figueira da Foz. ....	31
<b>Figura 4.15:</b> Elevação da superfície livre (m) (sinal total a azul, componente de baixa frequência a verde e componente de alta frequência a vermelho – topo), altura significativa da onda $H_s$ (m) (em baixo à esquerda) e profundidade média (m) (em baixo à direita). ....	32
<b>Figura 4.16:</b> Componente longitudinal (esquerda) e transversal (direita) da velocidade (m/s). 32	
<b>Figura 4.17:</b> Valores médios da componente longitudinal (vermelho) e transversal (azul) da velocidade (m/s) em intervalos de 10 minutos, EST6 à esquerda e EST8 à direita. ....	33
<b>Figura 4.18:</b> Concentração de sedimentos em suspensão (g/L) para o OBS2 aos 0.11cm (azul), OBS3 aos 0.24cm (verde) e OBS1 aos 0.39cm (preto). ....	33
<b>Figura 4.19:</b> Componente longitudinal (vermelho) e transversal (azul) do fluxo sedimentar integrado na vertical (kg/m/s). As linhas verticais delimitam as zonas de espraio da zona de rebentação, EST6 à esquerda e EST8 à direita. ....	34
<b>Figura 4.20:</b> Valores médios do fluxo sedimentar (kg/m/s). As linhas verticais delimitam as zonas de espraio da zona de rebentação, EST6 à esquerda e EST8 à direita.....	35
<b>Figura 4.21:</b> Localização das estações de recolha de dados da campanha de novembro de 2014 (branco) e de maio de 2015 (amarelo), na secção norte (esquerda) e secção sul (direita) (Fonte: Google Earth, 2015). ....	37
<b>Figura 4.22:</b> Maré observada (m) no porto da Figueira da Foz para os dias da 2ª campanha (21 – 24 maio 2015). ....	38
<b>Figura 4.23:</b> Altura significativa da onda ( $H_s(m)$ ), do período de pico ( $T_p(s)$ ) e da direção da agitação marítima ( $^\circ$ ) observada na bóia ondógrafo de Leixões nos dias da campanha. As caixas representam o período das campanhas de campo para os diferentes ciclos de maré. ....	38
<b>Figura 4.24:</b> Espectro de potência calculados para as estações localizadas na praia da Figueira da Foz (esquerda) para a EST4B: 23 de maio (azul 1C); 24 de Maio (vermelho 2C) e nas praias a sul da embocadura (direita) EST4A: 21 de maio (azul 1C); 22 de maio (vermelho 2C) e 22 de maio (verde 3C). ....	39
<b>Figura 4.25:</b> Valores médios da componente longitudinal (vermelho) e transversal (azul) da velocidade (m/s) em intervalos de 10 minutos na zona de rebentação para EST4B: 23 de maio (a), 24 de maio (b) e para a EST7A: 21 de maio (c), 22 de maio 2ºCiclo (d) e 22 de maio 3ºCiclo (e). ....	40



**Figura 4.26:** Valores médios do fluxo sedimentar para a EST7A (kg/m/s). As linhas verticais delimitam as zonas de espraio da zona de rebentação. Dia 21 de maio (a), dia 22 de maio 2ºCiclo (b), dia 22 de maio 3ºCiclo (c). ..... 42

## Capítulo 5:

<b>Figura 5.1:</b> Grelha não estruturada desenvolvida para o módulo hidrodinâmico e de propagação de ondas, para o estuário do Mondego e litoral envolvente.....	50
<b>Figura 5.2:</b> Batimetria numérica e fronteira aberta oceânica (linha a vermelho). ....	51
<b>Figura 5.3:</b> Malha numérica A e B (domínio pai e filho) utilizada na propagação de ondas e fronteira aberta (linha vermelha). ....	52
<b>Figura 5.4:</b> Altura significativa representada na grelha hidrodinâmica para uma onda de NNO. ....	53
<b>Figura 5.5:</b> Altura significativa (m) representada na malha pai aninhado à grelha 1 (a) e grelha 2 (b) para uma onda de NNO. ....	53
<b>Figura 5.6:</b> Altura significativa (m) representada na malha filho aninhado à grelha 1 (a) e a grelha 2 (b) para uma onda de NNO. ....	53
<b>Figura 5.7:</b> Pontos de controlo para verificação da malha de ondas.....	54
<b>Figura 5.8:</b> Comparação dos resultados numéricos da altura significativa da onda (linha azul) com as medições (linha a vermelho) ao longo do tempo, nos pontos de amostragem para as campanhas de novembro de 2014 e maio de 2015. ....	56
<b>Figura 5.9:</b> Batimetria inicial (a) e simuladas para caudal fluvial de 0m <sup>3</sup> /s (b), 1500 m <sup>3</sup> /s (c) e 3000 m <sup>3</sup> /s (d).....	58
<b>Figura 5.10:</b> Variação da batimetria entre 11 a 19 de dezembro de 2012 para valores observados (esquerda) e simulados (direita). ....	59
<b>Figura 5.11:</b> Distribuição da altura significativa da onda calculada para quatro ondas equivalentes de condições distintas. ....	61
<b>Figura 5.12:</b> Campo de velocidade média calculado para quatro ondas equivalentes de condições distintas. ....	62
<b>Figura 5.13:</b> Campo de velocidade média calculado para W6, zoom no Cabo Mondego. ....	62
<b>Figura 5.14:</b> Valor médio da taxa de transporte sedimentar calculados para diferentes ondas do regime equivalentes (m <sup>2</sup> /s).....	63
<b>Figura 5.15:</b> Valor médio da taxa de transporte sedimentar em suspensão calculados para condição W5 (m <sup>2</sup> /s).....	64
<b>Figura 5.16:</b> Localização das secções para o cálculo da deriva litoral. ....	64
<b>Figura 5.17:</b> Transporte total médio em uma secção a sul da embocadura do rio Mondego, para condições de onda distintas.....	65
<b>Figura 5.18:</b> Taxas de transporte líquido ponderado (m <sup>3</sup> /ano), total (linha azul), por arrastamento (linha verde) e por suspensão (linha vermelha), para todas as secções de controlo. ....	67
<b>Figura 5.19:</b> Batimetria inicial (a) e simulada para diferentes condições de onda.....	68

# Índice de Tabelas

## Capítulo 4:

<b>Tabela 4.1:</b> Localização das estações de amostragem das campanhas de campo na praia (WGS84). .....	28
<b>Tabela 4.2:</b> Caracterização da campanha (*dados relativos ao PT). .....	29
<b>Tabela 4.3:</b> Valores máximos de $H_s$ e $h$ nas estações de amostragem das campanhas de campo (EST1,2,3,4 e 5 – 6 de novembro de 2014). .....	30
<b>Tabela 4.4:</b> Caudal sólido médio ( $m^2/s$ ) na direção longitudinal e transversal e taxa de transporte longitudinal ao longo de um ano ( $m^3/ano$ ). .....	35
<b>Tabela 4.5:</b> Localização das estações de amostragem das campanhas de campo na praia (WGS84). .....	36
<b>Tabela 4.6:</b> Caracterização da campanha (*dados relativos ao PT). .....	37
<b>Tabela 4.7:</b> Valores máximos de $H_s$ (m) e $h$ (m) nas estações de amostragem das campanhas de campo referentes a todos os ciclos de maré. ....	39
<b>Tabela 4.8:</b> Caudal sólido na direção longitudinal e transversal ( $m^2/s$ ) e taxa de transporte longitudinal ao longo de um ano( $m^3/ano$ ). .....	42

## Capítulo 5:

<b>Tabela 5.1:</b> Constituintes de maré introduzidos no módulo hidrodinâmico (Delft3D-FLOW). ..	51
<b>Tabela 5.2:</b> Variação de $H_s$ entre a grelha 1 e 2 nos pontos de controlo. ....	54
<b>Tabela 5.3:</b> Variação entre a altura significativa registada nos pontos de controlo entre os resultados numéricos obtidos com a teoria linear na fronteira norte e a onda 3 constante em toda a fronteira para a grelha 1 e 2. ....	54
<b>Tabela 5.4:</b> Análise qualitativa dos fatores de calibração no transporte sedimentar. ....	58
<b>Tabela 5.5:</b> Ondas representativas do clima de agitação equivalente. ....	60
<b>Tabela 5.6:</b> Volumes líquidos em transporte calculados para as diferentes condições de onda para as secções de controlo. ....	65

# Capítulo 1 – Introdução

## 1.1 – Enquadramento

O Oceano Atlântico é fundamental para o funcionamento e sustentabilidade de Portugal. Este está em contacto direto com todo o litoral, que é extenso e variado apresentando uma multiplicidade de ambientes desde praias arenosas, zonas rochosas a arribas. Segundo Andrade e Freitas (2002) a faixa oeste de Portugal é caracterizada por um regime ondulatório muito energético, e dominado por ventos de noroeste, fazendo desta uma das costas mais ativas e suscetíveis da Europa. Assim, grandes porções de energia libertada na rebentação das ondas transformam-se numa intensa deriva litoral, que prevalece para sul.

As zonas costeiras são ambientes únicos, complexos e vulneráveis, muito dependentes de forçamentos exteriores, sendo que ligeiras alterações nestes podem induzir grandes modificações em todo o sistema costeiro. Estas faixas são regiões de elevada importância a nível ambiental, cultural e socioeconómico, necessitando de um estudo intenso e contínuo, de modo a favorecer a sua compreensão e preservação. Do ponto de vista socioeconómico, o litoral apresenta uma grande diversidade, com importantes polos de turismo, comércio, indústrias e de habitação. Por esta razão as zonas costeiras estão sujeitas a pressões.

A Figueira da Foz localiza-se na costa oeste Portuguesa, no distrito de Coimbra. O crescimento da cidade da Figueira da Foz centrou-se na importância do seu litoral, baseando-se no poder económico do seu porto, na indústria de construção naval e dos serviços associados ao turismo.

Para melhorar as condições de funcionamento do porto da Figueira da Foz foram efetuadas obras de engenharia costeira, como a implementação de molhes para a fixação do seu canal de navegação. Estes foram construídos nos anos 60 do século XX, sendo que o molhe norte foi prolongado em 400 metros entre 2008 e 2010 de modo a minimizar os problemas de navegabilidade de acesso ao porto.

Segundo Komar (1983), o movimento natural de areia das praias ao longo da costa é um potencial problema sempre que este é interrompido por construções. Estas estruturas atuam como barreiras, gerando acumulações de areia a barlar e erosão a sotamar. O conhecimento do transporte de sedimentos é necessário para a compreensão da formação de morfologias de fundo, como por exemplo, as barras submersas, que podem afetar a navegação e obstruir a entrada dos canais de acesso ao porto. Assim, a monitorização e previsão da evolução da morfologia das zonas costeiras é fundamental, bem como desafiadora, uma vez que resulta da combinação de diferentes fatores.

A Administração do Porto da Figueira da Foz desenvolveu o projeto ‘Estudo da dinâmica sedimentar na embocadura da barra do porto da Figueira da Foz’, com intuito de tentar prever e compreender a causa do assoreamento na entrada da embocadura. A presente dissertação enquadrou-se neste projeto de forma a estudar a dinâmica envolvente à entrada da embocadura.

## 1.2 – Objetivos

O principal objetivo deste trabalho consiste em caracterizar a dinâmica sedimentar no trecho costeiro entre o Cabo Mondego e a praia da Leirosa, bem como descrever a morfodinâmica na embocadura do rio Mondego. Este subdividiu-se em três componentes: pesquisa bibliográfica, monitorização e modelação.

Na primeira componente, foram adquiridos conhecimentos da área de estudo, sobre a dinâmica de transporte sedimentar, os recuos de linha de costa e as intervenções costeiras efetuadas com base em estudos efetuados.

Na segunda componente, foram elaboradas duas campanhas de campo (em novembro de 2014 e maio de 2015), para a aquisição de dados referentes ao clima de agitação observado junto à costa e avaliação do caudal sólido. Posteriormente foi feito o processamento e análise dos dados, que são importantes na compreensão da dinâmica sedimentar nas áreas adjacentes à embocadura.

Na terceira componente, a partir do modelo Delft3D desenvolvido pela Deltares, simularam-se os processos hidrodinâmicos (agitação marítima, correntes de maré e correntes induzidas pelas ondas) e os processos morfodinâmicos (fluxos sedimentares e evolução da batimetria) da região de estudo. Foi considerado um regime de ondulação equivalente, baseado no trabalho de Barata *et al.* (1996), de modo a estudar a hidrodinâmica e a dinâmica sedimentar. Foi também simulada a propagação de ondas junto à costa para os dias das campanhas, por forma a analisar a validade dos resultados do modelo. Por fim, devido ao intenso transporte de sedimentos gerado em situações de agitação marítima mais energéticas (tempestades), foi estudada a resposta morfodinâmica da embocadura a um evento de temporal.

## 1.3 – Estrutura da Dissertação

A dissertação está subdividida em 6 capítulos, sendo o primeiro a introdução, em que é feito o enquadramento do trabalho, a apresentação dos objetivos e a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 – Fundamentos teóricos - faz-se uma breve explicação da propagação de ondas, bem como dos processos de transformação que estas sofrem ao aproximarem-se da costa. São descritas as correntes de retorno e longilitorais, bem como a representação dos perfis transversais das correntes, que serão úteis na compreensão de outras componentes do trabalho.

O Capítulo 3 - Características da agitação marítima e dinâmica sedimentar na zona de estudo - fragmenta-se em 7 subcapítulos. No primeiro é feita uma breve introdução, em que é apresentada a localização da zona de estudo, as suas características morfológicas e as obras de proteção costeira. De seguida é efetuado um enquadramento histórico da região de forma a situar no tempo o que já ocorreu naquela área. Posteriormente, nos subcapítulos 3 a 6, são apresentadas a agitação marítima, maré, caudal fluvial e a dinâmica sedimentar características daquela região. Por fim, no subcapítulo 7 é feita uma descrição da evolução morfológica da embocadura entre 2010-2014, representando assim a época posterior ao prolongamento do molhe norte.

No Capítulo 4 – Campanhas de campo – são descritas as campanhas de campo realizadas, os instrumentos de medição utilizados e os métodos considerados no processamento dos dados. Seguidamente são apresentados os resultados relativamente à maré, agitação marítima ao largo e localmente, bem como os caudais sólidos transportados.

O Capítulo 5 – Modelação da hidrodinâmica e morfodinâmica - subdivide-se em 5 subcapítulos, correspondentes a uma breve introdução, seguida da descrição do modelo em que são apresentadas as componentes hidrodinâmica, agitação marítima, transporte sedimentar e morfodinâmica. No terceiro subcapítulo é apresentada a implementação do modelo para os diferentes módulos (Delft3D- FLOW, WAVE, SED e MOR) na região de estudo. No quarto subcapítulo é feita a validação do modelo na componente de agitação marítima, bem como da morfodinâmica, para além de um estudo de sensibilidade da componente sedimentar. Por fim são apresentados os resultados do modelo em duas partes, uma primeira, relativamente à hidrodinâmica costeira, associada ao regime equivalente de ondas e uma segunda associada aos fluxos sedimentares e morfodinâmica e a discussão destes.

No Capítulo 6 – Considerações finais - são apresentadas as conclusões principais feitas ao longo do trabalho, incluindo comparações entre os resultados do modelo, das campanhas e registos históricos. São também apresentados registos de desenvolvimentos futuros do trabalho que visam melhorar as técnicas de modelação costeira e aquisição de dados.



## Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos

### 2.1 – Propagação de Ondas

As ondas em águas profundas ao propagarem-se para a costa interagem com o fundo, sofrendo modificações devido a diferentes processos que levam à transformação da altura, comprimento de onda, forma, velocidade e direção da onda. Os principais processos que levam à transformação das ondas são o empolamento, refração, difração e rebentação, que serão apresentados posteriormente.

De modo a prever a propagação das ondas, são utilizadas teorias. A teoria mais simples considerada é a teoria de onda de Airy, também conhecida por teoria linear. Esta teoria considera um perfil de onda perfeitamente sinusoidal, sendo apenas necessárias equações lineares para descrever a superfície da água e o movimento orbital. Assume-se ainda que a inclinação da superfície da água é pequena, o fluido homogéneo, incompressível, não viscoso, que o movimento das partículas de água é irrotacional. Com base nesta teoria é possível descrever o movimento das partículas em águas profundas e pouco profundas. No primeiro caso, a profundidade da água é muito maior do que a amplitude e comprimento de onda, tendo as ondas um carácter dispersivo. No segundo caso, o movimento das partículas é afetado pelo fundo. Neste caso as ondas adquirem características dissipativas, e a dinâmica das ondas vai-se tornando progressivamente não linear ao aproximar-se da costa, fazendo com que a teoria de onda de Airy perca gradualmente os bons resultados.

### 2.2 – Processos de Transformação

#### Empolamento

O empolamento das ondas consiste na modificação da altura da onda provocada pela aproximação da onda à costa (redução da profundidade) e consequente redução do comprimento de onda e velocidade de propagação. A energia entre duas cristas consecutivas mantém-se constante durante a sua propagação, assim, quando o comprimento de onda diminui, a altura da onda aumenta para que a quantidade de energia transportada seja a mesma numa área mais pequena.

#### Refração

O fenómeno de refração manifesta-se como resultado da aproximação das ondas à costa e consequente redução da sua velocidade de fase, sendo que a onda tende a alinhar-se com a batimetria. No entanto, a batimetria das praias não é regular e sendo assim, para uma mesma crista de onda, existe um troço que atinge zonas de menor profundidade primeiro, perdendo velocidade, enquanto porções a maior profundidade têm uma velocidade superior, fazendo com que a crista da onda tenda a curvar adaptando-se a morfologia do fundo, alinhando-se à costa (Figura 2.1, esquerda).

A refração das ondas pode ser analisada pelo comportamento das linhas ortogonais da onda, perpendiculares à crista da onda em todos os pontos do seu deslocamento. Assumindo que existe conservação de energia da onda entre ortogonais desde as águas profundas até a costa, a convergência de ortogonais, num cabo, resulta num aumento de energia, que se manifesta por um aumento da altura da onda. Por outro lado, a divergência de ortogonais, numa baía, produz um decréscimo da energia e da altura da onda, como representado na Figura 2.1 (direita).

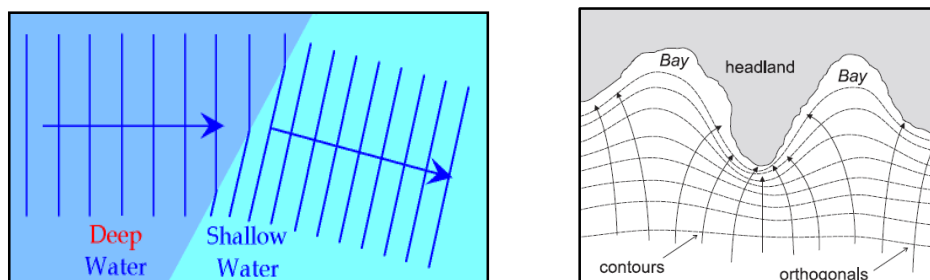


Figura 2.1: Refração da onda induzida pela alteração da profundidade à esquerda (Fonte: Stack Exchange) e refração das ondas apresentada pelas ortogonais das ondas sobre topografia de complexidade intermédia, associada a uma série de baías e cabos à direita (Davidson-Arnott, 2010).

Portanto, a refração tem o efeito de variar a altura da onda ao aproximar-se da costa, o que afeta a distribuição da energia das ondas ao longo da costa. Este é um processo muito importante na determinação da magnitude e direção do transporte de sedimentos longitudinal à costa (deriva litoral), o potencial de erosão das ondas e os impactos das ondas em estruturas de proteção costeira.

### Difração

A difração da onda consiste na mudança de direção da onda à medida que esta passa através de uma abertura ou em torno de um obstáculo, como os promontórios. Esta é responsável pela propagação da onda para zonas localizadas atrás do obstáculo, decrescendo a sua altura de onda.

### Rebentação

À medida que a onda se propaga para a costa, a velocidade de fase da crista e da cava tem valores distintos. A primeira com valor superior, leva a que a crista da onda comece a inclinar-se para a frente e quando esta inclinação atinge um valor máximo a onda rebenta. Assim, a rebentação inicia-se quando a onda torna-se instável devido a uma redução da profundidade e incremento da declividade ( $H/\lambda$ ), acabando por rebentar. A rebentação da onda resulta numa redução da energia das ondas, e assim da altura da onda, variando consoante a profundidade do local. Várias expressões foram desenvolvidas de modo a prever a profundidade da água onde a onda rebenta ( $h_b$ ) e a altura da onda no mesmo local ( $H_b$ ). De acordo com Munk (1949), citado em Davidson-Arnott (2010),  $H_b/h_b=0.78$ . Assim, as ondas começam a rebentar em profundidades de água ligeiramente maior que a altura da onda, sendo o valor 0.78 característico do início da rebentação.

## 2.3 – Corrente de Retorno

O empolamento e a rebentação da onda levam a um fluxo de massa de água para a costa. De modo a garantir a conservação da massa estabelece-se um fluxo dirigido para o largo, na zona de rebentação, denominado corrente de retorno, ou *undertow*. O transporte de massa de água para a costa ocorre de modo relativamente uniforme acima do nível da cava da onda. O fluxo de retorno ocorre como uma corrente dirigida para o largo entre o fundo e a cava das ondas. Uma vez que este fluxo ocorre na parte inferior da coluna de água, onde as concentrações de sedimentos são mais elevadas, este é um mecanismo muito importante para a transferência de sedimentos para o largo e na migração de barras próximas à costa.

Okayasu *et al.* (1986), realizaram experiências em laboratório com ondas regulares de modo a classificar as características dos campos de velocidade na zona de rebentação, obtendo a distribuição de correntes apresentada na Figura 2.2. Esta figura ilustra a corrente de retorno que



tem velocidades reduzidas junto à costa, aumentando à medida que se afasta desta, atingindo um valor máximo aproximadamente a meio da zona de rebentação, reduzindo posteriormente a sua velocidade na zona mais ao largo. É importante mencionar que a zona de espraio não é representada.

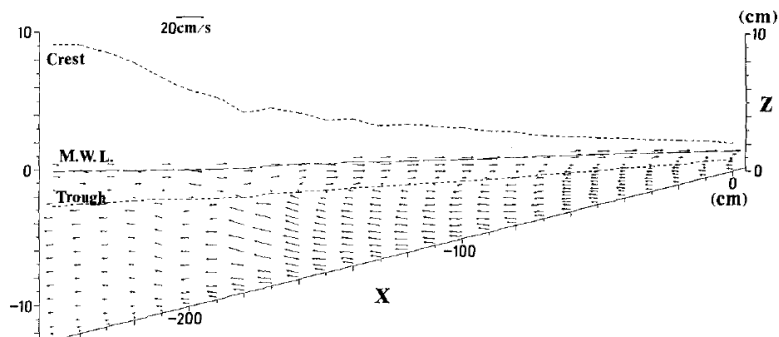


Figura 2.2: Distribuição da velocidade de escoamento associada à propagação de uma onda regular (Okayasu *et al.*, 1986).

## 2.4 – Corrente Litoral

Quando as ondas rebentam com um determinado ângulo em relação à praia, a mesma crista de onda liberta energia em diferentes intervalos de tempo e secções da costa, gerando uma corrente que flui paralelamente à costa, estando confinada junto a esta. A corrente litoral estende-se por toda a largura da zona de rebentação, atingindo velocidade máxima a meio desta, reduzindo de intensidade rapidamente ao afastar-se desta área (Figura 2.3).

A Figura 2.3 apresenta a distribuição da velocidade da corrente litoral para ondas regulares. Este perfil é irrealista porque assume um valor máximo no ponto de rebentação e decresce até à praia. Por outro lado é apresentado um perfil mais realista para as ondas irregulares, em que se verifica uma distribuição de velocidades mais suave. Segundo Davidson-Arnott (2010), o perfil de distribuição da velocidade da corrente litoral para ondas irregulares na zona de rebentação interna, aproxima-se do perfil de ondas regulares, onde a dissipação da energia da onda é controlada pela profundidade da água. No entanto a rebentação das ondas inicia-se a profundidades superiores ao ponto de rebentação, verificando-se uma zona de rebentação, com o perfil representado na Figura 2.3.

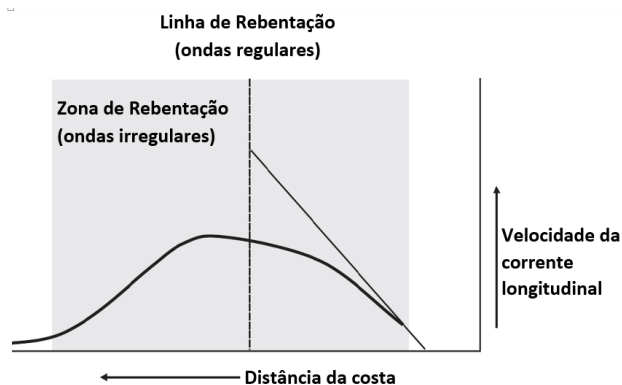


Figura 2.3: Padrão geral de distribuição da velocidade da corrente litoral na zona de rebentação em um perfil plano para ondas regulares sem mistura lateral (linha reta e linha de rebentação) e de ondas irregulares (linha curva e zona de rebentação das ondas) (Adaptado de Davidson-Arnott, 2010).



## Capítulo 3 – Características da Agitação Marítima e Dinâmica Sedimentar na Zona de Estudo

### 3.1 - Introdução

Segundo Komar (1976), as zonas costeiras são consideradas ambientes dinâmicos, sujeitas a alterações morfológicas em curtos intervalos de tempo, resultantes de variações nas condições energéticas atuantes na região.

A sequência de imagens apresentadas na Figura 3.1 ilustra parte da evolução histórica da embocadura do rio Mondego e região envolvente. Verifica-se que nesta região há uma tendência para a existência e formação de uma barra, sendo esta motivada pelo transporte sedimentar longitudinal intenso da região. A barra e a sua forma é variável no tempo e no espaço, no entanto é persistente.

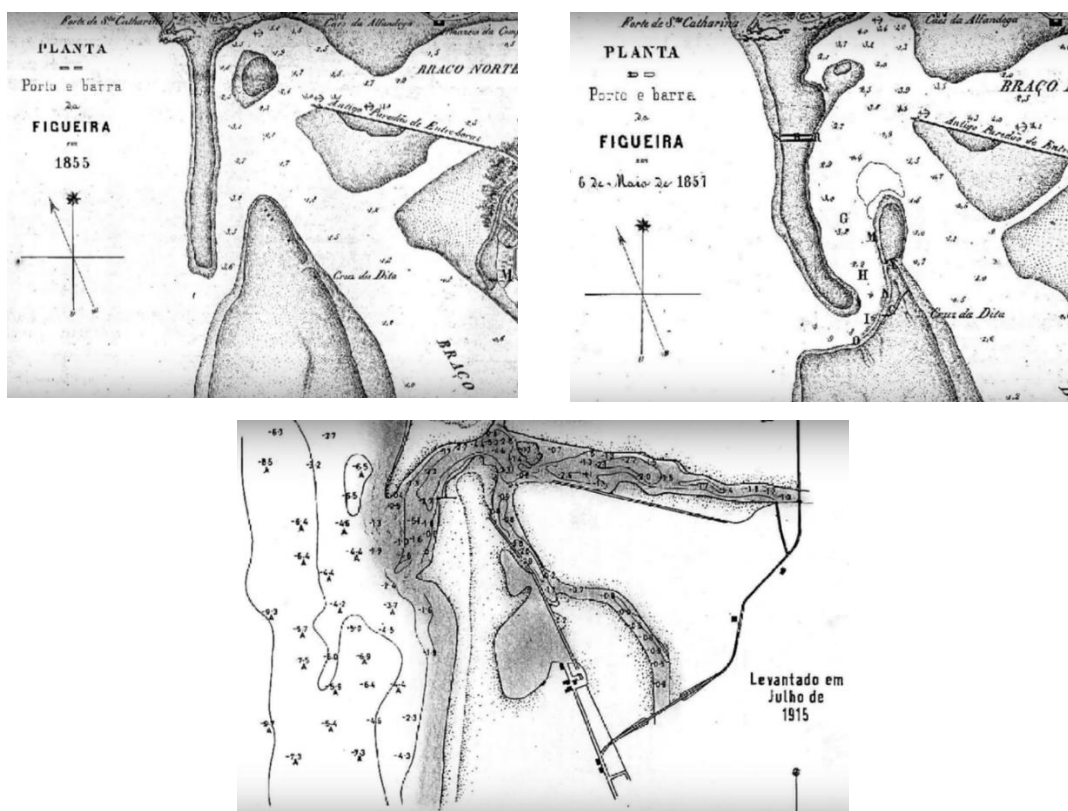


Figura 3.1: Planta do porto e da barra da Figueira da Foz em 1855 (canto superior esquerdo), em 1857 (canto superior direito) e 1915 (em baixo) (Fonte: YouTube).

#### 3.1.1 - Localização

A Figueira da Foz localiza-se na costa oeste Portuguesa, no distrito de Coimbra. A área em estudo abrange a foz do rio Mondego e o litoral adjacente, abarcando a zona costeira entre o Cabo Mondego até a Praia da Leirosa.

A norte do porto da Figueira da Foz existe uma extensão de 5 quilómetros até ao Cabo Mondego, com dois troços distintos: o primeiro tem uma orientação N-S com ligeira curvatura na praia da

Figueira da Foz junto ao molhe norte, passando a uma orientação NNO-SSE até a praia de Buarcos e por fim de NO-SE até ao Cabo Mondego, como se pode observar pela Figura 3.2.

A sul da embocadura do rio Mondego o trecho costeiro tem uma extensão de cerca de 10 quilómetros até a praia da Leirosa, sendo caracterizada por praias de largura reduzida. A secção entre o molhe sul e a Cova da Gala tem uma orientação de N-S, sensivelmente, enquanto à medida que se avança para sul essa orientação passa a NNE-SSO, aproximadamente.

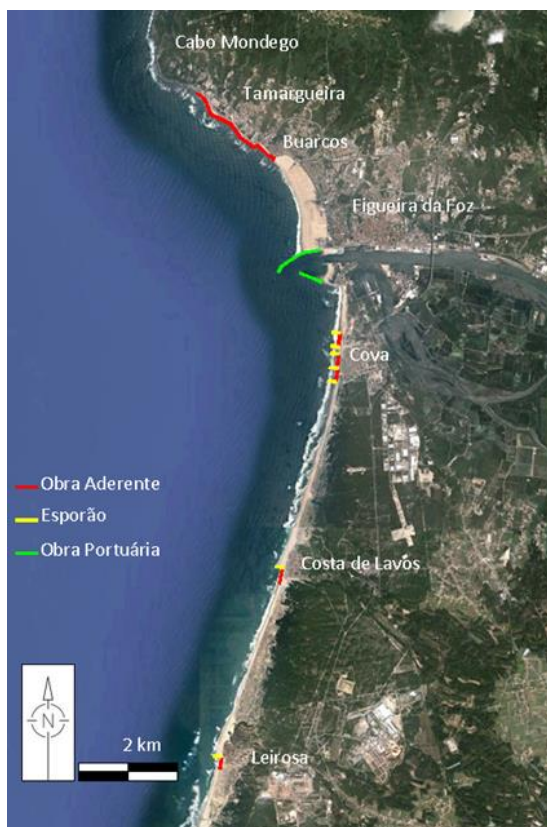


Figura 3.2: Embocadura do porto da Figueira da Foz e área de estudo: intervenções de defesa costeira associadas (Universidade de Aveiro, 2015).

### 3.1.2 - Caracterização Morfológica

A zona em estudo é muito variável a nível morfológico, desde costas rochosas até praias arenosas. A norte da foz do Mondego observa-se uma faixa arqueada de relevos de baixa altitude (entre 100 e 258m), finalizado pelo Cabo Mondego. Este Cabo é talhado pela sua costa rochosa, com arribas e plataforma de abrasão. A sul do Cabo após Buarcos transita-se para uma costa arenosa, semi-encastada até à praia da Figueira da Foz. A sul da embocadura a costa é arenosa, geralmente com cordões dunares associados (Cunha e Dinis, 1998).

No setor norte à embocadura do rio Mondego, mais propriamente próximo do Cabo Mondego, a linha de costa permanece aproximadamente constante, devido ao carácter rochoso da zona. Mais a sul, a praia da Figueira da Foz possui um areal muito robusto, com cerca de 400 metros de largura em 2010. No entanto, com o prolongamento do molhe norte, este valor pode ter vindo a aumentar.

O setor a sul da embocadura tem sofrido erosão intensa, sendo que o prolongamento do molhe poderá ter agravado a situação.

### 3.1.3 - Obras de Proteção Costeira

O sector em estudo possui inúmeras obras de proteção costeira, como ilustrado na Figura 3.2. A praia de Tamargueira, por exemplo, é uma praia de tipologia arenosa, contudo apresenta afloramentos rochosos a norte. Logo, como se observa na Figura 3.2, esta apresenta uma obra longitudinal aderente em enrocamento de pedra, para a proteção do talude.

A construção dos molhes exteriores do porto da Figueira da Foz provocou uma grande retenção de sedimentos a norte destes, estando na origem da construção de outras infraestruturas de proteção no trecho costeiro Cova-Leirosa.

Na praia da Cova existe um conjunto de cinco esporões e três obras longitudinais aderentes, uma vez que a frente urbana localiza-se numa zona suscetível à erosão, induzindo o recuo da linha de costa. Tanto na praia da Costa de Lavos como na praia da Leirosa observa-se a existência de um esporão, seguida de uma obra longitudinal aderente. Em todos estes casos, as obras pretendem mitigar o processo erosivo e o recuo da linha de costa, fixando a posição da linha de costa de modo a resguardar o património.

## 3.2 - Enquadramento Histórico

Há 2500 anos, a configuração do litoral da região em estudo era muito distinta da atual, sendo que, o rio Mondego desaguava num golfo que se prolongava por cerca de 10 quilómetros para o interior da atual linha de costa (Dias *et al.*, 1994)

Segundo Dias *et al.* (1994) já no ano de 1166, o rio Mondego era um local favorável para a navegação, tendo sido utilizado como porto para a pesca e comércio marítimo. No entanto, no final do século XVII, com o aparecimento da construção naval observou-se um aumento acentuado da sua utilização. No início do século XVII, o estuário do Mondego começou a sofrer assoreamento, levando a que a embocadura se tornasse instável e pouco profunda, dificultando a entrada de navios. Assim, no final do mesmo século iniciaram-se trabalhos de regularização do rio, com a construção de barragens, visando a expansão e segurança do movimento portuário. Todavia, estas obras induziram fortes impactos a jusante, levando a uma intensa acreção da barra, dificultando a utilização do porto, fazendo com que os navios o evitassem.

Como consequência e de modo a minimizar a erosão da costa nos setores mais a sul da embocadura iniciou-se, em 1962, a construção de dois molhes convergentes exteriores, um a norte da embocadura com 900 metros, que enraíza próximo do Forte de Santa Catarina e outro a sul com 950 metros que enraíza na praia do Cabedelo, fixando a largura da embocadura em 325 metros (Cunha e Dinis, 1998). Com a finalização da obra em 1965, verificou-se uma grande alteração na morfologia da zona costeira envolvente à embocadura. Nas praias a norte observou-se um avanço da linha de costa, resultante da acumulação de sedimentos transportados longitudinalmente, de encontro com o molhe norte do porto da Figueira da Foz provenientes da zona costeira a norte do Cabo Mondego (Dias *et al.*, 1994). Isto é constatado uma vez que Abecasis *et al.* (1962) realizou um estudo através da marcação de areias com isótopos radioativos (radioisótopos), que foram libertadas na praia de Quiaios, alguns quilómetros a norte do Cabo Mondego. Este observou que alguns sedimentos contornaram o cabo, atingindo a foz do Mondego em alguns dias, verificando-se um transporte sedimentar ao longo do Cabo Mondego. Por outro lado, consequentemente, a sul da embocadura, começou a observar-se erosão intensa, devido à retenção explicada anteriormente, bem como às obras de regularização da bacia hidrográfica do rio Mondego.

Segundo Duarte e Reis (1992), citado em Dias *et al.* (1994), na primeira década após a construção dos molhes observaram-se taxas de acumulação da ordem dos 30m/ano junto ao molhe norte e de 7m/ano em Buarcos, posteriormente este avanço foi atenuado até 1982 (106m em 13 anos: 8.2m/ano) até atingir a sua estabilização. Por outro lado, a sul, os efeitos da erosão junto à praia da Cova registaram um recuo da linha de costa com valores extremos de -30m/ano em 1976. Já a praia do Hospital, imediatamente a sul do molhe sul, apresentou-se relativamente estável, com o cordão dunar preservado, beneficiando do efeito de difração dos molhes.

De acordo com Duarte e Reis (1992), citados em Dias *et al.* (1994), observou-se, no final dos anos oitenta do século XX, um recuo na linha de costa a norte de molhe norte, numa taxa de 3 a 5m/ano, devendo-se parcialmente à exploração de areias nessa região. Segundo Cunha e Dinis (1998), os valores mensais de extração, com registo a partir de 1985, evidenciam oscilações que atingem o valor máximo de 460 000m<sup>3</sup> em Abril de 1993. Períodos de sobre exploração induziram erosão na praia da Figueira. O volume total extraído na praia entre 1977 a 1996 foi de aproximadamente 5.8x10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>. Contudo é importante mencionar que todo este volume foi posteriormente preenchido por sedimento da deriva litoral.

Os molhes embora essenciais na proteção do porto da Figueira, não foram suficientes. Assim, foram necessárias dragagens regulares na zona da barra de forma a manter as cotas de navegabilidade. Segundo Duarte e Reis (1992), citado por Dias *et al.* (1994), na década de 70, século XX, foram construídos esporões e enrocamentos entre o troço costeiro Cova - Leirosa, de forma a procurar minimizar o *deficit* sedimentar no sector sul.

Entre 2008 e 2010, de forma a minorar os problemas que afetavam as condições de navegabilidade no porto, nomeadamente o assoreamento da barra, o molhe norte foi prolongado em 400 metros. Contudo, após a obra, os problemas de assoreamento persistiram, sendo necessária a realização de dragagens de emergência de modo a facilitar o acesso dos navios às instalações portuárias.

### 3.3 – Agitação Marítima

A agitação marítima é a principal ação forçadora do transporte sedimentar nos trechos costeiros. Em cada instante o transporte depende das variáveis que caracterizam localmente a agitação: altura, período e direção de propagação da onda. Num determinado intervalo de tempo o transporte resultante depende da frequência e da sequência segundo as quais ocorrem os diversos tipos de agitação. Por esta razão, para o sucesso da simulação do transporte de sedimentos torna-se determinante a caracterização cuidadosa do clima de agitação ao largo da região de estudo (Barata *et al.*, 1996).

A propagação da agitação do largo para a costa é acompanhada e influenciada por vários fenómenos. Enquanto as características ao largo podem-se assumir, aproximadamente, idênticas numa vasta extensão, as características junto à costa são próprias de cada local, já que são influenciadas pelos fundos e pelo “recorte” da costa. Estes fenómenos ocorrem por interação entre as ondas e os fundos e fronteiras sólidas tais como praias, falésias, estruturas portuárias, etc. (Coelho, 2005).

#### 3.3.1 - Agitação ao Largo

A agitação marítima ao largo é aquela que é registada a elevadas profundidades, afastada da costa, de modo a que a propagação da onda não seja influenciada pelo efeito do fundo. Esta pode ser

medida com o auxílio de boias ondógrafo, determinando os seguintes parâmetros: altura significativa ( $H_s$ ), altura máxima ( $H_{m\acute{a}x}$ ), período médio ( $T_z$ ), período máximo observado ( $T_{m\acute{a}x}$ ), período de pico ( $T_p$ ) e direção da agitação.

O estudo da agitação marítima apresentado tem por base o Relatório Preliminar do Estudo da dinâmica sedimentar na embocadura da barra do porto da Figueira da Foz (Universidade de Aveiro, 2014), que se baseou no estudo efetuado no âmbito da Revisão do Plano de Ordenamento da Orla Costeira Ovar-Marinha Grande.

Para este caso foram estudados os dados das bóias da Figueira da Foz, entre 1990 e 1996, e de Leixões, entre 1996 e 2003, que apesar das suas posições distintas, apresentam um regime de agitação ao largo que pode ser considerado semelhante.

Neste estudo observou-se uma predominância da ondulação no quadrante NO, com uma frequência de 41%, sendo seguida dos setores ONO e NNO, com frequências de 29% e de 18% respetivamente. Para além disto, verificou-se um padrão sazonal forte da direção da ondulação, sendo que no verão marítimo (abril a setembro) observa-se uma predominância da ondulação do setor NO e NNO, em resposta aos ventos predominantes desta estação do ano (ventos de norte e noroeste). Já nos meses de inverno marítimo (outubro a março) a ondulação predomina nos quadrantes NO e ONO. Estes resultados aproximam-se dos estudos realizados por Barata *et al.* (1996) e Coelho (2005).

Relativamente à altura significativa observou-se que a classe entre os 0.5-1.5m tem uma frequência de ocorrência de 40%, seguida pela classe dos 1.5-2.5m, com 35% de ocorrência. Esta tendência decrescente mantém-se para as restantes classes, sendo que entre 2.5-3.5 e 3.5-4.5m verificam-se frequências de ocorrência de 16% e 6%, respetivamente. As menores alturas observam-se nos períodos de verão marítimo e as alturas superiores nas de inverno marítimo. Os regimes de temporal, com ondas acima dos 5.5m, têm menos de 1% de frequência de ocorrência.

Períodos de ondulação mais frequentes estão entre 5 e 9s, representando 77% dos registos. Neste intervalo, 6-7s e 7-8s com frequência de ocorrência de 23% e 20%, respetivamente, são as mais representadas.

### 3.3.2 – Agitação Local

A agitação local ocorre próximo à costa, sendo bastante distinta da agitação ao largo uma vez que há interação com o fundo. Sendo assim, as características da agitação local podem ser estimadas com recurso a instrumentos de medição como correntómetros e transdutores de pressão que registam a velocidade da corrente e a elevação da superfície livre. A agitação junto à costa é frequentemente determinada através da utilização de modelos numéricos dedicados à propagação das características da agitação da ondulação do largo para a costa.

Capitão *et al.* (1997), citado em Freire *et al.* (2004), caracterizaram o clima de agitação anual da região próxima da costa de Buarcos baseando-se em registos de janeiro de 1984 até dezembro de 1996. Estes registos foram obtidos por uma estação localizada a 89 metros de profundidade, e através de modelação numérica foram transferidos para a frente da praia, a 10 metros de profundidade. Foi possível assim concluir que, as direções de ondas mais frequentes ocorrem dentro da gama de valores N265-295° e estão associados a valores de altura significativa entre 0.5-3.0m. Valores mais frequentes ocorrem dentro dos 0.5-3.0m e correspondem a 91% do número total de registos de onda disponíveis. A classe de alturas 1.0-1.5m é uma das que tem mais registos. Ondas com  $H_s$  superiores a 4 metros só ocorrem 2.6% no total do regime.

Já o trabalho de Freire *et al.* (2004) baseou-se na caracterização da ondulação em três pontos localizados na batimétrica dos -10m (ZH) ao longo de um ano, entre agosto de 2001 e agosto de 2002. Os três pontos, P3/P2 e P1, encontram-se distribuídos na praia de Buarcos, sendo que o primeiro encontra-se mais a norte e o último mais a sul. A descrição do clima de agitação próximo à costa de Buarcos foi baseada nos registos da boia de Leixões que se encontrava a cerca de 120km a norte de Buarcos, que dão os parâmetros das ondas necessários para através de modelação numérica simular a propagação desde o largo para a zona de estudo. Comparando os resultados obtidos ao largo, com os próximos à costa, foi possível observar que estes sofreram alterações por efeito do fenómeno de refração. Verificaram-se algumas mudanças nas direções da propagação da onda do largo para a costa, observando-se uma ligeira rotação para o quadrante oeste. A faixa de direções ao largo entre N185° a N340° foi reduzida na zona costeira de Buarcos para N200° a N330°. Em Buarcos, as direções mais frequentes encontram-se nos setores N260° a N330°. As alturas de onda com maior número de ocorrências encontram-se na classe dos 0.5-3.5m, que estão associadas a direções entre N260° e N330°, bem como períodos entre 4 e 12s. Contrariamente, as alturas de onda superiores a 3.5m estão associadas a direções N270°, com períodos entre 8 e 14s.

### 3.4 – Maré

A costa oeste de Portugal é caracterizada por marés semidiurnas, de amplitude elevada (média de marés vivas de 2.8-2.9m, litoral mesotidal elevado), em que as correntes associadas adquirem importância nas vizinhanças das barras de maré de lagunas e estuários (Andrade e Freitas, 2002) Segundo Marta-Almeida & Dubert (2006), as componentes semidiurnas lunar principal ( $M_2$ ) e solar principal ( $S_2$ ) originam importante variação quinzenal na amplitude da maré (ciclo de marés vivas e marés mortas).

Segundo Duarte *et al.* (2000) e Cunha *et al.* (1997), o rio Mondego tem uma bacia hidrográfica com 1300km<sup>2</sup>, apresentando uma planície aluvial com 4 quilómetros de largura máxima. O seu estuário desdobra-se junto à foz em dois braços, separados pela ilha de Morraceira, braços estes que voltam a unir-se parcialmente a cerca de 7 quilómetros a montante. A dinâmica deste estuário é fortemente influenciada pela propagação da maré Atlântica ao longo dos braços do estuário.

À medida que se avança para o interior do estuário, observa-se a distorção não linear da propagação da maré, havendo um atraso na fase da maré, levando à geração da componente de maré secundária  $M_4$ . Esta deve-se aos canais pouco profundos, bem como à reduzida área de ambientes intermareais e consequentemente baixa capacidade de retenção de água no sistema. Estes aspetos traduzem-se pelo desenvolvimento de enchentes mais curtas e vazantes mais longas, maiores atrasos nas baixa-mares. As condições hidrodinâmicas analisadas permitiram caracterizar este sistema costeiro de 'Estuário de domínio de enchente' (Duarte *et al.*, 2000).

### 3.5 – Caudal Fluvial

A Figura 3.3 representa o caudal médio diário referente ao Açude-Ponte Coimbra, entre 1988 e 2015, fornecidos pelo Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH). O caudal apresenta um regime sazonal com valores superiores no inverno, não excedendo os 1000m<sup>3</sup>/s, e inferiores no verão, não excedendo os 100m<sup>3</sup>/s. Segundo Louro e Lourenço (2005) o pico de



1800m<sup>3</sup>/s corresponde ao inverno de 2001, em que se verificou precipitação intensa e ocorrência de cheias, no entanto estes relatam que, em 1948, registaram-se valores superiores a 3000m<sup>3</sup>/s.

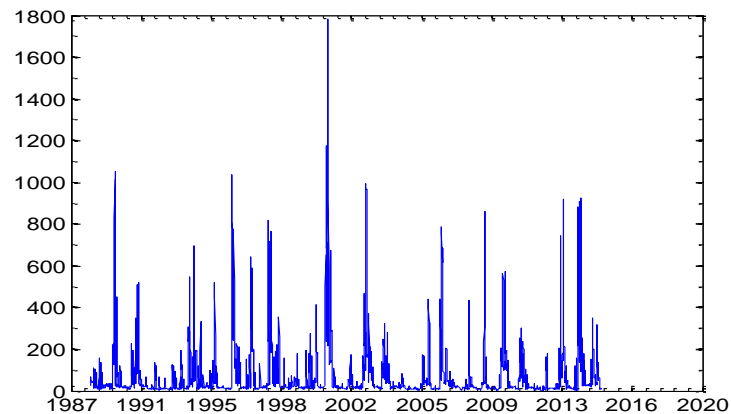


Figura 3.3: Caudal médio diário (m<sup>3</sup>/s) referente ao Açude Ponte Coimbra, entre 1988 e 2015.

## 3.6 – Dinâmica Sedimentar

A dinâmica sedimentar é um tema complexo e de elevado grau de incerteza, uma vez que a estimativa de transportes sedimentares pode resultar em valores distintos, no entanto válidos para as condições de agitação a que estão sujeitos. Sendo assim, os valores válidos do transporte de sedimentos são escassos e díspares na literatura. O transporte litoral sólido determina-se consoante diferentes parâmetros, parâmetros estes que influenciarão os resultados, fazendo com que as estimativas de um valor representativo do transporte de sedimentos ao longo do litoral seja muito difícil. Nesta secção será apresentada de um modo geral a dinâmica sedimentar na costa portuguesa e posteriormente na zona de estudo.

### 3.6.1 - Costa Portuguesa

Andrade e Freitas (2002) referem que a elevada energia da agitação marítima na costa oeste de Portugal faz com que esta seja uma das mais ativas da Europa. A enorme quantidade de energia libertada pela rebentação das ondas traduz um intenso volume de transporte sedimentar para sul, com um valor líquido de 1 a 2 milhões de m<sup>3</sup>/ano.

Coelho (2005) aplicou as fórmulas do CERC (Rosati *et al.*, 2002) e de Kamphuis (Kamphuis 1991) na estimativa dos volumes de transporte sólido. A primeira assume que a rebentação das ondas dá-se em águas pouco profundas considerando a orientação da linha de costa ao longo do litoral ( $\alpha_N$ ). A segunda é uma expressão empírica que inclui a declive da praia (M) e a dimensão dos sedimentos ( $d_{50}$ ). A avaliação do potencial de transporte sólido longitudinal a sul da barra de Aveiro foi feita, com base num ano típico do clima de agitação registado na boia ondógrafo de Leixões e considerando diferentes localizações na faixa costeira em estudo. Foram obtidos volumes potenciais de transporte sólido longitudinal no sentido N-S na região de Aveiro: com a fórmula do CERC  $2.4 - 3.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  (variando a orientação da linha de costa) e com a fórmula de Kamphuis  $1.3 - 1.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  (variando o declive da praia e a dimensão do sedimento).

Silva *et al.* (2012) desenvolveram um estudo sobre o transporte longitudinal na praia da Vieira, situada entre o troço costeiro da Figueira da Foz e a Nazaré e que se considera representativa da dinâmica sedimentar entre a foz do rio Mondego e o Canhão da Nazaré. Estes fundamentaram-se em dados de reconstituições do clima marítimo entre 1953 e 2010 com o modelo WW3 (Dodet *et*

*al.*, 2010) juntamente com o modelo SWAN e a fórmula do CERC (Rosati *et al.*, 2002) estimando o transporte longitudinal. Os resultados obtidos apresentam, para o período considerado, um valor médio do transporte líquido de aproximadamente  $1 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$  de norte para sul, no entanto com uma variabilidade interanual significativa, com valor mínimo de 0.108 e máximo de  $2.24 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ .

### 3.6.2 - Área de Estudo

A área de estudo entre o Cabo Mondego e a Leirosa apresenta características distintas a norte e a sul da embocadura do rio, que irão determinar a dinâmica sedimentar destes setores e da própria embocadura que é a zona de transição entre estes. No entanto é importante referir e salientar a existência do cabo no limite superior da zona de estudo, uma vez que torna a avaliação do transporte sedimentar peculiar. O transporte no cabo é predominantemente de norte para sul, contudo, de acordo com Freire *et al.* (2004), para regimes de ondulação com importantes contribuições do setor SO pode reduzir ou eliminar a deriva litoral através do Cabo Mondego.

Abecassis *et al.* em 1962, citado por Cunha e Dinis (1998), realizaram um estudo que permitiu evidenciar que sedimentos provenientes da deriva litoral a norte do Cabo Mondego contornavam o mesmo e atingiam regiões mais a sul, como a praia da Figueira da Foz. Isto mostra que os sedimentos que alimentam este setor provêm de regiões a norte do cabo. No entanto quando esta fonte de sedimentos é cortada ou limitada, no momento em que a agitação adquire rumos inferiores a  $N283^\circ$ , pode levar a eventos de erosão na praia de Buarcos, como se verificou entre 1995 e 1997, em que a agitação marítima esteve mais rodada para os quadrantes de oeste (Abecassis *et al.*, 1962). Estes trabalhos evidenciaram que no trecho da praia de Buarcos o transporte efetua-se sempre para sul, independentemente do clima sazonal da agitação marítima.

Foram feitas diferentes estimativas para o transporte sedimentar neste troço, tendo por base a retenção de sedimentos junto ao molhe norte, Vicente e Clímaco (1986), citado em Lorangeiro e Oliveira *et al.* (2003), que após a construção dos molhes estimou uma acumulação de  $1 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ . Para além deste, Abecassis *et al.* (1970), citado em Dias *et al.* (1994), estimaram entre 1963 e 1968 uma acumulação de  $0.3 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ , entre a linha de maré-baixa e a batimétrica dos -10m. Além destes, Carvalho (1971), citado em Dias *et al.* (1994), avaliou o transporte sólido litoral com base na comparação de levantamentos topo-hidrográficos realizados entre 1961-1966, estimando um acumulação de  $0.9 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$  a norte do molhe da Figueira da Foz. No entanto este resultado não abarca a praia submersa, nem o banco externo da foz do Mondego, podendo ser um valor inferior ao real.

Cunha e Dinis (1998) estimaram que o caudal sólido em deriva na zona de rebentação na praia da Figueira da Foz é de  $0.42 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$  com base nos volumes de areia extraídos na praia da Figueira da Foz até 1996.

Lorangeiro *et al.* (2003) utilizaram o modelo numérico LITPACK (DHI, 2000) para determinar o transporte sólido na praia de Buarcos. Os resultados mostraram que o transporte longitudinal ocorre preferencialmente ao largo das plataformas rochosas, sendo fortemente influenciado pelo nível da superfície livre da água. O valor médio anual avaliado para o transporte admitindo toda a extensão da praia de Buarcos é de  $0.788 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$  em situações de preia-mar e de  $1.545 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$  em baixa-mar. Esta desigualdade de valores deve-se ao deslocamento da zona de rebentação para a zona da plataforma rochosa à medida que o nível médio da superfície livre da água aumenta. Estes autores verificaram que ondas com alturas significativas superiores a 2.8m, apesar de constituírem apenas 13% das ocorrências, contribuem com aproximadamente 60 a 70%

do transporte total. O que decorre da zona de rebentação destas ondas se localizar antes das plataformas rochosas, que é onde existem sedimentos. Verificaram que, a ondulação do setor N265-285°, apesar de representar cerca de 25% das direções da ondulação num ano médio, gera 50% do transporte longitudinal. Assim, o estudo de Larangeiro *et al.* (2003) revelou que parâmetros de reduzido nível percentual de ocorrência, podem afetar de forma significativa o transporte naquela região.

Oliveira *et al.* (2002) calcularam, a partir de modelação, a distribuição transversal do transporte sedimentar longitudinal e a evolução da linha de costa de modo a avaliar a influência do efeito do afloramento rochoso de Buarcos. Estes observaram a existência de uma barra submersa longitudinal à costa, localizada a sul do alinhamento do afloramento rochoso de Buarcos, possivelmente associada ao fluxo sedimentar para sul, sendo esta confinada ao setor norte da praia da Figueira da Foz. Oliveira *et al.* (2002) concluíram que a barra submersa influencia a distribuição transversal do transporte longitudinal e por rebentação condiciona a energia das ondas que chega à praia e origina valores do transporte sobre a barra mais intensos do que os observados na praia. Por outro lado, nos setores mais a sul da praia da Figueira da Foz o transporte apresenta valores máximos localizados junto à praia.

Cerca de 83% do transporte líquido anual ocorre durante o regime marítimo de inverno. Os valores médios do transporte para norte e para sul estimam-se em  $30 \times 10^3$  e  $0.893 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ , respetivamente. Devido à forma curvilínea da praia da Figueira da Foz e à direção predominante da ondulação, os setores localizados mais a norte da praia apresentam uma maior capacidade para transportar sedimento para sul (Oliveira *et al.*, 2002).

O setor sul, entre a embocadura e a praia da Leirosa tem uma orientação da costa similar à do setor a norte do Cabo Mondego e sujeita ao mesmo regime de agitação. Assim, apresentará um valor de transporte longitudinal semelhante.

Todos os estudos que foram apresentados anteriormente mostraram que o transporte longitudinal de sedimentos ao longo das praias do setor em estudo faz-se predominantemente de norte para sul. No entanto, a maior prova deste transporte foi o aprisionamento dos sedimentos da deriva litoral na praia da Figueira da Foz após a construção dos molhes em 1962 e o avanço da linha de costa verificado.

### **3.7 – Evolução Morfológica da Embocadura 2010-2014**

Nesta secção pretende-se analisar a evolução morfológica da embocadura entre 2010 e 2014 após o prolongamento do molhe norte. A Figura 3.4 apresenta essa evolução das batimetrias ao longo do tempo, em períodos de inverno marítimo, na embocadura e zona envolvente próxima. Nas figuras foi evidenciada a batimétrica dos 7m de modo a ilustrar a formação e evolução da barra submersa no tempo.

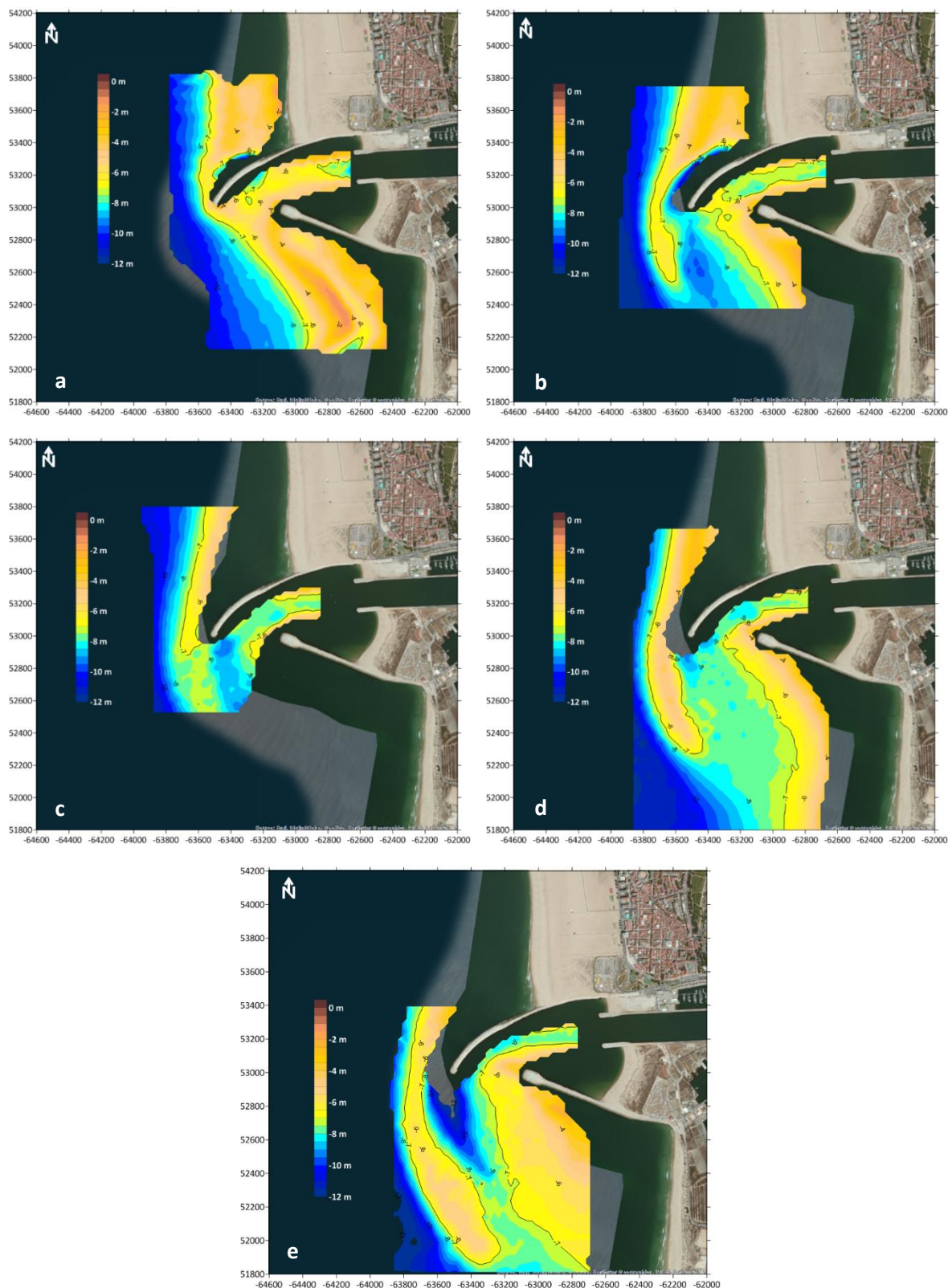


Figura 3. 4: Batimetrias da embocadura do Mondego: a) 16 de março de 2010; b) 7 de março de 2011; c) 27 de fevereiro de 2012; d) 25 de fevereiro de 2013; e) 12 de março de 2014 (Universidade de Aveiro, 2015).

Como é possível analisar pela Figura 3.4, a 16 de março de 2010 observava-se uma situação em que as batimétricas contornam de modo regular o molhe norte, estando a batimétrica dos 7 metros

próxima a este, seguindo para sul continuamente, sem grandes variações. A 7 de março de 2011, verifica-se a existência de uma barra submersa que contorna o molhe norte. Na Figura 3.4 (c), 27 de fevereiro de 2012, a batimétrica dos 7 metros sofre um recuo, possivelmente por efeito de atividade de dragagem. Aproximadamente um ano depois, a barra submersa volta a sofrer acreção (25 de fevereiro de 2013), sendo este efeito contínuo, uma vez que a 12 de março de 2014 esta torna-se mais larga e persistente. Pode-se assim observar que, com a extensão do molhe norte, houve um ajustamento do sistema, gerando-se uma barra submersa que varia de comprimento e espacialmente, oscilando para perto do molhe ou afastando-se do mesmo.

A existência da barra submersa constitui um problema para o porto da Figueira da Foz, uma vez, que torna a navegação insegura. Assim, estes para além de continuarem a monitorizar este setor com levantamentos batimétricos, necessitam de realizar dragagens de emergência para assegurar a entrada dos navios às instalações portuárias.

A formação e consolidação da barra submersa parece estar associada à ocorrência de eventos de temporal devido ao intenso transporte sedimentar que se observa nestes regimes de agitação marítima, em que é realimentada a barra submersa na embocadura. Deste modo, será apresentado um caso específico de um temporal que ocorreu em 2012 que afetou a embocadura (Figura 3.5 b).

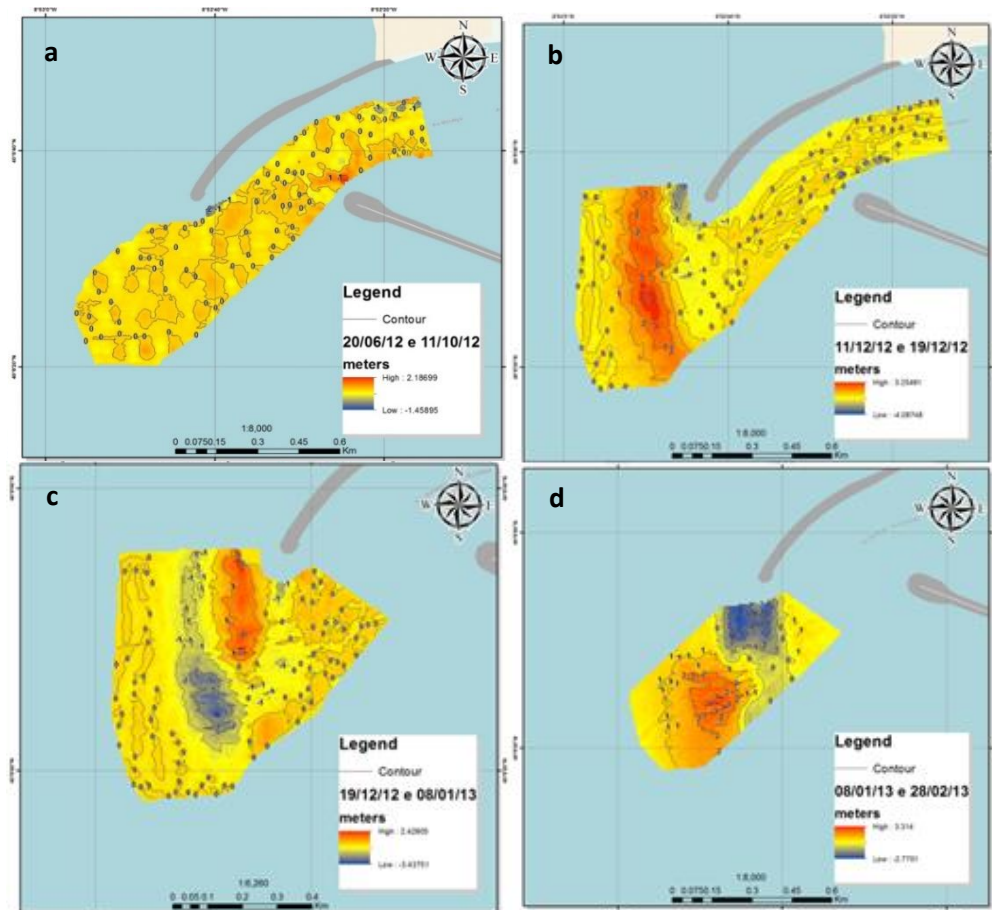
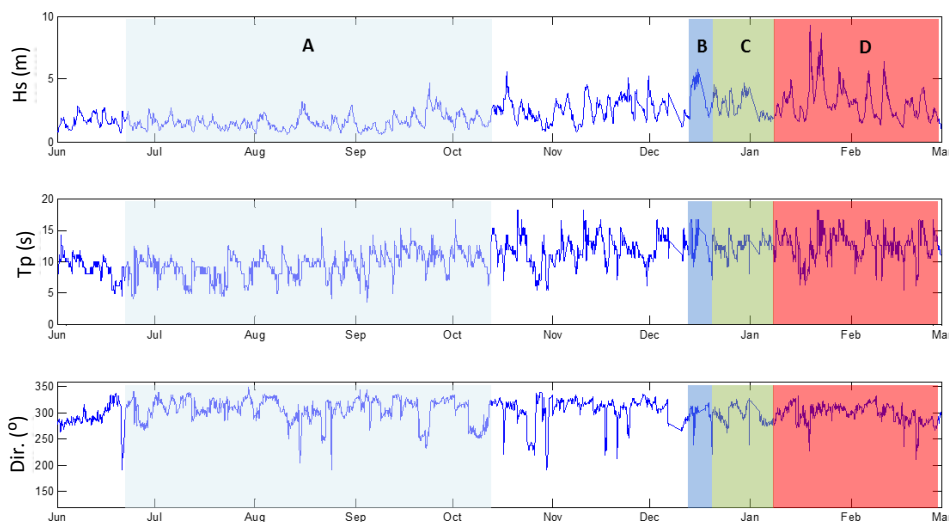


Figura 3.5: Mapas da variação de cota para os períodos: a) 20 de junho a 11 outubro 2012; b) de 11 a 19 dezembro 2012; c) de 19 dezembro a 8 janeiro 2013; d) de 8 de janeiro a 28 fevereiro 2013 (Universidade de Aveiro, 2015).

A Figura 3.5 representa as variações batimétricas associadas às distintas campanhas, que permitem captar o início e fim do inverno, para além de explicar um pouco o porquê deste estudo. Entre 20 de junho e 11 de outubro de 2012 as diferenças mantêm-se praticamente nulas, havendo um

padrão constante de fundo entre essas datas. Observou-se que as diferenças são inferiores às dos restantes intervalos, sendo que isto se deve à ausência de temporais (Figura 3.6 A). Em contrapartida, no período de 11 a 19 de dezembro de 2012 ocorreu um evento de temporal com alturas máximas até aos 5.6m (Figura 3.6 B), verificando-se um aumento nos volumes de acreção de  $189.089\text{m}^3$  levando ao reforço da barra submersa como consequência direta do efeito do temporal. Posteriormente, no período compreendido entre 19 de dezembro de 2012 e 8 de janeiro de 2013 foi efetuada uma operação de dragagem com remoção de  $100.000\text{m}^3$  de volume de sedimentos, tal como se observa nos valores negativos no mapa da Figura 3.5 (c). Por fim, entre 8 de janeiro e 28 de fevereiro de 2013, observa-se que num curto intervalo de tempo o mapa apresenta valores positivos na zona onde foi realizada a dragagem, podendo indicar que a sua colmatação tenha ocorrido devido a eventos de temporal (Figura 3.6 D) que ocorreram nesse período, registando uma acreção de  $157.554\text{m}^3$ .

A Figura 3.6 representa os valores da altura significativa da onda ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ) e direção medidos na bóia ondógrafo de Leixões para a totalidade dos quatro períodos mencionados anteriormente. O primeiro período corresponde ao verão marítimo (Figura 3.6 A), sendo os valores da altura da onda típicos desta estação do ano.



**Figura 3.6: Regime de ondulação medido na bóia de Leixões. Os quatro quadrados A-D delimitam os quatro períodos em análise (Silva *et al.*, 2015).**

## Capítulo 4 – Campanhas de Campo

A elaboração desta dissertação baseou-se em duas campanhas de campo distintas, de modo a estudar a dinâmica sedimentar entre o Cabo Mondego e a praia da Leirosa, região envolvente à embocadura do estuário do Mondego. Procedeu-se à aquisição de dados hidrodinâmicos e de concentração de sedimentos em suspensão, de forma a estimar caudais sólidos em transporte e testar e validar o modelo numérico que foi desenvolvido. A primeira campanha realizou-se entre 5 e 9 de novembro de 2014 e a segunda entre 21 e 24 de maio de 2015.

Em ambas as campanhas foram efetuadas medições com sondas OBS para a obtenção da concentração de sedimentos em suspensão (*Optical Backscatter Sensors, OBS*), correntómetros eletromagnéticos de modo a medir a velocidade do escoamento (*Electromagnetic Current Meters, ECM*) e por fim, sensores de pressão para a medição da elevação da superfície livre da água (*Pressure Transducers, PT*), Figura 4.1. A frequência de aquisição foram de 6.667Hz, 10Hz e 2Hz, respetivamente (Figura 4.1). Estes instrumentos foram instalados em estruturas que se colocaram na zona entre marés (Figura 4.2).

As campanhas foram realizadas de formas distintas. A primeira baseou-se na medição de parâmetros hidrodinâmicos da agitação marítima em 8 estações, sendo que 5 destas situavam-se na praia da Figueira da Foz e 3 a sul da embocadura do rio Mondego. Na campanha de maio de 2015 existiram 6 estações de medições, três a norte e três a sul da embocadura.



Figura 4.1: Instrumentos utilizados nas campanhas de campo, sensor de pressão (Fonte: Fondriest Environmental, Inc.), seguido de sensor ótico (Fonte: Campbell Scientific, Inc.) e por fim um correntómetro eletromagnético (Fonte: JFE Advantech Co., Ltd).



Figura 4.2: Tripé para a instalação dos instrumentos, seguida de um transdutor de pressão (Level Troll 500), sensor ótico (Campbell) e correntómetro eletromagnético (Infinity) na Campanha de novembro 2014.

## 4.1 – Instrumentos

### 4.1.1 – Transdutor de Pressão

Os transdutores de pressão (PT) medem a elevação da superfície livre da água em relação à uma posição fixa do sensor,  $\zeta$ . Através da análise dos dados obtidos pelo PT é possível calcular a altura significativa da onda,  $H_s$ , e a profundidade média,  $h$ .

O processamento dos dados baseia-se em cinco passos. Primeiro é feita a identificação dos regimes de agitação no registo de dados, sendo estes a zona de espraio e de rebentação. Após a identificação destes é necessário extrair os dados correspondentes ao regime de espraio, uma vez que ao se aplicar o filtro neste, estes irão gerar resultados irrealistas. Isto deve-se ao facto que neste regime temos picos de elevação da superfície livre da água, voltando a zero após a passagem da onda, e ao filtrarmos estas secções nulas o filtro cria ruído no sinal, levando à camuflagem do sinal. Depois de selecionado o regime de rebentação foi necessário recalculer os valores da elevação da superfície livre relativamente ao nível da superfície da areia, uma vez que a distância entre o sensor e a superfície da areia são medidos e variam ao longo do tempo. Ao sinal obtido,  $\zeta$ , foi aplicado um filtro de modo a separar a componente de alta frequência,  $\zeta_{HF}$ , representativa das ondas de curto período, da componente de baixa frequência,  $\zeta_{LF}$ , representativa de ondas de longo período. Com os resultados obtidos da alta frequência e para intervalos de tempo com a duração de 10 minutos foi estimada a altura significativa da onda,  $H_s$ , a partir da equação 1. Com os valores de  $\zeta$  da baixa frequência foi calculada a profundidade média, através da equação 2.

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (1)$$

$$h = \sum_i \zeta_i / N \quad (2)$$

Nas expressões anteriores,  $m_0$  exprime a variância de  $\zeta$  em cada intervalo de tempo e  $N$  o número de dados correspondente em cada intervalo. Por fim, foram calculados os espectros de amplitude do sinal.

### 4.1.2 – Sensor Ótico

Os sensores OBS são sensores óticos que detetam a dispersão e a atenuação da luz, de forma a medir os sedimentos em suspensão e a turvação em amostras de água. O seu sinal irá depender da área que o OBS atinge, que é proporcional à concentração de sedimentos em suspensão, da reflexão, bem como do tamanho e forma das partículas (Downing, 2008). Estes sensores são muito sensíveis à luminosidade, bem como à existência de bolhas, matéria orgânica, sendo de difícil calibração.

Estes sensores adquirem dados em milivolts (mV), pelo que, para se obter concentrações de sedimentos em suspensão,  $C$ , em gramas por litro, é necessária a sua conversão através da calibração do sensor. As calibrações dos OBS foram feitas em laboratório, com amostras de areia dos locais onde os sensores se posicionavam nas campanhas de campo.

Para a realização da calibração dos sensores foram introduzidos 5 litros de água num recipiente cilíndrico, um agitador, de modo a que toda a água ficasse em movimento, e o sensor ótico para calibração. Posteriormente foram adicionados os sedimentos gradualmente, mantendo-os em suspensão e controlando a concentração de sedimentos dentro do recipiente. Este procedimento de introdução de sedimentos, bem como a leitura dos resultados do OBS foi efetuada para os diferentes OBS utilizados na campanha de campo. A Figura 4.3 representa o sistema utilizado para



a calibração das sondas. No entanto, não foi possível chegar a concentrações muito elevadas, uma vez que o agitador não tinha potência suficiente para manter o sistema homogéneo, isto é, os sedimentos distribuídos uniformemente em suspensão em toda a coluna de água.



Figura 4.3: Estrutura utilizada para a calibração das sondas OBS (esquerda) e exemplificação da calibração (direita), (Calibração Carrilho, 2013).

Sendo assim, para a mesma sonda, sonda OBS3 foram executadas 3 calibrações. Duas destas foram feitas com a areia recolhida na campanha de campo do dia 9 de novembro 2014 ( $d_{50} \approx 0.4\text{mm}$ ), obtendo os perfis 1 (preto) e 2 (verde) da Figura 4.4. Note-se que não foi possível atingir valores muito elevados de concentração, máximo de 125g/L no interior do recipiente. A terceira calibração feita (perfil vermelho) foi efetuada com uma areia calibrada de 0.2 milímetros, atingindo concentrações de 280g/L. Os valores obtidos são próximos dos obtidos por Carrilho (2013), com um  $d_{50}$  entre 0.5 e 0.3mm, em que se conseguiu atingir valores de concentração de 1000g/L. É possível ainda observar que tanto para a calibração 3 e calibração de Carrilho (2013) respetivamente, estes têm o seu valor mínimo praticamente sobrepostos de -3735mV aos 120g/L. Uma vez que os meios de calibração e uniformização da cama de sedimentos em suspensão foi mais bem conseguida na calibração de Carrilho (2013), consideraram-se as calibrações de Carrilho (2013) para os 3 OBS, dado que foram calibrados os mesmos OBS com areia da praia de Mira, que terá características similares às da praia a sul da embocadura.

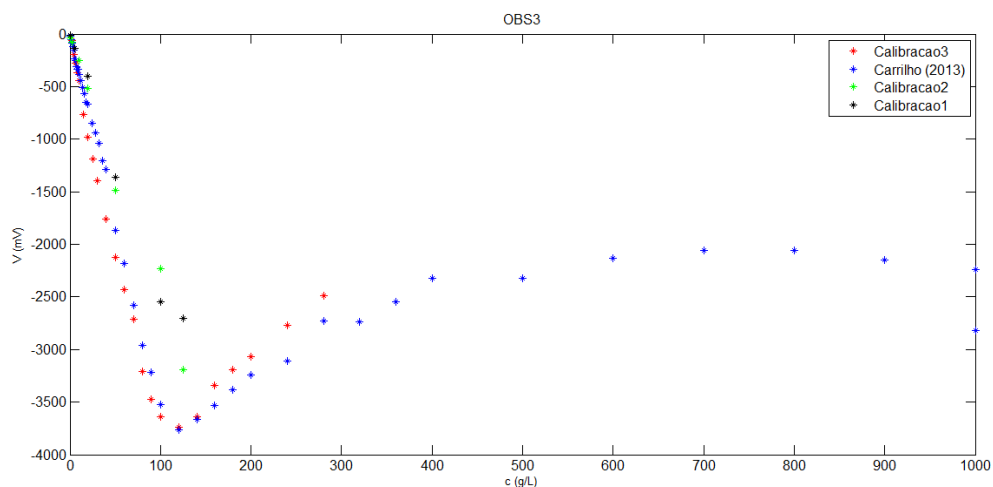


Figura 4.4: Voltagem (mV) em função da concentração de sedimentos (g/L) em médias de 2 minutos para o OBS3.

Os valores medidos pelo OBS durante a calibração correspondem a valores conhecidos de C no recipiente, de onde se estabelece a reta de calibração (Figura 4.5). Do processo de calibração de Carrilho (2013), resultaram as seguintes retas de calibração:

$$C_{OBS1} = -0.026 \times OBS1 - 0.130 \quad (3)$$

$$C_{OBS2} = -0.028 \times OBS2 - 0.013 \quad (4)$$

$$C_{OBS3} = -0.028 \times OBS3 - 0.110 \quad (5)$$

$C_{OBS}$  é o valor da concentração de sedimentos em suspensão ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) e OBS é a voltagem atribuída pelo aparelho a uma determinada concentração.

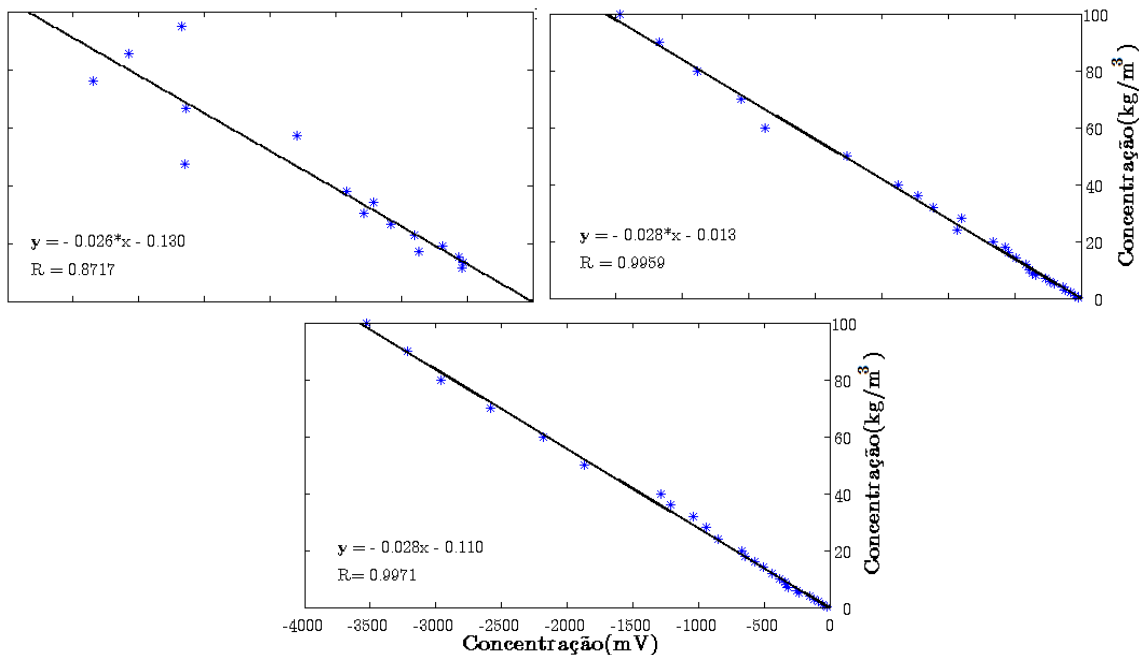


Figura 4.5: Retas de calibração dos sensores OBS: OBS1 (canto superior esquerdo), OBS2 (canto superior direito) e OBS3 (em baixo) (Carrilho, 2013).

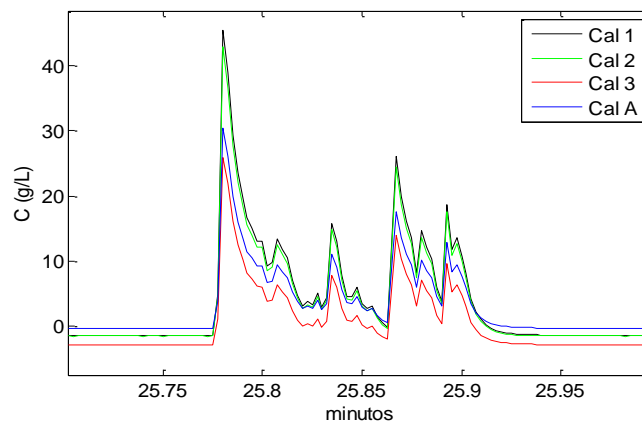


Figura 4. 6: Concentração de sedimentos em suspensão para as diferentes retas de calibração, OBS3 (zoom da zona de espraio).

A Figura 4.6 representa a concentração de sedimentos em suspensão do OBS3 para diferentes retas de calibração. É interessante observar a influência que a granulometria dos sedimentos tem na calibração e assim nos resultados de concentração dos sedimentos. Assim, compreende-se que a

partir do momento em que os valores de concentração de sedimentos são afetados pela calibração, estes irão afetar o valor final do transporte. Para além disso é possível constatar que a calibração 1 e 2 dão valores de concentração superiores aos da calibração 3, e Carrilho (2013) apresenta um valor intermédio.

Os valores de concentração de sedimentos medidos no campo após a calibração foram processados: foram calculados valores médios das concentrações em intervalos de tempo de 10 minutos, de modo a avaliar os valores de C correspondentes às zonas de espraio e rebentação.

#### 4.1.3 – Correntómetro Eletromagnético

O correntómetro eletromagnético (ECM) mede as componentes  $v_x$  e  $v_y$  horizontais de velocidade num referencial interno. Para calcular a componente longitudinal (*longshore*,  $v_x$ ) e transversal (*cross-shore*,  $v_y$ ) da velocidade da corrente, como representado na Figura 4.7, foi necessário converter o eixo de referência local do instrumento nessas duas componentes através da medida da orientação do ECM com uma bússola (Figura 4.8). Neste processo foi necessário fazer a correção entre o norte magnético e o geográfico, bem como determinar a orientação da linha de costa daquela região. Assim, foi possível com estes ângulos fazer uma transformação de coordenadas de modo a calcular os valores de  $v_x$  e  $v_y$ .

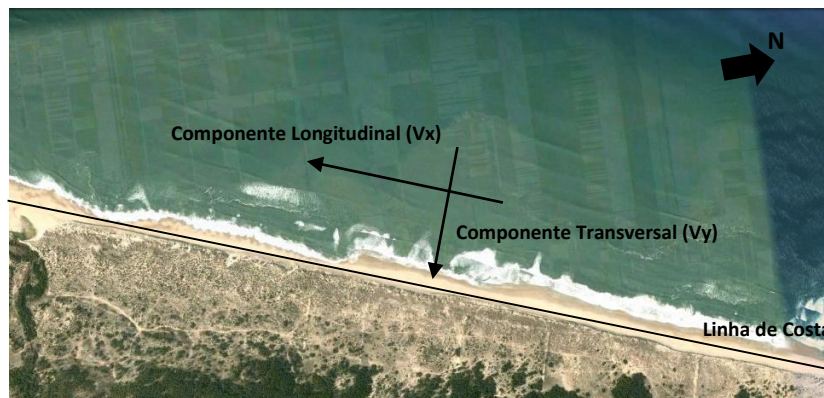


Figura 4.7: Sistema de referência considerado para as componentes da velocidade  $V_x$  e  $V_y$ .



Figura 4.8: Bússola para medição do ângulo entre o sensor de temperatura do ECM e o norte magnético.

Com os dados obtidos em campo ( $v_x$  e  $v_y$ ) é possível fazer a calibração das componentes da velocidade. Para tal foi calculada a intensidade da velocidade  $V_{xy}$ , a partir da equação 6:

$$V_{xy} = \left(1 + \alpha \frac{4v_x^2 v_y^2}{(v_x^2 + v_y^2)^2}\right) \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (6)$$

Em que  $\alpha$  é a constante de calibração do ECM. Para além disto foi calculado o ângulo  $\theta_{xy}$ , que é o ângulo entre o eixo Y e  $V_{xy}$  que é determinado por:

$$\theta_{xy} = \left[ \arctan\left(\frac{V_x}{V_y}\right) + \gamma \right] \times 180/\pi \quad (7)$$

$$\gamma = 0 \text{ para } V_y \geq 0, \quad \gamma = \pi \text{ para } V_y < 0$$

A partir destas duas variáveis ( $V_{xy}$  e  $\theta_{xy}$ ) é possível obter as componentes calibradas da velocidade:

$$V_x = V_{xy} \sin(\theta_{xy}) \quad (8)$$

$$V_y = V_{xy} \cos(\theta_{xy}) \quad (9)$$

Concluída a calibração das velocidades, a componente longitudinal da velocidade tem sentido positivo de norte para sul e a componente transversal do largo para a costa como se ilustra na Figura 4.7.

Com as séries temporais obtidas após esse tratamento de dados, foi feita uma filtragem dos dados, considerando uma frequência de corte de 0.03Hz, de modo a separar a componente de alta e baixa frequência. Com as componentes  $V_x$  e  $V_y$  no domínio das altas frequências, foi calculada a velocidade orbital das ondas de curto período para além de determinado o valor médio do ângulo de incidência da onda a cada 10 minutos. Com os valores da componente de baixa frequência, foram calculadas os valores médios das duas componentes da velocidade a cada 10 minutos, de modo a estimar a intensidade e a direção da corrente litoral e da corrente transversal.

#### 4.1.4 – Caudais Sólidos em Suspensão

De modo a calcular o caudal sólido em suspensão é necessário, numa primeira fase, definir uma altura de influência de cada OBS na coluna de água, de forma a, posteriormente, ser possível integrar na vertical. A representação da posição de 3 OBS na Figura 4.9 é um dos casos das campanhas de campo, tendo sido utilizado 3 OBS. Estimou-se que os registos do OBS3 representavam o caudal sólido em suspensão na coluna de água entre o fundo e os primeiros 17.5cm de altura. O OBS2, por sua vez, representava dos 17.5cm aos 31.5cm de coluna de água, e por fim, o OBS1 representa dos 31.5cm até aos 38cm. No entanto é importante salientar a variabilidade do fundo ao longo do tempo, sendo que este é tido em conta e ajustado. Por outro lado, os transportes em suspensão para níveis superiores do OBS1 são considerados nulos, uma vez que não existem medições na zona acima deste OBS.

Deste modo, no local da medição, com os dados adquiridos pelo ECM e OBS é possível determinar a componente do transporte em suspensão. Dado que as medições de velocidade do ECM foram efetuadas a um só nível, na maior parte dos casos, assumiu-se que esta é representativa da velocidade de escoamento de toda a coluna de água.

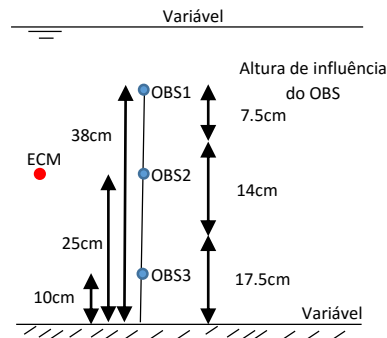


Figura 4.9: Esquema do posicionamento dos instrumentos na coluna de água e respetivas alturas de influência dos OBS.

A taxa de transporte sedimentar,  $q_s$ , é determinada pelo volume de areia que atravessa uma secção por unidade de largura e por unidade de tempo, sendo definido pelo integral do fluxo de sedimentos na coluna de água.

De modo a determinar o fluxo de sedimentos nos diferentes níveis da coluna de água, foi necessário para cada instante de tempo, multiplicar a velocidade medida pelo ECM com a concentração de sedimentos em suspensão de cada OBS. Estes valores foram posteriormente integrados na coluna de água, de modo a calcular a taxa de transporte total na direção longitudinal e transversal:

$$q_{sx} = \int_{z_0}^h V_x(z, t)C(z, t)dz; \quad q_{sy} = \int_{z_0}^h V_y(z, t)C(z, t)dz \quad (10)$$

onde  $h$  representa a altura da coluna de água e  $z_0$  corresponde ao nível acima do fundo onde o valor da velocidade do escoamento é nulo.

Um dos problemas no cálculo dos fluxos sedimentares é a sincronização dos níveis dos diferentes equipamentos. A Figura 4.10 mostra os dados dos sensores OBS, ECM e PT do dia 7 de novembro de 2014 quando estes se encontravam na zona de espraio. Como é possível observar estes encontram-se bem sincronizados, uma vez que, quando a água atinge os sensores o PT mede um aumento da elevação da superfície livre da água e com este verifica-se que a componente transversal da velocidade, representada a verde no gráfico, tem um pico positivo elevado, uma vez que a água desloca-se para a costa. Para além disto, observa-se que há um pico da concentração de sedimentos, sendo que estes foram mobilizados quando a água passou pelos sedimentos. Quando a água retorna para o largo, observa-se que a velocidade transversal decresce, atingindo valores negativos uma vez que a sua direção passa a ser para o largo. Além disso a concentração de sedimentos apresenta outro pico, ainda mais elevado, resultado dos sedimentos remobilizados em locais da praia com nível superior.

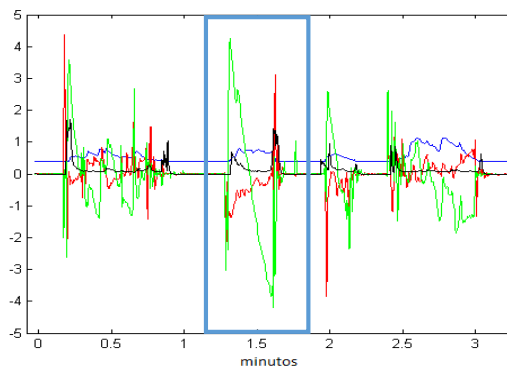


Figura 4. 10: Sobreposição dos sinais medidos do PT (m - azul), ECM: Vx (m/s - vermelho) Vy (m/s - verde) e OBS (g/L - preto), na zona do espraio para o dia 7 de novembro de 2014.

## 4.2 – Campanha 1 – 5 a 9 de Novembro 2014

Entre os dias 5 e 9 de novembro de 2014 foi realizada a primeira campanha de campo para a medição de parâmetros hidrodinâmicos e de concentração de sedimentos em suspensão. Os primeiros dois dias foram realizados a norte da embocadura do rio Mondego e os restantes três dias a sul. No total foram estabelecidas cinco estações, na praia da Figueira (Est1-5) e três a sul, na praia do Cabedelo (Est6), na praia do parque de campismo da Orbitur (Est7), localizada entre a Gala e a costa de Lavos e por fim na praia da Leirosa (Est8), como se pode observar na Figura 4.11 e referenciada geograficamente na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Localização das estações de amostragem das campanhas de campo na praia (WGS84).

Dia	Estação	Longitude	Latitude
5/6 de nov	Estação 1	-8°52'27.312"	40°08'56.743"
5/6 de nov	Estação 2	-8°52'27.841"	40°09'04.237"
5/6 de nov	Estação 3	-8°52'28.847"	40°09'10.818"
5/6 de nov	Estação 4	-8°52'30.902"	40°09'19.249"
5/6 de nov	Estação 5	-8°52'34.304"	40°09'29.031"
7 de nov	Estação 6	-8°51'51.087"	40°08'07.704"
8 de nov	Estação 7	-8°51'58.183"	40°07'05.366"
9 de nov	Estação 8	-8°53'30.291"	40°03'27.785"

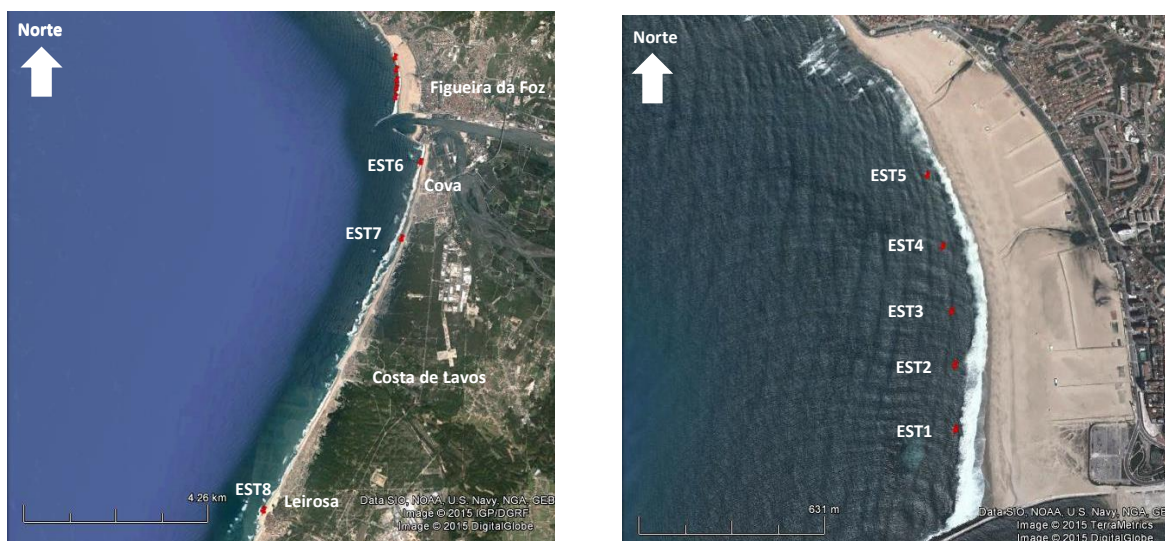


Figura 4.11: Localização das estações de recolha de dados da campanha de novembro de 2014, na secção sul (esquerda) e norte (direita) (Fonte: Google Earth, 2015).

Nas estações Est1, Est4, Est6, Est7 e Est8 foram montados tripés (Figura 4.11), nos quais foram instaladas três sondas óticas (OBS), um correntómetro eletromagnético (ECM) e um sensor de pressão (PT). Nas estações Est2, Est3 e Est5 foram apenas colocados PT em hastes verticais, de modo a medir a elevação da superfície livre da água em diferentes pontos da praia da Figueira. Os dados foram adquiridos ao longo de um ciclo de maré, sendo que os instrumentos foram instalados em baixa-mar e recolhidos na baixa-mar seguinte. De modo a sintetizar todo o trabalho desenvolvido, apresenta-se a Tabela 4.2, que identifica os dias das campanhas, bem como o início e fim das medições, posição dos instrumentos e estações.

Tabela 4.2: Caracterização da campanha (\*dados relativos ao PT).

Data e Local	Início das medições*	Fim das medições*	Estações	Instrumentos
Praia da Figueira da Foz 05/11/2014	09h11	16h42	EST1	ECM; PT5; OBS
			EST2	PT1
06/11/2014	10h08	17h53	EST3	PT3
			EST4	PT4
			EST5	PT2
			EST1	PT5
			EST2	PT4
07/11/2014	09h09	19h30	EST3	PT3
			EST4	ECM; PT3; OBS
			EST5	PT1
			EST6	ECM; PT1; OBS
08/11/2014	10h51	19h04	EST7	EMC; PT1; OBS
Praia da Orbitur				
09/11/2014	10h34	20h43	EST8	ECM; PT1; OBS
Praia da Leirosa				

#### 4.2.1 – Maré

Os valores da maré observada no porto da Figueira da Foz obtidos pelo Instituto Hidrográfico para os dias da campanha de campo estão representados na Figura 4.12. É possível observar que a maré variou entre 3.90 e 0.77 metros.

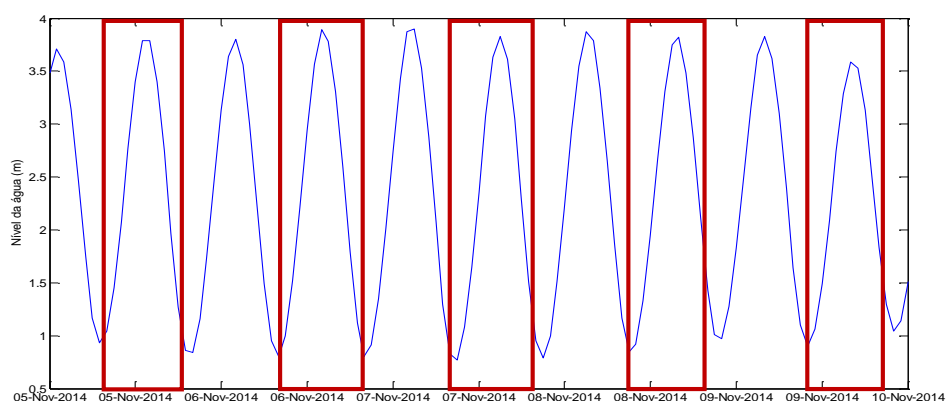


Figura 4.12: Maré observada no porto da Figueira da Foz para os dias da 1ª campanha (5 – 9 novembro 2014).

#### 4.2.2 – Agitação Marítima ao Largo

A Figura 4.13 representa a altura significativa da onda ( $H_s$ ), o período de pico ( $T_p$ ) e a direção da agitação marítima ao largo observada na boia ondógrafo de Leixões nos dias da campanha.

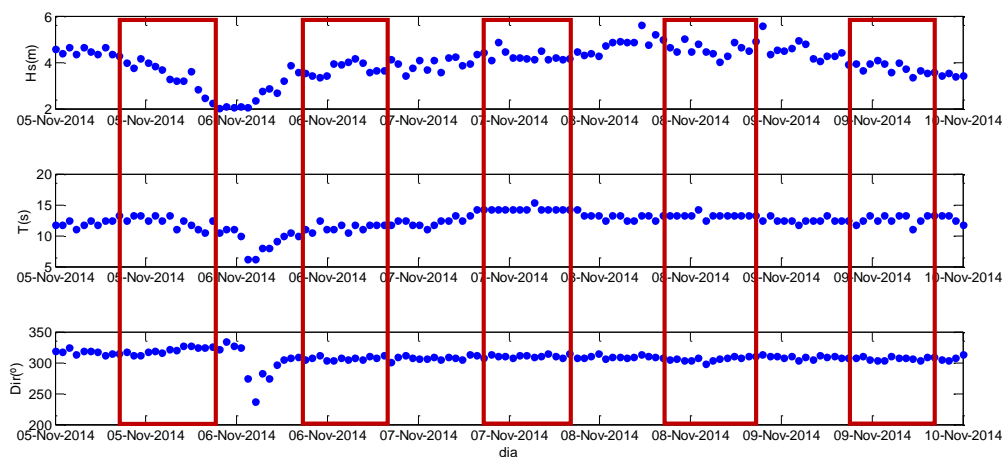


Figura 4.13: Altura significativa da onda ( $H_s$ ), do período de pico ( $T_p$ ) e direção ( $Dir$ ) das ondas observadas na boia ondógrafo de Leixões nos dias da campanha. As caixas representam o período das medições das campanhas de campo.

Os valores de  $H_s$  reduziram do dia 5 para o dia 6 de aproximadamente 4.5 para 2 m, verificando-se posteriormente um aumento progressivo deste ao longo do tempo. Para o período de pico no início da campanha observou-se um valor relativamente constante de aproximadamente 12 segundos, descendo gradualmente no dia 6 também, para 5 segundos, observando-se o seu aumento gradual nos restantes dias e mantendo-se oscilatório entre os 10 e 14s. Por fim, a direção da agitação marítima foi predominantemente do quadrante de NNO durante os dias de campanha. As condições de ondulação nos dias 7 e 9 de novembro são semelhantes. Para além disto as medições no dia 8 são consideradas condições de temporal.

#### 4.2.3 – Agitação Marítima Local e Concentração de Sedimentos em Suspensão

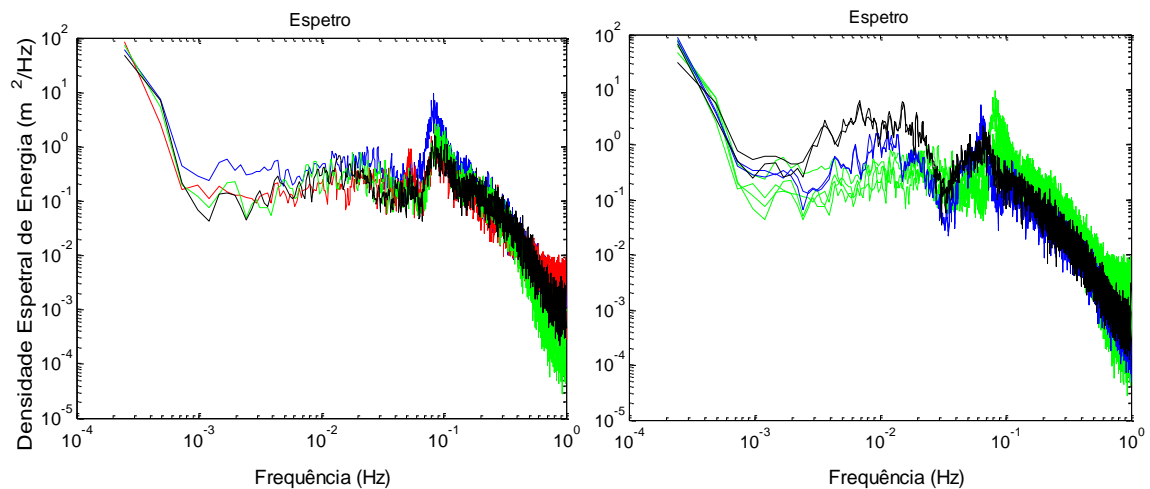
A Tabela 4.3 sintetiza os valores máximos de  $H_s$  e de  $h$  calculados para todas as estações, na praia-mar. No dia 5 de novembro e no dia 8 de novembro (EST7), os sensores PT encontraram-se, apenas, na zona de espraio, não possibilitando a filtragem do sinal de modo a obter valores reais, pelo que não são apresentados. O mesmo ocorreu na EST2 do dia 6 de novembro. Em todas as estações observaram-se zonas de rebentação extensas, sendo que os sensores nunca se posicionaram antes da zona de rebentação. Isto comprova-se uma vez que os valores de  $H_s/h$  são sempre superiores a 0.78, que como referido no subcapítulo 2.2, pode ser considerado como uma primeira aproximação ao início da rebentação. Por outro lado os valores medidos de  $H_s$  são sempre inferiores aos registados ao largo, o que sugere que houve dissipação de energia.

Tabela 4.3: Valores máximos de  $H_s$  e  $h$  nas estações de amostragem das campanhas de campo (EST1,2,3,4 e 5 – 6 de novembro de 2014).

Estações	$H_s$ máx	$h$ máx	$H_s$ máx/ $h$ máx
EST1	1.14	1.43	0.80
EST2	--	--	--
EST3	1.21	1.44	0.84
EST4	1.17	1.12	1.04
EST5	1.82	1.75	1.04
EST6	1.13	1.31	0.86
EST7	--	--	--
EST8	1.05	1.35	0.78



A Figura 4.14 representa o espectro de energia das ondas para as diferentes estações nos diferentes dias das campanhas, e permite determinar em que frequências está concentrada a energia da agitação marítima. Para esta análise foi apenas considerada a zona de rebentação.



**Figura 4.14:** Espectro de potência calculados em função da frequência para as estações localizadas na praia da Figueira da Foz (esquerda): EST1 (preto); EST3 (verde); EST4 (vermelho); EST5 (azul) e nas praias a sul da embocadura (direita): EST6 (azul); EST8 (preto) sendo as linhas representadas a verde as estações da praia da Figueira da Foz.

Na praia da Figueira da Foz, observa-se que em média os espectros têm um comportamento semelhante, tendo o seu período de pico a aproximadamente 12s, exceto o da EST5 (linha azul) que tem um pico de energia superior às restantes. É possível observar-se este padrão na Tabela 4.3, uma vez que o valor de  $H_s$  máximo é superior ao das restantes estações a norte da embocadura, podendo dever-se a algum efeito batimétrico existente. Nas estações a sul (Figura 4.14, à direita) é possível observar que o pico de energia está deslocado a regimes de frequência inferior ao anterior, tendo um período de pico de aproximadamente 15s. O máximo de energia é inferior ao máximo observado no setor a norte, comprovado pela redução da altura significativa verificada na Tabela 4.3, o que pode indicar uma maior dissipação da onda. O aumento do período de pico do dia 6 para o dia 7 e 9 é coerente com os registos observados ao largo na bóia de Leixões (Figura 4.13).

De modo a exemplificar alguns dos resultados que podem ser obtidos nas campanhas de campo foi selecionado um dia, 7 de novembro 2014, para a representação de alguns resultados dos PT (Figura 4.15), OBS e ECM.

A Figura 4.15, no topo, (painel superior) representa o sinal do sensor de pressão durante um ciclo de maré. Como é possível observar, este adquire dados da zona de espraio, posteriormente da zona de rebentação e novamente da zona de espraio (linha a azul). Para a aplicação de um filtro aos dados de elevação da superfície livre, de modo a separar a componente de alta frequência, a vermelho, e de baixa frequência a verde, foi necessário selecionar o sinal apenas na zona de rebentação. Assim, após esta análise, obtêm-se valores médios em 10 minutos da altura significativa (Figura 4.15, à esquerda), através da componente de alta frequência, que variou entre 0.5 e 1.13 metros e da profundidade média (Figura 4.15, direita), através da componente de baixa frequência, que variou entre 0.5 e 1.31 metros.

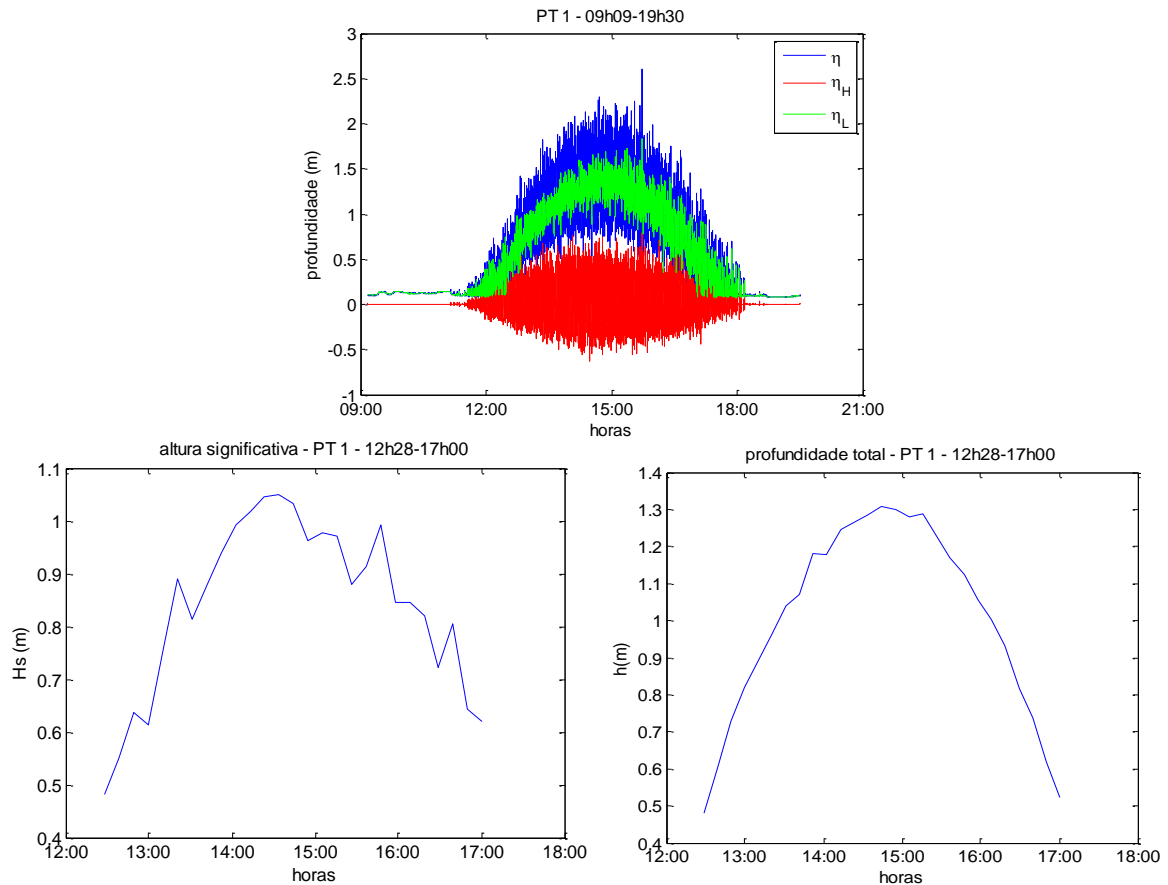


Figura 4.15: Elevação da superfície livre (m) (sinal total a azul, componente de baixa frequência a verde e componente de alta frequência a vermelho – topo), altura significativa da onda  $H_s$  (m) (em baixo à esquerda) e profundidade média (m) (em baixo à direita).

A Figura 4.16 ilustra os valores medidos da velocidade no dia 7 de novembro de 2014, na EST6. A componente longitudinal da velocidade representada na Figura 4.16 da esquerda é responsável pelo transporte paralelo à costa, enquanto a componente transversal caracteriza o transporte na direção perpendicular à costa. A componente  $V_x$  e  $V_y$  apresentam oscilação do seu sinal ao longo do tempo, não sendo perceptível o seu sentido preferencial do escoamento.

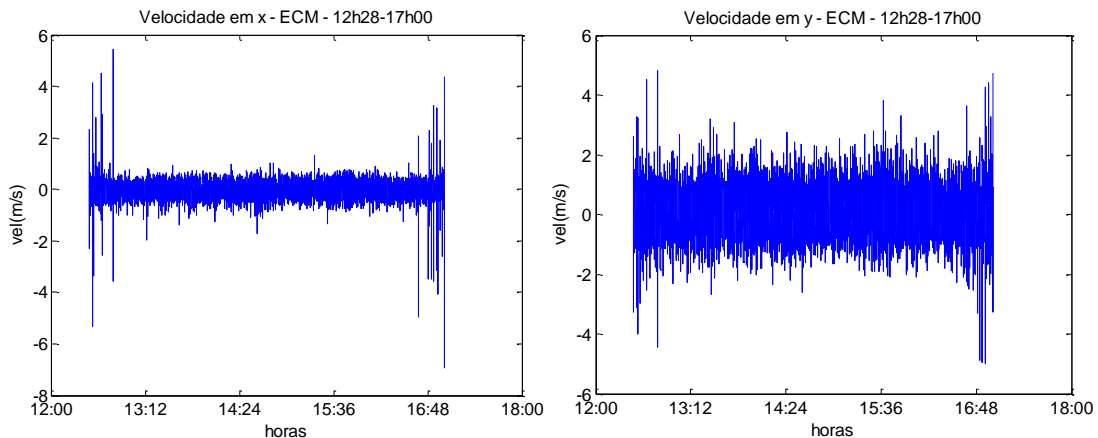


Figura 4.16: Componente longitudinal (esquerda) e transversal (direita) da velocidade (m/s).

A Figura 4.17 representa os valores médios da componente da velocidade em intervalos de 10 minutos. Verifica-se que a corrente de deriva litoral na EST6 varia entre 0 e 0.6m/s e na EST8 entre -0.2 e 0.8m/s, sendo que o sinal positivo indica que a corrente é de norte para sul. Observa-se um aumento do valor médio da intensidade da corrente da EST6 para a EST8. A componente transversal da velocidade na praia do Cabedelo varia entre aproximadamente -0.1 e -0.4m/s e na praia da Leirosa entre -0.3 e -0.7m/s, verificando-se assim a existência de correntes transversais para o largo, correspondentes ao *undertow*, que se intensificam durante a preia-mar e são mais intensas na praia da Leirosa. Ambas as componentes intensificam-se da EST6 para EST8, podendo isto dever-se à refração da agitação marítima no Cabo Mondego e nos molhes, afetando a corrente na praia do Cabedelo. No entanto, esta é uma estimativa por defeito uma vez que os sensores estiveram apenas em parte da zona de rebentação, podendo não ter registado os valores máximos.

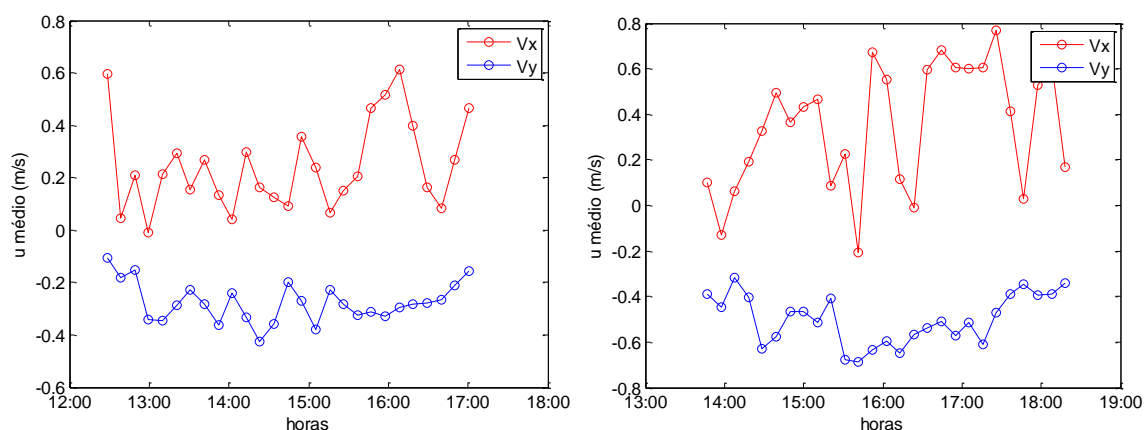


Figura 4.17: Valores médios da componente longitudinal (vermelho) e transversal (azul) da velocidade (m/s) em intervalos de 10 minutos, EST6 à esquerda e EST8 à direita.

A Figura 4.18 representa a concentração de sedimentos em suspensão para os diferentes OBS em medição no dia 7 de novembro de 2014 na EST6. A todos os níveis, a concentração de sedimentos é superior no início e fim do registo, onde se identificam picos de aproximadamente 110g/l para o OBS2 e OBS3 e de 100g/l para o OBS1. Isto deve-se ao facto de se estar perante a zona de espraio, em que se tem constantemente concentrações de sedimentos em suspensão máximas a passar pelos OBS, por exemplo entre as 16:00h e 18:00h, enquanto na zona de rebentação, tem-se uma coluna de água sobre os instrumentos, sendo a concentração de sedimentos em suspensão mais reduzida, como se pode observar pela Figura 4.18, entre as 13:00h e 16:00h, aproximadamente.

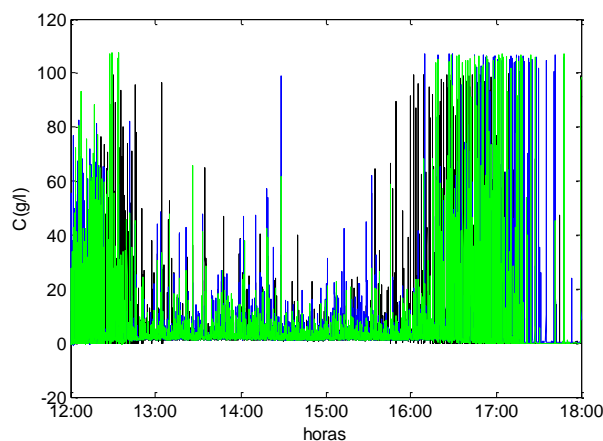
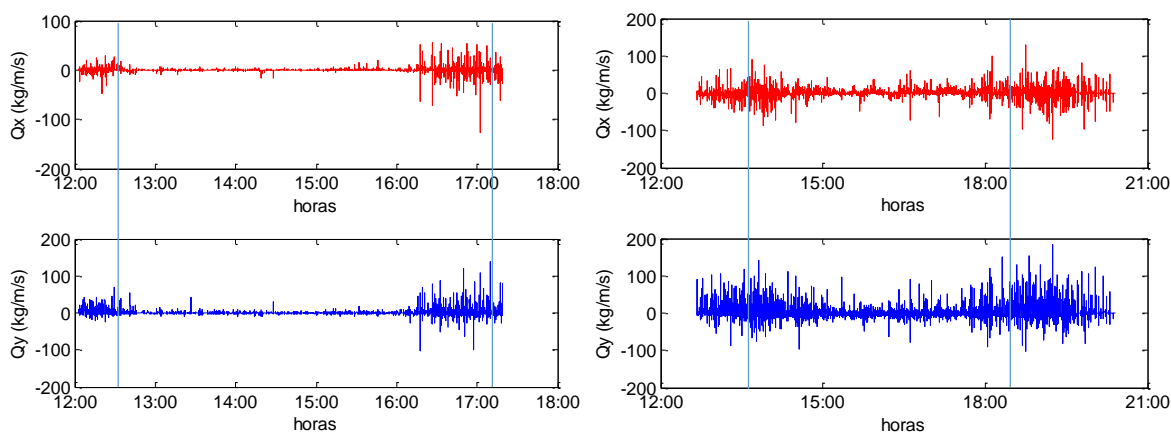


Figura 4.18: Concentração de sedimentos em suspensão (g/L) para o OBS2 aos 0.11cm (azul), OBS3 aos 0.24cm (verde) e OBS1 aos 0.39cm (preto).

#### 4.2.4 – Caudal Sólido

Nesta secção será feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos para o caudal sólido no dia 7 de novembro (EST6) e dia 9 de novembro (EST8). Não foram selecionadas estações do dia 6 de novembro uma vez que no decorrer desta, um saco de plástico condicionou o registo de dados do ECM fazendo com que houvesse uma anomalia nos dados de velocidade, não possibilitando o cálculo do fluxo sedimentar. A EST7 esteve sempre na zona de espraio, não sendo também selecionada.

Com base nos dados da velocidade e concentração de sedimentos em suspensão foi calculado o caudal sólido instantâneo em suspensão, Equação 10, representado na Figura 4.19. O fluxo sedimentar integrado na vertical apresenta maiores intensidades nas zonas de espraio e transição com a zona de rebentação do que na própria zona de rebentação, tanto na componente longitudinal como na transversal. No entanto há um aumento da intensidade na praia da Leirosa, sendo que, a componente longitudinal na EST6 varia entre -125 e 55 kg/m/s, enquanto na EST8 varia entre -124 a 130 kg/m/s. Para a componente transversal observa-se o mesmo padrão de aumento de intensidade da praia do Cabedelo para a praia da Leirosa.



**Figura 4.19: Componente longitudinal (vermelho) e transversal (azul) do fluxo sedimentar integrado na vertical (kg/m/s). As linhas verticais delimitam as zonas de espraio da zona de rebentação, EST6 à esquerda e EST8 à direita.**

O valor médio do fluxo sedimentar longitudinal em intervalos de 10 minutos (Figura 4.20) aumenta da EST6 para a EST8, sendo que na primeira atinge valores na ordem de 1kg/m/s, enquanto no segundo alcança os 4kg/m/s, seguindo a tendência observada nas correntes médias, com valores superiores na região da Leirosa. A Figura 4.20 apresenta uma deriva litoral que se intensifica de norte para sul, para além de um fluxo transversal mais intenso para o largo na EST8, podendo favorecer a perda de sedimentos neste setor. A componente transversal apresenta valores positivos na zona de espraio e negativos na zona de rebentação, favorecendo o transporte para a costa na primeira e para o largo na segunda.

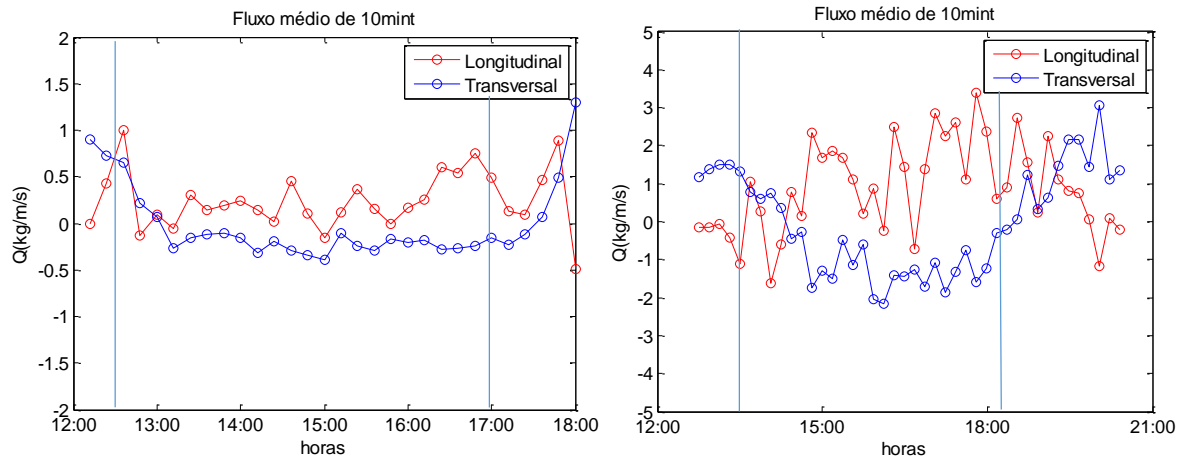


Figura 4.20: Valores médios do fluxo sedimentar (kg/m/s). As linhas verticais delimitam as zonas de espraio da zona de rebentação, EST6 à esquerda e EST8 à direita.

Integrando os valores de  $Q_x$  e  $Q_y$  no período de tempo das medições obtém-se os valores do caudal sólido médio em  $m^2/s$  (Tabela 4.4). Assumindo que a extensão do perfil de praia ativo tem 100 metros e extrapolando os valores obtidos para um ano obtém-se a taxa de transporte longitudinal em  $m^3/ano$ . Estes valores são calculados na hipótese que se verificam condições de agitação constantes ao longo do ano e iguais às verificadas durante as medições das campanhas.

Tabela 4.4: Caudal sólido médio ( $m^2/s$ ) na direção longitudinal e transversal e taxa de transporte longitudinal ao longo de um ano ( $m^3/ano$ ).

EST6	Dia 7 de novembro	$Q_x$ $m^2/s$	$Q_y$ $m^2/s$	$Q_x$ $m^3/ano$	
	Todo o Regime		$0.86 \times 10^{-4}$	$0.67 \times 10^{-4}$	$0.27 \times 10^6$
Rebentação		$1.01 \times 10^{-4}$	$-0.63 \times 10^{-4}$	$0.32 \times 10^6$	
Espraio		$-0.12 \times 10^{-4}$	$1.30 \times 10^{-4}$	$-0.048 \times 10^6$	
EST8	Dia 9 de novembro	$Q_x$ $m^2/s$	$Q_y$ $m^2/s$	$Q_x$ $m^3/ano$	
	Todo o Regime		$2.99 \times 10^{-4}$	$0.087 \times 10^{-4}$	$0.95 \times 10^6$
	Rebentação		$4.79 \times 10^{-4}$	$-3.37 \times 10^{-4}$	$1.51 \times 10^6$
	Espraio		$-1.79 \times 10^{-4}$	$3.45 \times 10^{-4}$	$-0.57 \times 10^6$

A Tabela 4.4 apresenta o caudal sólido na componente longitudinal e transversal, bem como a taxa do transporte longitudinal ao longo de um ano, na última coluna. Neste estudo representou-se todo o regime, isto é, durante todo o período de amostragem, e para porções deste, para a rebentação e espraio. O caudal sólido na componente transversal total é positiva, no entanto, ao observar-se a desfragmentação deste, verifica-se que na rebentação este tem valor negativo e no espraio valor positivo, para ambos os dias de observações. O valor negativo verificado na componente  $Q_y$  corresponde à corrente de retorno que é verificada na Figura 4.17 e que de acordo com a Tabela 4.4 é comprovado o aumento desta corrente de norte para sul (amplificação do caudal sólido médio de  $-0.63 \times 10^{-4} m^2/s$  na Cova da Gala para  $-3.37 \times 10^{-4} m^2/s$  na Leirosa).

Na zona de espraio o fluxo é positivo, indicando que o transporte foi em direção à costa, tendo sido superior na praia da Leirosa ( $3.45 \times 10^{-4} m^2/s$ ). A zona de espraio é caracterizada por ser uma área muito dinâmica de fluxos muito intensos e de grande turbulência, devido a isso a aquisição de dados realistas nesta área de modo a quantificar o transporte sedimentar é de elevada complexidade. A componente longitudinal é negativa no espraio, possivelmente devido à elevada turbulência nos sensores. Note-se que devido ao facto dos sensores se encontrarem a uma certa distância da

superfície da areia estes não conseguem captar o escoamento associado a cada espraio. No entanto para a rebentação, é caracterizada parte da deriva litoral naquela secção, aumentando da EST6 para EST8. Em geral observa-se um aumento da taxa de transporte longitudinal da praia do Cabedelo para a praia da Leirosa, com valores de  $0.27 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$  para o primeiro e  $0.95 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$  para o segundo, no entanto estes valores podem estar subestimados, uma vez que os sensores estiveram apenas em parte da zona de rebentação.

### 4.3 - Campanha 2 – 21 a 24 de Maio 2015

Entre os dias 21 e 24 de maio de 2015 foi realizada a segunda campanha de campo que tem os mesmos objetivos que a primeira. Os primeiros dois dias foram realizadas medições a sul dos molhes e os restantes dois dias a norte. No total foram estabelecidas seis estações, três a sul, na praia do parque de campismo da Orbitur (Est7A-7C), ligeiramente a sul da Estação 7 (EST7 a branco na Figura 29) da primeira campanha. As restantes três estações localizaram-se na praia da Figueira da Foz (Est4A-4C), representadas a amarelo na Figura 4.21, entre as estações 4 e 3 da campanha 1. As estações da segunda campanha estão representadas a amarelo na Figura 4.21 para além de referenciadas geograficamente na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Localização das estações de amostragem das campanhas de campo na praia (WGS84).

Dia	Estação	Longitude	Latitude
21/22 de maio	Estação 7A	-8°52'00.039"	40°07'03.766"
21/22 de maio	Estação 7B	-8°52'01.622"	40°06'58.362"
21/22 de maio	Estação 7C	-8°52'04.943"	40°06'51.217"
22/23 de maio	Estação 4A	-8°52'31.239"	40°09'16.982"
22/23 de maio	Estação 4B	-8°52'30.547"	40°09'15.074"
22/23 de maio	Estação 4C	-8°52'30.492"	40°09'14.010"

Nas estações Est7A e Est4B (Figura 4.21) foram montados tripés, nos quais foram instaladas três sondas óticas (OBS), um correntómetro eletromagnético (ECM) e um sensor de pressão (PT). Nas estações Est7B, Est7C, Est4A e Est4C foram apenas colocados PT em hastes verticais. A sul da embocadura do rio Mondego os dados foram adquiridos ao longo de três ciclos de maré (1C/2C/3C), sendo que os instrumentos foram instalados em baixa-mar e descarregados na baixa-mar seguinte de modo a ser possível uma aquisição de dados contínua, instalando-os novamente na mesma baixa-mar e recolhendo-os apenas na baixa-mar seguinte. Na zona norte da embocadura os dados foram adquiridos ao longo de dois ciclos de maré (4C/5C), seguindo o conceito anterior.



Figura 4.21: Localização das estações de recolha de dados da campanha de novembro de 2014 (branco) e de maio de 2015 (amarelo), na secção norte (esquerda) e secção sul (direita) (Fonte: Google Earth, 2015).

A Tabela 4.6 apresenta os dias das campanhas, bem como o início e fim das medições, posição dos instrumentos e estações.

Tabela 4.6: Caracterização da campanha (\*dados relativos ao PT).

Data e Local	Início das medições*	Fim das medições*	Estações	Instrumentos	
Praia da Orbitur 21/05/2015 1C	13h37	22h23	EST7A EST7B EST7C	ECM; PT1; OBS PT3 PT4	
	22/05/2015 2C	01h51	10h30	EST7A EST7B EST7C	ECM; PT1; OBS PT3 PT4
	3C	13h49	23h12		
Praia da Figueira da Foz 23/05/2015 4C	13h02	01h03	EST4A EST4B EST4C	PT1 ECM;PT2 PT4	
	24/05/2015 5C	02h02	13h24	EST4A EST4B EST4C	PT1 EMC; PT2 PT4

### 4.3.1 – Maré

Os valores da maré observados no porto da Figueira da Foz obtidos pelo Instituto Hidrográfico para os dias da campanha de campo estão representados na Figura 4.22. É possível observar um comportamento bastante distinto da primeira campanha, sofrendo um decréscimo da altura da maré ao longo do tempo. A maré variou entre 3.47 e 0.86 metros, picos esses que se observaram no início da campanha.

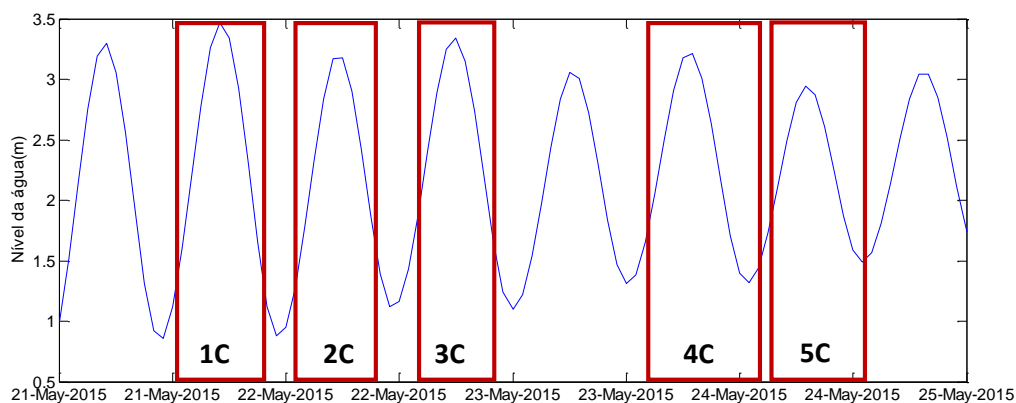


Figura 4.22: Maré observada (m) no porto da Figueira da Foz para os dias da 2ª campanha (21 – 24 maio 2015).

### 4.3.2 – Agitação Marítima ao Largo

O registo da agitação marítima observada ao largo para esta campanha é bastante distinto da campanha de novembro, oscilando ao longo do tempo, no entanto entre uma gama de valores mais reduzida (Figura 4.23), os valores de  $H_s$  são inferiores aos registados na primeira campanha. No dia 21 de maio a altura significativa variou entre 2 e 3m, aproximadamente, no 22 de maio, 2C, observou-se um decréscimo desta de 2 para 1m, por fim, no dia 22, no 3C verificaram-se variações de 1 a 3m. A norte da embocadura a altura significativa variou aproximadamente entre 1 e 2 metros. O período de pico variou entre 7 e 11s nos dias 21 e 22 e entre 7 e 12s a 23 e 24 de maio. A direção da ondulação oscilou nos dias da campanha entre NO e NNO.

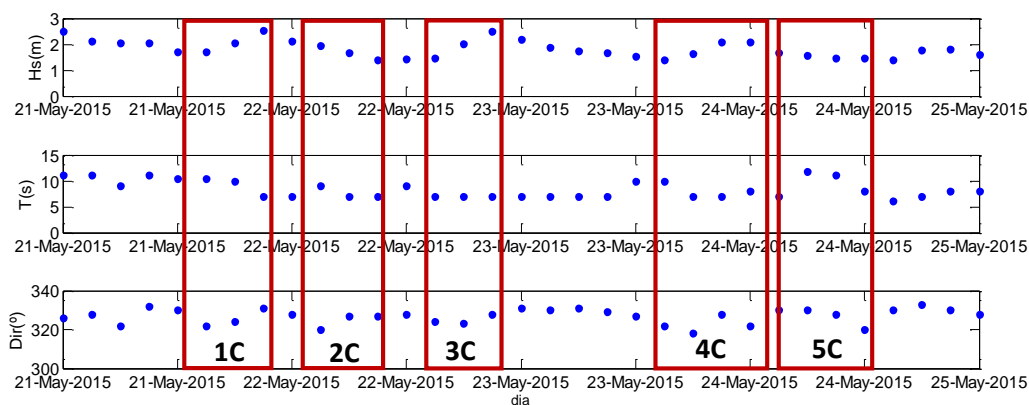


Figura 4.23: Altura significativa da onda ( $H_s(m)$ ), do período de pico ( $T_p(m)$ ) e da direção da agitação marítima (°) observada na bóia ondógrafo de Leixões nos dias da campanha. As caixas representam o período das campanhas de campo para os diferentes ciclos de maré.



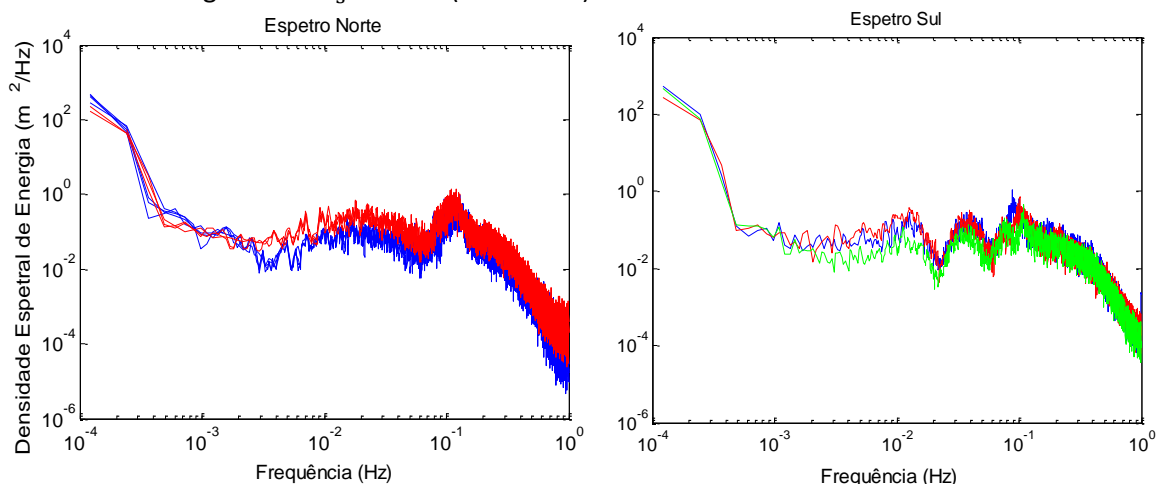
### 4.3.3 – Agitação Marítima Local e Concentração de Sedimentos em Suspensão

A Tabela 4.7 representa as alturas significativas máximas bem como a profundidade máxima da coluna de água para as estações onde estiveram instalados os sensores no tripé. Para o 4º e 5º ciclo, a norte da embocadura, averigua-se que em média os valores de  $H_s$  são homogéneos, observando-se apenas algumas variações na profundidade máxima. Por outro lado, a sul da embocadura, o  $H_s$  sofre algumas oscilações, tendo a EST7B altura superior a EST7C e EST7A. O mesmo se observa, em geral, para a profundidade máxima e isto pode ser justificado pelo facto da EST7B ter-se situado numa zona de cava de cúspide e a EST7C numa região de berma, levando assim a que os valores de profundidade fossem superiores na EST7B. Observa-se que os valores de  $H_s/h$  foram em geral inferiores a 0.78 em preia-mar o que indica que os sensores registaram toda a zona de rebentação, uma vez que ultrapassaram o início da rebentação.

**Tabela 4.7:** Valores máximos de  $H_s$ (m) e  $h$ (m) nas estações de amostragem das campanhas de campo referentes a todos os ciclos de maré.

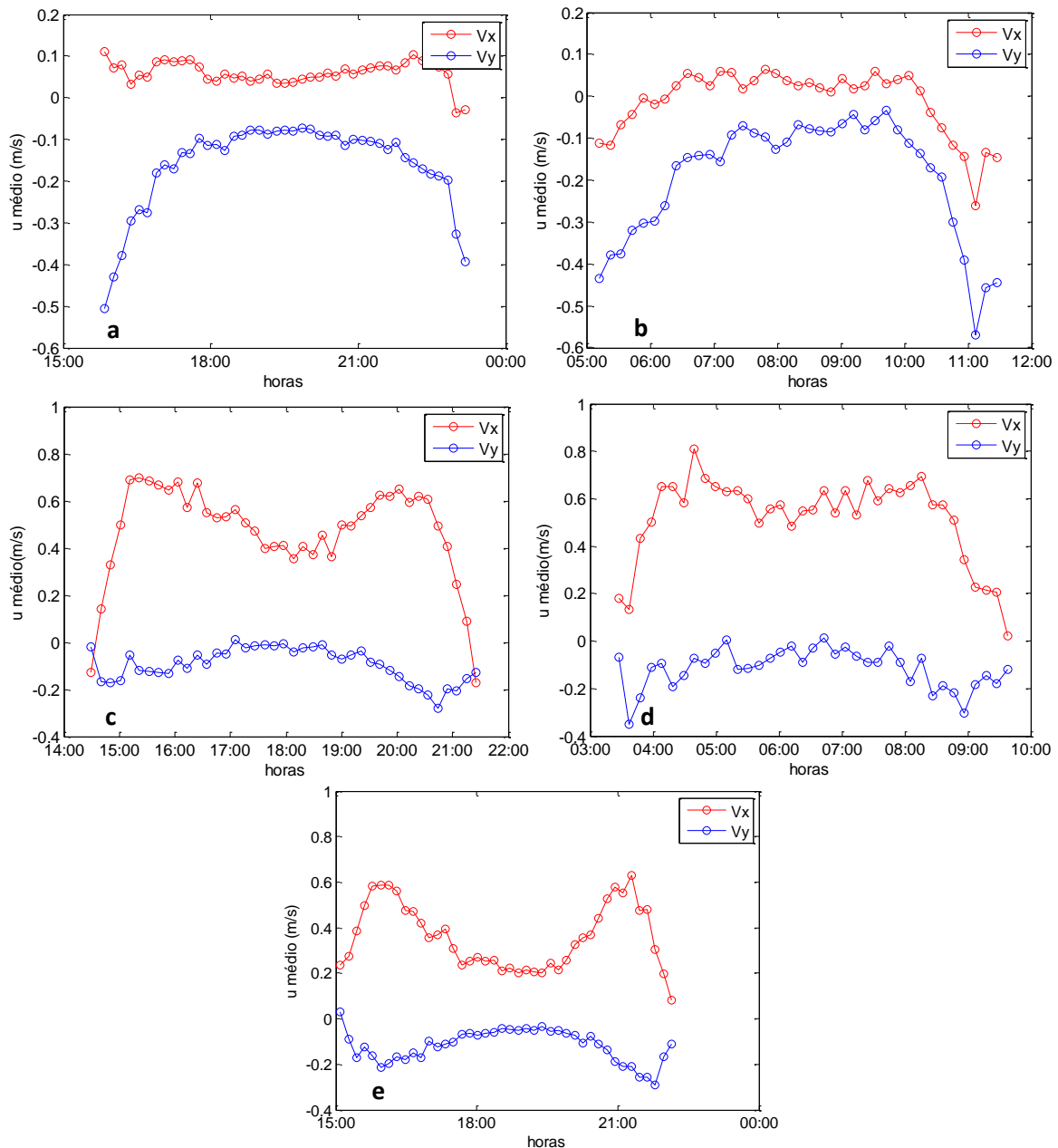
Estações	$H_s$ máx(m)	$h$ máx(m)	$H_s$ máx/ $h$ máx
EST4A (4C/5C)	0.80/0.87	1.62/1.37	0.49/0.64
EST4B (4C/5C)	0.72/0.98	1.52/1.23	0.47/0.80
EST4C (4C/5C)	0.73/0.92	1.81/1.52	0.40/0.61
EST7A (1C/2C/3C)	0.77/0.71/0.62	1.51/1.27/1.39	0.51/0.56/0.45
EST7B (1C/2C/3C)	1.17/1.11/1.00	1.79/1.42/1.62	0.65/0.78/0.62
EST7C (1C/2C/3C)	0.93/0.86/0.79	1.62/1.28/1.32	0.57/0.67/0.60

Como mencionado na análise da campanha anterior, a análise pretende estudar a distribuição de energia da onda na frequência. Os espetros das estações a norte (Figura 4.24, esquerda) e de sul (Figura 4.24, direita) distinguem-se de forma clara, sendo que os primeiros assemelham-se aos obtidos aos da primeira campanha. No setor norte observaram-se períodos de pico de 8s e a sul de 11s. A sul observam-se picos de energia ligeiramente superiores aos registados a norte, o que irá refletir nos registos de  $H_s$  obtidos (Tabela 4.7).



**Figura 4.24:** Espectro de potência calculados para as estações localizadas na praia da Figueira da Foz (esquerda) para a EST4B: 23 de maio (azul 1C); 24 de Maio (vermelho 2C) e nas praias a sul da embocadura (direita) EST4A: 21 de maio (azul 1C); 22 de maio (vermelho 2C) e 22 de maio (verde 3C).

Não serão apresentados gráficos de elevação da superfície livre,  $H_s$ ,  $h$  para um só caso e feita essa análise, uma vez que estes resultados estão apresentados em sumo na Tabela 4.7.



**Figura 4.25:** Valores médios da componente longitudinal (vermelho) e transversal (azul) da velocidade (m/s) em intervalos de 10 minutos na zona de rebentação para EST4B: 23 de maio (a), 24 de maio (b) e para a EST7A: 21 de maio (c), 22 de maio 2ºCiclo (d) e 22 de maio 3ºCiclo (e).

A Figura 4.25 representa a velocidade média na componente longitudinal e transversal para todos os dias da campanha de maio: a imagem (a) e (b) representam o setor norte a 23 e 24 de maio e os restantes (c), (d) e (e) o setor sul de 21 a 22. De um modo geral verifica-se que os dados medidos nas estações do setor norte e sul apresentam comportamentos distintos para a velocidade da corrente, o que é provavelmente associado a diferentes extensões da zona de rebentação mais larga nas estações a sul e mais estreita nas estações a norte. O fato mais evidente é a corrente longitudinal ser bastante reduzida no setor norte, variando entre -0.3 e 0.1m/s, enquanto a sul varia entre -0.2 e 0.8m/s. No setor sul a velocidade da corrente aumenta gradualmente até atingir um máximo, que de acordo com a teoria corresponde aproximadamente a zona intermédia da rebentação, decrescendo até um valor mínimo que associa-se ao início da zona de rebentação,

posteriormente a velocidade volta a aumentar, uma vez que a zona de rebentação desloca-se para o largo à medida que há a descida da maré, atingindo novamente um valor máximo e decrescendo até que a zona de rebentação deixa de interagir com os instrumentos. No 2º ciclo foram medidas velocidades superiores às dos restantes dias, 0.8m/s, seguida do 1º ciclo, com 0.7m/s e por fim, 3º ciclo com 0.6m/s. Para os registos de agitação observados verificam-se correntes longitudinais que crescem do setor norte para o setor sul.

A componente transversal da velocidade é negativa em todas as estações, tratando-se assim da corrente de retorno. Este valor negativo da velocidade transversal pode indicar que estão a ser transportados sedimentos para o largo, e sendo assim, a norte esse efeito foi mais evidente do que a sul. Observa-se o mesmo que na componente transversal, o setor sul atravessou toda a zona de rebentação, como se observa pela figura acima. Nas estações a sul verifica-se pela Figura 4.25 (e) que a velocidade da componente transversal aumenta para o largo até atingir um valor máximo, aproximadamente a meio da zona de rebentação e posteriormente reduz a sua velocidade, atingindo valores próximos de zero na preia-mar, seguindo o processo inverso à medida que a maré desce. Os valores mais elevados de corrente média para o largo observados na EST4, no início e fim da amostragem podem significar que a zona de rebentação está muito localizada.

#### 4.3.4 – Caudal Sólido

Uma vez que os sensores OBS não funcionaram no setor norte em estudo, será feita novamente análise do fluxo sedimentar apenas a sul da embocadura.

A Figura 4.26 representa os valores medidos do fluxo sedimentar na EST7A para os três primeiros ciclos de maré e a Tabela 4.8 os caudais sólidos na direção longitudinal e transversal e a taxa de transporte longitudinal ao longo de um ano.

O fluxo sedimentar médio na praia do parque de campismo da Orbitur entre o dia 21 e 22 de maio variou ligeiramente devido ao regime de agitação marítima existente. A deriva litoral observada é essencialmente positiva, apresentando valores superiores em (a) e decrescendo ao longo dos dias, como se comprova na Tabela 4.8 para todo o regime. Para além disto, esta apresenta sempre valores negativos na zona do espraio. A componente transversal do transporte altera-se entre os dias da campanha, tendo fundamentalmente valores negativos na zona de rebentação, exceto em (c), indicando um transporte de sedimentos para a costa.

Analisando a Figura 4.26 (a) verifica-se que a deriva litoral assemelha-se à corrente litoral em termos de perfil, uma vez que estas estão relacionadas. Observa-se assim, um máximo da deriva a meio da zona de rebentação tanto na subida, como descida da maré, sendo inferior na preia-mar e negativo na zona de espraio. Esta também é evidente no 3º ciclo de maré.

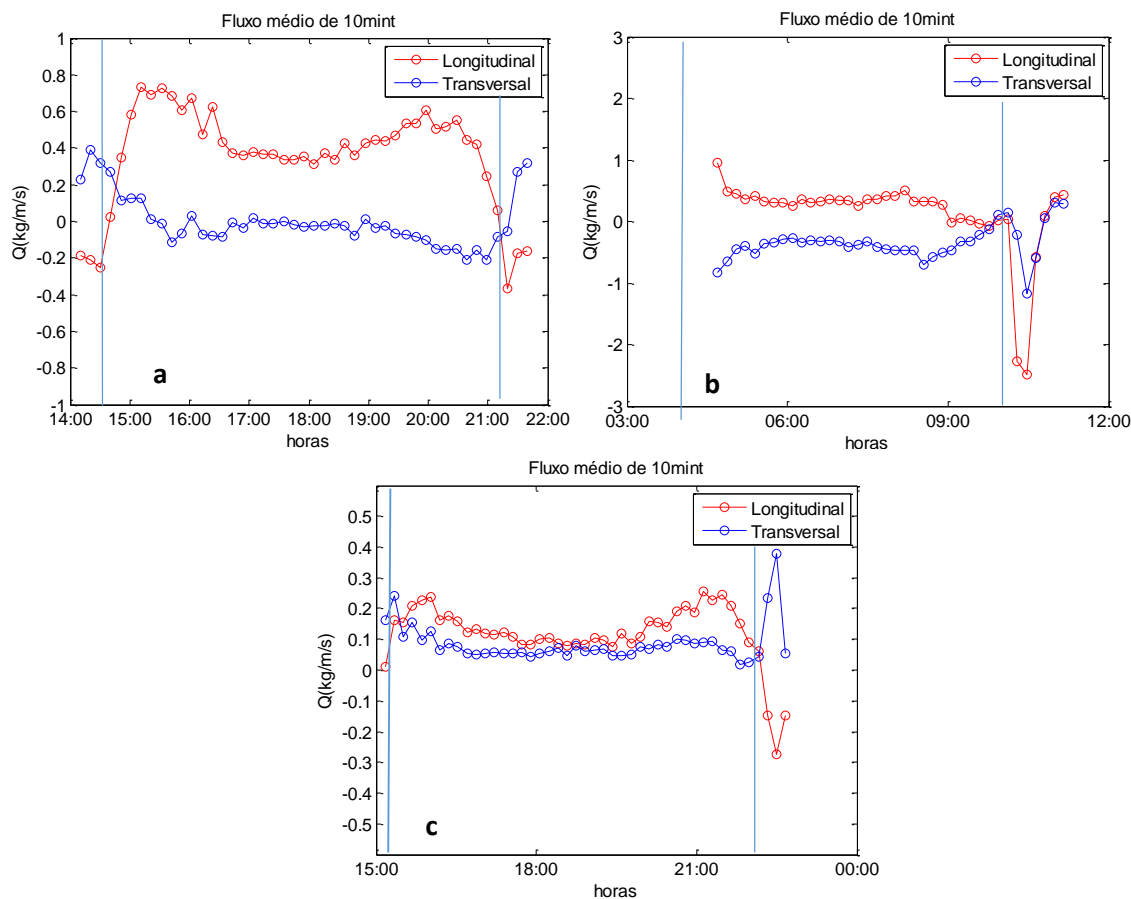


Figura 4.26: Valores médios do fluxo sedimentar para a EST7A (kg/m/s). As linhas verticais delimitam as zonas de espraio da zona de rebentação. Dia 21 de maio (a), dia 22 de maio 2ºCiclo (b), dia 22 de maio 3ºCiclo (c).

A partir da Tabela 4.8 verifica-se que para 1C observam-se as mesmas características que as da primeira campanha, no entanto a componente transversal do transporte em 2C e 3C não. Para 2C verificam-se valores negativos em todo o regime, indicando que o transporte é para o largo, enquanto em 3C, todo o regime é positivo, sugerindo que o fluxo foi para a costa. De um modo geral verificou-se um decréscimo do caudal sólido transportado na direção longitudinal do dia 21 para 22, que é consistente com a agitação marítima ao largo, em que se observa um decréscimo da altura significativa das ondas e do período.

Tabela 4.8: Caudal sólido na direção longitudinal e transversal ( $m^2/s$ ) e taxa de transporte longitudinal ao longo de um ano ( $m^3/ano$ ).

Dia 21 de maio 1C	$Q_x \text{ m}^2/s$	$Q_y \text{ m}^2/s$	$Q_x \text{ m}^3/ano$
Todo o Regime	$1.31 \times 10^{-4}$	$0.009 \times 10^{-4}$	$0.41 \times 10^6$
Rebentação	$1.53 \times 10^{-4}$	$-0.099 \times 10^{-4}$	$0.48 \times 10^6$
Espraio	$-0.22 \times 10^{-4}$	$0.108 \times 10^{-4}$	$-0.069 \times 10^6$
Dia 22 de maio 2C	$Q_x \text{ m}^2/s$	$Q_y \text{ m}^2/s$	$Q_x \text{ m}^3/ano$
Todo o Regime	$0.59 \times 10^{-4}$	$-1.33 \times 10^{-4}$	$0.18 \times 10^6$
Rebentação	$0.99 \times 10^{-4}$	$-1.22 \times 10^{-4}$	$0.31 \times 10^6$
Espraio	$-0.41 \times 10^{-4}$	$-0.11 \times 10^{-4}$	$-0.13 \times 10^6$
Dia 22 de maio 3C	$Q_x \text{ m}^2/s$	$Q_y \text{ m}^2/s$	$Q_x \text{ m}^3/ano$
Todo o Regime	$0.42 \times 10^{-4}$	$0.33 \times 10^{-4}$	$0.13 \times 10^6$
Rebentação	$0.52 \times 10^{-4}$	$0.29 \times 10^{-4}$	$0.16 \times 10^6$
Espraio	$-0.10 \times 10^{-4}$	$0.035 \times 10^{-4}$	$-0.032 \times 10^6$

A análise comparativa das duas campanhas, mostra que: as campanhas decorreram em regimes de agitação distintos, na campanha de novembro estamos perante regime de inverno marítimo e em maio de verão marítimo. Para condições de ondulação com rumos predominantes de NNO-ONO, observa-se que os transportes longilitorais aumentam da EST6 para a EST8, sendo de  $0.27 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$  na praia do Cabedelo, e  $0.95 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$  na praia da Leirosa. Os valores do transporte longitudinal na EST6 deverão ser sempre inferiores aos da EST8, uma vez que está na zona de sombra dos molhes, enquanto a segunda é afetada diretamente pela agitação marítima.

Os valores de transporte longitudinal na praia da Figueira da Foz deverão ser inferiores aos observados nas estações a sul, o que decorre das diferenças observadas nas correntes longilitorais em maio.

Verifica-se que a extensão da zona de rebentação na praia da Figueira da Foz é distinta das praias a sul, sendo mais estreita na primeira, devido ao declive da praia, o que é refletido posteriormente nos perfis longitudinais e transversais da velocidade da corrente.



# Capítulo 5 – Modelação da Hidrodinâmica e Morfodinâmica

## 5.1 – Introdução

O modelo Delft3D que tem vindo a ser desenvolvido pela Deltares constitui uma plataforma de computação para zonas costeiras, estuarinas e rios (Deltares, 2011a). Este sistema contém diferentes interfaces de pré-processamento, processamento e pós-processamento que facilitam o utilizador no manuseamento do modelo. Como ferramentas de processamento este modelo é composto por vários módulos, podendo simular correntes médias (Delft3D-FLOW), propagação de ondas (Delft3D-WAVE), transporte de sedimentos (Delft3D-SED), qualidade da água (Delft3D-WAQ), alterações da morfologia (Delft3D-MOR) e ecologia (Delft3D-ECO). Para este trabalho serão apenas utilizadas quatro módulos: FLOW, WAVE, MOR e SED.

Para a implementação do modelo a um local de estudo é necessária a criação de uma grelha computacional ortogonal ou curvilínea a partir do módulo Delft3D-RGFGRID, que será posteriormente implementado nos módulos de processamento, FLOW e WAVE, (Deltares, 2011b). Para além disto, no pré-processamento é necessária a criação da batimetria, como uma ‘entrada’ dos restantes módulos, através do Delft3D-QUICKIN (Deltares, 2011c). Por fim, como pós-processador é utilizado o Delft3D-QUICKPLOT, para visualizar os resultados obtidos através da interface MATLAB (Deltares, 2011d).

O modelo numérico morfodinâmico segue o seguinte esquema: os campos de velocidade são resolvidos pelo módulo hidrodinâmico e guardados, para posteriormente serem utilizados no módulo de transporte sedimentar, para assim, produzir campos de transporte sedimentar. Em casos de modelos de morfologia costeira, um módulo de ondas é necessário para a simulação da propagação de ondas e de correntes geradas por ondas no modelo de hidrodinâmica, e fornecer os parâmetros adicionais ao módulo de transporte sedimentar. Assim, deve ser feita uma ‘chamada’ ao módulo Delft3D-WAVE, onde é executado o modelo de propagação de ondas SWAN (Booij *et al.*, 1999; Ris *et al.*, 1999), antes de executar o módulo FLOW. Isto irá resultar num ficheiro de comunicação que será armazenado, contendo os resultados da simulação de ondas, que é utilizado pelo FLOW. Uma grande vantagem prática de utilizar o modelo SWAN é que este simula a propagação das ondas nas mesmas grelhas curvilíneas como é usualmente utilizado nos cálculos do Delft3D-FLOW, reduzindo significativamente o esforço exigido em simulações combinadas WAVE e FLOW (Lesser, 2009).

A seguinte secção terá inicialmente uma parte teórica, em que será descrita a componente hidrodinâmica, bem como a componente de transporte de sedimentos e morfodinâmica. De seguida será exposta a calibração das componentes Delft3D-WAVE e Delft3D-MOR. A criação da grelha, e da batimetria numérica, bem como validação da componente hidrodinâmica do modelo foi elaborada no âmbito do projeto ‘Estudo da dinâmica sedimentar na embocadura da barra do porto da Figueira da Foz’ (Universidade de Aveiro, 2015). Por fim serão apresentados os resultados obtidos pelo modelo e discussão dos mesmos.

## 5.2 – Modelo Delft3D

### 5.2.1 – Componente Hidrodinâmica

O módulo Delft3D-FLOW simula fluxos bidimensionais (integrando na vertical) ou tridimensionais e fenómenos de transporte resultantes da maré e forças meteorológicas que forçam a grelha retilínea ou curvilínea (Deltares, 2011a). Neste é possível ativar os restantes módulos e definir os parâmetros iniciais destes.

O sistema de equações baseia-se nas equações do movimento, na equação da continuidade, na equação do transporte, incluindo modelos de turbulência para o cálculo da viscosidade vertical. Quando executado o modelo no modo bidimensional, assume-se que as acelerações verticais são pequenas comparadas com a aceleração da gravidade, podendo assim ser negligenciadas, tornando o modelo hidrostático. Isso faz com que o modelo seja adequado para prever fluxos em águas pouco profundas, zonas costeiras, estuários, rios e lagos (Lesser *et al.*, 2004).

Definindo a velocidade média do escoamento na vertical como:

$$U = \frac{1}{(d+\zeta)} \int_d^\zeta u \, dz \quad (11)$$

$$V = \frac{1}{(d+\zeta)} \int_d^\zeta v \, dz \quad (12)$$

A equação da continuidade em duas dimensões (integrada na vertical) toma a forma:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(d+\zeta)U]}{\partial x} + \frac{\partial [(d+\zeta)V]}{\partial y} = S \quad (13)$$

$d$  representa a profundidade abaixo do plano de referência, e  $\zeta$  a elevação da superfície livre acima desse plano.  $S$  é a contribuição por unidade de área devido a descargas ou saídas de água, evaporação e precipitação.

As equações do momento tomam a seguinte forma em duas dimensões:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{fx}}{\rho_0(d+\zeta)} + F_x + M_x \quad (14)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{fy}}{\rho_0(d+\zeta)} + F_y + M_y \quad (15)$$

onde  $F_x$  e  $F_y$  são as tensões horizontais de Reynolds,  $M_x$  e  $M_y$  são contribuições devido a fontes externas ou perdas de momento linear,  $\tau_s$  é a tensão de corte que o vento exerce na superfície livre da água,  $\tau_f$  é a tensão de atrito junto ao fundo,  $f$  é o parâmetro de Coriolis,  $\rho_0$  é a densidade inicial da água e  $g$  a aceleração da gravidade.

### 5.2.2 – Componente de Agitação Marítima

O módulo Delft3D-WAVE é baseado no modelo de terceira geração SWAN (*Simulation WAVes Nearshore*), desenvolvido pela Universidade Tecnológica de *Delft*, que tem em consideração os processos de refração, difração, propagação devido a correntes e profundidade, interação não-linear onda-onda, geração da onda devido ao vento, dissipação devido ao atrito de fundo, dissipação induzida pela rebentação induzida pelo fundo e dissipação devido ao *whitcapping*. O bloqueio de ondas devido a correntes também é explícito no modelo (Deltares, 2011e). Este baseia-se nas características da agitação marítima ao largo, tendo em conta a sua altura significativa,



período da onda, direção da ondulação e *directional spreading*, de modo a simular as características da agitação nas zonas costeiras (até a zona de rebentação).

As ondas são descritas com a densidade espectral bidimensional da ação da onda,  $N(\sigma, \theta)$ , ao invés da densidade espectral de energia  $E(\sigma, \theta)$ , uma vez que na presença de correntes a densidade de ação é conservada, ao contrário da densidade de energia. Como variáveis independentes tem-se a frequência relativa  $\sigma$  (enquadrada num sistema de referência que se move com a velocidade de propagação) e a direção da onda  $\theta$  (direção normal à crista da onda de cada componente espectral (Deltares, 2011e)). A densidade da ação é igual à razão entre a densidade de energia e a frequência relativa ( $\sigma$ ):

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (16)$$

No modelo SWAN a evolução do espectro de ondas é descrito pela equação do balanço da ação espectral, que em coordenadas cartesianas toma a forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} N(\sigma, \theta) + \frac{\partial}{\partial x} c_x N(\sigma, \theta) + \frac{\partial}{\partial y} c_y N(\sigma, \theta) + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N(\sigma, \theta) + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N(\sigma, \theta) = \frac{S(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (17)$$

O primeiro termo da esquerda representa a taxa local de variação da densidade de ação no tempo. O segundo e terceiro termos representam a propagação da ação no espaço (com velocidades de propagação  $c_x$  e  $c_y$ ). O quarto termo representa mudanças na frequência relativa devido a variações de profundidade e correntes (com velocidade de propagação  $c_\sigma$ ). O quinto termo demonstra a refração induzida pela profundidade e por correntes (com velocidade de propagação  $c_\theta$ ) (Deltares, 2011e). O termo  $S(\sigma, \theta)$ , da direita, representa as componentes de fonte e perda:

$$S(\sigma, \theta) = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (18)$$

A soma total das componentes de fonte e perda são divididas em três grupos:  $S_{in}$  que representa o termo de fonte do vento;  $S_{nl3}$  e  $S_{nl4}$  que correspondem aos termos não lineares de terceira e quarta ordem de interação onda-onda; e os termos de dissipação que incluem a dissipação devido ao *whitecapping*,  $S_{ds,w}$ , dissipação devido ao atrito de fundo,  $S_{ds,b}$ , e dissipação devido à rebentação induzida pela profundidade,  $S_{ds,br}$ .

### 5.2.3 – Componente de Transporte Sedimentar e Morfodinâmica

O transporte sedimentar é convencionalmente interpretado como a soma de dois tipos distintos de transporte, o em suspensão e o por arrastamento (*bedload*). O transporte em suspensão é aquele em que as partículas não estão em contato direto com o fundo, à medida que são transportadas, enquanto o transporte por arrastamento é o transporte de partículas de sedimentos em uma camada fina junto ao fundo, o que implica que as partículas estejam sempre próximas ou em contato direto com o fundo.

O modelo Delft3D calcula tanto o transporte em suspensão como o transporte junto ao fundo de sedimentos não-coesivos e transporte em suspensão para sedimentos coesivos. Para os sedimentos não-coesivos, o transporte em suspensão é calculado pela equação advecção-difusão, enquanto o transporte por arrastamento é calculado segundo van Rijn (1993) (Deltares, 2011a).

As velocidades médias associadas à propagação da maré, as velocidades orbitais e as correntes induzidas pelas ondas são utilizadas no módulo Delft3D-MOR, de modo a calcular as taxas de transporte de sedimentos em todo o domínio, e para resolver a equação da conservação da massa

de sedimentos no leito, determinando assim as variações da batimetria, numa escala de tempo de dias a anos.

### 5.2.3.1 – Transporte em Suspensão

Quando o Delft3D-FLOW é executado em 2D é aplicada uma média em profundidade. Neste caso, apenas uma camada computacional é considerada, sendo que a descarga nessa camada assume-se equivalente à descarga integrada em profundidade num modelo tridimensional. O modelo de profundidade média não resolve perfis verticais de velocidade, concentração de sedimentos e mistura turbulenta, sendo necessário aproximações de modo a calcular a tensão de cisalhamento de fundo e o transporte de sedimentos integrado em profundidade (Lesser, 2009). A maior aproximação feita é que o perfil de velocidade toma a forma logarítmica e pode ser calculado diretamente da velocidade média em profundidade:

$$U = \left[ \frac{\bar{U}}{\frac{z_0}{(d+\zeta)} - 1 + \ln\left(\frac{d+\zeta}{z_0}\right)} \right] \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (19)$$

A equação advecção-difusão média em profundidade escreve-se como:

$$\frac{\partial[(d+\zeta)\bar{c}]}{\partial t} + \frac{\partial[(d+\zeta)\bar{U}\bar{c}]}{\partial x} + \frac{\partial[(d+\zeta)\bar{V}\bar{c}]}{\partial y} = (d + \zeta) \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_H \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_H \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) \right] + (d + \zeta)S \quad (20)$$

onde  $\bar{c}$  é a concentração de sedimentos médios em profundidade e S representa o termo fonte de sedimentos dado por:

$$S = \frac{\bar{c}_{eq} - \bar{c}}{T_s} \quad (21)$$

Em que  $\bar{c}_{eq}$  é a concentração de equilíbrio de sedimentos média em profundidade e  $T_s$  a escala de tempo de adaptação, sendo este uma função da profundidade da água, velocidade de queda e velocidade de cisalhamento do fundo.

### 5.2.3.2 – Transporte por Arrastamento

De acordo com Lesser (2009), o transporte por arrastamento é calculado para todas as frações de sedimentos seguindo a abordagem descrita por van Rijn (1993). Este transporte ocorre abaixo de uma altura de referência 'a', altura esta que é calculada com base na rugosidade do fundo.

Para simulações que incluem o módulo de ondas, como é o caso do presente estudo, a magnitude e a direção do transporte por arrastamento em fundo horizontal são calculadas através do método de aproximação elaborado por van Rijn (2001). Este método contém também contribuições do efeito da assimetria da velocidade orbital das ondas no transporte de sedimentos em suspensão. O método calcula a magnitude do transporte por arrastamento como:

$$|S_b| = \eta 0.006 \rho_s w_s M^{0.5} M_e^{0.7}$$

onde  $|S_b|$  é a magnitude do transporte por arrastamento (kg/m/s),  $\eta$  é a disponibilidade relativa da fração de sedimento na camada de mistura,  $\rho_s$  é a densidade das partículas de sedimento sólido,  $w_s$  é a velocidade de queda do sedimento, M é o numero de mobilidade do sedimento devido às ondas e correntes,  $M_e$  é o numero de mobilidade do sedimento em excesso.

$$M = \frac{v_{eff}^2}{(s-1) g d_{50}} \quad (22)$$

$$M_e = \frac{(v_{eff} - v_{cr})^2}{(s-1)gd_{50}} \quad (23)$$

onde,

$$v_{eff} = \sqrt{v_R^2 + U_{on}^2} \quad (24)$$

onde  $s$  = densidade relativa dos sedimentos ( $=\rho_s/\rho$ ), onde  $\rho$  é a densidade do fluído,  $v_{cr}$  é a velocidade crítica média em profundidade para iniciar o movimento das partículas de sedimentos,  $v_R$  é a magnitude da velocidade equivalente média em profundidade calculada a partir da velocidade (Eulariana) na camada computacional de fundo, assumindo um perfil de velocidade logarítmico,  $U_{on}$  é a velocidade orbital de pico próxima do fundo na direção onshore (na direção de propagação da onda) baseada na altura significativa da onda.

A direção do vetor de transporte por arrastamento é determinada assumindo que este é composto por duas partes: 1) a parte devido às correntes ( $S_{b,c}$ ), que atua na direção da corrente próxima do fundo, e 2) a parte devido às ondas ( $S_{b,w}$ ), que atua na direção de propagação da onda. A magnitude destas duas partes são determinadas da seguinte forma:

$$|S_{b,c}| = \frac{|S_b|}{\sqrt{1+r^2+2|r|\cos\varphi}} \quad (25)$$

$$|S_{b,w}| = r |S_{b,c}| \quad (26)$$

onde,

$$r = \frac{(|U_{on}| - v_{cr})^3}{(|v_R| - v_{cr})^3} \quad (27)$$

$S_{b,w}=0$  se  $r<0.01$ ,  $S_{b,c}=0$  se  $r>100$ , e  $\varphi$  é o ângulo entre a direção da corrente e da onda.

Também incluído no vetor transporte '*bedload*' está uma estimativa do transporte de sedimentos em suspensão devido a efeitos de ondas assimétricas. Este destina-se a calcular o efeito das velocidades orbitais assimétricas das ondas no transporte de material em suspensão dentro de uma altura de coluna de água de aproximadamente 0.5m, desde o fundo, e representa a maior parte do transporte em suspensão afetado por oscilações de ondas de alta frequência.

Este transporte de sedimentos em suspensão relacionado com as ondas é calculado através do método de aproximação utilizado por van Rijn (2001):

$$|S_{s,w}| = \gamma U_A L_T \quad (28)$$

Onde  $|S_{s,w}|$  é a magnitude do transporte em suspensão relacionado com a onda (kg/m/s),  $\gamma$  é o coeficiente de atraso da fase ( $=0.2$ ),  $U_A$  é o valor de assimetria da velocidade  $\frac{U_{on}^4 - U_{off}^4}{U_{on}^3 + U_{off}^3}$  e  $L_T$  é a carga de sedimentos em suspensão ( $=0.007d_{50}\rho_s M$ ).

Os três modos de transporte distintos são então combinados sob a suposição de que  $S_{b,c}$  é na direção da corrente junto do fundo e  $S_{b,w}$  e  $S_{s,w}$  são na direção da propagação da onda. Isto resulta nas seguintes componentes de transporte por arrastamento:

$$S_{b,u} = f_{BED} \left[ \frac{u_b}{\bar{u}_b} |S_{b,c}| + (f_{BEDW} S_{b,w} + f_{SUSW} S_{s,w}) \cos\phi \right] \quad (29)$$

$$S_{b,v} = f_{BED} \left[ \frac{v_b}{\bar{u}_b} |S_{b,c}| + (f_{BEDW} S_{b,w} + f_{SUSW} S_{s,w}) \sin \phi \right] \quad (30)$$

Onde  $f_{BED}$  e  $f_{BEDW}$  representam fatores de calibração especificados pelo usuário (valor padrão = 1.0),  $f_{SUSW}$  também é fator de calibração especificado pelo usuário (0.5 recomendado para casos de campo),  $u_b, v_b, \bar{u}_b$  = componentes da velocidade Euleriana e vetor na camada computacional do fundo, e  $\phi$  ângulo local entre a direção da propagação da onda e a grelha computacional.

### 5.2.3.3 – Morfodinâmica

A equação do balanço de massa descreve as taxas de transporte sedimentar ( $m^3/m/s$ ) em relação às alterações do fundo, tendo a seguinte forma:

$$(1 - p) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial y} = 0 \quad (31)$$

onde  $p$  é a porosidade,  $z_b$  o nível do fundo acima de um determinado ponto de referência horizontal e  $S_x$  e  $S_y$  são as taxas de transporte na direção  $x$  e  $y$  por segundo e por metro de largura.

## 5.3 – Implementação do Modelo

### 5.3.1 – Módulo Delft3D-FLOW

Para a elaboração do modelo foi necessária a definição de uma malha computacional e a sua respetiva batimetria, posteriormente utilizada no módulo hidrodinâmico e de agitação marítima.

Para a criação da grelha, utilizou-se o módulo RGFRID, adequado para a criação de uma grelha não estruturada, isto é, uma grelha em que as células de cálculo não são completamente ortogonais entre si. No desenvolvimento da malha, seguiu-se o critério de criação de linhas (*splines*) que seguissem o eixo do canal, de modo a que as linhas de corrente fluíssem na direção montante-jusante e não transversalmente ao canal (Universidade de Aveiro, 2015). A malha construída é apresentada na Figura 5.1, tem um número de elementos de 1081 por 360, com uma resolução horizontal entre os 20 e 30 metros (dentro do estuário) e uma resolução horizontal mínima de 300m na fronteira aberta. A malha foi desenvolvida de modo a ter uma resolução superior na zona de interesse, na embocadura do rio Mondego, reduzindo-se para o exterior.

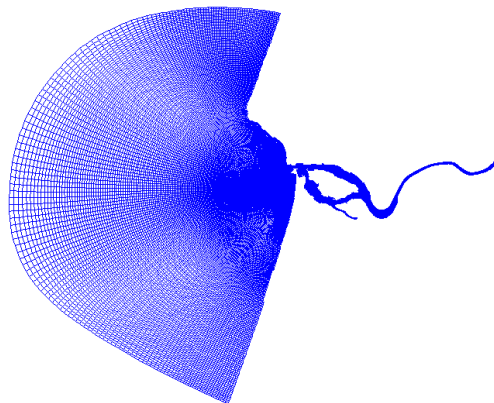


Figura 5.1: Grelha não estruturada desenvolvida para o módulo hidrodinâmico e de propagação de ondas, para o estuário do Mondego e litoral envolvente.

A batimetria numérica foi construída através de dados de batimetria real e da grelha não estruturada mencionada anteriormente. No entanto, para a determinação do valor de

profundidade em cada um das células de cálculo da grelha foi utilizado um esquema de interpolação por triangulação, que interpola para o centro de cada célula os valores de batimetria real e os pontos adjacentes, obtendo-se a batimetria numérica observada na Figura 5.2, que varia, aproximadamente, entre 90m ao largo até aos -9m próximo à costa.

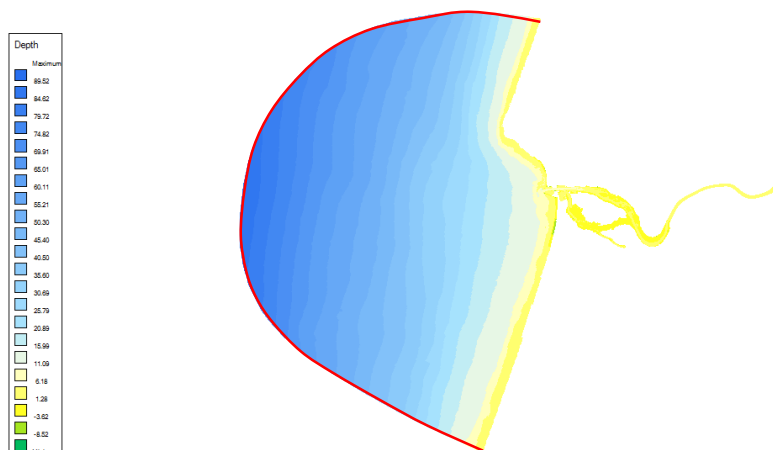


Figura 5.2: Batimetria numérica e fronteira aberta oceânica (linha a vermelho).

O modelo hidrodinâmico do Delft3D requer a definição de condições de fronteira aberta, que neste caso foi a fronteira oceânica representada na Figura 5.2 a vermelho, onde foram impostos os constituintes de maré obtidos no modelo global TOPEX (<http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>), representados na Tabela 5.1.

Foram considerados como parâmetros livres do modelo diferentes fatores, um destes foi o passo de tempo para o cálculo das grandezas hidrodinâmicas, tendo sido este de 0.5 minutos (30s) e um valor constante para o coeficiente de viscosidade e difusidade horizontal de  $10 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . Para além destes considerou-se a formulação de Manning para o cálculo da rugosidade: esta foi considerada variável dentro de estuário, entre  $0.0025$  e  $0.02\text{s}/\text{m}^{1/3}$ , e constante fora deste, igual a  $0.02\text{s}/\text{m}^{1/3}$ , que é o valor padrão utilizado. Na superfície, a condição de fronteira considerada é uma condição *free-slip*, usual em modelos hidrodinâmicos. Não foram consideradas as ações forçadoras do vento.

Tabela 5.1: Constituintes de maré introduzidos no módulo hidrodinâmico (Delft3D-FLOW).

Constituinte		Amplitude (m)	Fase (°)
M2		1.030233	71.703459
S2		0.36305	99.498616
N2		0.219897	54.018466
K2		0.100686	95.800844
K1		0.070072	62.297132
O1		0.060598	40.926842
P1		0.019359	50.162579
Q1		0.018769	95.60638
M4		0.007731	166.48968
MS4		0.004384	72.910902
MN4		0.003077	123.89531

De modo a concluir o processo de implementação do modelo, foi necessário fazer a sua calibração. Esta foi realizada definindo valores para diversos parâmetros livres do modelo e fazendo a comparação entre resultados numéricos e observações de campo, de modo a otimizar o ajuste

entre os resultados. Por fim, efetuou-se a quantificação do melhor ajuste obtido (Universidade de Aveiro, 2015).

### 5.3.2 – Módulo Delft3D-WAVE

Para o módulo Delft3D-WAVE também é necessária a criação de uma malha computacional no qual serão projetados os dados batimétricos. A malha terá de ser suficientemente extensa de modo a permitir o cálculo correto da propagação da agitação marítima na zona de estudo. Para este caso de estudo foi criado um domínio pai (Figura 5.3, A) correspondendo a uma grelha de maior extensão, que terá associada a si, o domínio filho, grelha de maior resolução (Figura 5.3, B), onde serão extraídos os dados. Este método de aninhamento de malhas (*nested grids*) é muito útil para diminuir o tempo de cálculo associado e para obter uma maior resolução na área de estudo.

A geração desta grelha foi elaborada pelo mesmo método que a anterior, com o auxílio do módulo RGFRID do Delft3D. A grelha pai é uma grelha retangular, que tem uma resolução inferior, sendo uma malha computacional regular com espaçamento de 500m, cobrindo uma área que vai desde a Ria de Aveiro até sul da praia da Leirosa, como representado na Figura 5.3. O domínio filho é a mesma grelha elaborada para o FLOW, de maior resolução.

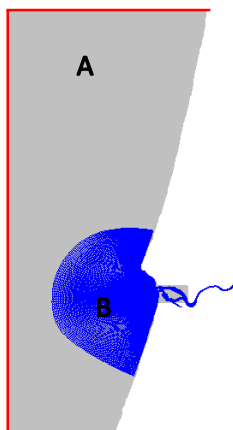


Figura 5.3: Malha numérica A e B (domínio pai e filho) utilizada na propagação de ondas e fronteira aberta (linha vermelha).

A batimetria utilizada baseou-se no mesmo método que a do FLOW, no entanto, esta foi prolongada de forma linear até as dimensões definidas para a grelha pai, de modo a não afetar os resultados na zona de interesse. Por fim, para o módulo WAVE é necessária a introdução dos dados de agitação marítima ao largo, tendo sido escolhidas as 3 secções que se encontram representadas na Figura 5.3 a vermelho, a norte, a oeste e a sul.

#### 5.3.2.1 – Definição da Malha

Para a escolha da malha em questão foi necessário a execução de diferentes testes de modo a chegar a um resultado plausível. Numa primeira abordagem, foi imposta uma onda de NNO ( $H_s=3.75m$ ,  $T_p=12s$  Rumo= $326.25^\circ$ ) na fronteira da malha do módulo hidrodinâmico, de maior resolução. Como se observa na Figura 5.4, gerava-se uma zona de sombra que afetava a embocadura do rio Mondego. Deste modo seguiu-se a metodologia de aninhamento de grelhas. Criou-se uma primeira grelha (grelha 1), representada na Figura 5.5 (a), no entanto observou-se que esta induzia perturbações na altura significativa das ondas junto ao Cabo Mondego, que posteriormente eram prolongadas para a malha filho, como se observa na Figura 5.6 (a). Consequentemente prolongou-se a grelha até Aveiro (grelha 2), de forma a afastar esta anomalia,

sendo que como se observa na Figura 5.5 (b), esta não se verifica junto ao cabo, melhorando o resultado para a malha filho como se averigua na Figura 5.6 (b).

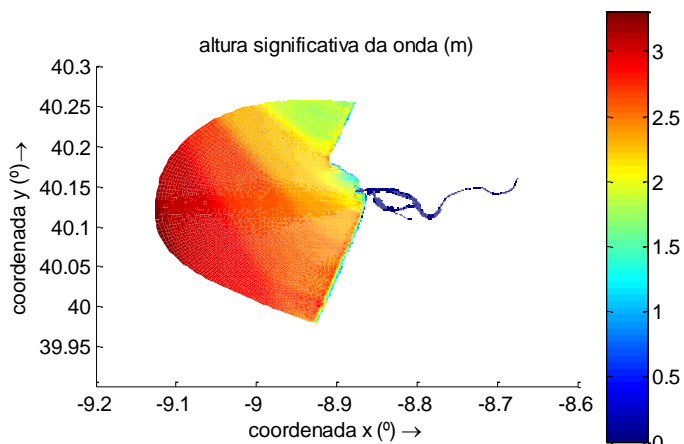


Figura 5.4: Altura significativa representada na grelha hidrodinâmica para uma onda de NNO.

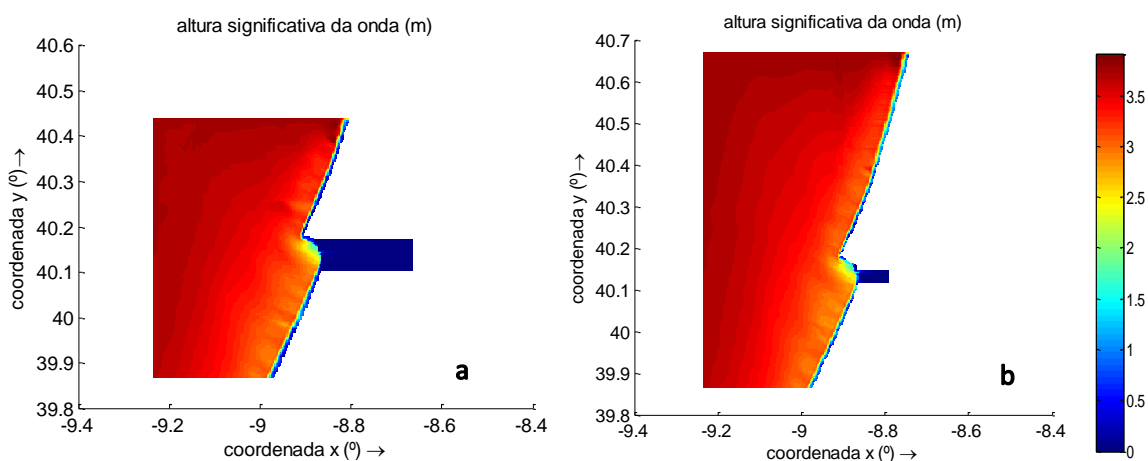


Figura 5.5: Altura significativa (m) representada na malha pai aninhado à grelha 1 (a) e grelha 2 (b) para uma onda de NNO.

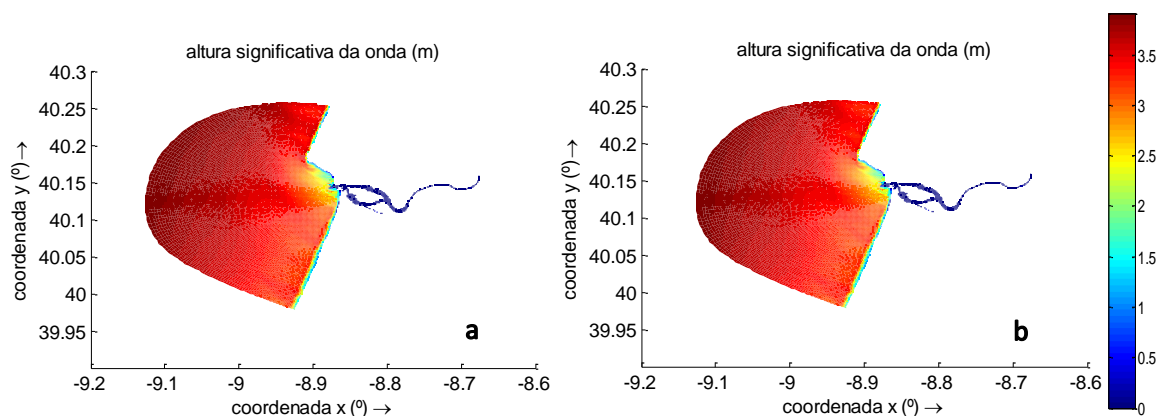


Figura 5.6: Altura significativa (m) representada na malha filho aninhado à grelha 1 (a) e a grelha 2 (b) para uma onda de NNO.

A Figura 5.7 apresenta os pontos de controlo seleccionados. Foi feita uma comparação entre os resultados de  $H_s$  calculados na grelha 1 e 2. A Tabela 5.2 apresenta a variação do  $H_s$  entre as grelhas para os pontos de controlo.

Tabela 5.2: Variação de  $H_s$  entre a grelha 1 e 2 nos pontos de controlo.



norte do Cabo Mondego	9.2 cm
Cabo Mondego	9.7 cm
norte dos Molhes	3.7 cm
Embocadura	1.4 cm
sul dos Molhes	0.3 cm

Figura 5.7: Pontos de controlo para verificação da malha de ondas.

Verifica-se através da Tabela 5.2 que existe alguma variação entre os valores de  $H_s$  calculados nas duas grelhas, no entanto estes decrescem para os pontos mais a sul. De modo a confirmar a que a melhor abordagem a ter seria a utilização da grelha 2, foi aplicada a teoria linear à onda de NNO ( $H_s=3.75\text{m}$ ,  $T_p=12\text{s}$  Rumo= $326.25^\circ$ ) e imposta esta condição na fronteira norte, uma vez que esta seria a condição mais realista de aproximação da onda à costa, em ambas as grelhas. A comparação dos resultados com e sem esta condição de fronteira para ambas as grelhas é apresentada na Tabela 5.3. Como verificado na Tabela 5.3, não se registaram resultados satisfatórios com a grelha 1, sendo que estes deram discrepâncias acima de 0.5 metros, ao passo que para a grelha 2, a maior diferença observada foi de 1.3cm.

Tabela 5.3: Variação entre a altura significativa registada nos pontos de controlo entre os resultados numéricos obtidos com a teoria linear na fronteira norte e a onda de NNO constante em toda a fronteira para a grelha 1 e 2.

Pontos	Grelha 1	Grelha 2
norte do Cabo Mondego	65cm	2.3cm
Cabo Mondego	48cm	2.5cm
norte dos Molhes	21cm	0.9cm
Embocadura	5.8cm	0.7cm
sul dos Molhes	8.7cm	1.3cm

Este estudo foi elaborado também para mais duas ondas de  $H_s$  de 1.75 e 6.25 metros, com um ângulo de incidência de  $315^\circ$ , não se verificando variações significativas entre os resultados obtidos pela grelha 1 e 2.

### 5.3.3 – Módulo Delft3D-MOR e SED

Considerou-se um diâmetro mediano do sedimento constante para toda a extensão em estudo,  $d_{50} = 0.35\text{ mm}$ , uma areia média, o que não é real, no entanto este é representativo da área envolvente à embocadura e das praias da região de estudo, sendo uma aproximação. Para os restantes parâmetros do módulo SED foram considerados os valores padrão recomendados, bem como no módulo MOR.

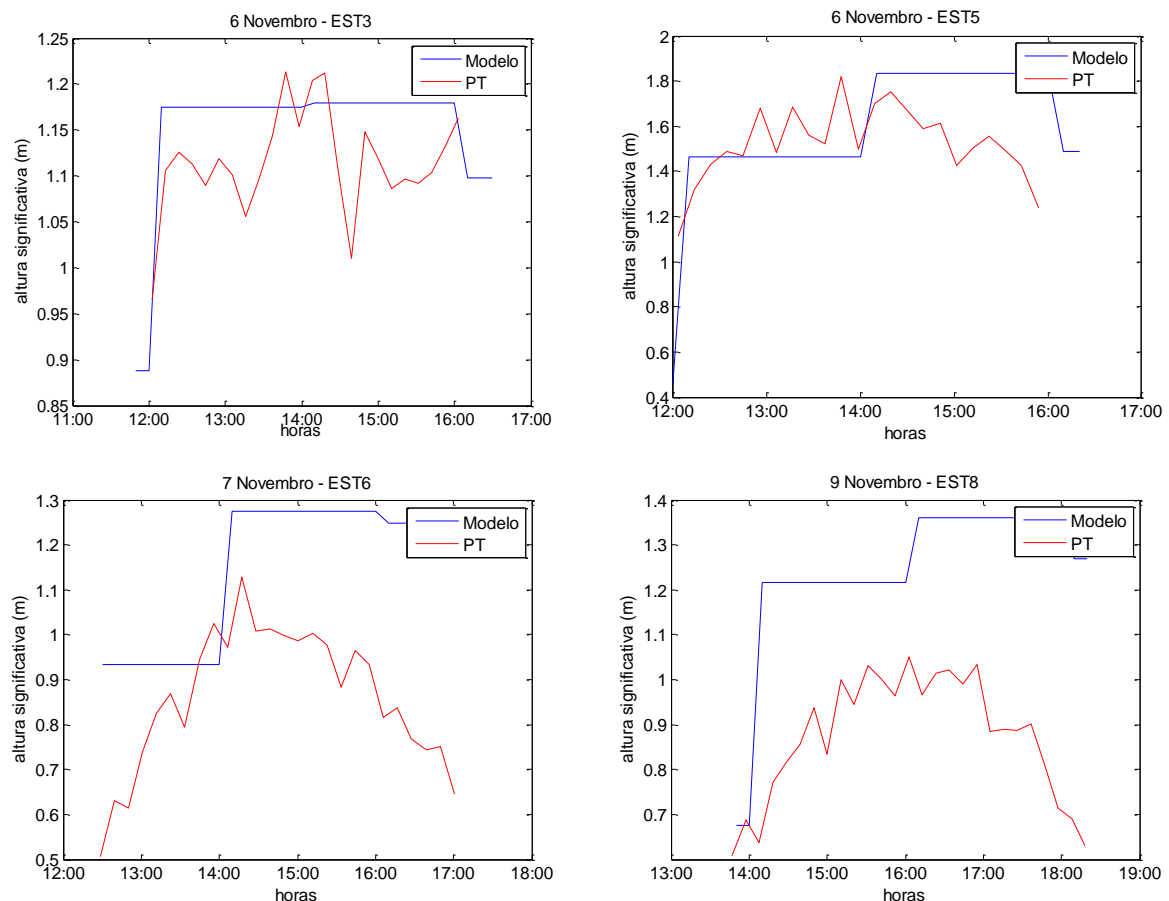


## 5.4 – Validação do Modelo

### 5.4.1 – Validação Delft3D-WAVE

Para a validação da componente de agitação marítima do modelo, foram comparados os resultados numéricos da altura significativa da onda com as observações das campanhas de novembro e maio. Deste modo foram executadas simulações com o modelo de propagação de ondas introduzindo nas fronteiras abertas valores de altura significativa, período de pico, e rumo da onda medidos na boia ondógrafo de Leixões para esses mesmos períodos e forçando, também, o modelo com a maré astronómica.

Foram identificados pontos da malha o mais próximo dos locais de observações das campanhas, de modo a serem representadas as séries temporais de alturas significativas calculadas nestes pontos. Assim, as Figuras seguintes ilustram as séries temporais da altura significativa calculada e observada para algumas estações de amostragem nas campanhas de novembro e maio. A Figura 5.8 representam a comparação dos resultados numéricos da altura significativa (linha a azul) com as medições (linha a vermelho) nos pontos de amostragem para as campanhas de novembro (primeiras quatro imagens) e de maio (restantes seis imagens).



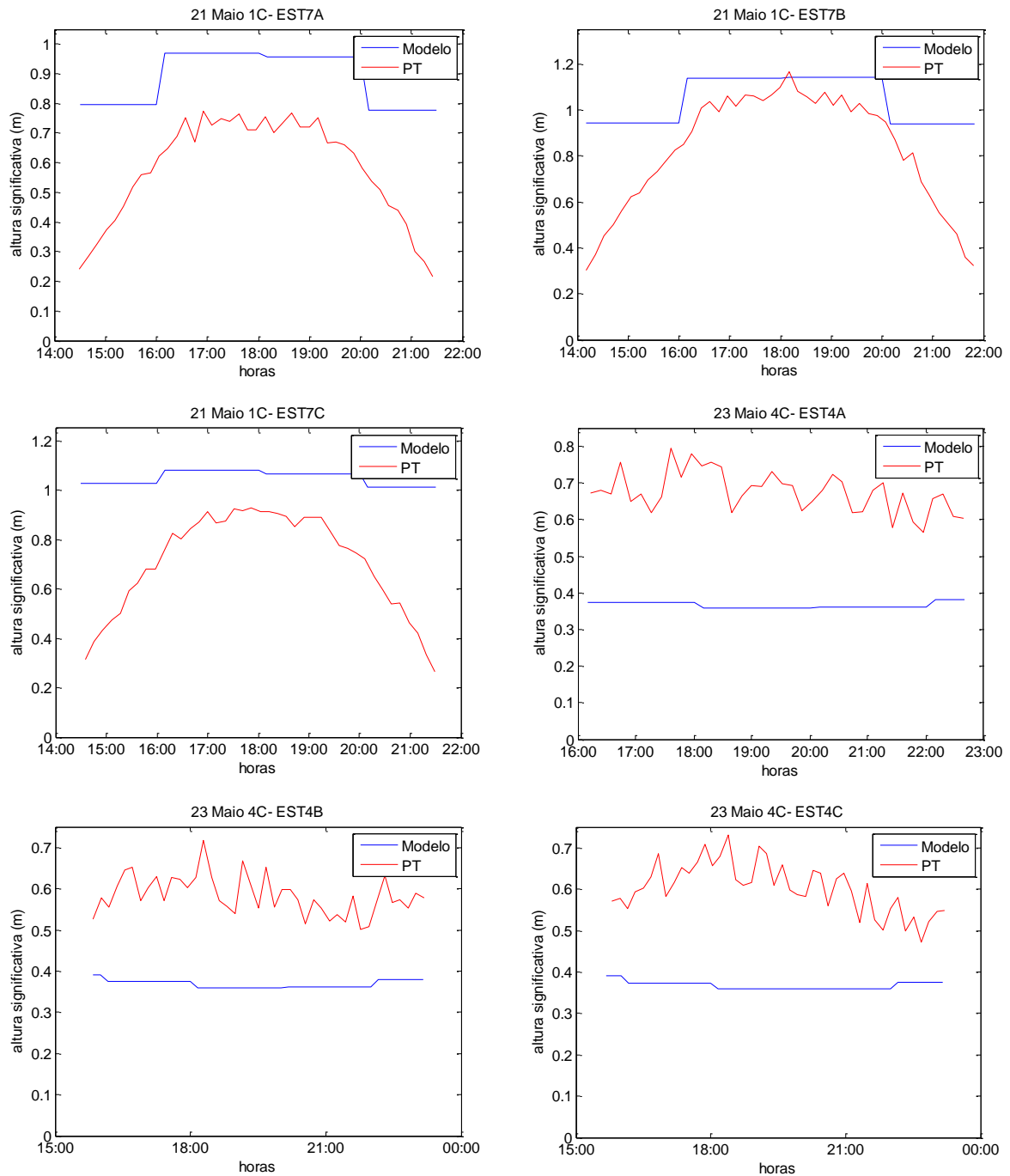


Figura 5.8: Comparação dos resultados numéricos da altura significativa da onda (linha azul) com as medições (linha vermelha) ao longo do tempo, nos pontos de amostragem para as campanhas de novembro de 2014 e maio de 2015.

Esta comparação deve ser feita tendo em conta que a batimetria numérica, não é exatamente igual à batimetria real nos locais de amostragem. Esta desigualdade pode ser maior quando o declive da praia é mais acentuado, resultando em uma menor coerência entre os resultados.

Na campanha de novembro as maiores discrepâncias observam-se na EST6 e 8, tendo estas uma variação entre máximos de aproximadamente 0.2 e 0.3 metros, respetivamente. Nas EST3 e 5 não se verifica grande variação entre os valores observados e calculados, tendo variações na ordem dos centímetros (cerca de 2 centímetros na EST3). Note-se que na EST3 os resultados do modelo e da campanha ajustam-se, indicando que o modelo de um modo geral reproduz a variação da altura

significativa com a maré. Em particular nas estações 6 e 8 foram registados valores elevados da ondulação ao largo (Figura 4.13- secção 4.2.2), o que pode também ter influenciado os resultados do modelo, induzindo as discrepâncias observadas. Verifica-se que nestas condições a comparação entre os resultados é feita na zona de rebentação, representando um teste aos mecanismos de dissipação da ondulação descritos pelo modelo.

Na campanha de maio no primeiro ciclo de maré, a sul da embocadura do Mondego, o resultado do modelo ajusta-se bem aos dados de campo para a EST7B. Nas estações 7A e 7C verificam-se discrepâncias entre os 0.25 a 0.2 metros, respetivamente. Por outro lado, nas estações a norte, observam-se discrepâncias maiores para todas as estações, chegando a variações da ordem dos 40 centímetros. A praia da Figueira da Foz, que tem um declive acentuado, o que favorece uma zona de rebentação estreita. Para além disto, a existência de erros na reprodução da batimetria são inevitáveis, uma vez que a batimetria numérica não é idêntica à real, o posicionamento do ponto na malha correspondente ao ponto de amostragem pode induzir variações, uma vez que podem não ser exatamente os mesmos.

#### 5.4.2 – Validação Delft3D-MOR e Estudo de Sensibilidade

De modo a estudar a sensibilidade da componente morfodinâmica do modelo foram efetuados estudos de diferentes fatores, nomeadamente às condições de fronteira, através da variação da ondulação e caudal do rio, bem como de parâmetros livres do modelo, que intervêm no cálculo do transporte em suspensão e por arrastamento. Através desta análise determinaram-se os valores que melhor se ajustavam à simulação de seguida apresentada, tornando o modelo o mais realista possível. Por fim, a validação dos resultados deste módulo foi efetuada através da comparação dos resultados numéricos da variação da batimetria na embocadura com valores observados. Para tal selecionou-se um evento de temporal, em que as variações batimétricas fossem acentuadas, tendo sido este entre 11 e 19 de dezembro de 2012, referido no subcapítulo 3.7 (Figura 3.5, b). Consideraram-se as condições de agitação marítima e maré astronómica ao largo correspondentes ao período em questão.

##### **Condição de fronteira - ondulação**

Foram efetuadas simulações considerando apenas a ação forçadora da maré, sem qualquer componente ondulatória. O tempo de simulação foi de 49h40m, de modo a completar quatro ciclos da constituinte lunar semidiurna ( $M_2$ ). Verificou-se que a maré não afetou a morfodinâmica na embocadura. Desta forma, a maré não é dinâmica morfologicamente fora do estuário.

##### **Condição de fronteira - caudal**

Foram também efetuadas variações no caudal do rio Mondego, de modo a verificar o efeito que este teria na morfodinâmica da embocadura. Os resultados estão apresentados na Figura 5.9. Considerou-se a configuração correspondente ao evento de temporal referido anteriormente (11 a 19 de dezembro de 2012), e definiram-se quatro caudais fluviais, 0, 700, 1500 e 3000m<sup>3</sup>/s. De acordo com os valores apresentados na Figura 3.3 (subcapítulo 3.5), o primeiro valor representa valores próximos ao máximo observado entre 2010-14, o segundo, o caudal máximo observado em 2001 e o último um valor correspondente ao caudal máximo característico ao rio Mondego em 1948, antes de este ser regularizado (Louro e Lourenço, 2005).

A Figura 5.9 (a), corresponde à batimetria inicial imposta no modelo, sendo que após o temporal se obtem o resultado ilustrado na Figura 5.9 (b), correspondente ao sistema de referência (caudal nulo). A solução numérica correspondente à descarga de 700m<sup>3</sup>/s não apresentou variações

relativamente ao gráfico (b), não contribuindo para alterações na morfologia da embocadura e assim não é apresentado. Por outro lado as condições 1500 e 3000m<sup>3</sup>/s, (c) e (d), induziram algumas modificações. Analisando as soluções numéricas com o resultado de referência (b), verifica-se que o efeito do caudal fluvial contribui para um aprofundamento do canal no anteporto, para a acreção junto ao cabeço do molhe sul e a advecção da barra submersa na embocadura.

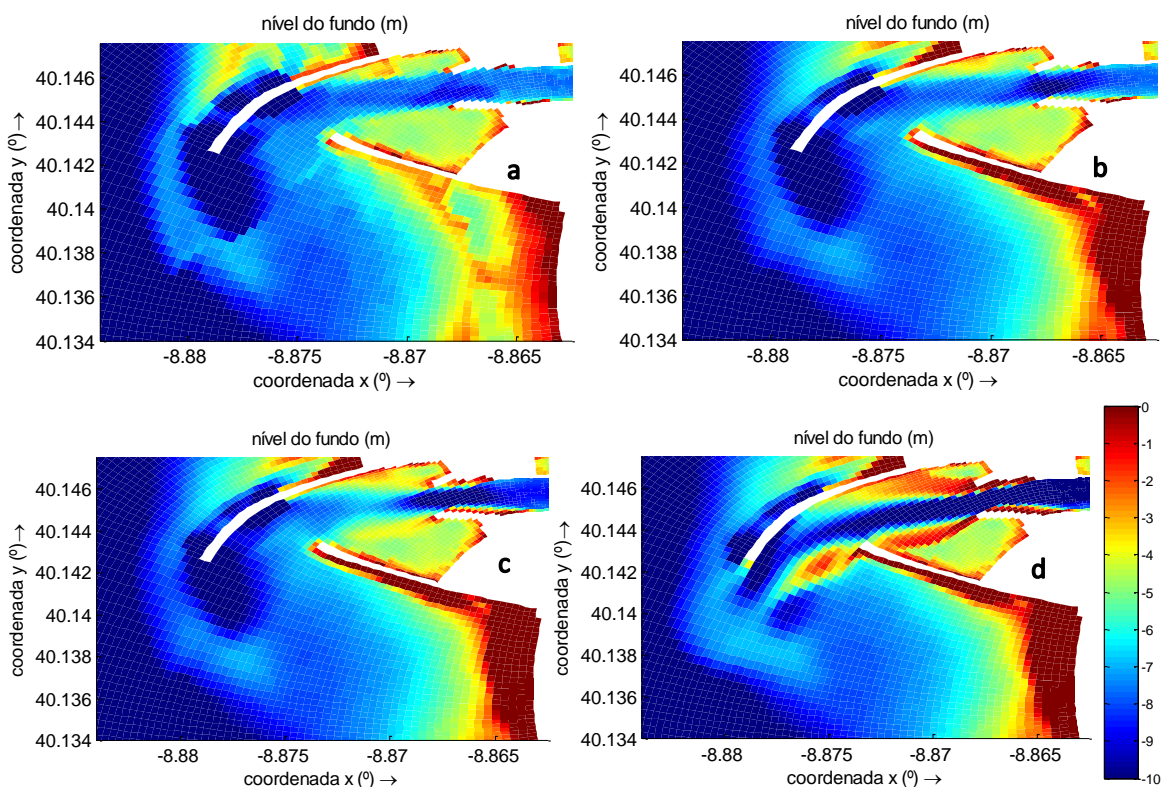


Figura 5.9: Batimetria inicial (a) e simuladas para caudal fluvial de 0m<sup>3</sup>/s (b), 1500m<sup>3</sup>/s (c) e 3000m<sup>3</sup>/s (d).

### Parâmetros livres

De modo a analisar a sensibilidade dos resultados de transporte sedimentar do modelo aos parâmetros livres foram efetuadas simulações com uma onda monocromática ( $H_s=3.75m$ ,  $T_p=12s$  Rumo= $326.25^\circ$ ) e variados os fatores de calibração  $f_{SUS}$ ,  $f_{BED}$ ,  $f_{SUSW}$  e  $f_{BEDW}$ . O primeiro determina a concentração de referência e assim a carga em suspensão, enquanto os restantes calibram o transporte por arrastamento, como referido na secção 5.2.3.2. O valor inicial de todos estes parâmetros de calibração é 1. De modo a observar a sensibilidade, foram alterados cada um dos fatores individualmente, para 0.5 e 5, obtendo os resultados da Tabela 5.4, realizando-se assim uma análise qualitativa.

Tabela 5.4: Análise qualitativa dos fatores de calibração no transporte sedimentar.

		Arrastamento	Suspensão	Total
$f_{SUS}$	5	=	↑	↑
	0.5	=	↓	↓
$f_{BED}$	5	↑	=	↑
	0.5	↓	=	↓
$f_{SUSW}$	5	↑	=	↑
	0.5	↓	=	↓
$f_{BEDW}$	5	↑	=	↑
	0.5	↓	=	↓

Analisando a Tabela 5.4 verifica-se que, os resultados estão em conformidade com a teoria. Ao alterarem-se os fatores  $f_{BED}$ ,  $f_{SUSW}$  e  $f_{BEDW}$  afeta-se o transporte por arrastamento e ao modificar-se o parâmetro  $f_{SUS}$  influencia-se o transporte em suspensão, e conseqüentemente em ambos os casos alterando o transporte total. Deste modo, ao aumentar-se o valor dos fatores mencionados em primeiro, o transporte por arrastamento ( $S_b$ ) também é incrementado e o oposto também se verifica, enquanto a componente em suspensão se mantém constante. Contrariamente, quando se aumenta ou reduz o fator  $f_{SUS}$ , a componente em suspensão é alterada, ao passo que, a por arrastamento permanece estável.

Este estudo permitiu averiguar para que parâmetro o modelo apresenta sensibilidade. Verificou-se que o fator  $f_{SUSW}$  induz variações significativas do transporte por arrastamento e total, contrariamente ao fator  $f_{BED}$  em que as variações são praticamente impercetíveis.

### Validação

Os valores de caudal para o evento de temporal em estudo eram inferiores a  $700 \text{ m}^3/\text{s}$ , sendo que o caudal não foi considerado na simulação, uma vez que verificamos variações significativas na morfologia apenas em condições extremas, que geralmente não se observam no rio Mondego.

Por fim calculou-se a variação da batimetria para o período do temporal de 2012, obtendo os resultados da Figura 5.10 (direita) e comparou-se com os valores observados (esquerda). Fazendo uma análise comparativa, a simulação reproduz a acreção de sedimento na barra submersa, com valores na ordem de grandeza dos observados (valores máximos de 3 metros).

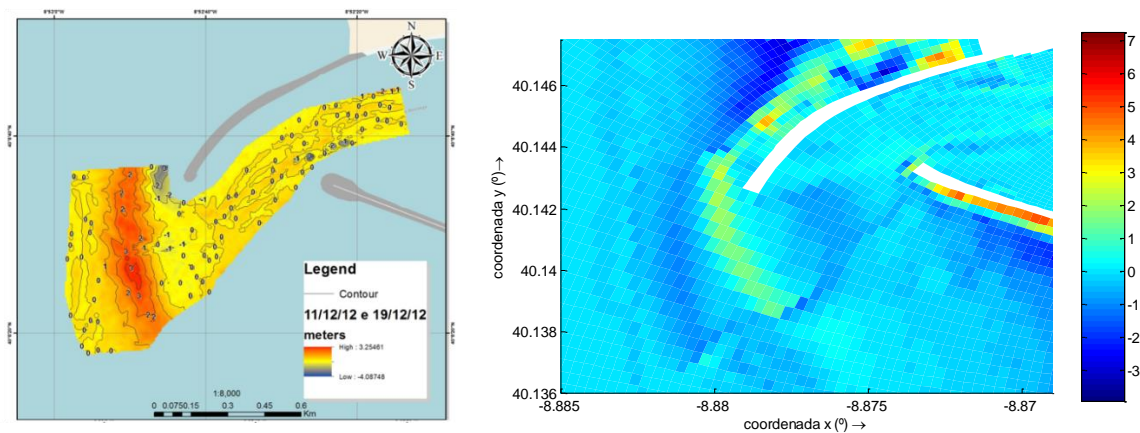


Figura 5.10: Variação da batimetria entre 11 a 19 de dezembro de 2012 para valores observados (esquerda) e simulados (direita).

## 5.5 – Resultados

### 5.5.1 – Hidrodinâmica Costeira

A necessidade de especificar um número reduzido de ondas como condições de fronteira de um sistema em modelos matemáticos de simulação da dinâmica sedimentar é muito elevada, uma vez que este conjunto de ondas será representativo do clima de agitação marítima daquela região. Deste modo, para estudar as correntes e transportes médios considerou-se o regime de ondulação equivalente anual estabelecido por Barata *et al.* (1996). Este regime é constituído por 6 ondas com condições distintas, sendo que a altura significativa destas cresce da primeira para a quinta e os rumos são essencialmente de NO, exceto o da onda 6 que é de O. A diferença entre a onda 3 e 6 consiste apenas no ângulo de incidência da onda. A onda 1 é a onda com maior percentagem de ocorrência, seguida da onda 2, sendo que a onda com menor ocorrência, onda 5, corresponde a onda com caráter de temporal. Este regime de 6 ondas representado na Tabela 5.5 foi estabelecido presumindo que este produz um transporte anual longitudinal na costa que é equivalente ao adquirido com o regime de agitação medido ao largo da Figueira da Foz.

Tabela 5.5: Ondas representativas do clima de agitação equivalente.

Onda	W1	W2	W3	W4	W5	W6
Altura (m)	1.75	2.25	3.75	4.75	6.25	3.75
Período (s)	12	12	12	15	15	12
Rumo (°)	315	303.75	326.25	315	315	281.25
Frequência (%)	50.00	30.02	9.80	1.64	1.00	7.54

O conjunto de ondas correspondente ao regime de ondulação equivalente foi considerado no módulo Delft3D-WAVE, de modo a caracterizar a propagação de ondas na região em estudo, em condições de agitação médias e extremas. Todas as ondas da Tabela 5.5 foram impostas na fronteira oceânica do domínio pai, tendo sido considerado também a ação da maré para um tempo de simulação de 2 dias. Deste registo de ondas apenas serão apresentadas quatro condições de onda, W1, W3, W5 e W6.

#### Altura Significativa

A Figura 5.11 representa as distribuições de altura significativa das ondas 1, 3, 5 e 6 simuladas pelo modelo. A condição W1 corresponde a um regime frequente na costa da Figueira da Foz, tendo valores de  $H_s$  inferiores aos das outras ondas. Contrariamente, W5 equivale a um registo de ondulação de temporal, verificando-se alturas significativas superiores às restantes. Analisando W3 e W6, que são idênticas exceto no seu rumo, observa-se que a segunda atinge  $H_s$  superiores até profundidades mais reduzidas do que a primeira, verificando-se que W6 consegue gerar perturbações na entrada da barra, uma vez que tem um ângulo de incidência que o favorece.

Os resultados das ondas com um rumo de NO (W1, W3 e W5) sofrem efeito de refração no Cabo Mondego levando à existência de valores inferiores de  $H_s$  entre o Cabo Mondego e a praia da Figueira da Foz, enquanto a W6 não.

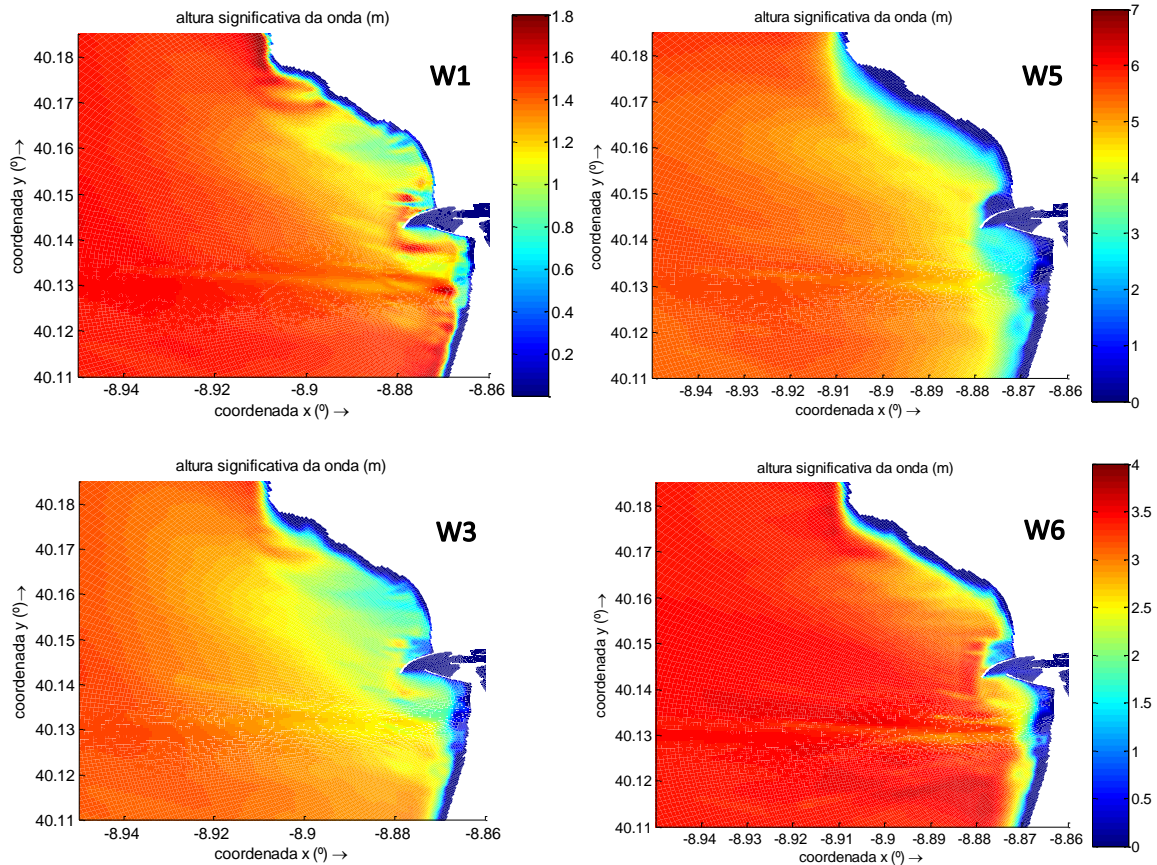


Figura 5.11: Distribuição da altura significativa da onda calculada para quatro ondas equivalentes de condições distintas.

### Velocidade média

O campo de velocidade média da corrente litoral induzida pela rebentação das ondas é calculado pelo modelo, e está ilustrado na Figura 5.12 para as condições de onda W1, W3, W5 e W6. Observa-se que o aumento da altura da onda ao largo leva a uma intensificação da corrente, sendo que o sentido desta entre o Cabo Mondego e praia da Figueira da Foz é o mesmo em todas as ondas de norte, para sul. Para além disto, verifica-se que os valores superiores da corrente encontram-se entre o Cabo Mondego e Buarcos.

Na embocadura a corrente para sul também se intensifica com o aumento da altura da onda ao largo, no entanto para a condição W5 esta é, claramente, mais intensa. Este aumento de intensidade, provavelmente, ocorre devido à rebentação das ondas sobre a barra longilitoral e barra submersa existentes. A sul da embocadura o campo de velocidade média não foi apresentado, no entanto este é para sul em todas as condições, aumentando a sua intensidade de norte para sul. O mesmo não se verifica na condição W6 em que ocorre uma inversão desta.

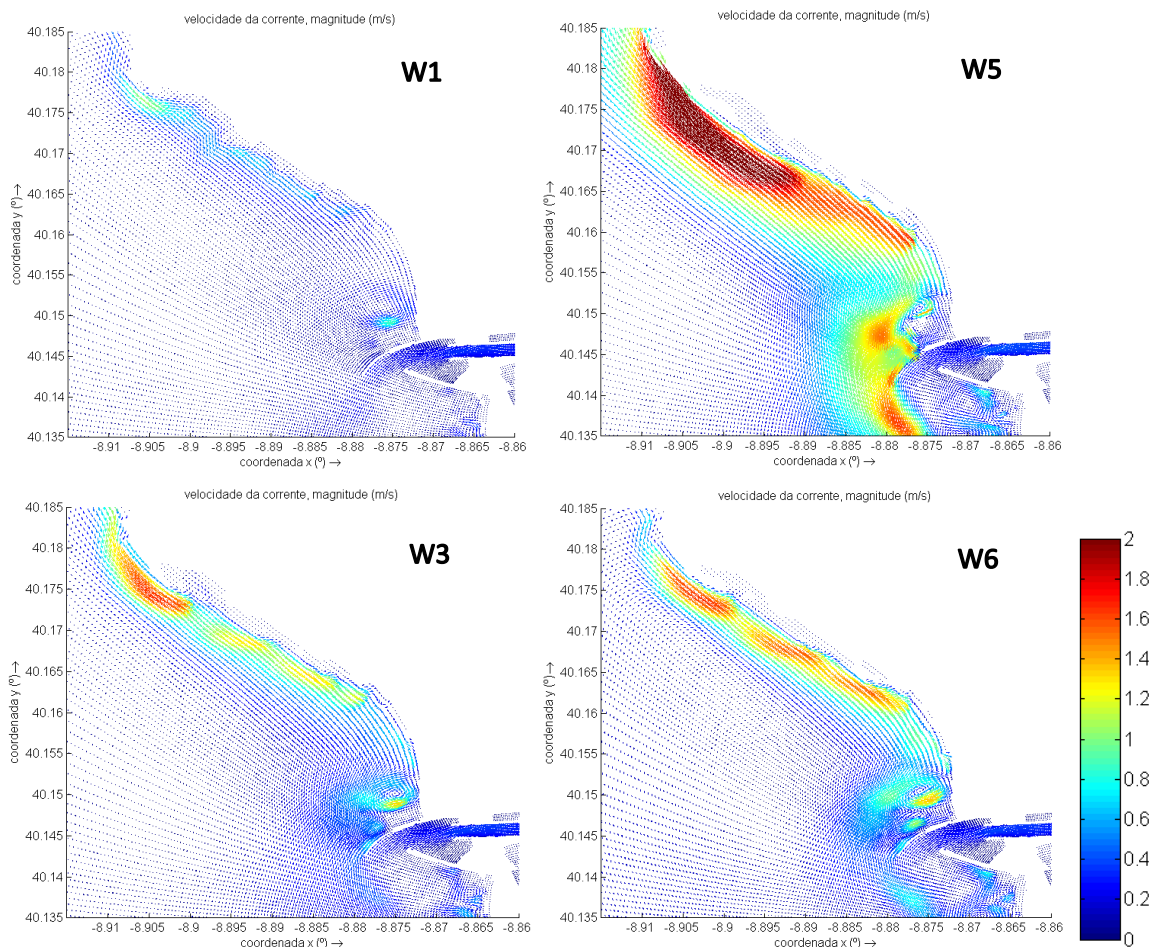


Figura 5.12: Campo de velocidade média calculado para quatro ondas equivalentes de condições distintas.

Para todas as condições de onda, a corrente para sul transpõe o Cabo Mondego de forma contínua, exceto W6, que tem um ângulo de incidência de oeste, induzindo uma interrupção da corrente, como se observa na Figura 5.13.

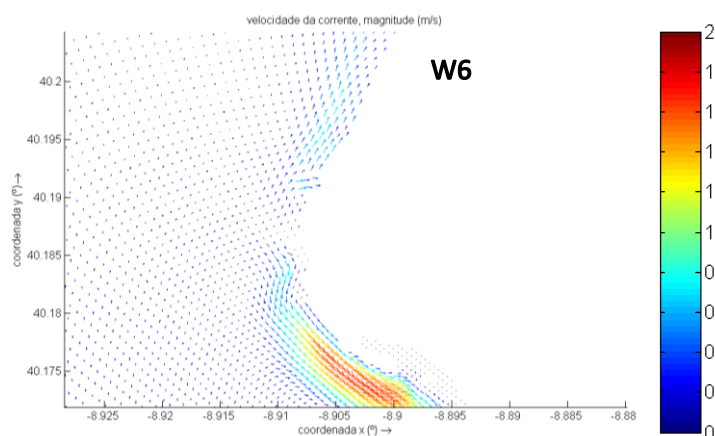


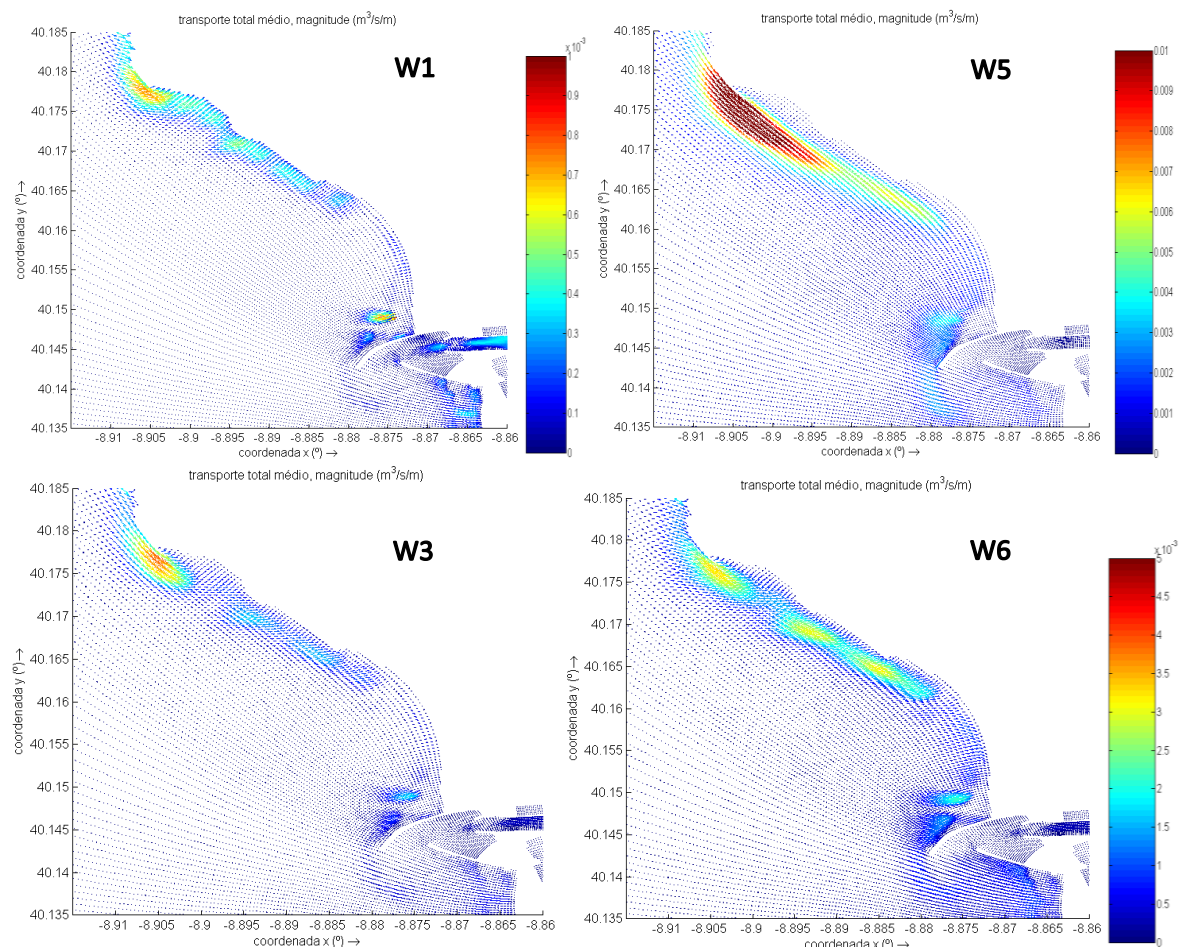
Figura 5.13: Campo de velocidade média calculado para W6, zoom no Cabo Mondego.



### 5.5.2 – Fluxos Sedimentares e Morfodinâmica

Uma onda equivalente potencia um determinado transporte, consoante as suas características. Assim, foram efetuadas simulações para todas as ondas do regime equivalente de ondas de forma a compreender o efeito destas a nível de taxas de transporte sedimentar, bem como, variações da batimetria. As simulações consideraram as correntes de maré e uma distribuição uniforme da granulometria dos sedimentos, sendo que o caudal fluvial não foi considerado.

A Figura 5.14 apresenta as soluções numéricas dos valores médios da taxa de transporte sedimentar total (componente em suspensão e por arrastamento) calculados para diferentes condições de onda (W1, W3, W5 e W6).



**Figura 5.14:** Valor médio da taxa de transporte sedimentar calculados para diferentes ondas do regime equivalentes ( $m^2/s$ ).

Apesar das escalas gráficas serem distintas, de modo a ser possível a observação das taxas de transporte, verifica-se que quanto maior a altura da onda ao largo, mais intensa é a taxa de transporte sedimentar simulada pelo modelo, o que é coerente com os campos de velocidade média. Os picos de transporte observam-se entre o Cabo Mondego e Buarcos, decrescendo para a praia da Figueira da Foz. Na região sul à embocadura as taxas de transporte mais elevado também ocorrem junto à costa.

Os resultados numéricos mostram que a componente por arrastamento, que tem a direção de propagação da onda, é dominante face à por suspensão. Entre o Cabo Mondego e a praia da Figueira da Foz, a componente do transporte em suspensão é orientada de norte para sul para

todas as condições de onda. A condição W6 induz taxas de transporte total mais intensos do que W3, bem como na componente em suspensão. A sul da embocadura a componente longitudinal do transporte processa-se de norte para sul, exceto para W6.

Para o caso da condição W5, condição de temporal, as taxas de transporte são claramente mais elevadas do que as restantes. Junto à embocadura, contrariamente às restantes ondas, verifica-se uma continuidade do transporte em suspensão de norte para sul. A Figura 5.15 representa a distribuição da taxa de transporte em suspensão na embocadura. Verifica-se que a componente em suspensão tem a direção da corrente induzida pela ondulação e será responsável pela transposição de sedimentos de norte para sul através do molhe.

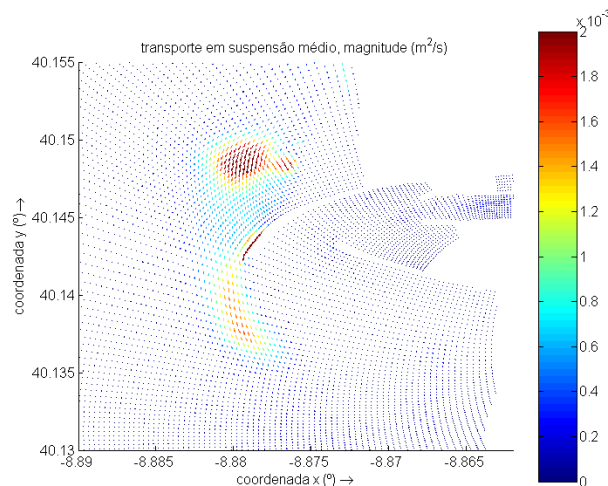


Figura 5.15: Valor médio da taxa de transporte sedimentar em suspensão calculados para condição W5 ( $m^2/s$ ).

Para melhor compreensão dos fluxos sedimentares foram calculados fluxos totais ao longo de diferentes secções de controlo, para todo o tempo de simulação, apresentadas na Figura 5.16. Foram seleccionadas cinco secções, duas a norte (Sec2 e Sec3) e a sul (Sec5 e Sec6) da embocadura, perpendiculares à costa e uma última paralela à costa (Sec4), perpendicular ao molhe norte. Esta configuração foi escolhida de forma a estimar a deriva litoral através das secções perpendiculares à costa.

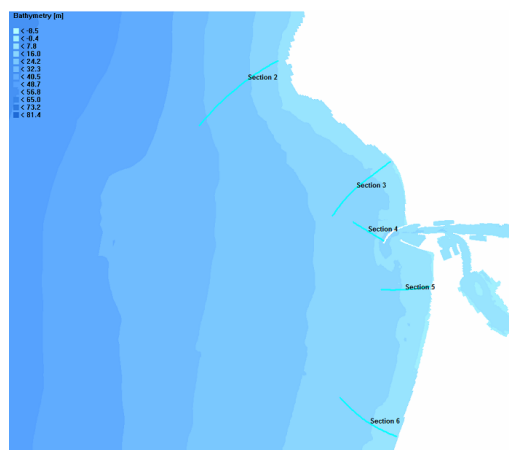


Figura 5.16: Localização das secções para o cálculo da deriva litoral.

A partir dos valores dos fluxos totais para o tempo de simulação considerado foram calculadas as taxas de transporte médias anuais para cada secção, apresentados na Tabela 5.6. Ponderando a

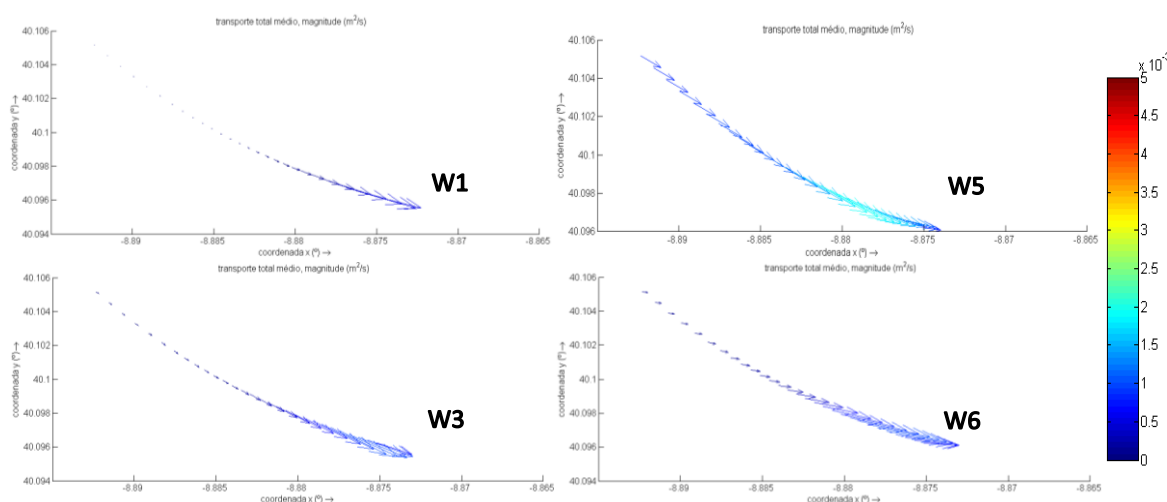
frequência de ocorrência de cada onda no transporte anual obtêm-se os valores da penúltima coluna da tabela. A última coluna da tabela apresenta a percentagem do transporte que corresponde às condições das ondas de temporal, W4 e W5.

**Tabela 5.6: Volumes líquidos em transporte calculados para as diferentes condições de onda para as secções de controlo.**

Secções	Volume líquido ( $\times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ )						Ponderado	(onda4+onda5) %
	W1	W2	W3	W4	W5	W6		
2	0.97	1.80	4.28	10.13	15.49	3.56	2.03	15
3	0.07	0.54	2.25	20.27	58.57	8.04	1.94	47
4	-0.03	-0.18	-0.26	-1.95	5.07	-2.28	-0.25	-
5	0.11	0.44	2.88	15.50	41.26	-3.05	0.90	73
6	0.77	1.80	3.10	11.80	21.10	-7.40	1.07	37

Pela Tabela 5.6 verifica-se que o volume líquido transportado através das secções é proporcional à altura da onda ao largo, aumentando com a altura. Os valores obtidos para o transporte efetivo ponderado nas secções 2, 5 e 6 são da ordem de grandeza dos valores de referência, como verificado no subcapítulo 3.6, validando as suposições das ondas equivalentes. Na secção 3, o volume líquido simulado de  $1.94 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$  é superior aos valores encontrados na literatura. No entanto é importante referir que neste cálculo é considerada uma disponibilidade permanente do sedimento entre o Cabo Mondego e a praia de Buarcos, contudo isto não é real, uma vez que o substrato nesta região é maioritariamente rochoso, pelo que só uma percentagem do sedimento (correspondente à que provem da deriva litoral de norte) é transportada. Note-se que a distribuição do transporte é sempre de norte para sul, exceto na secção 4, sendo que o fluxo através desta terá uma importante contribuição do transporte por arrastamento, com exceção da condição W5 que contribui com um transporte de norte para sul devido ao transporte em suspensão.

As ondas referentes às condições de temporal (W4 e W5) têm uma frequência de ocorrência muito reduzida, 1.64% e 1.00%, respetivamente, no entanto, as taxas de transporte que promovem são muito elevadas, revelando um valor significativo para o transporte efetivo ponderado, sendo de aproximadamente 15% na secção 2, de 47% na secção 3, de 73% na secção 5 e 37% na secção 6.



**Figura 5.17: Transporte total médio em uma secção a sul da embocadura do rio Mondego, para condições de onda distintas.**

A Figura 5.17 apresenta o transporte total médio para as condições W1, W5, W3 e W6 para a região sul à embocadura do rio Mondego, no entanto para uma secção apenas, de modo a que a percepção seja mais clara. Verifica-se que o transporte é de norte para sul para as condições W1, W3 e W5, exceto para W6 que é de sul para norte, devido à sua direção de aproximação à costa, mais rodado a oeste. Para além disto observa-se que para W3 o transporte ocorre muito junto à costa, devendo-se à direção de aproximação da onda.

### **Componentes do transporte**

Para uma análise mais pormenorizada do volume líquido transportado em cada secção foram separadas as componentes de suspensão e de arrastamento, conforme representado na Figura 5.18, sendo a linha azul o transporte total correspondente à soma do transporte por arrastamento, linha verde, com o transporte em suspensão, linha vermelha. De um modo geral verifica-se que o transporte por arrastamento domina o transporte total em todas as secções.

Na secção 2, o transporte total ( $2.03 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ ) foi claramente dominado pela componente de arrastamento ( $1.98 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ ). Do valor total do transporte em suspensão ( $5.20 \times 10^4 \text{m}^3/\text{ano}$ ) o máximo foi observado na condição W5 ( $2.46 \times 10^4 \text{m}^3/\text{ano}$ ). Através do perfil de transportes verifica-se que a frequência de ocorrência das ondas tem um papel importante no resultado final dos fluxos.

Na secção 3, verifica-se um aumento do transporte total com o aumento da altura da onda ao largo, sendo este de  $1.94 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ . Para este caso o transporte por arrastamento domina em ondas de altura inferiores, como as condições W1, W2, W3 e W6. Já para as condições W4 e W5 há uma maior proximidade entre os resultados das duas componentes do transporte.

Na secção 4, o transporte por arrastamento ( $-0.433 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ ) determina o transporte total ( $-0.250 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ ) de sul para norte, uma vez que o primeiro se processa na direção de propagação da onda e devido à orientação da secção. O transporte em suspensão para todas as condições de onda promove um transporte de norte para sul, aumentando com a altura da onda ao largo. No total este valor é de  $0.186 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ , no entanto, como se observa pelo gráfico, as maiores contribuições ocorrem nas condições W5 ( $0.131 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ ), W6 ( $0.24 \times 10^5 \text{m}^3/\text{ano}$ ) e W4 ( $0.22 \times 10^5 \text{m}^3/\text{ano}$ ), respetivamente. Desta forma verifica-se que o transporte sedimentar que transpõe o molhe de norte para sul processa-se por suspensão e tem origem nos sedimentos que provêm da deriva litoral da praia da Figueira da Foz.

Na secção 5 verifica-se que o transporte por arrastamento ( $0.87 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ ) é dominante, aumentando com a altura da onda ao largo, correspondendo o máximo à condição de temporal W5 ( $0.41 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ ). Os transportes para W6 são negativos, uma vez que nos encontramos a sul dos molhes, sendo o fluxo de sul para norte.

Na secção 6 o transporte por suspensão ( $0.28 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ ) foi positivo e de algum significado para todas as condições de onda, exceto para W6, que tem um ângulo de incidência de oeste. As condições W1 e W2 têm um transporte por arrastamento significativo nesta secção possivelmente devido à exposição da costa nesta secção e à sua taxa de frequência. Já na condição W3 verifica-se um aumento do transporte em suspensão, uma vez que por efeito de refração esta onda ao incidir na costa sul aumenta a deriva litoral da costa de Lavos até a Leirosa. As condições de onda W1/W2/W4 e W5 são ondas que aproximam-se da costa sul com um ângulo mais 'perpendicular' do que as restantes duas condições, levando com que os seus valores estejam mais associado à sua

frequência de ocorrência, isto é, apesar de haver um aumento do transporte total de sedimentos com o aumento da altura da onda ao largo que se verifica através da Tabela 5.6, a frequência de ocorrência tem um papel muito importante determinando nesta secção os valores de transporte. Contrariamente a condição W3 e W6, com ângulos de aproximação distintos sofrem outras influências por parte do transporte em suspensão e por arrastamento.

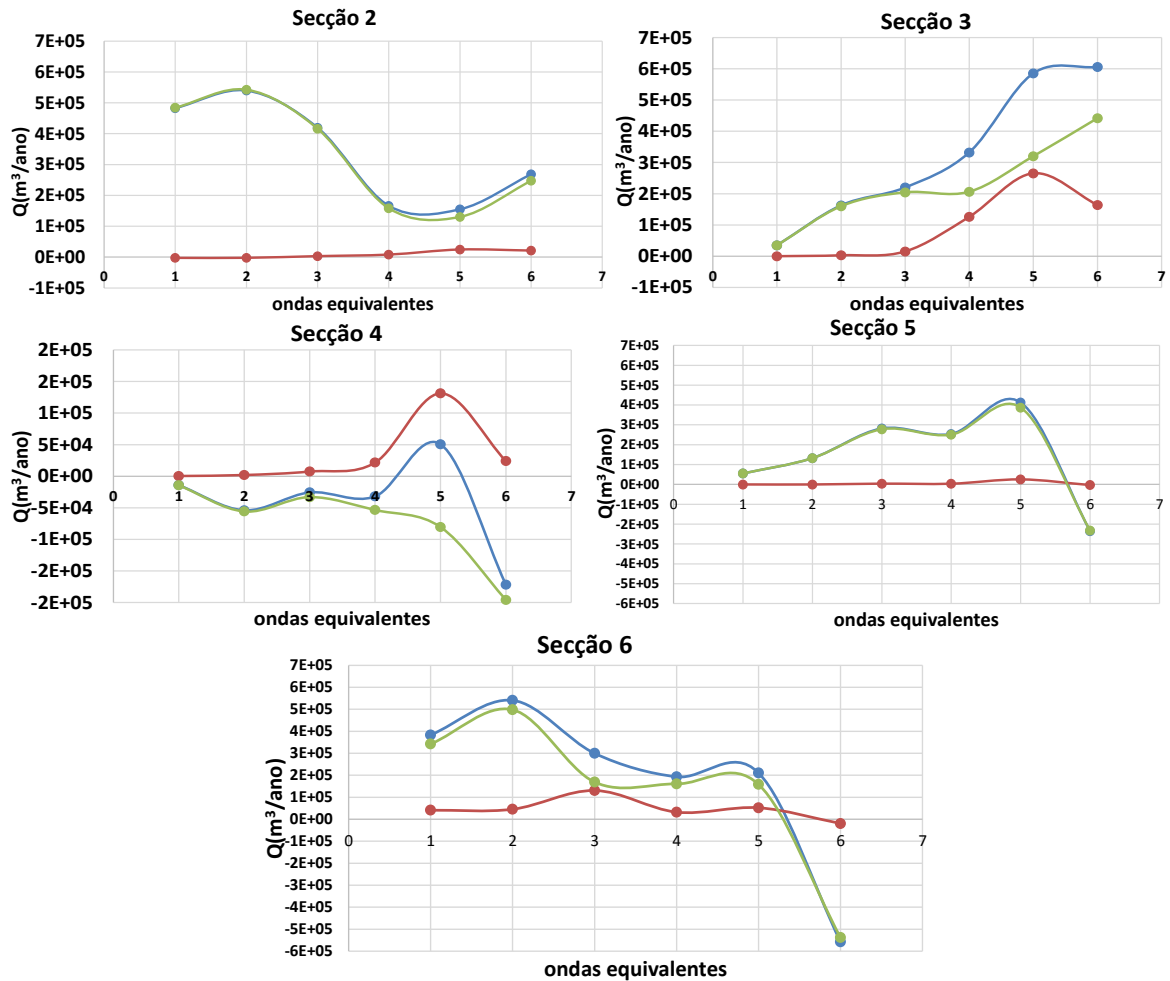


Figura 5.18: Taxas de transporte líquido ponderado ( $m^3/ano$ ), total (linha azul), por arrastamento (linha verde) e por suspensão (linha vermelha), para todas as secções de controlo.

### Morfodinâmica

Tendo em conta as condições de onda referidas anteriormente foi representada a batimetria numérica calculada ao fim de 2 dias de simulação, de forma a observar para que regimes se observam alterações significativas. Assim, para W1 têm-se alterações da batimetria impercetíveis comparadas com a batimetria inicial referida na secção 5.4.2, uma vez que os transportes associados a esta foram reduzidos, indicando que o regime médio de ondulação característico da Figueira da Foz não contribui para alterações da morfologia na embocadura.

Comparando W3 e W6, há um ligeiro aprofundamento próximo ao molhe sul, possivelmente devido à direção de incidência da onda, para além de uma maior acreção e deslocação da barra submersa para a costa da zona adjacente ao molhe norte. Para W5 observam-se alterações acentuadas, verificando-se um aumento da largura da barra submersa e a sua acreção, observando-se também acreção a norte do molhe norte.

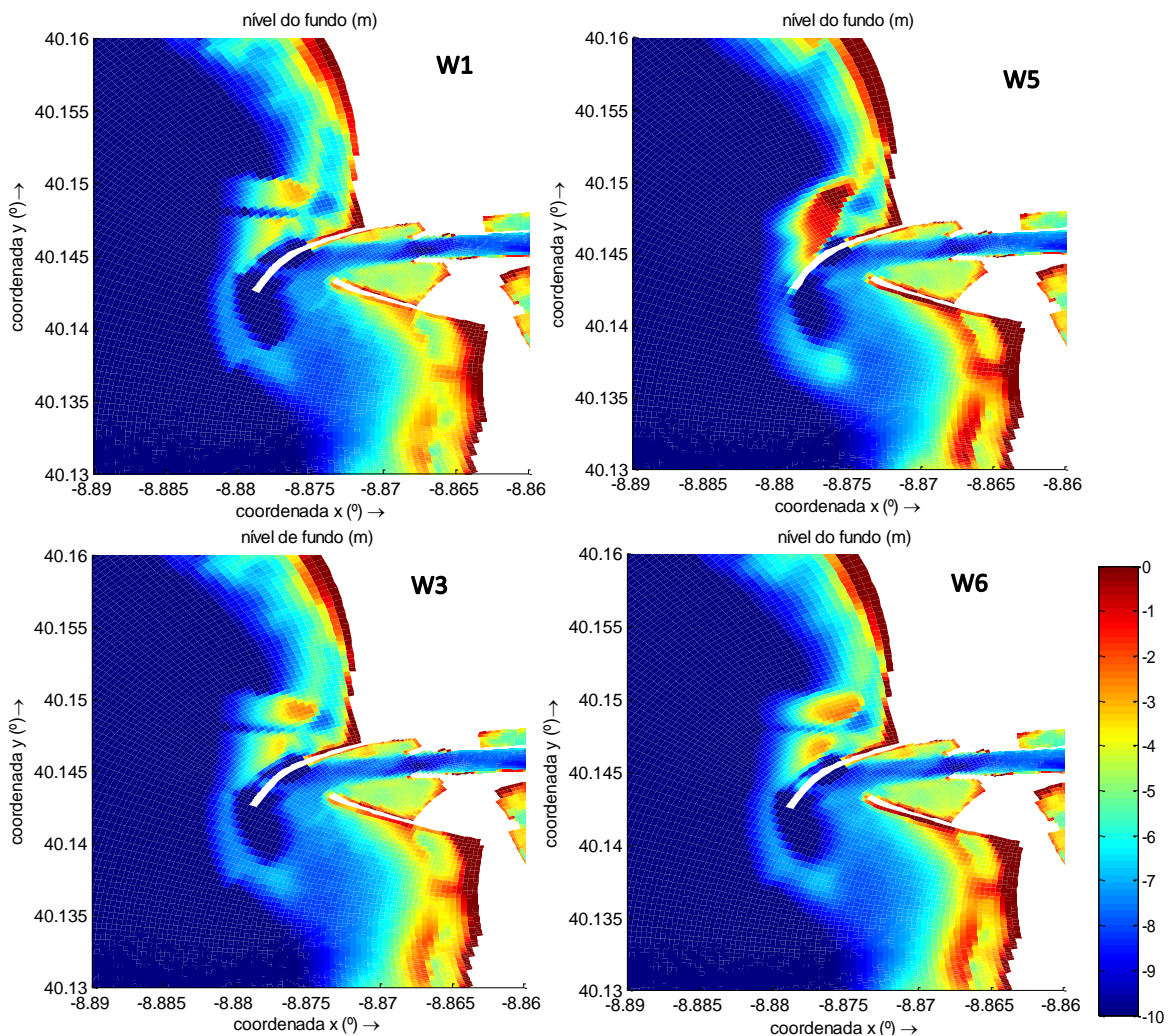


Figura 5.19: Batimetria inicial (a) e simulada para diferentes condições de onda.

# Capítulo 6 - Considerações Finais

## 6.1 - Conclusões

Neste capítulo pretende-se reunir e destacar os tópicos mais importantes observados ao longo desta dissertação. Assim, esta teve como objetivo caracterizar a dinâmica sedimentar no trecho costeiro entre o Cabo Mondego e a praia da Leirosa, bem como descrever a morfodinâmica na embocadura do rio Mondego.

Numa primeira fase procedeu-se à caracterização da área de estudo em termos históricos, considerando a agitação ao largo e local, maré, caudais fluviais e dinâmica sedimentar, permitindo melhorar o conhecimento da zona de estudo.

Posteriormente foi efetuada a análise dos dados hidrodinâmicos e fluxos sedimentares das campanhas que tiveram como intuito estimar as alturas significativa da onda, quantificar correntes e valores de transporte sólido importantes na validação do modelo numérico da área de estudo e compreensão da dinâmica sedimentar associada. Nas campanhas de campo os resultados obtidos podem ser representativos do comportamento local, no entanto estes devem ser avaliados com precaução, uma vez que estão a ser extrapolados resultados de um ponto para toda uma coluna de água e setor.

Na primeira campanha conclui-se que a intensidade da velocidade na componente longitudinal e transversal crescem da praia do Cabedelo para a praia da Leirosa, comprovando o efeito de refração existente entre estas secções devido à orientação da linha de costa. Por outro lado, os fluxos sedimentares longitudinais variam em função da agitação marítima incidente e apresentam variabilidade ao longo de todo o setor costeiro, tendo valores superiores na EST8 relativamente à EST6. Verificou-se ainda que os fluxos sedimentares instantâneos são mais intensos na zona de espraio e na zona final da rebentação, uma vez que a concentração de sedimentos em suspensão é superior nestas zonas.

Na segunda campanha os instrumentos registaram toda a zona de rebentação, tendo sido possível a captar o perfil transversal da corrente de retorno, bem como da deriva litoral. Para além disto, as estimativas da taxa de transporte efetuadas na praia do parque de campismo da Gala variaram entre  $0.13 - 0.41 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$  para as condições de agitação:  $H_s=2\text{m}$ ,  $T_p=7-11\text{s}$  e rumo entre NO-NNO, aproximadamente. Estes resultados são coerentes com os valores simulados na secção 5, para as condições de onda 1 e 2, tendo o transporte variado entre  $0.11 - 0.44 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ , semelhante às condições desta campanha.

De seguida foram analisados os resultados da componente de modelação numérica. De um modo geral, a variação de altura significativa é simulada pelo modelo, verificando-se um decréscimo desta entre o Cabo Mondego e a praia da Figueira da Foz, quando a ondulação é de NO. A análise da altura significativa nas campanhas apresentam alguma disparidades entre os resultados calculados e observados podendo estar associado à topográfica da componente computacional ser distinta da realidade.

A modelação numérica permitiu concluir que a ondulação proveniente do quadrante NO contribui para um transporte contínuo entre o Cabo Mondego e a praia da Figueira da Foz, no entanto, para

regimes de ondulação provenientes do quadrante oeste, verifica-se uma interrupção da deriva no Cabo Mondego, como estudado por Abecassis *et al.* (1962).

O transporte longitudinal que transpõe o molhe norte para sul apresenta oscilações em função da agitação local nas praias de Buarcos e da Figueira da Foz, que é influenciado pelo Cabo Mondego. O fluxo sedimentar através do molhe norte processa-se devido ao transporte por arrastamento e em suspensão, sendo o último de norte para sul e significativo em condições de temporal.

O estudo revela que as ondas com maiores alturas ao largo induzem um transporte superior. No entanto, como a sua frequência de ocorrência é inferior à de ondas de altura inferior, estas têm um transporte efetivo pouco enérgico em termos médios anuais, mas de grande importância para casos pontuais em curtos períodos de tempo.

Para além disto, constatou-se que os sedimentos transportados pela deriva através do Cabo Mondego favorecem o alargamento da praia da Figueira da Foz, dado que o transporte de sedimentos decresce na região da praia da Figueira da Foz. Como é provado pelas batimetrias do modelo, será de esperar que quando o molhe norte sature a sua capacidade de reter sedimentos reduza, induzindo um aumento do volume transportado através deste, amplificando a taxa de acreção na embocadura aquando da ocorrência de eventos de temporal.

Os valores simulados para as secções definidas aproximam-se dos valores encontrados na literatura, nomeadamente no Cabo Mondego ( $2.0 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ ) e nas praias situadas a sul da embocadura ( $0.9 - 1.0 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ ), o que confere fiabilidade aos resultados numéricos. Na secção 3, os resultados são superiores aos esperados uma vez que é considerado uma fonte sedimentar continua, o que não é real, uma vez que nesta região o substrato é rochoso.

Na componente morfodinâmica foram realizadas simulações de forma a comparar a evolução da batimetria na embocadura com as observações num período de variações acentuadas (temporal de 2012). A simulação numérica para esse intervalo reproduziu a acreção de sedimentos na barra submersa, com valores na ordem de grandeza dos observados. Os resultados numéricos mostram que os sedimentos que contribuem para a acreção na zona da barra provem do transporte em suspensão de norte para sul através do molhe norte, associado a regimes de agitação energéticos. Por outro lado a dinâmica dos caudais fluviais habituais não são eficazes no transporte de sedimentos para o litoral, não influenciando a barra submersa.

Conclui-se que a monitorização da morfodinâmica e do transporte sedimentar permite a validação de modelos numéricos para a simulação e previsão de alterações nas zonas costeiras.

## 6.2 – Desenvolvimentos Futuros

A complexidade e dinâmica associada às zonas costeiras levam a que estas tenham associadas muitas incertezas a nível de modelação. Assim, é importante investir na componente de monitorização, de forma a quantificar diferentes fatores, como transporte sedimentar, altura significativa da onda, batimetrias, perfis de praia, entre outros, uma vez que estes irão validar e calibrar os modelos numéricos.

No âmbito da presente tese, o modelo numérico utilizado permitiu simular a morfodinâmica da zona litoral entre o Cabo Mondego e a praia da Leirosa. No entanto, os modelos numéricos poderão ser otimizados através da realização de mais testes de validação. Para além disto, seria interessante o estudo de cenários de dragagens com o modelo verificando a resposta do mesmo, de forma a



antecipar alguns efeitos dos temporais e chegar a um plano de dragagens de prevenção antecipada a estes.

Esta secção da costa portuguesa tem sido bastante estudada ao longo dos anos devido à fisionomia da linha de costa, no entanto é uma região muito ativa e com um porto de grande importância, sendo necessária a monitorização constante.



## Referências

- Abecasis, F., Matias, M. F., Carvalho, J. J., Vera-Cruz, D.,** 1962. Methods of determining sand and silt movement along the coast, in estuaries and in maritime rivers. Lab. Nac. Eng. Civil. Technical paper nº 186, Lisboa, 25 p.
- Andrade, C., Freitas, M. C.,** 2002. Coastal Zones. In: F. D. Santos, K. Forbes e R. Moita (eds.), *Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts and Adaptation Measures*, SIAM Project, Lisboa, Gradiva, pp. 173-219.
- Barata, M.G.O.A., Teles, M. J.B.S., Vieira, J.A.R.,** 1996. Selecção de Ondas Representativas da Agitação Marítima para efeito da avaliação do transporte litoral na costa de Aveiro. *Recursos Hídricos*, Vol 17, no1, pp. 43-74.
- Carrilho, A.** (2013). Morfodinâmica e transporte sedimentar longitudinal na Praia de Mira; Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, 31-33pp.
- Coelho, C.,** 2005. Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira; Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 404 p.
- Cunha, P. P., Pinto, J., Dinis, J.,** 1997. Evolução da fisiografia e ocupação antrópica na área do Rio Mondego e região envolvente (Portugal centro-oeste), desde 1947. *Territorium*, 4, 99-124.
- Cunha, P. P., Dinis, J.,** 1998. Beach erosion between cabo Mondego and Figueira da Foz (Portugal Midwest), from 1995 to 1998. *Territorium*, 5, 31-50.
- Davidson-Arnott, R.,** 2010. *Introduction to coastal processes and geomorphology*. Universidade de Cambridge, Nova Iorque, 78-128.
- Deltares,** 2011a. Delft3D-Flow User Manual Version 3.15. Delft, The Netherlands, 7pp e 323pp.
- Deltares,** 2011b. Delft3D-RGFGRID User Manual Version 4.00. Delft, The Netherlands, 5pp.
- Deltares,** 2011c. Delft3D-QUICKIN User Manual Version 4.00. Delft, The Netherlands, 5pp.
- Deltares,** 2011d. Delft3D-QUICKPLOT User Manual Version 2.15. Delft, The Netherlands, 1pp.
- DHI,** 2000. LITPACK-An Integrated Modelling System for LITtoral Processes And Coastline Kinetics, Short Introduction and Tutorial, DHI Water and Environment.
- Dias, J. A., Ferreira, O., Pereira, A.R.,** 1994. Estudo sintético de diagnóstico da geomorfologia e da dinâmica sedimentar dos troços costeiros entre Espinho e Nazaré. Edição electrónica de 2005: [w3.uaig.pt/~jdias/JAD/ebooks](http://w3.uaig.pt/~jdias/JAD/ebooks).
- Dodet, G., Bertin, X., Taborda, R.,** 2010. Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. *Ocean Modelling*, 31(3-4): 120-131.
- Downing, J.,** 2008. Basics of OBS and Turbidity Sensors, Campbell Scientific, INC.
- Duarte, D.N.R., Blanton, J.O., Boski, T., Dias, J.M.A.,** 2000. Estudo da propagação não linear da maré no estuário do Mondego (Portugal), com base na componente M4. 3º Simpósio sobre a Margem Continental Ibérica Atlântica, Lisboa, 31-32.

**Fondriest**, consultado a 7 de dezembro de 2015: <http://www.fondriest.com/in-situ-level-troll-500-water-level-logger.htm>

**Freire, P., Oliveira, F.S.B.F., Capitão, R., Fortes, C., Costa, M.**, 2004. Cross-shore Evolution of Buarcos Beach, Portugal. J.M. Smith (ed.), Proc. 29th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Vol. 3: 2314-2326.

**JFE Advantech Co., Ltd.**, Consultado a 7 de dezembro de 2015: <http://www.jfe-advantech.co.jp/eng/ocean/infinity/infinity-em.html>

**Kamphuis, J.W.**, 1991. Alongshore sediment transport rate. *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering (ASCE)*, 117(6), pp. 624-641.

**Komar, P.**, 1976. *Beach Process and Sedimentation*, New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc., Englewood. 429p.

**Komar P.**, 1983. *Nearshore currents and sand transport on beaches*, Physical oceanography of coastal and shelf seas- B. Jonhs. pp 67.

**Larangeiro, S.H.C.D., Oliveira, F.S.B.F., Freire, P.M.S.**, 2003. Longshore sediment transport along a sandy coast with hard rock outcrops. *Shore & beach* Vol. 71, No. 2, April 2003, pp. 20-24.

**Larangeiro, S.H.C.D., Oliveira, F.S.B.F.**, 2003. Assessment of the longshore sediment transport at Buarcos beach (West Coast of Portugal) through different formulations. Proceedings of CoastGis'03 (Genoa, Italy).

**Lesser, G.R., Roelvink, J.A., van Kester, J., Stelling, G.S.**, 2004. Development and validation of three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51, 883-915.

**Lesser, G., R.**, (2009). An Approach to Medium-term Coastal Morphological Modelling. Dissertação de Doutoramento, Universidade Tecnológica de Delft. Pp 5-24.

**Marta-Almeida, M., Dubert, J.**, 2006. The structure of tides in the Western Iberian Region. *Continental Shelf Research*, 26, 385-400.

**Oliveira, F. S. B. F., Freire, P. M. S. & Larangeiro, S. H. C. D.**, 2002. Characterisation of the dynamics of Figueira da foz beach, Portugal. *Journal of Coastal Research*, 563 (36), 552-563.

**Okayasu, A., et. al.**, 1986. Velocity field under plunging waves. *Coastal Engineering Proceedings*, Capítulo 50, pp 667.

**Plecha, S., Silva, P., Oliveira, A., Dias, J.**, 2012. Establishing the wave climate influence on the morphodynamics of a coastal lagoon inlet. *Ocean Dynamics*.

**Rosati, J.D., Walton, T.L., Bodge, K.**, 2002. Longshore sediment transport. In: Vincent, L., y Demirbilek, Z. (ed.), *Coastal Engineering Manual, Part III, Chapter III-2, Engineer Manual 1110-2-1100*, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.

**Silva, A.N., Taborda, R., Bertin, X., Dodet, G.**, 2012. Seasonal to Decadal Variability of Longshore Sand Transport at the Northwest Coast of Portugal. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 138(6), 464-472.

**Silva, P., et al.**, 2015. Dinâmica sedimentar na embocadura do porto da Figueira da Foz, Portugal. 8º Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa.

**Stack Exchange**, consultado a 18 de novembro de 2015: <http://physics.stackexchange.com/questions/22377/why-does-change-in-speed-of-a-wave-make-it-refract>.

**Universidade de Aveiro**, 2014. Estudo da dinâmica sedimentar na embocadura da barra do porto da Figueira da Foz. Relatório preliminar.

**Universidade de Aveiro**, 2015. Estudo da dinâmica sedimentar na embocadura da barra do porto da Figueira da Foz. Relatório Final.

**Van Rijn, L.C.**, 1993. Principles of sediment transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publications, Amsterdam.

**YouTube**, consultado a 30 de outubro de 2015: <https://www.youtube.com/watch?v=LhvneAlz6KY>.