



**Daniela Patrícia de  
Pinho Santos**

**MODELAÇÃO DE PROCESSOS HIDRODINÂMICOS  
DAS ONDAS NA ZONA COSTEIRA**





**Daniela Patrícia de  
Pinho Santos**

## **MODELAÇÃO DE PROCESSOS HIDRODINÂMICOS DAS ONDAS NA ZONA COSTEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências do Mar e das Zonas Costeiras, realizada sob a orientação científica do Doutor Paulo Manuel Cruz Alves da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro e sob a co-orientação científica do Doutor Tiago André Martins de Azevedo Abreu, Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto “EROS: Erosão dos litorais rochosos - diferenças na proteção conferida pelas praias arenosas e pelas plataformas litorais” – (PTDC/CTE-GIX/111230/2009), com o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e Tecnologia – FCT.



*There are two things worth aiming for, good music and a clean conscience.*

Paul Hindemith



## **o júri**

presidente

**Professora Doutora Filomena Maria Cardoso Pedrosa Ferreira Martins**  
Professor Associado, Departamento de Ambiente e Ordenamento – Universidade de Aveiro

**Doutor Francisco Eduardo da Ponte Sancho**  
Investigador Auxiliar, Departamento de Hidráulica e Ambiente – Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)

**Professor Doutor Paulo Manuel Cruz Alves da Silva**  
Professor Auxiliar, Departamento de Física – Universidade de Aveiro

**Professor Doutor Tiago André Martins de Azevedo Abreu**  
Professor Adjunto, Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Viseu



## **agradecimentos**

Um grande obrigado a todos os que sempre me acompanharam, apoiaram, me viram crescer e me ajudaram a ser cada dia um pouco mais e melhor durante o meu percurso dentro e fora desta Academia.

Aos meus pais pela compreensão, apoio, paciência e opinião nas situações mais difíceis ao longo desta grande jornada.

Ao Pedro por todas as frases de motivação na reta final.

Aos colegas do laboratório, Leandro Vaz, Catarina Vargas, Nuno Cordeiro, Ana Azevedo pela boa disposição transmitida e à Elisabete Capelo por todo o apoio, motivação, ajuda, troca de ideias e momentos de convívio. À Mariana Rocha, pelos ensinamentos transmitidos durante esta minha passagem pelo laboratório, camaradagem e boa disposição nas campanhas de campo.

Ao Tiago Luna, Daniela Gonçalves e Selma Gabriel pela prontidão e disponibilidade de informações e dados que contribuíram para a realização deste trabalho.

Em último, mas não menos importante aos orientadores pelas oportunidades e experiências a que tive acesso durante esta dissertação, pois sem elas não teria contato com estas pessoas e, por todas as contribuições/sugestões relevantes à conclusão do trabalho. Ao professor Paulo Silva, pela sempre grande disponibilidade e ao professor Tiago Abreu que mesmo distante, sempre demonstrou interesse ao longo do desenvolvimento deste trabalho.



**palavras-chave**

Teoria linear de ondas, simulação, propagação da ondulação, empolamento, rebentação, dissipação.

**resumo**

A propagação das ondas para a costa envolve processos como o empolamento, a rebentação e a dissipação das ondas. O presente trabalho apresenta um modelo numérico unidimensional para o cálculo da altura da onda, tendo em conta estes processos e a existência de múltiplas rebentações. A partir da teoria linear e considerando que existe conservação do fluxo de energia são estabelecidas as equações que descrevem o empolamento. As equações baseadas na conservação do fluxo de energia conduzem a um aumento não realista da amplitude da onda, pelo que é necessário considerar os processos de rebentação e dissipação de energia. O modelo considera diferentes formulações encontradas na literatura para a rebentação e dissipação. Os resultados obtidos com o modelo são comparados com um conjunto de resultados experimentais obtidos num canal de ondas com um perfil transversal do tipo barra-fossa e, igualmente, com dados de campo recolhidos na praia da Galé no Algarve em diferentes condições de morfologia.



**keywords**

Linear wave theory, numerical modeling, wave propagation, shoaling, breaking, dissipation.

**abstract**

Wave propagation along the coast involves processes such as shoaling, breaking and dissipation of the waves. This work presents a one-dimensional numerical modeling to calculate the wave height, considering these processes and the existence of multiple wave breaking. From linear wave theory and considering conservation of the wave energy flux, the equations describing shoaling are established. These equations lead to an unrealistic increase of the wave amplitude. Therefore, the breaking and dissipation processes must be taken into account.

The model considers different formulations for breaking and dissipation. The results obtained with the model are compared with a set of data collected on a wave channel experiment with a bar-trough bottom profile and with field data collected on the beach of Galé in Algarve with different morphologic conditions.



## ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL.....	XV
LISTA DE FIGURAS.....	XVII
LISTA DE TABELAS.....	XXI
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. Descrição do problema e motivação.....	1
1.2. Objetivos.....	1
1.3. Estrutura.....	2
<b>2. PROPAGAÇÃO DA ONDULAÇÃO: PROCESSOS FÍSICOS E MODELAÇÃO.....</b>	<b>3</b>
2.1. Teoria linear.....	4
2.2. Coeficiente de empolamento.....	9
2.3. Rebentação.....	11
2.4. Dissipação.....	14
2.5. Formulação e descrição do modelo.....	14
<b>3. DADOS EXPERIMENTAIS E DE CAMPO.....</b>	<b>17</b>
3.1. Descrição da experiência no canal de ondas.....	17
3.2. Descrição das praias e do trabalho de campo.....	19
3.2.1. Galé.....	21
3.2.2. Olhos de Água.....	24
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>27</b>
4.1. Análise dos resultados das campanhas.....	27
4.1.1. Galé.....	27
4.1.2. Olhos de Água.....	30
4.2. Aplicação do modelo.....	33
4.2.1. Experiência da UPC.....	33
4.2.2. Campanhas de campo.....	42
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>63</b>
<b>6. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>65</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Movimento circular à superfície do oceano.....	3
Figura 2 – Esquema da alteração da forma das ondas na aproximação à costa (Abreu, 2006). .....	4
Figura 3 – Sistema de eixos de coordenadas <i>oxyz</i> . <i>u</i> , <i>v</i> , e <i>w</i> são as componentes do vetor velocidade. ....	5
Figura 4 – Movimento das partículas de água em águas profundas, mostrando um decaimento exponencial da trajetória com a profundidade. ....	7
Figura 5 – Movimento das partículas de água em águas pouco profundas, mostrando o achatamento das órbitas próximo do fundo, nas profundidades inferiores a $\lambda/2$ . ....	8
Figura 6 – Velocidade de fase ( <i>c</i> ) em função da profundidade ( <i>h</i> ) para vários comprimentos de onda, $\lambda$ (Bowden, 1984). ....	9
Figura 7 – Características de um grupo de ondas (adaptado de Dean and Dalrymple, 1991). ....	10
Figura 8 – Esquema representativo do modelo numérico. ....	15
Figura 9 – Perfil de praia e posição dos WG ( <i>Wave Gauges</i> ), ECM ( <i>Electromagnetic Current Meters</i> ) e ADV ( <i>Acoustic Doppler Velocity Meters</i> ) (adaptado de Sancho <i>et al.</i> , 2001). ....	17
Figura 10 – Valor médio quadrático da altura das ondas para as condições A, B, C e D. ....	18
Figura 11 – Localização geral das áreas de estudo (Relatório da campanha, 2012). ....	19
Figura 12 – a) Fixação das estruturas à plataforma rochosa. b) Pormenor da fixação na plataforma rochosa. c) Estrutura enterrada na areia. ....	20
Figura 13 – <i>Electromagnetic Current Meters</i> (ECM) – correntómetro eletromagnético. ....	20
Figura 14 – <i>Pressure Transducer</i> (PT) – transdutor de pressão. ....	20
Figura 15 – Posição dos sensores na plataforma rochosa e na praia na Galé (Relatório da campanha, 2012). ....	21
Figura 16 – Registos da boia ondógrafo de Faro entre as 00h00 (UTC) do dia 8 de Março e as 12h00 (UTC) do dia 9 de Março ao largo. a) Altura significativa, <i>H<sub>s</sub></i> e altura máxima, <i>H<sub>máx.</sub></i> ; b) Período médio da onda, ( <i>T</i> ); c) Direção da onda em graus. ....	23

Figura 17 – Posição dos sensores na plataforma rochosa e na praia nos Olhos de Água (Relatório da campanha, 2012).....	24
Figura 18 – Registos da boia ondógrafo de Faro entre as 00h00 (UTC) do dia 22 de Março e as 12h00 (UTC) do dia 23 de Março. a) Altura significativa, $H_s$ e altura máxima, $H_{máx}$ ; b) Período médio da onda, $(T)$ ; c) Direção da onda em graus.....	26
Figura 19 – Altura significativa da onda, $H_s$ em função do tempo (00h00 do dia 8) para os dois ciclos de maré na praia da Galé. ....	28
Figura 20 – Altura significativa da onda, $H_s$ em função da profundidade, $h$ na Galé. Símbolos circulares – PM1; símbolos triangulares a cheio – PM2.....	29
Figura 21 – Altura significativa da onda, $H_s$ em função do tempo (00h00 do dia 22) para os dois ciclos de maré na praia de Olhos de Água. ....	31
Figura 22 – Altura significativa da onda, $H_s$ em função da profundidade, $h$ nos Olhos de Água. Símbolos circulares – PM1; símbolos triangulares a cheio – PM2.....	32
Figura 23 – Perfil de fundo. Condição C – estimativa do empolamento. Linha azul – equação (14); linha vermelha – equação (18); linha verde – equação (19). Símbolo - $H_{rms}$ .....	34
Figura 24 – Perfil de fundo. Condição D – estimativa do empolamento. Linha azul – equação (14); linha vermelha – equação (18); linha verde – equação (19). Símbolo - $H_{rms}$ .....	34
Figura 25 – Condição C – local de rebentação, intersecção entre a altura da onda $H$ calculada pelo modelo e a altura de rebentação $H_b$ , pelas equação de Svendsen e Hansen.....	36
Figura 26 – Condição A – local de rebentação, intersecção entre a altura da onda $H$ calculada pelo modelo e a altura de rebentação $H_b$ , pela equação de Battjes e Janssen. ....	36
Figura 27 – Condição B – local de rebentação, intersecção entre a altura da onda $H$ calculada pelo modelo e a altura de rebentação $H_b$ , pelas equação de Sancho e Jacob e Weggel. ....	37
Figura 28 – Perfil de fundo com os vários declives local e médios de diferentes comprimentos de onda.....	37
Figura 29 – Localização da rebentação para a equação de Svendsen. ....	38
Figura 30 – Localização da rebentação para a equação de Hansen.....	38
Figura 31 – Localização da rebentação para equação de Weggel. ....	39
Figura 32 – Localização da rebentação para a equação de Sancho e Jacob. ....	39

Figura 33 – Condição C – Fluxo de energia da onda. Dissipação. Linha vermelha – equação (29); linha preta – equação (30). .....	40
Figura 34 – Interpolação dos pontos de perfil de fundo.....	41
Figura 35 – Condição B – representação da altura de rebentação, altura de onda estimada pelo modelo, valores de $H_{rms}$ e o perfil de fundo. ....	41
Figura 36 – Perfil da plataforma com e sem interpolação, referente ao nível médio do mar.....	42
Figura 37 – Perfil da plataforma, entre $x = 0$ m e $x = 160$ m, com e sem interpolação, referente ao nível médio do mar. ....	43
Figura 38 – Perfil da praia, entre $x = 0$ m e $x = 200$ m, com e sem interpolação, referente ao nível médio do mar. ....	43
Figura 39 – Síntese harmónica da maré para as 00h00 do dia 6 de Março de 2012. Zona a sombreado – os dois ciclos de maré abrangidos pela campanha na Galé.....	44
Figura 40 – Gráficos da altura significativa da onda, $H_s$ em função do tempo (00h00 do dia 8) para os dois ciclos de maré na plataforma rochosa da praia da Galé. ....	45
Figura 41 – Gráficos da altura significativa da onda, $H_s$ em função do tempo (00h00 do dia 8) para os dois ciclos de maré na areia da praia da Galé. ....	46
Figura 42 – Elevação da superfície livre ( $\eta$ ) relativamente ao nível médio do mar no primeiro ciclo. Linha azul – medição do PT; linha vermelha – maré astronómica em Faro. ....	48
Figura 43 – Elevação da superfície livre ( $\eta$ ) relativamente ao nível médio do mar no segundo ciclo. Linha azul – medição do PT; linha vermelha – maré astronómica em Faro. ....	49
Figura 44 – Representação da altura significativa da onda, observada pelos sensores e calculada pelo modelo, para os sensores localizados na plataforma rochosa durante o segundo ciclo de maré e dos cinco pontos com um aumento de 15 cm no nível médio (+).....	51
Figura 45 – Representação do local e o número de rebentações para os três níveis de maré dos critérios de rebentação na plataforma rochosa.....	52
Figura 46 – Representação do local e o número de rebentações para os três níveis de maré dos critérios de rebentação na praia. ....	52
Figura 47 – Dissipação e altura da onda na plataforma para $\eta = 1.48$ m.....	55
Figura 48 – Dissipação e altura da onda na praia para $\eta = 1.48$ m. ....	55

Figura 49 – Dissipação e altura da onda na plataforma para $\eta = 0.52$ m.....	56
Figura 50 – Dissipação e altura da onda na praia para $\eta = 0.52$ m.....	56
Figura 51 – Dissipação e altura da onda na plataforma para $\eta = -0.38$ m.....	57
Figura 52 – Dissipação e altura da onda na praia para $\eta = -0.38$ m.....	57
Figura 53 – Dissipação e altura da onda na plataforma para $\eta = 1.48$ m.....	58
Figura 54 – Dissipação e altura da onda na praia para $\eta = 1.48$ m.....	58
Figura 55 – Dissipação e altura da onda na plataforma para $\eta = -0.38$ m.....	59
Figura 56 – Dissipação e altura da onda na praia para $\eta = -0.38$ m.....	59
Figura 57 – Dissipação e altura da onda na plataforma para $\eta = 1.48$ m.....	60
Figura 58 – Dissipação e altura da onda na praia para $\eta = 1.48$ m.....	60
Figura 59 – Dissipação e altura da onda na plataforma para $\eta = 0.52$ m.....	61
Figura 60 – Dissipação e altura da onda na praia para $\eta = 0.52$ m.....	61

**LISTA DE TABELAS**

Tabela I – Características das ondas consideradas para comparação com o modelo numérico.....	18
Tabela II – Previsão de marés para os dias 8 e 9 de Março de 2012 para Faro – Barra de Faro – Olhão (Instituto Hidrográfico).....	22
Tabela III – Localização, distâncias médias ao fundo dos sensores e cotas relativamente ao zero hidrográfico.....	22
Tabela IV – Previsão de marés para os dias 22 e 23 de Março de 2012 para Faro – Barra de Faro – Olhão (Instituto Hidrográfico).....	24
Tabela V – Localização, distâncias médias ao fundo dos sensores e cotas relativamente ao zero hidrográfico.....	25
Tabela VI – Estimativa da razão $(H/h)_{reb}$ para cada PT e para as duas preias-mar (PM1 e PM2) na Galé.....	30
Tabela VII – Estimativa da razão $(H/h)_{reb}$ para cada PT e para a primeira preia-mar (PM1) nos Olhos de Água.....	33
Tabela VIII – Valor da aptidão $S$ para cada condição e equação (Santos <i>et al.</i> , 2012).....	35
Tabela IX – Diferenças em centímetros entre o valor máximo da elevação da superfície livre de cada PT e o valor máximo de maré, $\eta$ calculado pela síntese harmónica para cada preia-mar.....	50
Tabela X – Pontos em diferentes instantes da maré da segunda preia-mar relativa à plataforma.....	50
Tabela XI – Valores de $H_s$ para cada PT e critério de rebentação em diferentes níveis de elevação da maré na plataforma.....	53
Tabela XII – Valores de $H_s$ para cada PT e critério de rebentação em diferentes níveis de elevação da maré na praia.....	53
Tabela XIII – Condições impostas no modelo de altura significativa, período da onda, valor da maré e ângulo de incidência.....	54



## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. Descrição do problema e motivação**

As zonas costeiras correspondem à interface entre o domínio continental e o domínio marinho. São sistemas morfodinâmicos complexos que envolvem trocas de matéria e energia com o continente e com o oceano. A ação mecânica das ondas, das correntes e das marés têm um grande contributo energético para os ambientes costeiros e são importantes fatores na morfodinâmica destes sistemas, pois os seus resultados podem dar origem a erosão e/ou deposição de sedimentos. A zona costeira é um sistema que se encontra em equilíbrio dinâmico, que resulta de inúmeros fatores, naturais e antrópicos. No entanto, os sectores costeiros de arribas encontram-se numa fase de intensa erosão. A sua erosão resulta do desgaste provocado pelo impacto da ação das ondas sobre a costa. O recuo das arribas tem sido correlacionado com a morfologia das estruturas de sopé (plataforma rochosa ou praia arenosa).

A costa algarvia está repleta de arribas e algumas delas sofreram recuo e erosão. Neste contexto é importante perceber qual o papel das plataformas rochosas e das praias arenosas na proteção das arribas no Algarve. Na tentativa de responder a este problema, é importante descrever um modelo numérico onde seja possível estimar o comportamento de uma onda durante a sua propagação e a dissipação a ela associada nas duas morfologias diferentes, plataforma e praia.

### **1.2. Objetivos**

Um dos objetivos mais importantes neste trabalho foi o desenvolvimento de um modelo numérico de propagação de ondas para o estudo da evolução da morfologia da praia. A realização deste objetivo envolveu o estudo de diferentes aproximações encontradas na literatura para encontrar aquelas que melhor descrevem alguns dos processos hidrodinâmicos envolvidos (empolamento, rebentação e dissipação das ondas). O modelo desenvolvido foi aplicado a um conjunto de resultados experimentais de um canal de ondas da Universidade Politécnica da Catalunha (UPC) com um perfil transversal de praia do tipo barra-fossa e a dados de campo recolhidos na praia da Galé no Algarve.

### **1.3. Estrutura**

O presente trabalho encontra-se estruturado em 5 capítulos, constituindo a presente Introdução o capítulo 1.

No capítulo 2 – Propagação da ondulação: processos físicos e modelação – faz-se uma breve caracterização das ondas, nomeadamente sobre a sua formação e propagação das ondas no oceano. Este capítulo abrange uma introdução sobre a teoria linear, onde são expressas as equações que estão na sua origem e as aproximações associadas à diminuição da profundidade. Faz-se uma breve descrição dos processos físicos envolvidos aquando da propagação de ondas e apresentam-se equações desenvolvidas por vários autores caracterizando esses processos e que são posteriormente utilizadas no modelo numérico. Por fim, é apresentada uma descrição pormenorizada do modelo numérico.

No capítulo 3 – Dados experimentais e de campo – descreve-se muito resumidamente a experiência da UPC, da qual é utilizada dados para validar o modelo numérico desenvolvido. É feita ainda a descrição das duas campanhas de campo efetuadas no Algarve, nas praias da Galé nos dias 8 e 9 de Março de 2012 e Olhos de Água nos dias 22 e 23 de Março de 2012, assim como uma pequena caracterização da ondulação registada na boia ondógrafo de Faro nos respetivos dias referentes à altura máxima, altura significativa, período e direção.

No capítulo 4 – Resultados – na primeira secção, são apresentados e analisados os resultados das campanhas de campo. Na segunda secção é apresentado a aplicação do modelo aos dados da experiência da UPC e à campanha de campo da praia da Galé para diferentes morfologias, na plataforma rochosa e na praia.

Por fim, no capítulo 5 – Conclusões – são apresentadas as principais conclusões deste trabalho.

## 2. PROPAGAÇÃO DA ONDULAÇÃO: PROCESSOS FÍSICOS E MODELAÇÃO

Uma onda pode ser facilmente descrita como uma oscilação harmónica sinusoidal, caracterizada por vários parâmetros: comprimento de onda, período, frequência angular, velocidade de fase, altura e declividade. Uma onda transfere uma perturbação de um dado local do meio para um outro. A perturbação que é propagada possui algumas características: o transporte de massa do material que constitui o meio é nulo ou pequeno; não existe distorção significativa da sua forma fazendo com que a perturbação seja pouco dissipada; por fim, a perturbação propaga-se com uma velocidade de fase da onda que vai-se alterando consoante a profundidade do fundo. Durante o processo de propagação de uma onda, há dois aspetos que se devem ter em conta, nomeadamente o facto de a onda se propagar no espaço com uma velocidade de fase que depende das características do meio e das partículas de água adquirirem uma velocidade orbital. Neste capítulo, far-se-á uma descrição sumária sobre estes dois aspetos relevantes.

No oceano as ondas de superfície são geradas pelo vento através das forças de pressão e atrito que perturbam o equilíbrio da superfície do oceano. Estas ondas dependem da intensidade do vento, do intervalo de tempo que o vento se mantém e da extensão da superfície livre sobre a qual o vento sopra sem obstruções – *fetch* (Silva, 2008). Parte da energia do vento é transferida para a superfície do oceano através do atrito entre o vento e a água, gerando um movimento circular nas partículas à superfície do oceano, pois estas movem-se na vertical para cima e para baixo mas também na horizontal. – Figura 1.

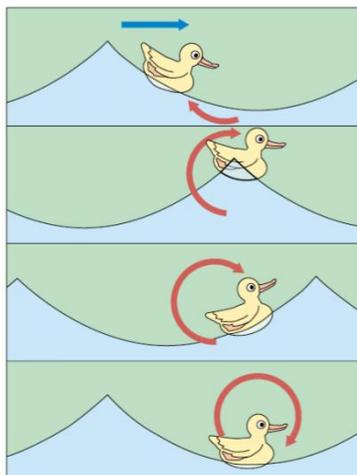


Figura 1 – Movimento circular à superfície do oceano.

As ondas, geradas principalmente pelo vento, propagam-se para o litoral através da plataforma continental. À medida que uma onda se propaga para a costa a profundidade vai diminuindo, havendo modificação na forma da onda à superfície, na velocidade orbital e na aceleração orbital e a dinâmica das ondas vai-se tornando progressivamente não linear e dissipativa. Durante a propagação das ondas, o perfil destas altera-se relativamente aos dois eixos, horizontal e vertical, pois a superfície livre vai-se tornando pontiaguda sobre a crista da onda, mais larga na cava e relativamente íngreme na face onde rebenta – ver Figura 2. A modificação da forma das ondas, que deriva da alteração das componentes harmónicas relativamente às que continha inicialmente, conduz à rebentação das ondas (Abreu, 2006).

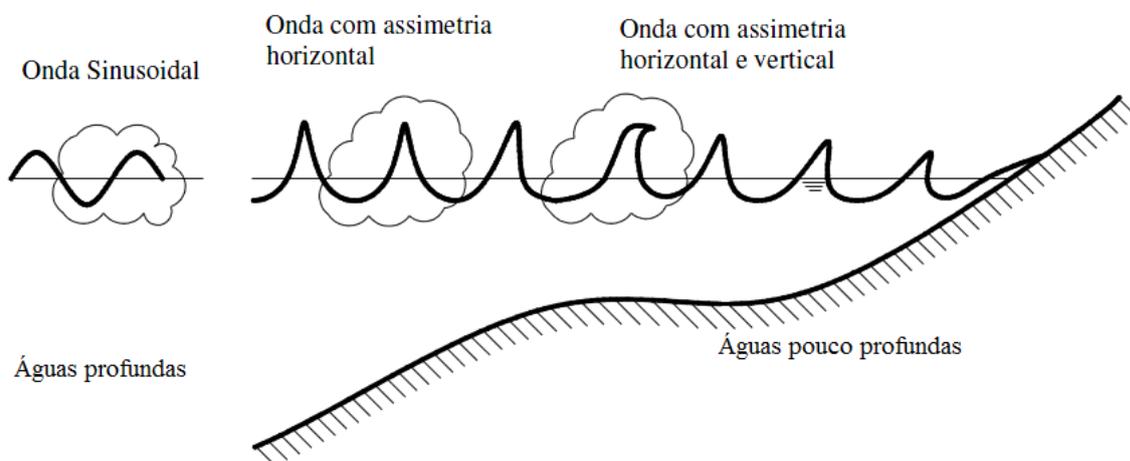


Figura 2 – Esquema da alteração da forma das ondas na aproximação à costa (Abreu, 2006).

Entre outros, a propagação das ondas para e junto à costa envolve processos como o empolamento, a rebentação e a dissipação das ondas. Estes processos são descritos através de equações propostas por vários autores e que podem ter a sua origem na teoria linear de ondas. Para melhor entendimento da descrição dos processos e as suas equações, seguir-se-á uma breve abordagem sobre a teoria linear.

### 2.1. Teoria linear

O movimento das partículas da água durante a propagação de uma onda à superfície nas direções vertical e horizontal têm escalas semelhantes. Contudo, as acelerações verticais das partículas de água são significativas e têm a mesma ordem de grandeza que a aceleração da gravidade,  $g$  (Silva, 2008).

Considerando um sistema de eixos de coordenadas  $oxyz$  – Figura 3 – as equações do movimento segundo este sistema de eixos são:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F_x \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F_y \quad (2)$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + F_z \quad (3)$$

onde,

$F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  – forças de atrito referentes à viscosidade molecular.

A equação da continuidade para um fluido incompressível expressa-se por:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

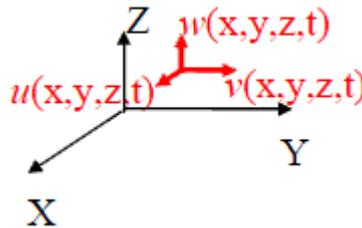


Figura 3 – Sistema de eixos de coordenadas  $oxyz$ .  
 $u$ ,  $v$ , e  $w$  são as componentes do vetor velocidade.

A formulação do modelo da teoria linear tem como hipóteses algumas considerações para as equações apresentadas anteriormente:

- $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  consideram-se nulas;
- As ondas de superfície propagam-se na direção  $ox$  e possuem frentes de onda planas, sendo que  $\partial/\partial y = 0$  e  $v = 0$ ;
- As ondas possuem uma amplitude infinitesimal,  $H/\lambda \ll 1$ .

Tendo em conta estas considerações, podem-se desprezar os termos não lineares de ordem superior das equações do movimento. As equações do movimento e da continuidade são reescritas:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5)$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (7)$$

A teoria linear pretende encontrar uma solução analítica para estas equações, tendo em conta que a perturbação na superfície livre tem a forma de uma oscilação harmónica simples de amplitude infinitesimal e se considerem condições de fronteira apropriadas, nomeadamente, em  $z = -h$  e  $z = 0$ .

Da solução analítica das equações anteriores, escrevem-se a relação de dispersão ( $\sigma$ ) – Equação (8) –, a velocidade de fase da onda ( $c$ ) – Equação (9) – e as equações de  $u(x, z, t)$ ,  $w(x, z, t)$  e  $p(x, z, t)$ . Se as ondas forem dispersivas, a velocidade de fase aumenta com o comprimento de onda,  $\lambda$ . Se forem não dispersivas, a velocidade de fase diminui com a profundidade. A relação de dispersão e a velocidade de fase da onda expressam-se por:

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kh)} \quad (8)$$

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)} \quad (9)$$

onde,

$g$  – aceleração da gravidade

$k$  – número de onda e  $k = 2\pi/\lambda$

$h$  – profundidade.

A teoria linear apresenta soluções para as equações (8) e (9) para as aproximações em águas profundas,  $kh \gg 1$ , onde a profundidade é muito maior relativamente ao comprimento de ondas das ondas que se estão a propagar e em águas pouco profundas,  $kh \ll 1$ , onde o comprimento de onda é muito superior comparativamente à profundidade.

Na propagação de uma onda na superfície livre do oceano, as partículas de água movem-se quer à superfície quer no interior da coluna de água e a trajetória das partículas depende da razão entre a profundidade local e o comprimento de onda.

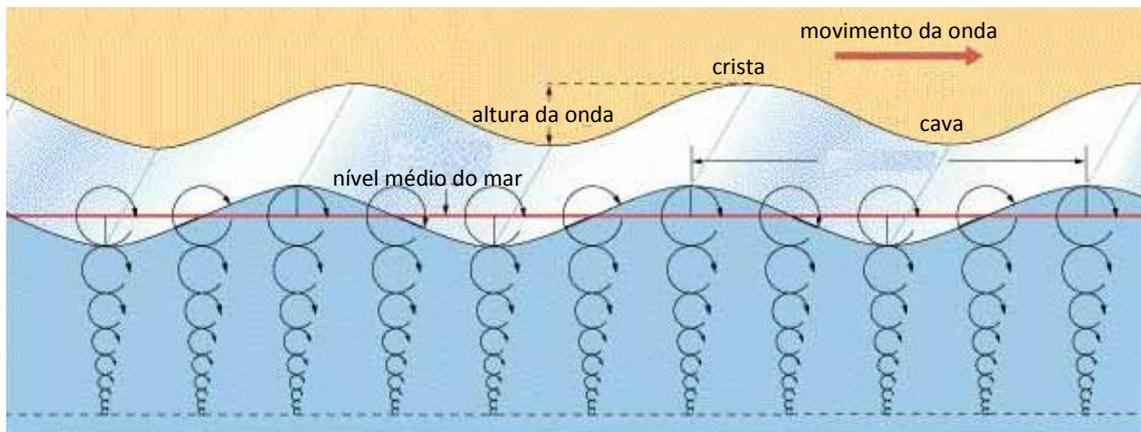
Na aproximação de águas profundas, a relação de dispersão e a velocidade de fase são:

$$\sigma = \sqrt{gk} \quad (10)$$

$$c = \sqrt{\frac{g}{k}} \quad (11)$$

Desta forma, é possível concluir que em águas profundas a velocidade de fase depende do comprimento de onda e que as ondas de maior comprimento de onda propagam-se a uma maior velocidade de fase comparativamente às ondas de menor comprimento de onda. As ondas são dispersivas e a elevação da superfície livre é idêntica a uma onda sinusoidal com frequência angular,  $\sigma$ .

Na denominação da aproximação de águas profundas, quando  $h > 1/2 \lambda$ , as partículas de água movem-se verticalmente, para cima e para baixo, e horizontalmente registrando um movimento composto por uma órbita circular no plano vertical. Verifica-se um decaimento exponencial do diâmetro da trajetória orbital com a profundidade, isto é, as órbitas têm um raio maior perto da superfície e vão diminuindo o seu raio até que chegam a uma determinada profundidade, cerca de  $1/2 \lambda$ , e deixam de existir – Figura 4.



**Figura 4 – Movimento das partículas de água em águas profundas, mostrando um decaimento exponencial da trajetória com a profundidade.**

À medida que a onda se aproxima da costa o movimento das partículas é condicionado pela presença do fundo para valores de  $h < 1/2 \lambda$  – aproximação de águas pouco profundas. Aí, as partículas de água descrevem uma elipse na sua trajetória, em que a dimensão do semi-eixo vertical decresce linearmente com  $z$ , e a do semi-eixo horizontal não depende de  $z$  – Figura 5.

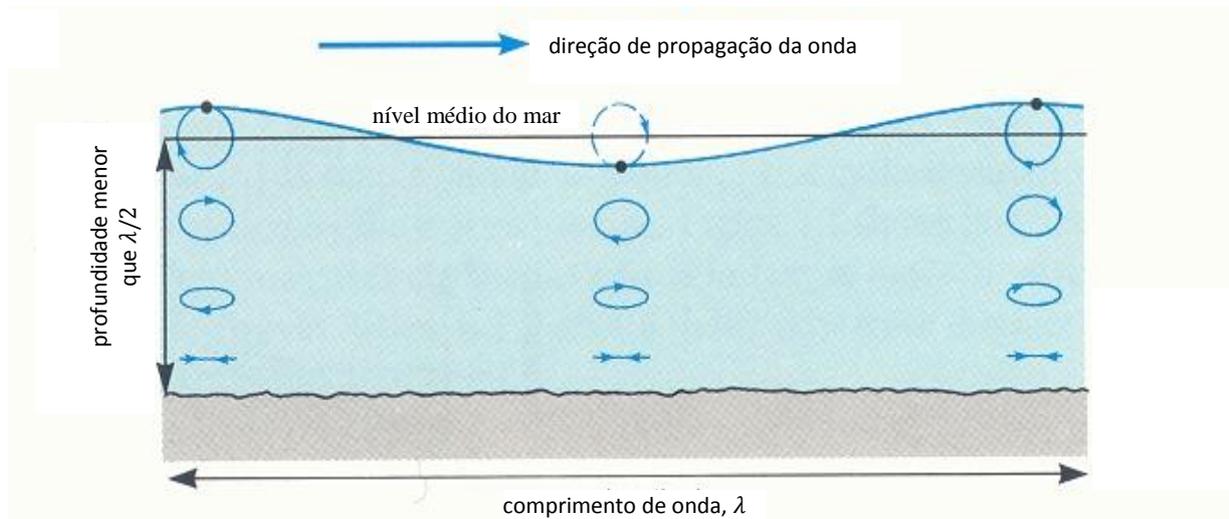


Figura 5 – Movimento das partículas de água em águas pouco profundas, mostrando o achatamento das órbitas próximo do fundo, nas profundidades inferiores a  $\lambda/2$ .

Na aproximação de águas pouco profundas as ondas são não dispersivas, pois os diferentes comprimentos de onda propagam-se com a mesma velocidade de fase que depende da profundidade:

$$\sigma = k\sqrt{gh} \quad (12)$$

$$c = \sqrt{gh} \quad (13)$$

A Figura 6 ilustra a velocidade de fase como função da profundidade, evidenciando os resultados obtidos pelas expressões anteriores.

É importante referir ainda que a distinção entre as ondas em águas profundas e em águas pouco profundas não depende, somente, da profundidade da coluna de água, sendo no entanto determinada pela razão entre a profundidade e o comprimento de onda.

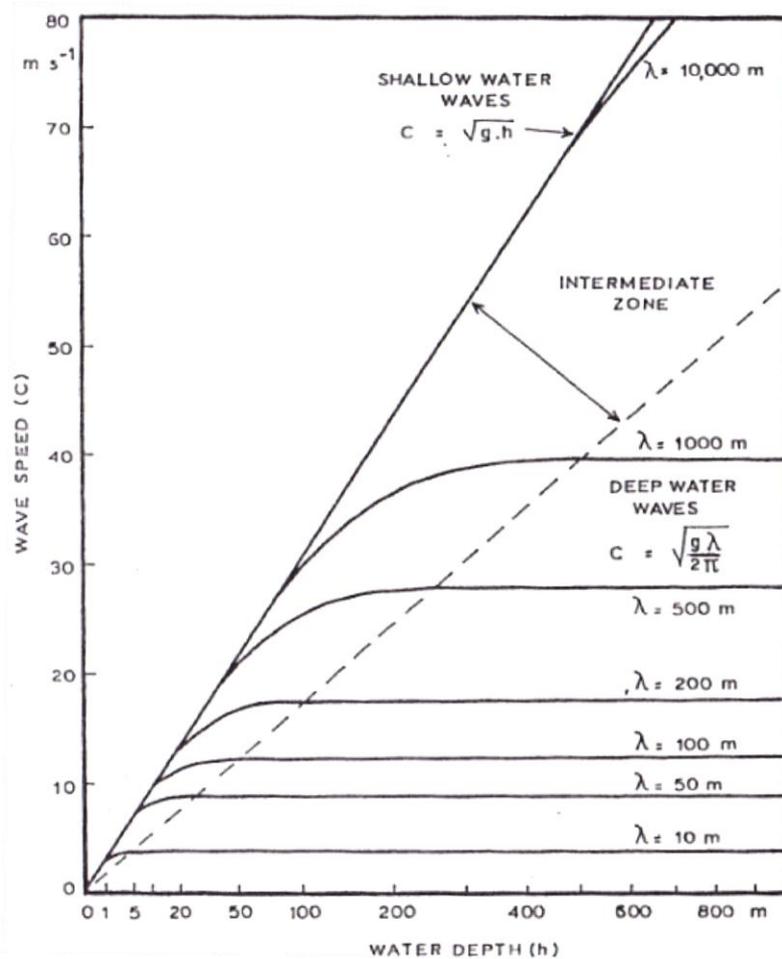


Figura 6 – Velocidade de fase ( $c$ ) em função da profundidade ( $h$ ) para vários comprimentos de onda,  $\lambda$  (Bowden, 1984).

## 2.2. Coeficiente de empolamento

O empolamento é um processo em que existe alteração na altura da onda devido a uma redução de profundidade na aproximação da onda à costa durante a sua propagação.

Assumindo que a propagação da onda tem direção constante, é perpendicular à costa e que não existe dissipação de energia nem reflexão da onda, o fluxo de energia entre duas ortogonais é constante pelo que existe conservação do fluxo de energia das ondas.

Existem expressões analíticas simples que, com base na conservação do fluxo de energia e assumindo contornos batimétricos paralelos entre si e à costa, permitem estimar a altura da onda num dado ponto junto à costa a partir do conhecimento das características da onda ao largo, isto é em águas profundas, sendo esta obtida a partir da teoria linear:

$$\frac{H}{H_0} = K_s = \sqrt{\frac{c_{g0}}{c_g}} \quad (14)$$

onde,

$K_s$  – coeficiente de empolamento

$H$  – altura da onda

$c_g$  – velocidade de grupo.

O índice 0 denota que os valores de  $H$  e de  $c_g$  são representativos de condições ao largo, isto é, em águas profundas.

A velocidade de grupo é a velocidade na qual a energia das ondas está a ser transferida por um *trem* de ondas em propagação. Se se considerarem dois *trens* de ondas com a mesma altura e com a mesma direção de propagação, mas com diferentes frequências e números de onda, a onda resultante será a soma dos dois *trens* de ondas e terá uma velocidade  $c$ . Esta é modelada por um “pacote” de ondas que se propaga com uma velocidade  $\Delta\sigma/\Delta k$ , denominada de velocidade de grupo  $c_g$  – Equação (15). A Figura 7 mostra o resultado da sobreposição das duas ondas e as características de um grupo de ondas.

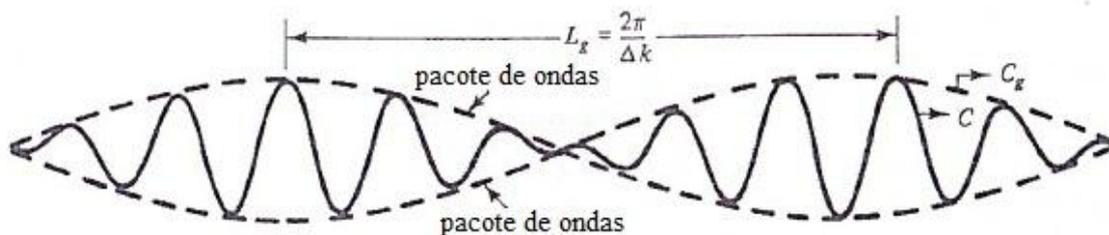


Figura 7 – Características de um grupo de ondas (adaptado de Dean and Dalrymple, 1991).

$$c_g = \frac{1}{2} c \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (15)$$

A energia das ondas é proporcional à sua altura e, a onda passando por um nodo, onde a sua altura é zero, esta não propaga energia. Portanto, a energia da onda tem de viajar com a velocidade de grupo das ondas (Dean and Dalrymple, 1991).

Para águas profundas, a velocidade de grupo é metade da velocidade de fase, isto é, a energia das ondas propaga-se com metade da velocidade das ondas que constituem os *trens* de ondas. O “pacote” de ondas move-se assim não com a velocidade de fase mas com a velocidade de grupo – Equação (16).

$$c_g = \frac{1}{2}c \quad (16)$$

Em águas pouco profundas, a velocidade de grupo é igual à velocidade de fase, portanto a energia das ondas propaga-se à mesma velocidade das ondas – Equação (17).

$$c_g = c \quad (17)$$

Desta forma, a equação (14) evidencia que a variação da velocidade de propagação  $c_g$  leva à transformação das ondas, causando uma variação da altura da onda à medida que a profundidade diminui. Recentemente, Nielsen (2009) propôs uma equação que representa uma boa aproximação ao coeficiente de empolamento determinado pela teoria linear das ondas:

$$\frac{H}{H_0} = K_s = \frac{1}{\sqrt[4]{4k_0h}} \left( 1 + \frac{1}{4}k_0h + \frac{13}{228}(k_0h)^2 \right) \quad (18)$$

A equação (18) apresenta um erro de 1% em relação à equação onde é descrita o coeficiente de empolamento, pela teoria linear – equação (14) – desde que se verifique a condição  $k_0h < 1.34$ .

Numa outra equação proposta por Nielsen (2009) é adicionado um fator de correção empírico que tem em consideração os efeitos resultantes da altura da onda finita:

$$\frac{H}{H_0} = K_s = \frac{1}{\sqrt[4]{4k_0h}} \left( 1 + \frac{1}{4}k_0h + \frac{13}{228}(k_0h)^2 \right) \left( 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{H_0}{\lambda_0} \right)^{1.5} (k_0h)^{-3} \right) \quad (19)$$

onde,

$\lambda_0$  – comprimento de onda.

Uma vez mais, o índice 0 nas equações (18) e (19) faz referência às condições ao largo, ou seja, em águas profundas.

### 2.3. Rebentação

O processo de rebentação ocorre quando a profundidade começa a diminuir e a declividade da onda a aumentar, pois as ondas tornam-se instáveis e rebentam dissipando energia. A rebentação causa também uma diminuição da altura da onda. O início do processo e o tipo de

rebentação da onda são geralmente determinados em função da profundidade local e do declive de fundo.

Existem alguns critérios para a determinação do local da rebentação, refletindo, por exemplo, como a velocidade das partículas excede a velocidade de propagação da onda e a superfície livre na zona frontal da crista assume uma posição vertical. Os critérios de rebentação podem ser traduzidos por expressões e uma das mais simples e conhecidas é

$$H_b = 0.78h \quad (20)$$

em que,

$H_b$  – altura de rebentação.

Visando um refinamento no cálculo da altura de rebentação  $H_b$ , Battjes e Janssen (1978) apresentaram uma expressão que define a altura de rebentação através de

$$H_b = \frac{0.88}{k} \tanh\left(\frac{\gamma}{0.88} kh\right) \quad (21)$$

onde,

$\gamma$  – parâmetro de calibração da altura de rebentação

$k$  – número de onda

$h$  – profundidade.

Segundo Ruessink *et al.* (2003), o parâmetro de calibração segue a seguinte expressão:

$$\gamma = 0.76kh + 0.29 \quad (22)$$

Tendo em conta as aproximações para águas profundas e águas pouco profundas, a equação (21) pode-se reduzir a  $H_b = 0.88/k$  e a  $H_b = \gamma h$ , respetivamente.

Mas existem outros critérios para a determinação da altura de rebentação que se expressam em função do declive de fundo isto é, dependem do declive. Como é o caso das equações propostas por Weggel (1972) – Equação (23) – ou por Sancho e Jacob (1992) – Equação (24). Weggel (1972) reinterpreto dados de laboratório, mostrando uma dependência da altura de rebentação e o declive de fundo.

$$\frac{H_b}{h} = \frac{1}{0.64(1 + e^{-19.5m})} + 4.46(1 - e^{-19m}) \frac{H_b}{T^2} \quad (23)$$

$$\frac{H_b}{h} = \left( \frac{0.0059}{m} + 1.1153 \right) + \left[ 1.5972 \ln \left( \frac{1}{m} \right) - 8.752 \right] \frac{H_0}{\lambda_0} \quad (24)$$

onde,

$T$  – período da onda

$m$  – declive de fundo.

O início de rebentação da onda deveria ser definido como o ponto onde a energia começa a dissipar. No entanto, este ponto é difícil de identificar experimentalmente. Para tal, pode-se considerar tanto o ponto de altura máxima da onda ou o ponto do índice de rebentação máximo –  $(H/h)_{max}$  – que define o início da rebentação – (Svendsen, 2006).

Com base numa série de dados de certos autores, Svendsen (1987) e Hansen (1990) propuseram as equações (25) e (26), respetivamente, de modo a definirem o valor de  $(H/h)_B$ :

$$\left( \frac{H}{h} \right)_B = 1.90 \left( \frac{S}{1+2S} \right)^{1/2} \quad (25)$$

$$\left( \frac{H}{h} \right)_B = S^{0.25} \quad (26)$$

onde,

$(H/h)_B$  – índice de rebentação

$S$  – parâmetro relacionado com o declive de fundo.

A equação de Hansen (1990) – Equação (26) – é válida para  $0.25 < S \leq 1$ .

O parâmetro relacionado com o declive de fundo depende da altura da onda em águas profundas  $H_0$ , como se pode verificar pela expressão:

$$S = m \left( \frac{L}{h} \right)_B \quad (27)$$

(Svendsen and Hansen, 1976), em que,

$$\left( \frac{L}{h} \right)_B = 2.30 \left( \frac{H_0}{\lambda_0} \right)^{-1/2} \quad (28)$$

Para finalizar, se o fluxo de energia for constante, do ponto de vista energético, a diminuição da velocidade de grupo origina um aumento da altura de onda. Assim, do ponto de vista físico,

pode-se dizer que a energia que é distribuída, sobre uma profundidade grande ao largo, passa a ser distribuída sobre uma profundidade pequena, isto é, junto à costa, durante a rebentação.

## 2.4. Dissipação

As equações com base na conservação do fluxo de energia conduzem a um aumento não realista da amplitude da onda pelo que se deve considerar o processo de dissipação.

A dissipação da onda após a rebentação,  $D$ , pode ser quantificada por duas expressões diferentes.

Na primeira, os valores de  $D$  foram estimados a partir da resolução numérica da seguinte equação que traduz que a variação do fluxo de energia é determinada pela dissipação da onda:

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2 c_g \cos \bar{\theta} \right) = -D \quad (29)$$

onde,

$x$  – posição ao longo do perfil de fundo

$\rho$  – massa volúmica da água

$g$  – aceleração da gravidade

$H_{rms}$  – altura da onda

$\bar{\theta}$  – ângulo de incidência médio da onda.

A segunda expressão Baldock *et al.* (1998) calcula a dissipação utilizando a altura de rebentação,  $H_b$  e a altura da onda ( $H_{rms}$ ):

$$D = \frac{\alpha}{4} \frac{1}{T} \rho g e^{\left[ -\left( \frac{H_b}{H_{rms}} \right)^2 \right]} \left( H_b^2 + H_{rms}^2 \right) \quad (30)$$

onde

$\alpha$  – constante de proporcionalidade que é da ordem de 1.

## 2.5. Formulação e descrição do modelo

O modelo engloba as equações que descrevem os três processos já mencionados anteriormente: empolamento, rebentação e dissipação da energia da onda. Numa primeira fase,

os processos foram calculados e comparados individualmente, com o intuito de saber qual a equação que melhor definia o processo de acordo com os dados experimentais existentes.

Neste modelo numérico, para calcular o empolamento é necessário introduzir as condições ao largo: altura da onda ( $H_0$ ) e período ( $T$ ). O cálculo do empolamento pode ser feito através da equação da teoria linear – Equação (14) – e das equações propostas em Nielsen (2009) – Equações (18) e (19) – mediante uma condição imposta, isto é, quando a condição  $k_0 h \geq 1.34$  é verificada, o empolamento é calculado pela equação (14) da teoria linear e, quando se verifica a condição  $k_0 h < 1.34$ , o cálculo é realizado pela equação (19). O processo de rebentação é calculado através da altura de rebentação  $H_b$ , pelas equações apresentadas na secção 2.3 e que podem ser escolhidas no início do modelo. Através da intersecção entre a altura de rebentação com a altura da onda calculada pelo empolamento é possível determinar o local de rebentação da onda. É de referir que nem todas as equações utilizadas permitem a obtenção de um local de rebentação, pelo que se excluíram algumas equações, nomeadamente a (23) e (24).

A rebentação começa quando a altura de rebentação é menor que a altura da onda,  $H_b < H$ , e tem em conta o processo de dissipação da onda. Quando se verifica  $H_b > H$ , a onda deixa de rebentar e volta a empolar, sendo o último valor da altura de onda  $H$ , calculado pela dissipação, o novo valor de  $H_0$ . Depois de empolar, a onda volta a rebentar e a dissipar energia, fazendo novamente este ciclo até que a onda chegue à costa, como se mostra na Figura 8. Neste caso, o modelo numérico contempla múltiplas rebentações. Para as equações de rebentação que dependem do declive de fundo, equações (25) e (26), é possível definir no modelo o declive de fundo a utilizar para cada uma delas, um declive local ou um declive médio que depende do comprimento de onda.

O modelo desenvolvido define a propagação das ondas junto à costa e é uma conjugação dos três processos e das suas respetivas equações.

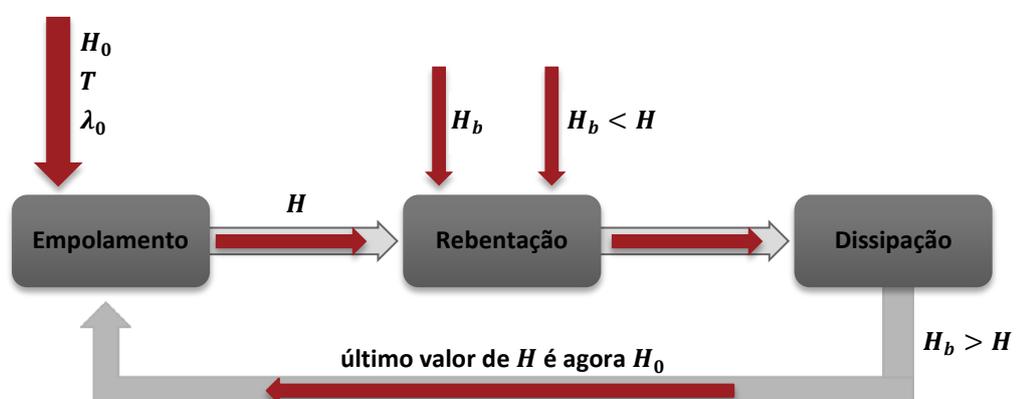


Figura 8 – Esquema representativo do modelo numérico.



### 3. DADOS EXPERIMENTAIS E DE CAMPO

#### 3.1. Descrição da experiência no canal de ondas

A série de dados experimentais utilizados neste trabalho para comparação com os resultados do modelo numérico proposto foi obtida a partir de um ensaio físico realizado por Sancho *et al.* (2001), cujo objetivo era a medição das características da turbulência gerada pela rebentação de ondas em praias com perfil transversal do tipo barra-fossa. Esta série foi obtida no canal de ondas da Universidade Politécnica da Catalunha (UPC) com um perfil de praia com barra construído sobre um fundo rígido – Figura 9.

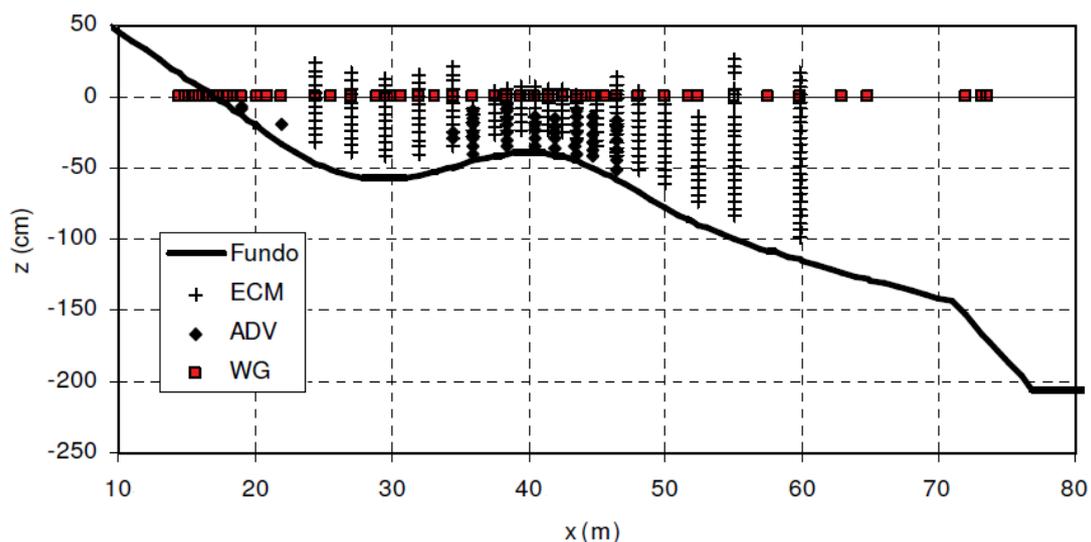


Figura 9 – Perfil de praia e posição dos WG (*Wave Gauges*), ECM (*Electromagnetic Current Meters*) e ADV (*Acoustic Doppler Velocity Meters*) (adaptado de Sancho *et al.*, 2001).

Entre outros, os dados experimentais contemplaram medições da elevação da superfície livre através de sondas de resistividade – WG, *Wave Gauges* – e da velocidade do escoamento através de velocímetros eletromagnéticos – ECM, *Electromagnetic Current Meters* – e acústicos – ADV, *Acoustic Doppler Velocity Meters*.

O conjunto de dados experimental contempla ondas regulares (condições A, B e C) e irregulares (condição D) geradas por um batedor de ondas. As características escolhidas para as ondas fizeram com que estas rebentassem antes da barra e se reformassem na zona da fossa. O

local e o tipo de rebentação das ondas foram estimados através da análise do vídeo gravado durante os ensaios físicos.

A Tabela I resume as características ao largo que foram utilizadas para comparação dos dados experimentais com os dados do modelo numérico. É de referir que o valor médio quadrático da altura das ondas,  $H_{rms}$ , foi medido junto ao bater do canal de ondas e que  $H_{rms,0}$  é a altura equivalente mas em águas profundas, tendo sido determinada a partir da teoria linear.

Tabela I – Características das ondas consideradas para comparação com o modelo numérico.

Condição	Período, $T$ (s)	Altura da onda, $H_{rms}$ (m)	Altura da onda em águas profundas, $H_{rms,0}$ (m)	Localização da rebentação (m)
A	2.48	0.218	0.235	40.5
B	3.48	0.224	0.236	42.0
C	3.48	0.411	0.432	46.5
D	2.17	0.208	0.223	45.0

A Figura 10 apresenta a variação espacial do valor médio quadrático da altura das ondas obtido no canal de ondas para cada condição. O gráfico permite identificar rebentação da onda antes da barra ( $x = 40$  m, ver Figura 9) e evidencia múltiplas rebentações, existindo após a primeira rebentação uma reformação da onda e empolamento da mesma.

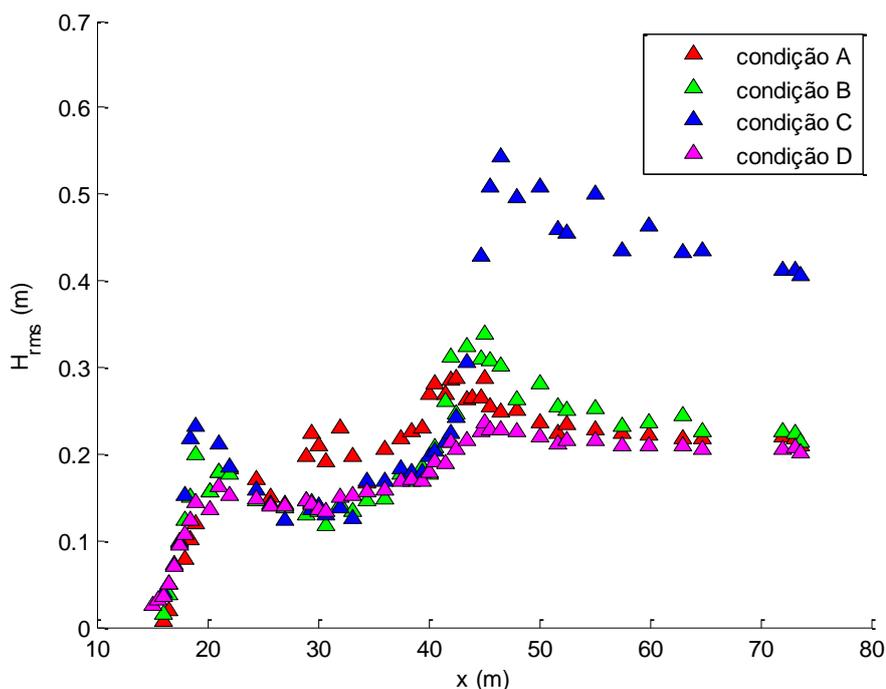


Figura 10 – Valor médio quadrático da altura das ondas para as condições A, B, C e D.

### 3.2. Descrição das praias e do trabalho de campo

A zona costeira do Algarve entre as praias da Galé e Olhos de Água apresenta uma complexa morfologia cársica provocando um forte controlo morfológico dos processos hidrodinâmicos. As praias são encastradas delimitadas por promontórios e pela plataforma rochosa, permitindo quantificar e comparar o comportamento das ondas e correntes tanto nas plataformas rochosas como nas praias adjacentes com as mesmas condições ao largo e durante o mesmo período de tempo, mas com diferente obliquidade quando se aproximam da costa (Moura *et al.*, 2012).

O clima de agitação na costa algarvia é composto por dois regimes, um de sudoeste-oeste representando 71% das ondas do ano e outro de sudeste representando 23%. A altura das ondas está compreendida entre os 0.3 m e os 1.8 m, havendo alturas de ondas menos frequentes superiores a 3.7 m. Estas ondas mais altas estão normalmente associadas a tempestades oriundas de sudoeste. O regime de marés na costa algarvia é semi-diurno mesotidal variando a maré morta entre 2.7 m a 1.36 m e a maré viva entre 3.82 m a 0.64 m (Costa *et al.*, 2001).

O trabalho de campo foi realizado no âmbito do projeto EROS (*Erosion of Rocky Shores-differences in protection promoted by sandy beaches and shore platforms*) com a concretização de duas campanhas. A primeira decorreu nos dias 8 e 9 de Março na praia da Galé e a segunda nos dias 22 e 23 de Março na praia de Olhos de Água, no ano de 2012 na costa Algarvia, Albufeira – Figura 11. O objetivo principal das campanhas foi o da obtenção de dados da elevação da superfície livre e de correntes para quantificar a dissipação de energia das ondas na praia e na plataforma rochosa.

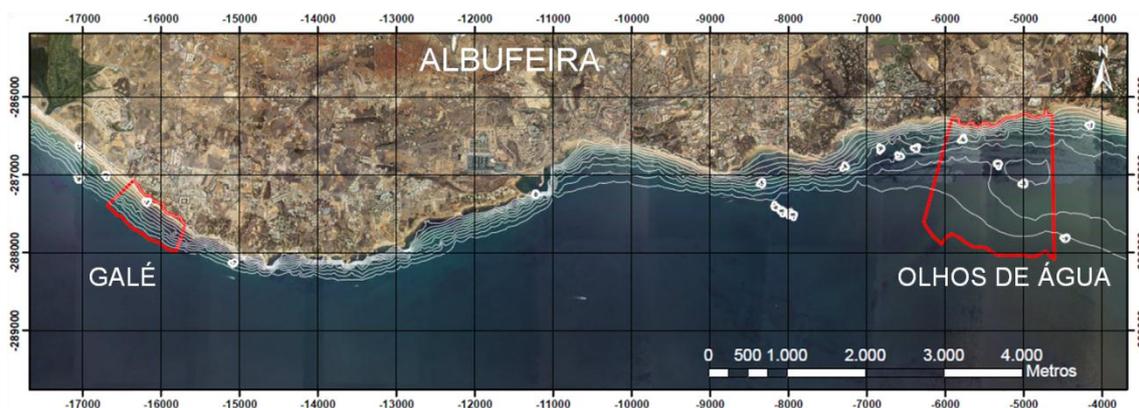


Figura 11 – Localização geral das áreas de estudo (Relatório da campanha, 2012).

Os instrumentos foram instalados em estruturas fixadas com parafusos na plataforma rochosa e na praia em estruturas enterradas na areia – Figura 12. Após colocação dos sensores nas estruturas, estes foram georreferenciados e retiradas as coordenadas ao nível de cada sensor. Mediu-se a distância dos instrumentos ao fundo com fita métrica e, para os sensores colocados na areia, efetuou-se o registo da distância ao fundo em cada baixa-mar para se saber a distância média ao fundo dos sensores durante a campanha.



**Figura 12 – a) Fixação das estruturas à plataforma rochosa. b) Pormenor da fixação na plataforma rochosa. c) Estrutura enterrada na areia.**

A metodologia adotada foi idêntica nas duas campanhas, nomeadamente, através da aquisição de dados de ondas e correntes utilizando dois tipos de sensores, o ECM (*Electromagnetic Current Meters*) – correntómetro eletromagnético, na Figura 13 – e o PT (*Pressure Transducer*) – transdutor de pressão, na Figura 14 – dispostos em linha ao longo da



**Figura 13 – *Electromagnetic Current Meters* (ECM) – correntómetro eletromagnético.**



**Figura 14 – *Pressure Transducer* (PT) – transdutor de pressão.**

praia e da plataforma rochosa adjacente. Desta forma, adquiram-se dados simultaneamente na praia e na plataforma rochosa durante dois ciclos de maré completos. As frequências de aquisição dos dados foram de 10 Hz para o ECM e 2 Hz para os PT.

Apesar de já ter sido feita referência à utilização de correntômetros eletromagnéticos durante as campanhas, neste trabalho só serão apresentados os resultados dos transdutores de pressão.

### 3.2.1. Galé

A campanha na praia da Galé decorreu nos dias 8 e 9 de Março de 2012. Os instrumentos foram dispostos pela plataforma rochosa (PT1, PT2, PT3, ECM1, ECM2) e na praia arenosa (PT4, PT5, PT6, ECM3) como ilustra a Figura 15.

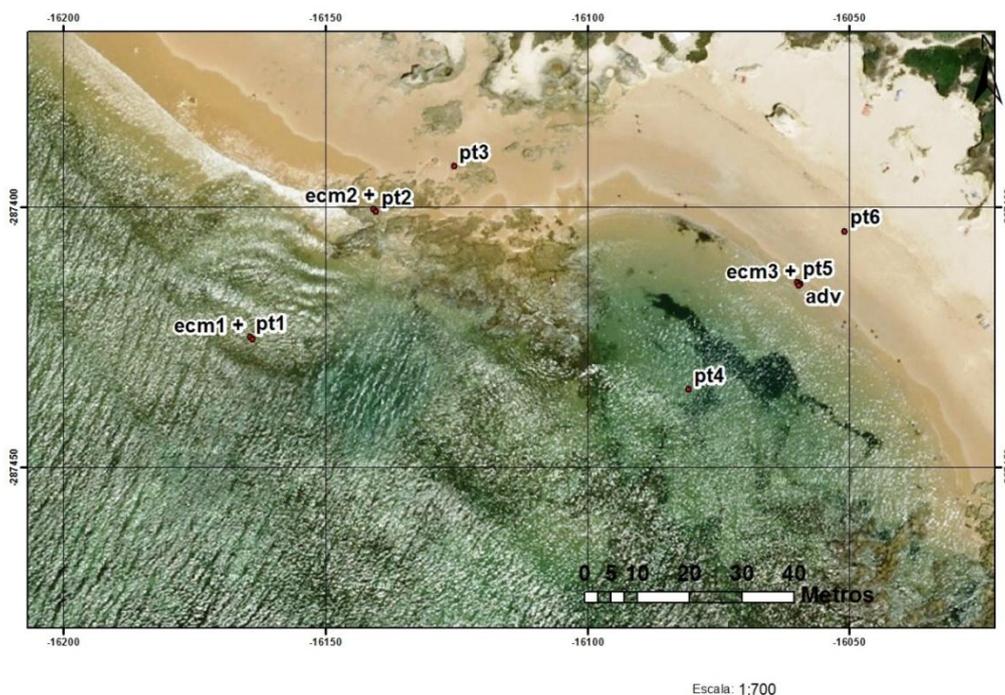


Figura 15 – Posição dos sensores na plataforma rochosa e na praia na Galé (Relatório da campanha, 2012).

As tabelas II e III descrevem, respetivamente, a previsão de marés para os dias da campanha, segundo o Instituto Hidrográfico, e a localização, distâncias médias ao fundo dos sensores, e as cotas dos instrumentos referentes ao zero hidrográfico.

Tabela II – Previsão de marés para os dias 8 e 9 de Março de 2012 para Faro – Barra de Faro – Olhão (Instituto Hidrográfico).

Hora de Inverno (UTC)		Altura (m)
<b>8 de Março de 2012</b>		
8:17	Baixa-mar	0.35
14:39	Preia-mar	3.48
20:30	Baixa-mar	0.34
<b>9 de Março de 2012</b>		
3:00	Preia-mar	3.67
8:55	Baixa-mar	0.25

Tabela III – Localização, distâncias médias ao fundo dos sensores e cotas relativamente ao zero hidrográfico.

Sensores	Localização	Distância média ao fundo (m)	Z (m)
PT1	Plataforma	0.140	1.221
PT2	Plataforma	0.045	1.810
PT3	Plataforma	0.045	2.302
PT4	Praia	0.070	0.061
PT5	Praia	0.145	1.112
PT6	Praia	0.098	2.533

Os gráficos da Figura 16 apresentam a altura significativa ( $H_s$ ), a altura máxima ( $H_{máx}$ ), o período médio ( $T$ ) e a direção da ondulação medidos na boia ondógrafo de Faro, entre as 00h00 (UTC) do dia 8 de Março e as 12h00 (UTC) do dia 9 de Março. Nesta mesma figura estão representadas as duas preias-mar, em caixas sombreadas, abrangidas durante o tempo de campanha e assinala-se ainda o começo e o fim de registo de cada PT para cada preia-mar através de uma linha vertical colorida (Figura 16 a)). O primeiro ciclo de maré (PM1) iniciou-se cerca das 9h00 do dia 8 e terminou cerca das 20h25. O segundo ciclo de maré (PM2) começa cerca das 20h30, tendo o seu término cerca das 7h40 do dia 9.

Assim numa primeira análise, pode-se verificar que a altura significativa e a altura máxima das ondas para o período das duas preias-mar manteve-se constante, rondando os 0.5 m para a altura significativa e entre os 0.7 – 1.2 m para a altura máxima. O período da onda, no início da primeira preia-mar foi cerca de 6 s e no fim cerca de 4 s. Na segunda preia-mar o período médio da onda

manteve-se praticamente constante sem grandes alterações. A ondulação nas duas preias-mar foi predominantemente de WSW.

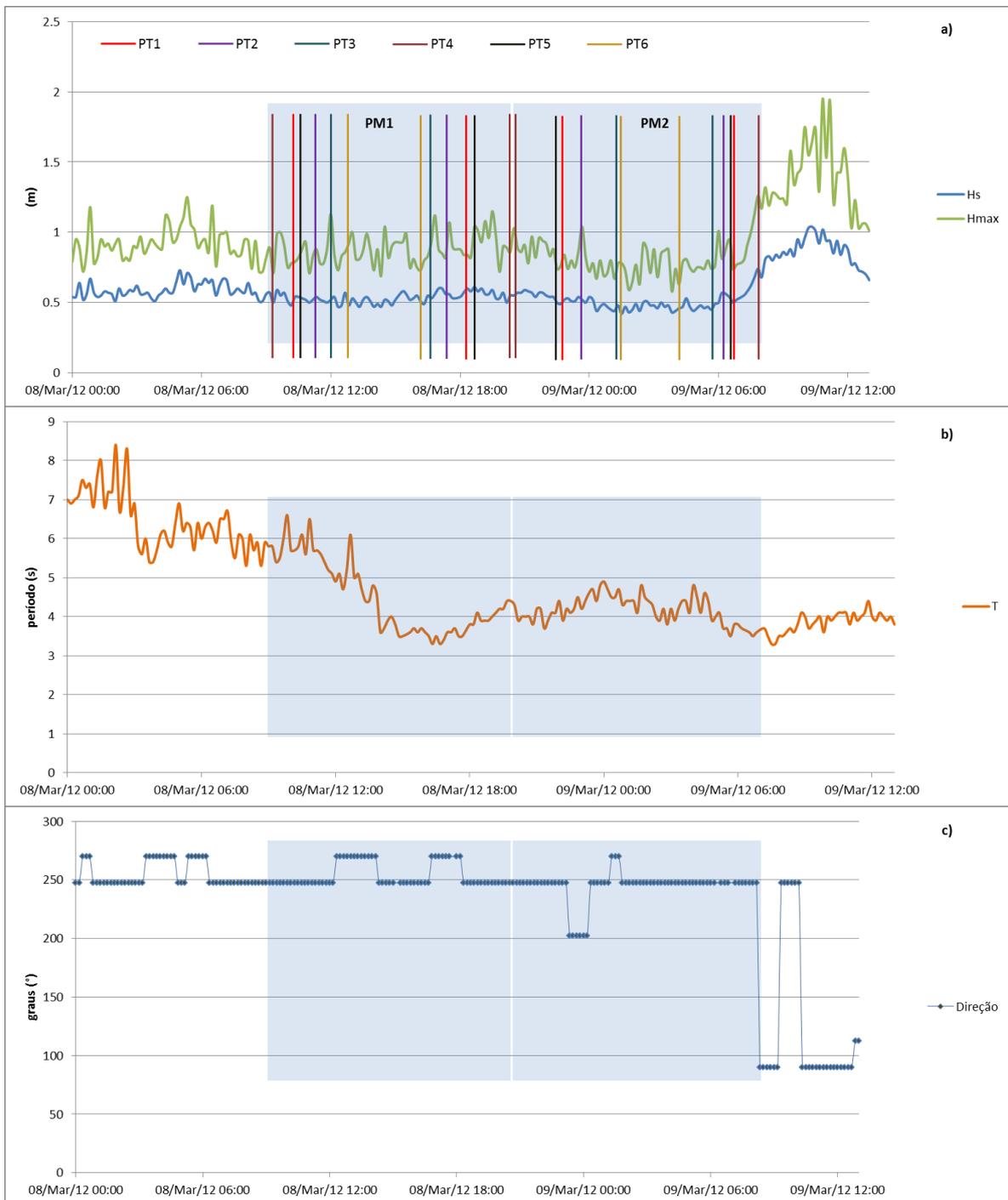


Figura 16 – Registos da boia ondógrafo de Faro entre as 00h00 (UTC) do dia 8 de Março e as 12h00 (UTC) do dia 9 de Março ao largo. a) Altura significativa,  $H_s$  e altura máxima,  $H_{máx}$ ; b) Período médio da onda, ( $T$ ); c) Direção da onda em graus.

### 3.2.2. Olhos de Água

A campanha na praia dos Olhos de Água decorreu nos dias 22 e 23 de Março de 2012 e a distribuição dos instrumentos pela plataforma rochosa e pela praia arenosa está ilustrada na Figura 17.

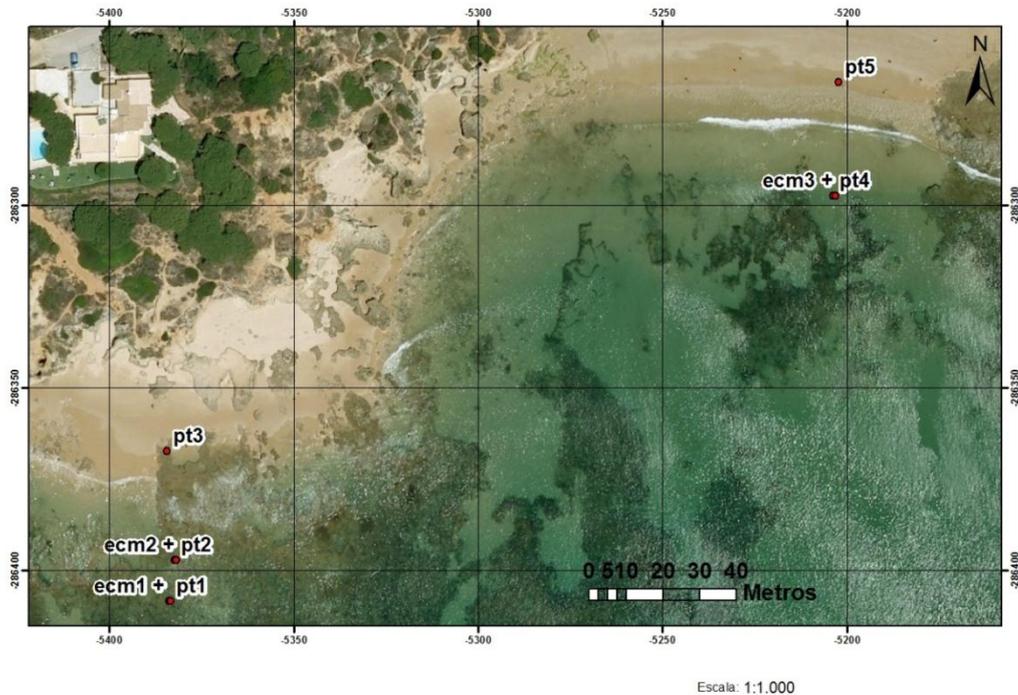


Figura 17 – Posição dos sensores na plataforma rochosa e na praia nos Olhos de Água (Relatório da campanha, 2012).

As tabelas IV e V são idênticas às anteriores mas reportam à campanha nos Olhos de Água. Assim, indicam a previsão das marés, a localização e distâncias médias ao fundo dos sensores, bem como as respetivas cotas relativas ao zero hidrográfico.

Tabela IV – Previsão de marés para os dias 22 e 23 de Março de 2012 para Faro – Barra de Faro – Olhão (Instituto Hidrográfico).

Hora de Inverno (UTC)		Altura (m)
<u>22 de Março de 2012</u>		
8:16	Baixa-mar	0.64
14:35	Preia-mar	3.25
20:28	Baixa-mar	0.64
<u>23 de Março de 2012</u>		
2:53	Preia-mar	3.34
8:46	Baixa-mar	0.64

Tabela V – Localização, distâncias médias ao fundo dos sensores e cotas relativamente ao zero hidrográfico.

Sensores	Localização	Distância média ao fundo (m)	Z (m)
PT1	Plataforma	0.040	0.968
PT2	Plataforma	0.030	1.233
PT3	Plataforma	0.040	2.219
PT4	Praia	0.073	0.880
PT5	Praia	0.067	1.965

Tal como os dados da secção anterior referente à Galé, a informação representada na Figura 18 foi adquirida através dos dados do Instituto Hidrográfico da mesma boia ondógrafo entre as 00h00 (UTC) do dia 22 de Março e as 12h00 (UTC) do dia 23 de Março ao largo. Neste caso, o primeiro ciclo de maré (PM1) começou cerca das 9h20 do dia 22 e terminou cerca das 19h00 e o segundo ciclo de maré (PM2) iniciou cerca das 21h30 e teve o seu término cerca das 7h30 do dia 23.

Numa primeira abordagem, tanto a altura significativa como a altura máxima da onda aumentaram da primeira preia-mar para a segunda preia-mar. Na primeira preia-mar tem-se alturas significativas de cerca de 0.7 m e uma altura máxima da onda entre 1 – 2 m. Na segunda preia-mar estes valores aumentam para 1 – 3 m referente à altura significativa e 1.5 – 5 m na altura máxima, havendo um pico de altura máxima no dia 23 de Março por volta das 03h00 que chegou aos 6 m. O período médio da onda na segunda preia-mar acompanha o aumento da altura significativa e máxima da onda, tendo aumentado de 4 s para 6 s de forma gradual. No final da primeira preia-mar, o período da onda aumentou, variando entre os 3 – 5 s. Relativamente à direção, esta variou no primeiro ciclo de maré entre ENE e SE e permaneceu constante no segundo ciclo.

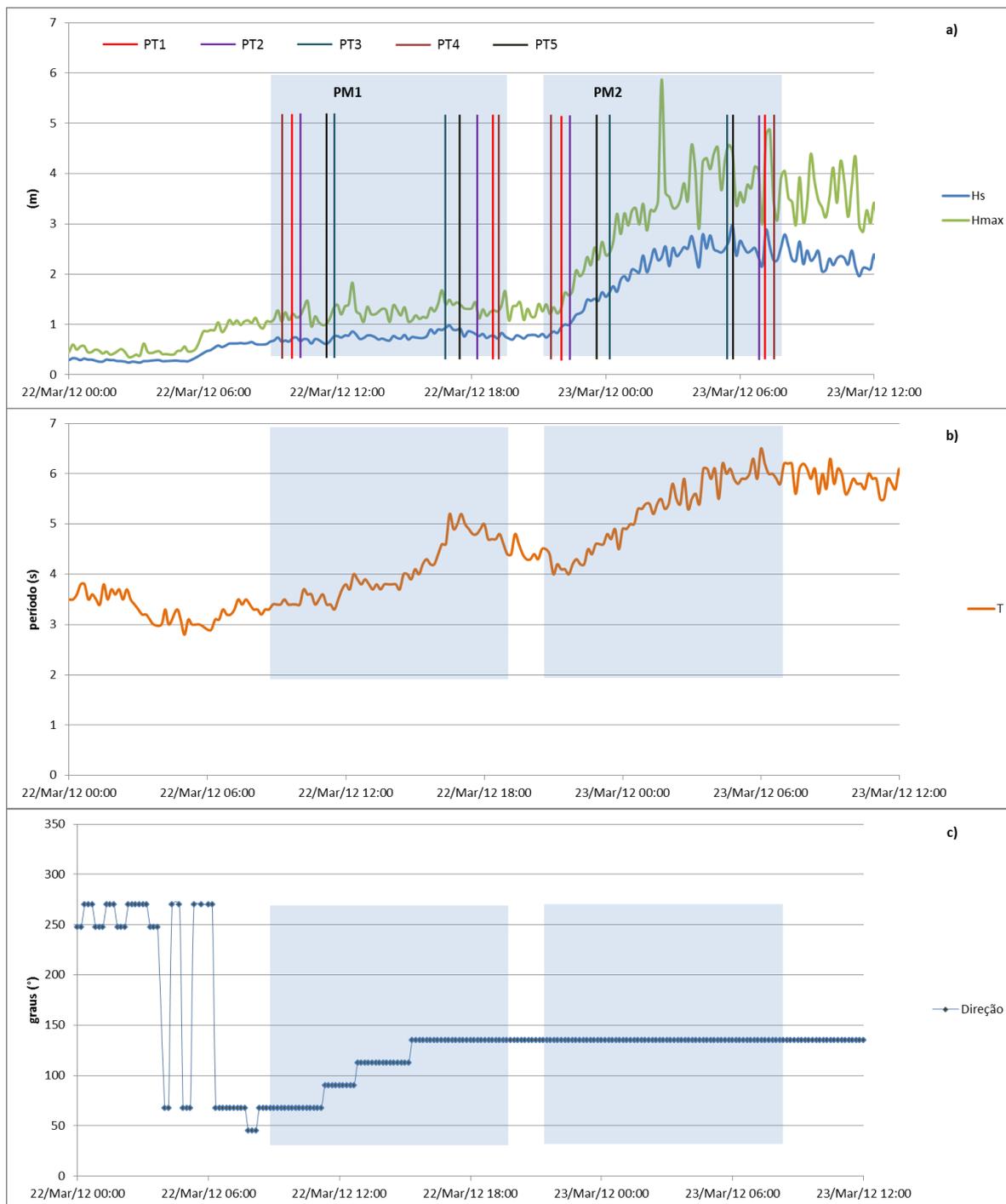


Figura 18 – Registos da boia ondógrafo de Faro entre as 00h00 (UTC) do dia 22 de Março e as 12h00 (UTC) do dia 23 de Março. a) Altura significativa,  $H_s$  e altura máxima,  $H_{máx}$ ; b) Período médio da onda, ( $T$ ); c) Direção da onda em graus.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Análise dos resultados das campanhas

Para o processamento de resultados das campanhas, foi preciso efetuar previamente alguns procedimentos, nomeadamente selecionar os períodos de tempo em que os sensores estiveram sempre submersos com água nos dois ciclos de maré, existindo portanto para cada PT dois períodos de dados. Após esta seleção eliminou-se o valor da pressão atmosférica e/ou o valor da altura da coluna de água correspondente, pois nem todos os sensores estavam calibrados de igual maneira.

Aos dados assim obtidos aplicou-se um filtro de passa-baixo com uma frequência de corte de 0.05 Hz, para se separar as componentes de longo período associadas às marés e às ondas de grupo das ondas de curto período.

Dividiram-se os períodos de dados em intervalos de 15 minutos e calcularam-se as médias da altura da superfície livre para cada intervalo, obtendo-se a profundidade média,  $h$ . Para tal adicionou-se a distância média a que os sensores estavam ao fundo ficando assim com a altura da coluna de água para o período selecionado.

A altura significativa foi calculada através da seguinte expressão

$$H_s = 4\sqrt{\sigma^2} \quad (31)$$

onde,

$\sigma^2$  – variância da elevação da superfície livre.

#### 4.1.1. Galé

A Figura 19 mostra a altura significativa da onda em cada PT para os dois ciclos de maré em função do tempo, estando referenciado às 00h00 do dia 8 e indicando em cada gráfico a hora de início e fim do período de tempo selecionado. Relembrando que o PT4 esteve sempre submerso em água, é o que apresenta um maior registo de dados nos dois ciclos. O PT6 que estava localizado na praia é o que apresenta menor registo de dados. Os valores de  $H_s$  seguem todos praticamente a mesma tendência, excetuando-se o PT6. Do primeiro ciclo para o segundo ciclo,

existe um aumento da altura significativa da onda em todos os sensores. A altura significativa máxima da onda para o primeiro ciclo ronda os 0.6 m e para o segundo ciclo é cerca de 0.9 m. A variação da altura significativa da onda para o primeiro ciclo está entre os 0.4 – 0.6 m e no segundo ciclo entre os 0.5 – 0.9 m. Os valores de  $H_s$  no PT4 apresentam uma amplitude maior de variação.

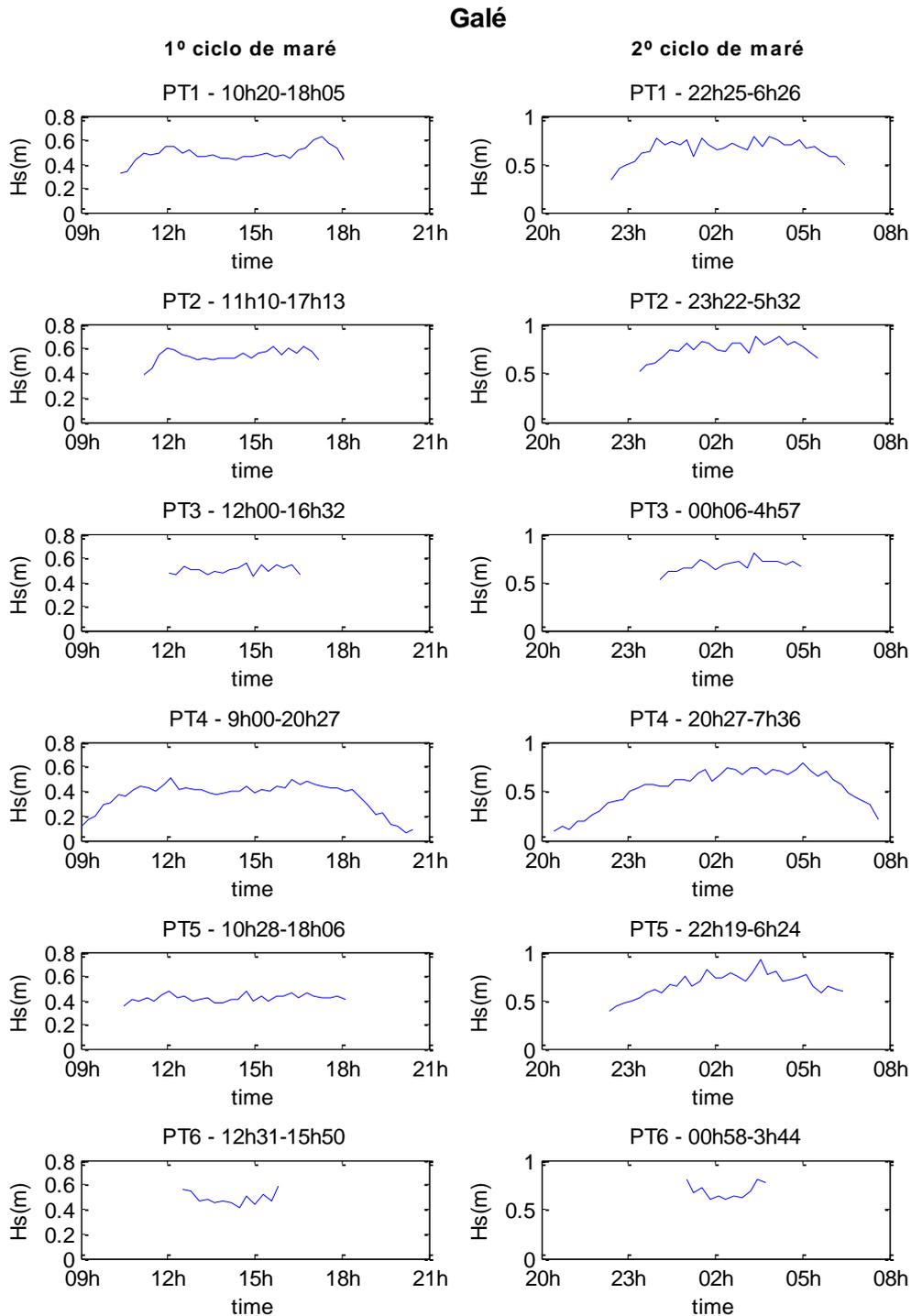


Figura 19 – Altura significativa da onda,  $H_s$  em função do tempo (00h00 do dia 8) para os dois ciclos de maré na praia da Galé.

A Figura 20 ilustra os gráficos da altura significativa da onda em função da profundidade a partir dos quais é possível definir as zonas em que os sensores estão ou não na zona de rebentação. Adicionalmente, a figura permite estimar a razão  $H/h$ , para cada PT e preia-mar, que indicia o ponto de rebentação da onda – Tabela VI.

Analisando os gráficos é possível verificar que os pontos para os dois ciclos de maré em cada PT têm a mesma zona de origem. Na primeira preia-mar (símbolos circulares) os valores registados no PT1 e PT2 sugerem que o sensor esteve na zona de rebentação verificando-se um aumento progressivo de  $H_s$  com  $h$  depois na zona de empolamento e posteriormente antes da zona de rebentação, em que os valores de  $H_s$  estão saturados. No PT4, a extensão da zona de rebentação e a saturação estão bem definidas, tal como no PT5 embora com uma extensão da zona de rebentação mais pequena. Na segunda preia-mar (símbolos triangulares a cheio), as extensões da zona de rebentação são superiores às da primeira preia-mar, evidenciando o aumento da altura da onda. Nota-se que nalguns casos, PT3 e PT5, o sensor esteve sempre na

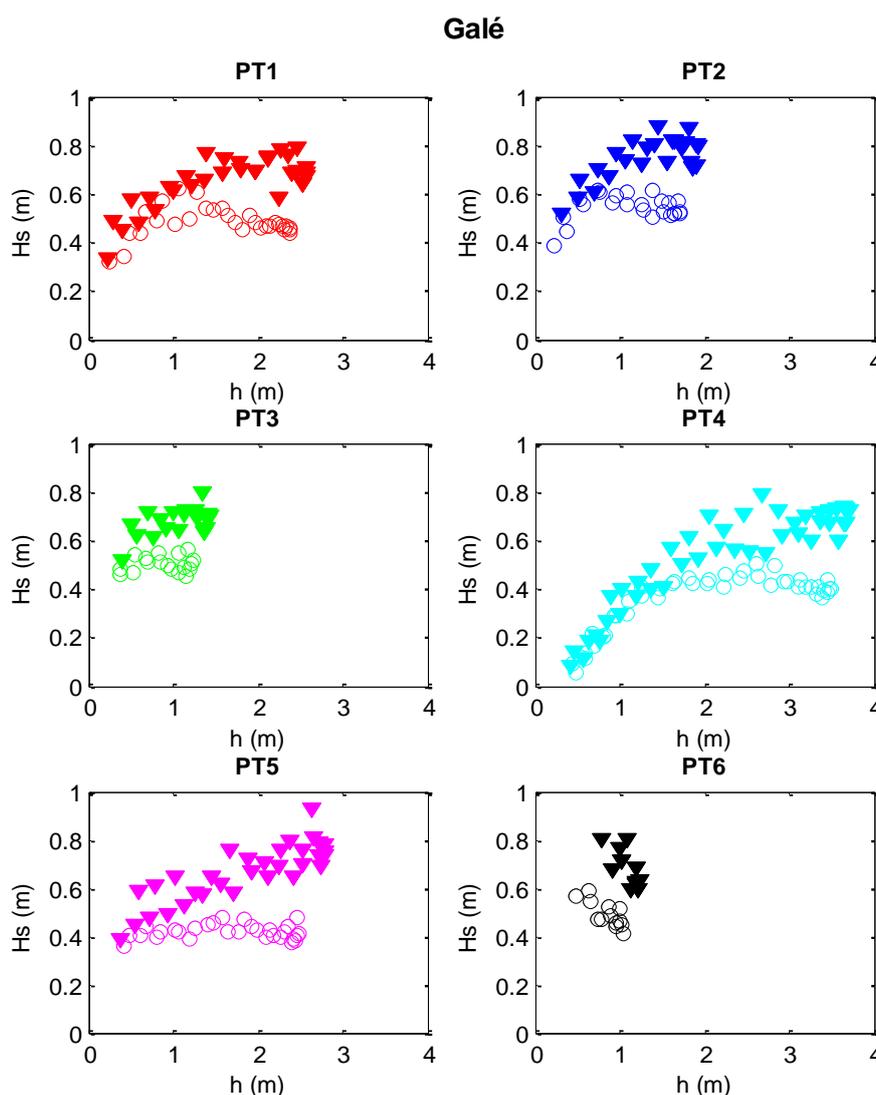


Figura 20 – Altura significativa da onda,  $H_s$  em função da profundidade,  $h$  na Galé. Símbolos circulares – PM1; símbolos triangulares a cheio – PM2.

zona de rebentação. Na segunda preia-mar houve uma extensão da zona de rebentação superior às da primeira preia-mar devido ao facto de o segundo ciclo de maré ter tido uma preia-mar superior relativamente ao primeiro ciclo.

Os sensores que se encontram mais para o largo têm profundidades da coluna de água maiores, nomeadamente o PT4 que tem um valor máximo de 3.5 m e os sensores que estão mais próximos da costa têm profundidades da coluna de água mais pequenas, como os PT3 e PT6, entre aproximadamente os 1 – 1.5 m.

A Tabela VI indica, para cada sensor, estimativas para os valores da razão  $(H/h)_{reb}$ , verificando-se que não há muita diferença entre os valores das duas preias-mar. A diferença mais relevante é no PT3, pois é o que apresenta uma razão superior. O PT6 apresentou um comportamento diferente dos outros, pois a altura da onda diminuiu com o aumento de  $h$ . Como o perfil da praia era muito acentuado aquando da realização da campanha, é possível que o tipo de rebentação no local do PT6 seja do tipo rebentação colapsante (*surging*).

**Tabela VI – Estimativa da razão  $(H/h)_{reb}$  para cada PT e para as duas preias-mar (PM1 e PM2) na Galé.**

<b>Sensores</b>	<b>PM1</b>	<b>PM2</b>
<b>PT1</b>	0.40	0.30
<b>PT2</b>	0.60	0.50
<b>PT3</b>	0.70	0.70
<b>PT4</b>	0.30	0.30
<b>PT5</b>	0.40	0.35
<b>PT6</b>	-	-

#### **4.1.2. Olhos de Água**

Os gráficos agora representados na Figura 21 estão referenciados para as 00h00 do dia 22 e mostram a altura significativa da onda em função do tempo para cada PT durante os dois ciclos de maré, indicando em cada gráfico a hora de início e fim do período de tempo seleccionado. Os sensores com menor duração do registo são os PT3 e PT5, pois estão mais perto da costa. Para esta praia a altura significativa da onda no primeiro ciclo varia aproximadamente entre os 0.3 – 0.5 m, excetuando o PT4 que tem um valor mínimo de altura significativa de 0.2 m. No segundo ciclo, esta variação está aproximadamente entre os 0.4 – 1.0 m, sendo visível que a altura máxima significativa da onda para este ciclo ultrapassa 1 m, por exemplo, no PT1. Este segundo ciclo tem

uma variação de altura significativa de onda superior relativamente ao primeiro ciclo, de acordo com o registo de  $H_s$  na boia de Faro (ver Figura 18).

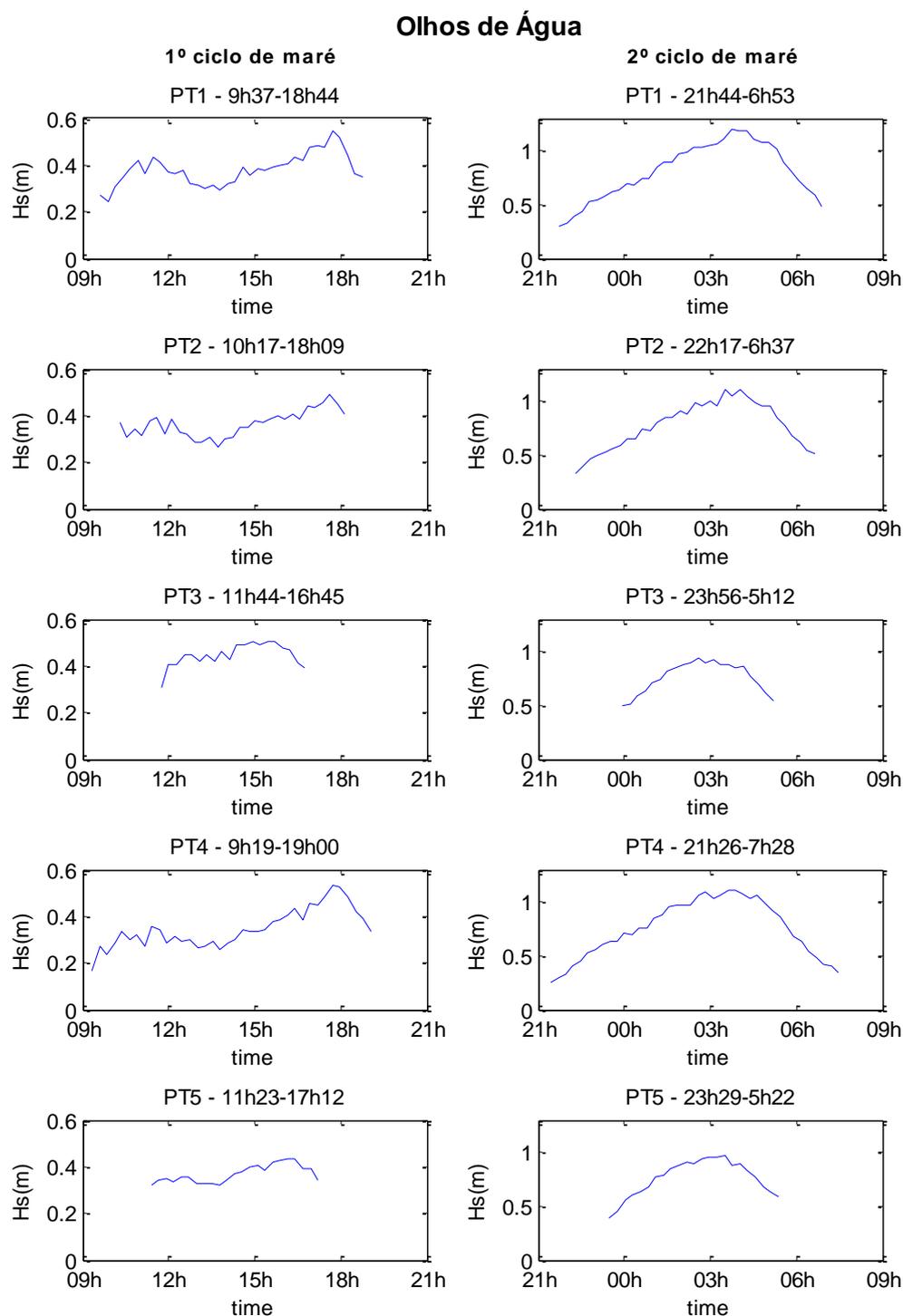


Figura 21 – Altura significativa da onda,  $H_s$ , em função do tempo (00h00 do dia 22) para os dois ciclos de maré na praia de Olhos de Água.

A Figura 22 ilustra os gráficos da altura significativa da onda em função da profundidade. Estimou-se também para estes dados a razão  $(H/h)_{reb}$ , para cada PT, estando indicados na Tabela VII.

Todos os sensores têm a mesma zona de origem. Fixando-nos na primeira preia-mar (símbolos circulares), os resultados sugerem que os sensores PT1 – PT4 estiveram na zona de rebentação e, posteriormente, antes da zona de rebentação. Na segunda preia-mar (símbolos triangulares cheios), tal como na campanha anterior, todos os sensores também apresentam uma extensão da zona de rebentação superior comparativamente à primeira preia-mar. Neste ciclo em nenhum dos sensores os valores de  $H_s$  saturam, estando estes sempre na zona de rebentação. Para este ciclo é visível que os pontos para a enchente e vazante não seguem a mesma linha, como no primeiro ciclo, mas sim outra linha, cujos valores de altura significativa da onda para uma mesma profundidade na vazante são maiores que na enchente, isto pode-se dever ao facto de a altura das ondas incidentes no segundo ciclo durante a vazante serem maiores.

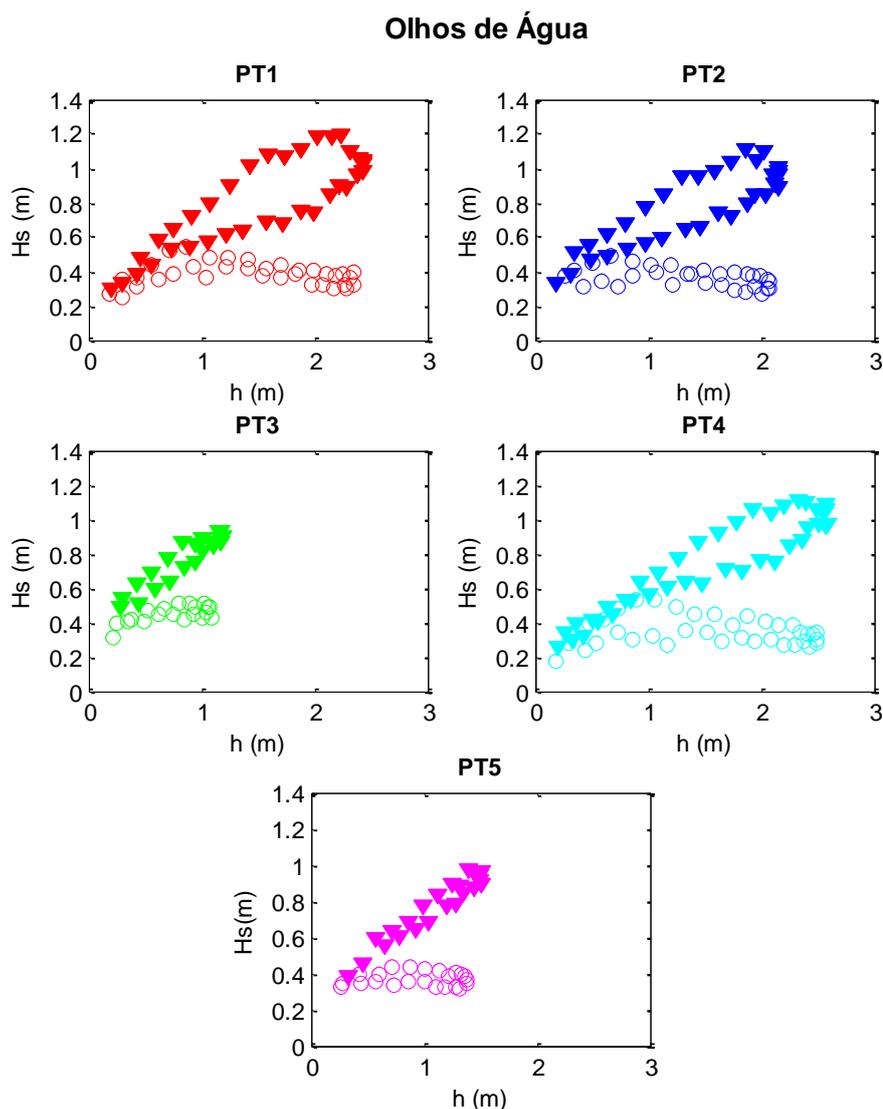


Figura 22 – Altura significativa da onda,  $H_s$  em função da profundidade,  $h$  nos Olhos de Água. Símbolos circulares – PM1; símbolos triangulares a cheio – PM2.

Em termos de semelhança dos resultados, podemos agrupar os sensores em dois grupos: o [PT3 e PT5] e o [PT1, PT2 e PT4], lembrando que o PT3 e PT5 são os que estão mais junto da costa e apresentam profundidades da coluna de água entre os 1 – 1.5 m e os restantes, PT1, PT2 e PT4, mais ao largo apresentam profundidades da coluna de água maiores, entre 2 – 2.5 m, aproximadamente. Nestes gráficos é perceptível o acompanhamento da profundidade da coluna de água que aumenta à medida que a altura significativa aumenta durante a enchente e a vazante, principalmente na segunda preia-mar.

Os valores para as estimativas da razão  $(H/h)_{reb}$ , só foram calculados para a primeira preia-mar, uma vez que na segunda preia-mar os sensores estiveram sempre na zona de rebentação.

Tabela VII – Estimativa da razão  $(H/h)_{reb}$  para cada PT e para a primeira preia-mar (PM1) nos Olhos de Água.

Sensores	PM1
PT1	0.50
PT2	0.55
PT3	0.70
PT4	0.40
PT5	0.60

## 4.2. Aplicação do modelo

### 4.2.1. Experiência da UPC

A experiência da UPC serviu para testar a validade das expressões utilizadas no modelo numérico para o cálculo do empolamento, rebentação e dissipação da onda mediante a comparação com os seus resultados experimentais.

Primeiro fez-se uma estimativa para a zona de empolamento, sendo apresentadas a Figura 23 e Figura 24, correspondentes a ondas regulares e irregulares, respetivamente.

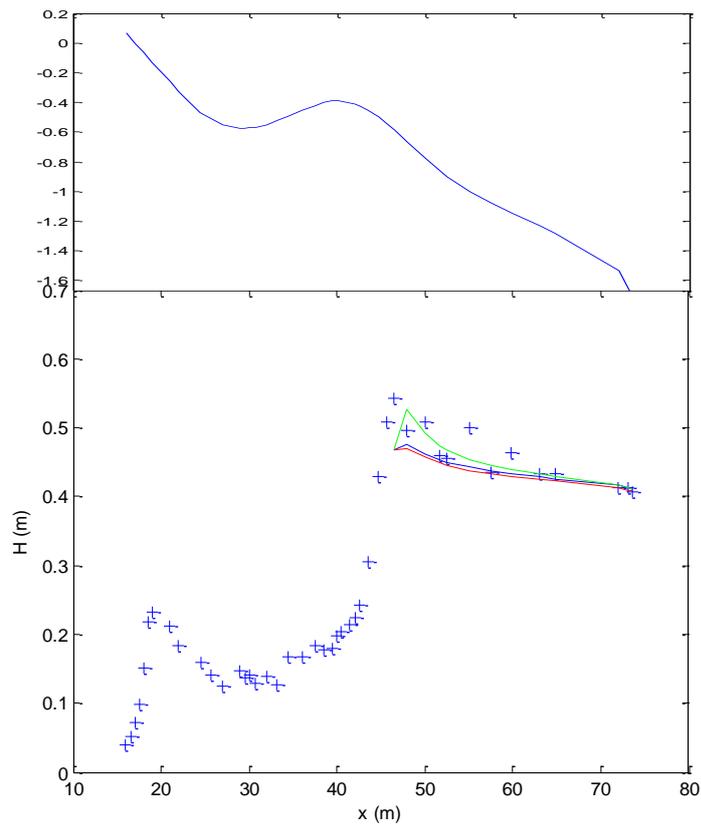


Figura 23 – Perfil de fundo. Condição C – estimativa do empolamento. Linha azul – equação (14); linha vermelha – equação (18); linha verde – equação (19). Símbolo -  $H_{rms}$ .

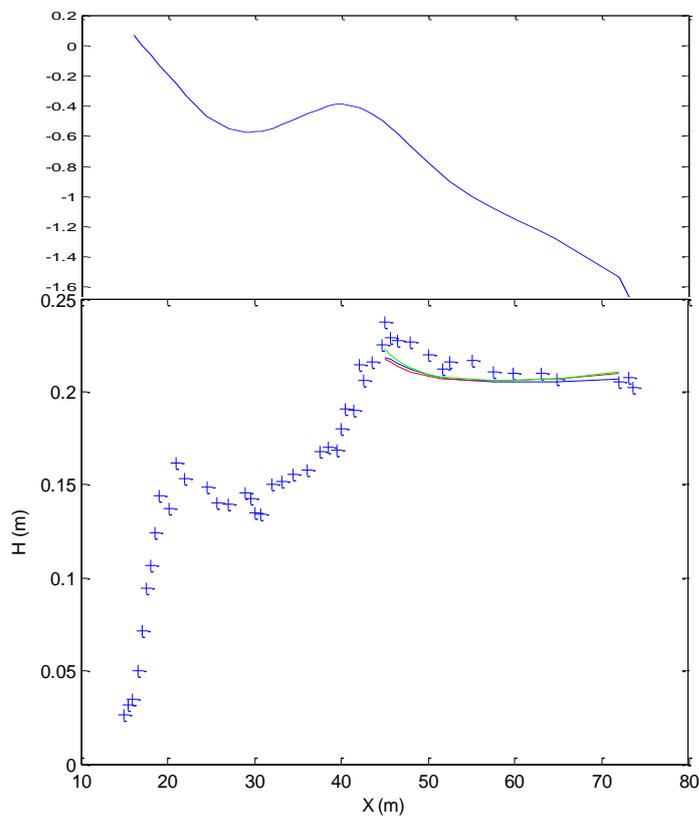


Figura 24 – Perfil de fundo. Condição D – estimativa do empolamento. Linha azul – equação (14); linha vermelha – equação (18); linha verde – equação (19). Símbolo -  $H_{rms}$ .

A estimativa do empolamento até à zona de rebentação foi quantificada por um parâmetro de aptidão, Skill ( $S$ ), que consiste na quantificação do erro através da razão entre o desvio padrão da média entre os valores calculados com os valores experimentais,  $H_{rms}$  – Equação (32).

$$S = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N (\xi_{cal,k} - \xi_{obs,k})^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (\xi_{obs,k})^2}} \quad (32)$$

Quando  $S = 1$ , há concordância entre os dados calculados e os experimentais. Se  $S = 0$ , o erro é tão grande como a raiz quadrada média dos valores obtidos. Calculou-se o valor da aptidão para cada condição e para as três equações, listando os resultados na Tabela VIII.

Tabela VIII – Valor da aptidão  $S$  para cada condição e equação (Santos *et al.*, 2012).

	A	B	C	D
<b>Eq. (14)</b>	0.87	0.87	0.89	0.89
<b>Eq. (18)</b>	0.93	0.91	0.93	0.95
<b>Eq. (19)</b>	0.95	0.95	0.94	0.96

Verifica-se que a equação (19) conduziu aos melhores resultados quando aplicada aos valores experimentais de  $H_{rms}$ .

A determinação do local de rebentação foi feita pela intersecção da altura da onda estimada pelo modelo com a altura de rebentação determinada pelos diversos critérios atrás apresentados, pois no ponto onde  $H_b < H$  é onde existe a primeira rebentação.

Nas figuras 25, 26 e 27 são apresentadas os valores de  $H_b$  e da altura  $H$  calculados com o modelo. Os valores de  $H_b$  foram calculados pelos critérios de Battjes e Janssen, (Figura 25) de Svendsen e Hansen (Figura 26) e Sancho e Jacob e Weggel (Figura 27). Note-se que, os últimos quatro critérios referidos dependem do declive.

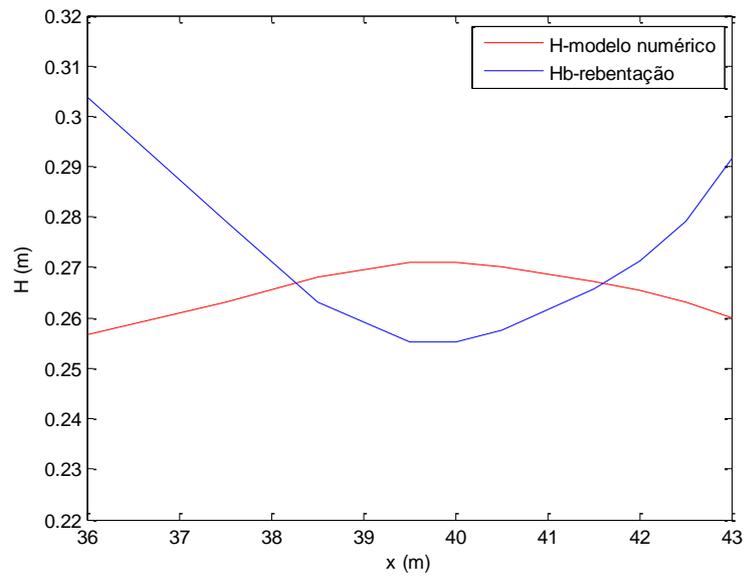


Figura 25 – Condição A – local de rebentação, intersecção entre a altura da onda H calculada pelo modelo e a altura de rebentação  $H_b$ , pela equação de Battjes e Janssen.

Na Figura 25, é possível verificar que houve só uma rebentação. Ao contrário, na Figura 26 verifica-se que a equação de Hansen contempla duas rebentações, assim como a equação de Svendsen. Neste gráfico é evidente também que os locais da primeira rebentação para os dois critérios são diferentes.

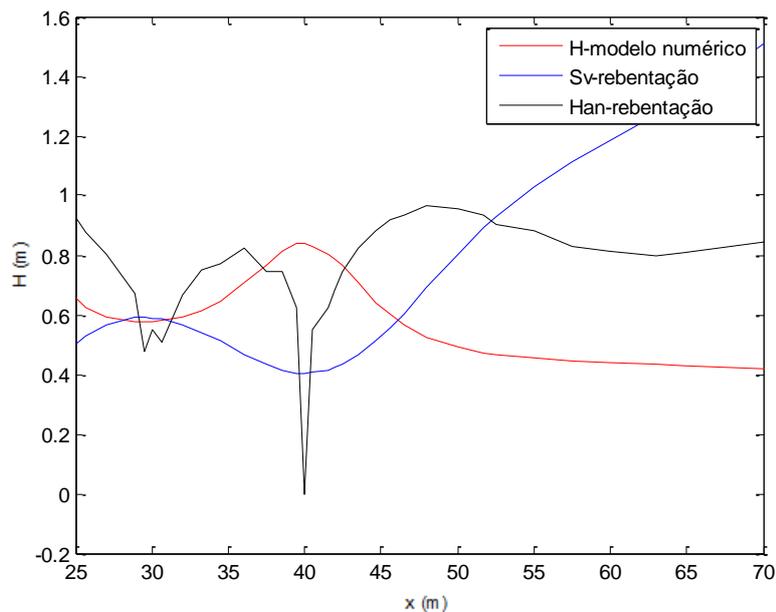


Figura 26 – Condição C – local de rebentação, intersecção entre a altura da onda H calculada pelo modelo e a altura de rebentação  $H_b$ , pelas equação de Svendsen e Hansen.

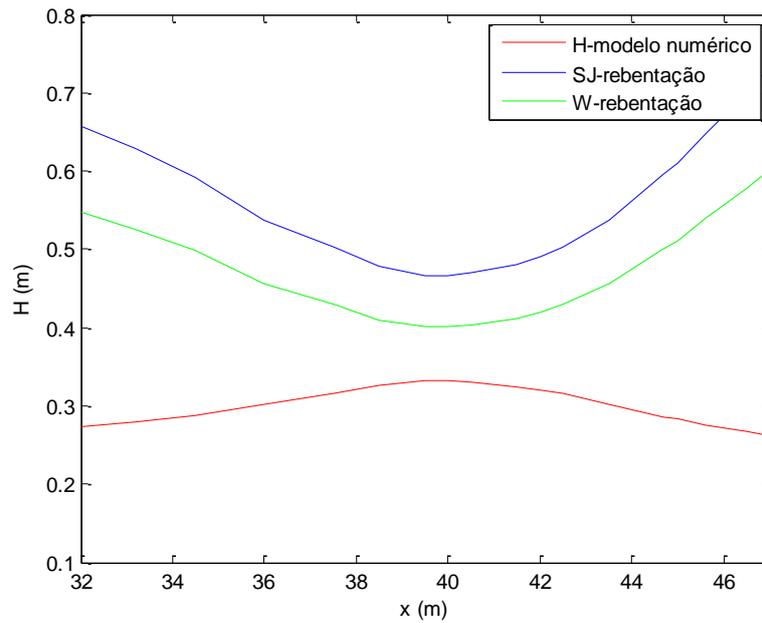


Figura 27 – Condição B – local de rebentação, intersecção entre a altura da onda  $H$  calculada pelo modelo e a altura de rebentação  $H_b$ , pelas equação de Sancho e Jacob e Weggel.

Na Figura 27, é possível ver que a altura de rebentação calculada pelas equações de Sancho e Jacob não intersectam a altura da onda reproduzida pelo modelo para a condição B.

Como os critérios Svendsen, Hansen, Sancho e Jacob e Weggel dependem do declive de fundo, ou seja dependem muito da batimetria a que estão a ser aplicados, consideraram-se diferentes valores para o declive de fundo da batimetria, um declive local ou médio num ou mais comprimentos de onda – Figura 28

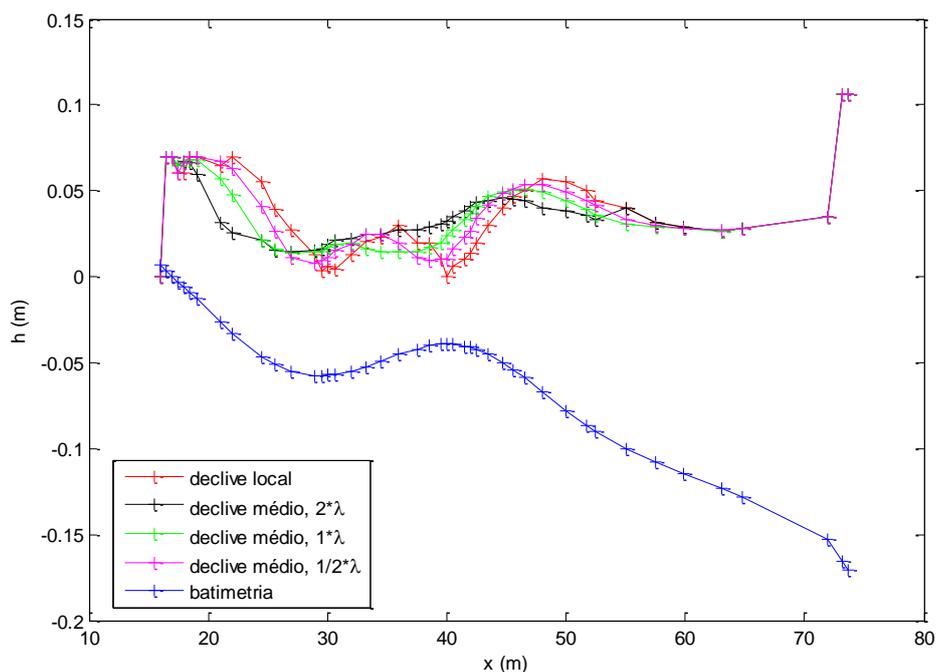


Figura 28 – Perfil de fundo com os vários declives local e médios de diferentes comprimentos de onda.

As figuras 29 a 32 indicam para cada condição (A, B, C e D), o local de rebentação calculado para cada método e os valores observados experimentalmente.

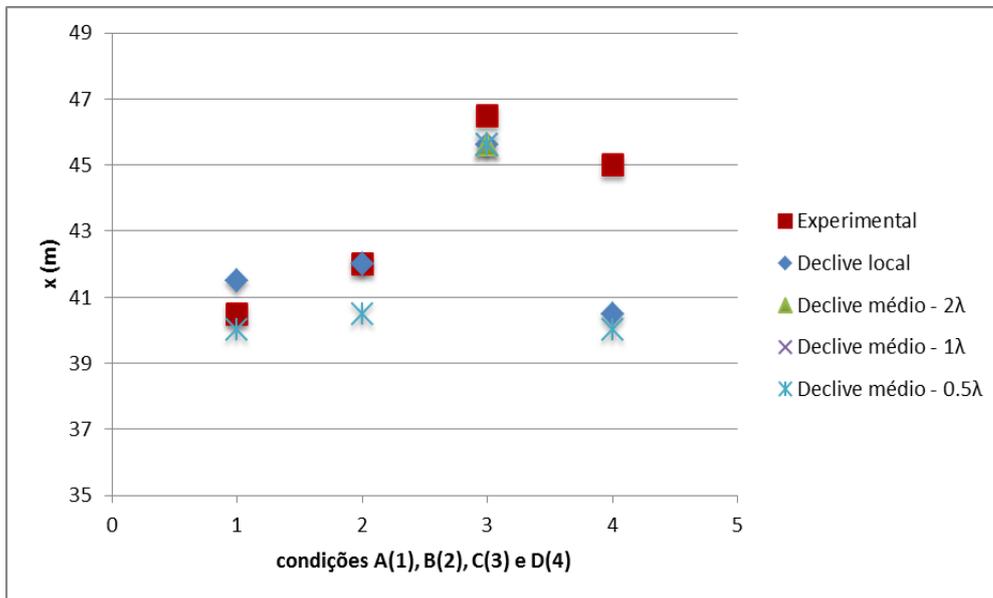


Figura 29 – Localização da rebentação para a equação de Svendsen.

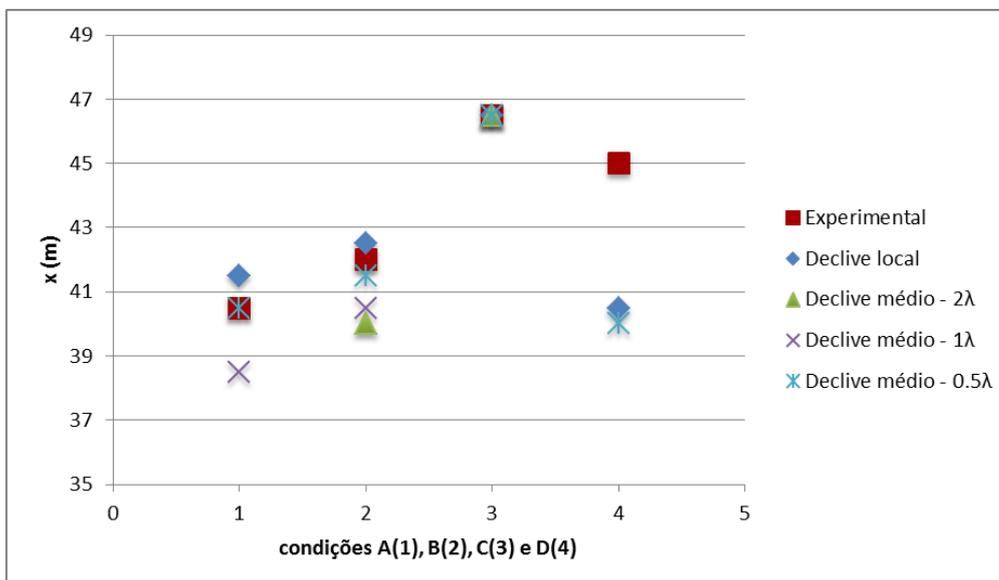


Figura 30 – Localização da rebentação para a equação de Hansen.

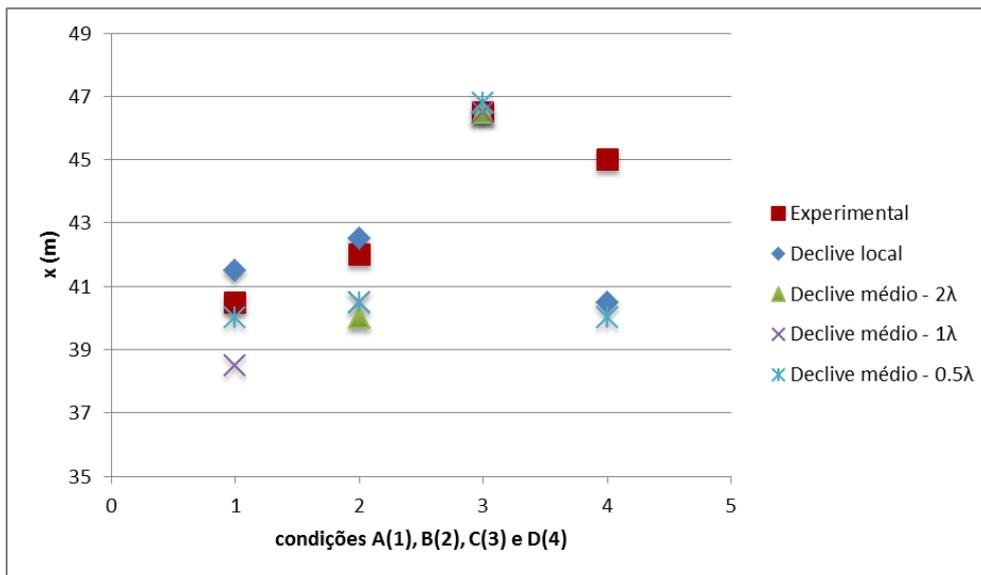


Figura 31 – Localização da rebentação para equação de Weggel.

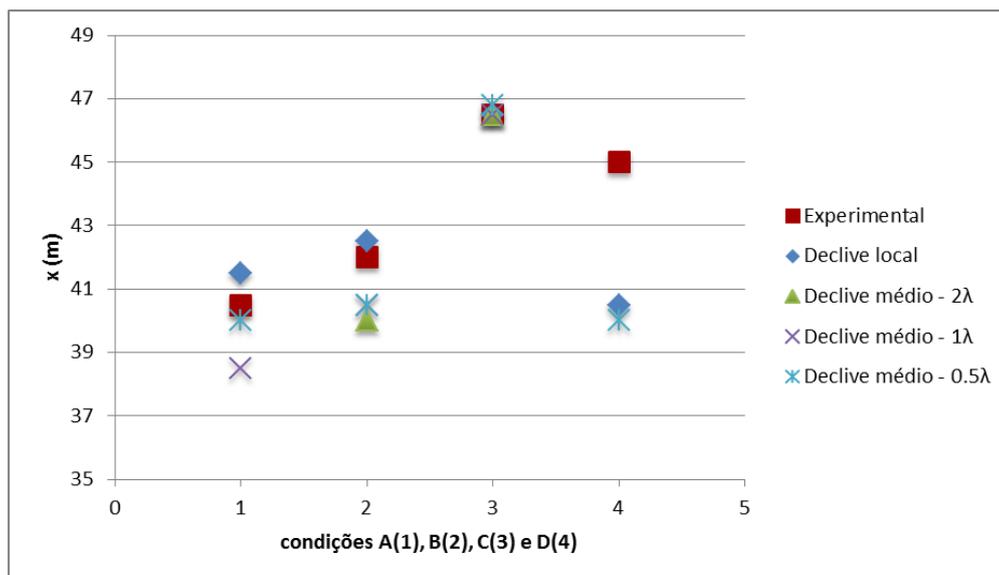


Figura 32 – Localização da rebentação para a equação de Sancho e Jacob.

Desta análise resulta que para as ondas da condição D, o local de rebentação calculado por estas equações são as que estão mais afastadas dos valores experimentais. A condição C é a que tem em todos os critérios mais proximidade ao local de rebentação experimental. Também se verifica que o declive médio –  $1\lambda$  para os dois últimos critérios representados (ver Figura 31 e Figura 32) é o que mais se afasta relativamente ao ponto experimental, assim como nem para todas as formas de cálculo do declive se verificou rebentação.

Segundo as observações das imagens do vídeo sobre o local de rebentação da experiência, estas rebentam em  $x = 40.5$  m,  $x = 42.0$  m,  $x = 46.5$  m e  $x = 45.0$  m, para as condições A, B C

e D, respetivamente. Segundo Battjes e Janssen, o ponto onde se verifica a condição para rebentação ( $H_b < H$ ) ocorre para  $x = 41.5$  m,  $x = 43.5$  m,  $x = 48.0$  m, nas condições A, B e C, respetivamente, distanciando-se dos locais observados cerca de 1 a 1.5 m. Para a condição D, não foi possível determinar o local de rebentação, pois as duas curvas não se intersectaram.

A dissipação da energia no modelo numérico foi igualmente verificada mediante a comparação com os resultados experimentais. Os gráficos da Figura 33 representam as distribuições espaciais do fluxo de energia da onda e da dissipação após o ponto de rebentação observado pelas imagens de vídeo para a condição C.

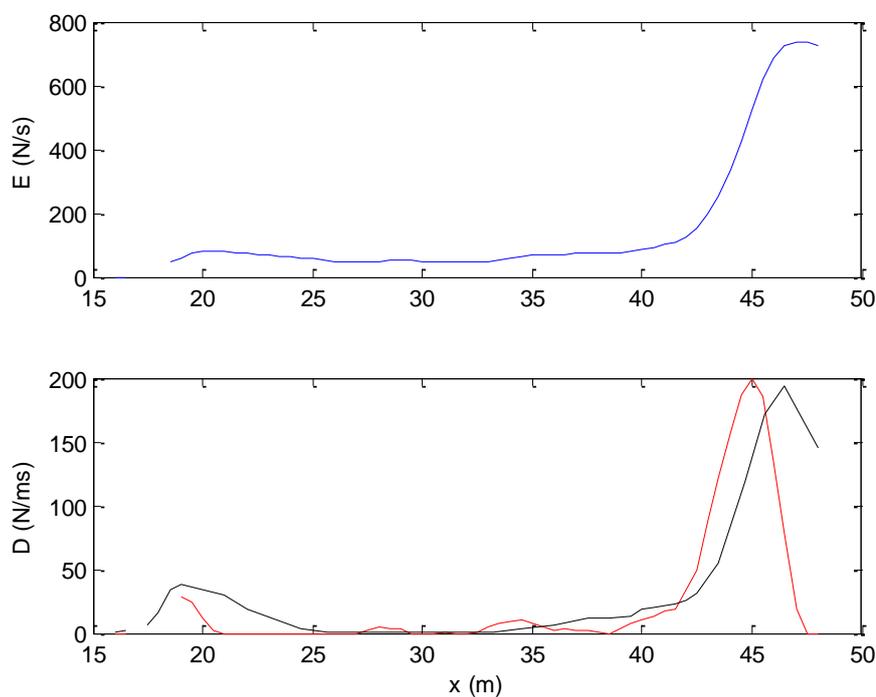


Figura 33 – Condição C – Fluxo de energia da onda. Dissipação. Linha vermelha – equação (29); linha preta – equação (30).

O fluxo de energia calculado pela equação (29) foi filtrado, de modo a alisar pequenas oscilações, com uma média corrida de 5 pontos. No gráfico da dissipação estão representadas as diferenças finitas do fluxo de energia representado no gráfico acima, e a dissipação calculada pela equação (30). Há um razoável ajuste entre estas equações na maneira como descrevem a dissipação de energia.

Um dos objetivos deste modelo numérico era a integração de múltiplas rebentações. Para isso o perfil de fundo necessita de ser igualmente espaçado, pois se a resolução do perfil for muito baixa haverá pontos do domínio em que pode não ser estimada a rebentação. Desta forma, faz-se uma interpolação da batimetria de fundo com um espaçamento de 50 cm – Figura 34.

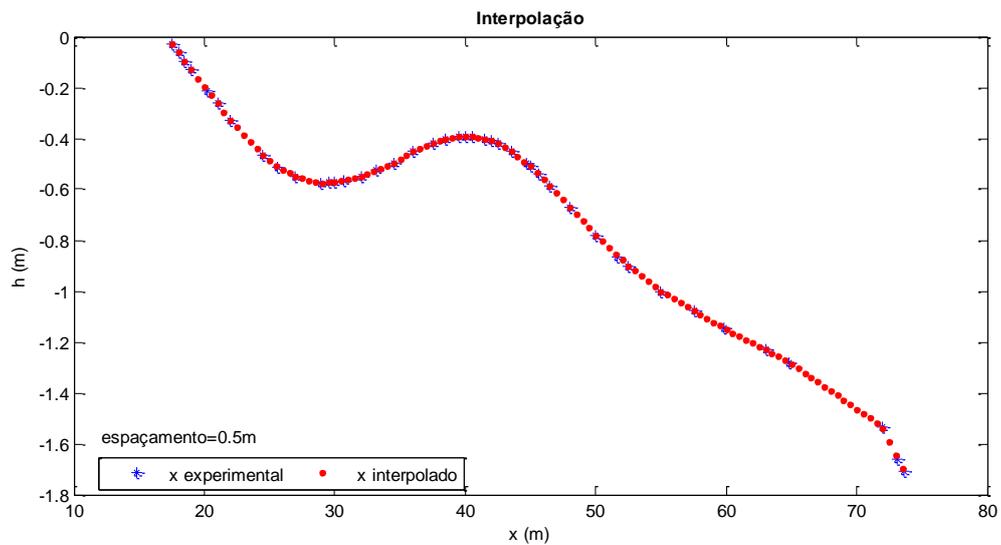


Figura 34 – Interpolação dos pontos de perfil de fundo.

Com a batimetria interpolada e com o critério de Battjes e Janssen o modelo numérico reproduz soluções para as condições de onda impostas que contemplam múltiplas rebentações. A Figura 35 mostra que a onda rebenta em dois pontos do domínio, estando em concordância com a estimativa da altura de onda, pois esta após o primeiro empolamento rebenta, verificando-se a condição  $H_b < H$ . Antes do segundo ponto de rebentação, a onda volta novamente a empolar e a verificar-se a condição anterior. Nos pontos do domínio em que  $H_b < H$ , a onda está a dissipar energia.

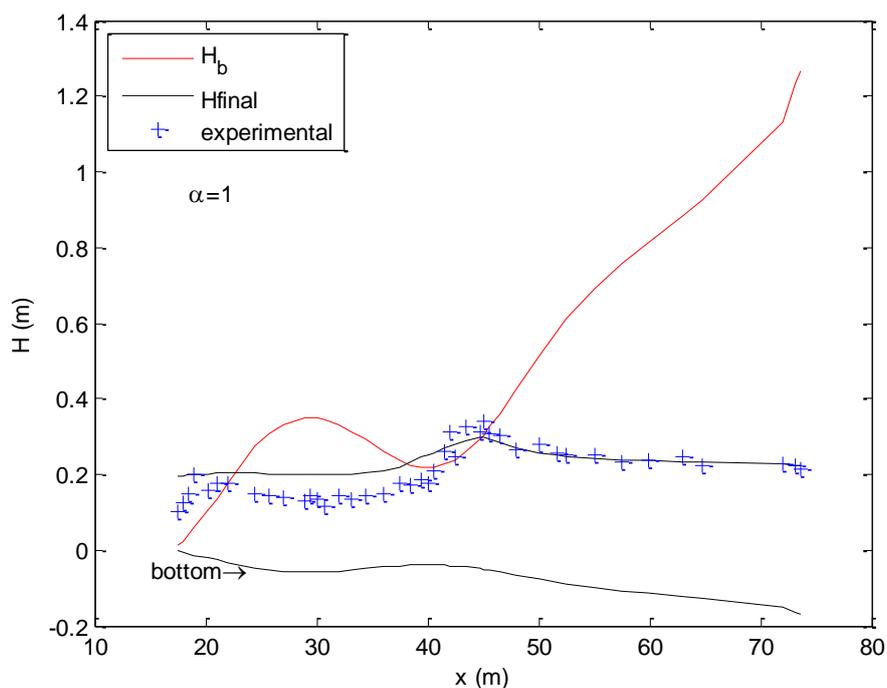


Figura 35 – Condição B – representação da altura de rebentação, altura de onda estimada pelo modelo, valores de  $H_{rms}$  e o perfil de fundo.

#### 4.2.2. Campanhas de campo

Para a aplicação do modelo à praia da Galé foi necessário gerar um domínio com uma batimetria representativa do local. Para tal fez-se a junção da informação de um perfil relativo à plataforma continental com a disponível na plataforma rochosa e na praia (Moura *et al.*, 2012) Aos perfis batimétricos das duas morfologias fez-se uma interpolação de 3 m, para os pontos estarem equidistantes entre si. É de referir que os perfis apresentados referem-se ao nível médio do mar.

O primeiro perfil apresentado é o da plataforma rochosa na Figura 36.

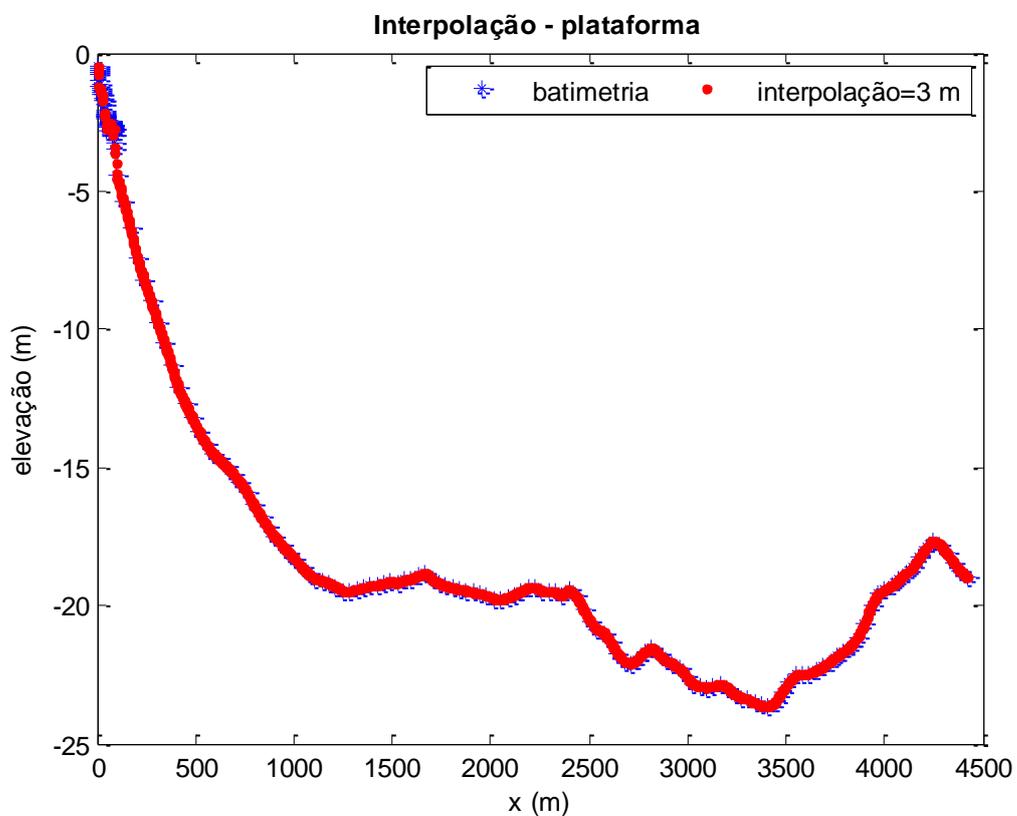


Figura 36 – Perfil da plataforma com e sem interpolação, referente ao nível médio do mar.

Como o perfil tem uma extensão de cerca de 4500 m, não é muito evidente a morfologia da plataforma perto da costa, assim como a sua interpolação, portanto apresenta-se a Figura 37 que representa os primeiros 160 metros do perfil da plataforma.

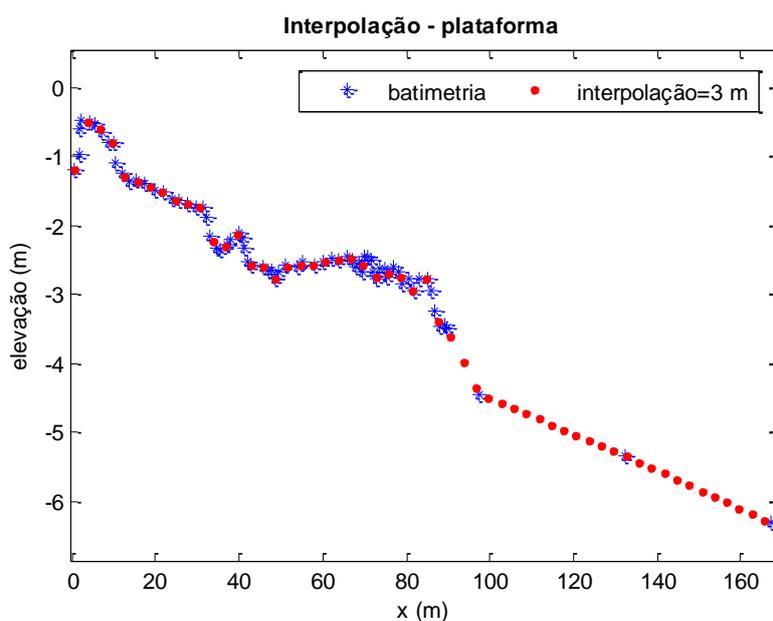


Figura 37 – Perfil da plataforma, entre  $x = 0$  m e  $x = 160$  m, com e sem interpolação, referente ao nível médio do mar.

De igual modo, a Figura 38 apresenta o perfil de praia para os 200 metros iniciais.

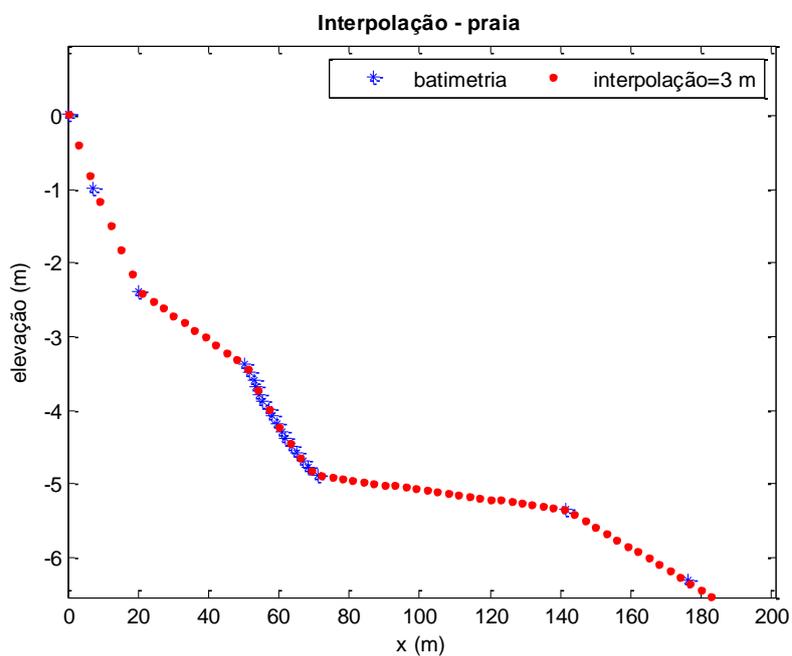


Figura 38 – Perfil da praia, entre  $x = 0$  m e  $x = 200$  m, com e sem interpolação, referente ao nível médio do mar.

Para uma comparação mais realista, entre os dados observados de  $H_s$  durante a campanha e os valores calculados pelo modelo, tendo os valores observados da campanha os efeitos da maré, introduziu-se a maré no cálculo. Para tal, realizou-se uma síntese harmónica considerando as duas componentes principais M2 e S2, lunar e solar, respetivamente, ajustando os valores das amplitudes e fases para se reproduzir a maré nos dias da campanha nas preias-mar (ver Figura 39 e Tabela II).

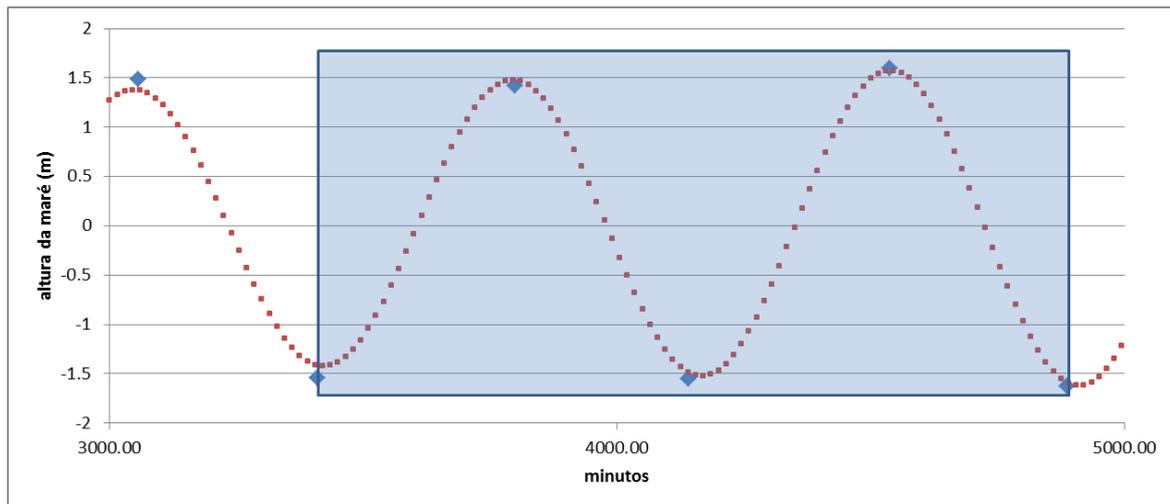


Figura 39 – Síntese harmónica da maré para as 00h00 do dia 6 de Março de 2012. Zona a sombreado – os dois ciclos de maré abrangidos pela campanha na Galé.

De seguida seleccionaram-se, nos dados da boia ondógrafo de Faro, os respetivos valores de altura significativa e período da ondulação para cada preia-mar da campanha de campo. Estes valores, em intervalos de 10 minutos foram extrapolados para intervalos de 15 minutos, visto os dados apresentados e analisados da campanha estarem em intervalos de 15 minutos. Para os valores da elevação da superfície livre associados à maré, também se procedeu de igual maneira. Para a direção da ondulação consideraram-se os valores correspondentes aos instantes de cálculos.

A extrapolação dos valores da altura significativa, período da ondulação e da altura da maré, foram realizadas para cada preia-mar, para a plataforma e praia, pois o espaço temporal das preias-mar não era o mesmo para os dois locais (plataforma e praia). O modelo tem como resultado final a altura da onda tendo em conta os processos de empolamento, rebentação e dissipação. Sendo assim, comparam-se os valores da altura significativa da onda calculados pelo modelo no local de cada PT com os valores observados na campanha em função do tempo, tendo como referência as 00h00 do dia 8.

A Figura 40 refere-se aos sensores instalados na plataforma rochosa: PT1, PT2 e PT3. Nesta figura é possível ver que o PT1 é o que está mais ao largo e esteve durante mais tempo submerso, apresentando um maior registo, ao contrário do PT3 que está mais próximo da costa e com um registo com menor duração. No primeiro ciclo de maré, há uma boa resposta do cálculo do modelo numérico face aos resultados observados, embora no segundo ciclo haja um pequeno desvio entre os valores calculados e observados de cerca de 20 cm.

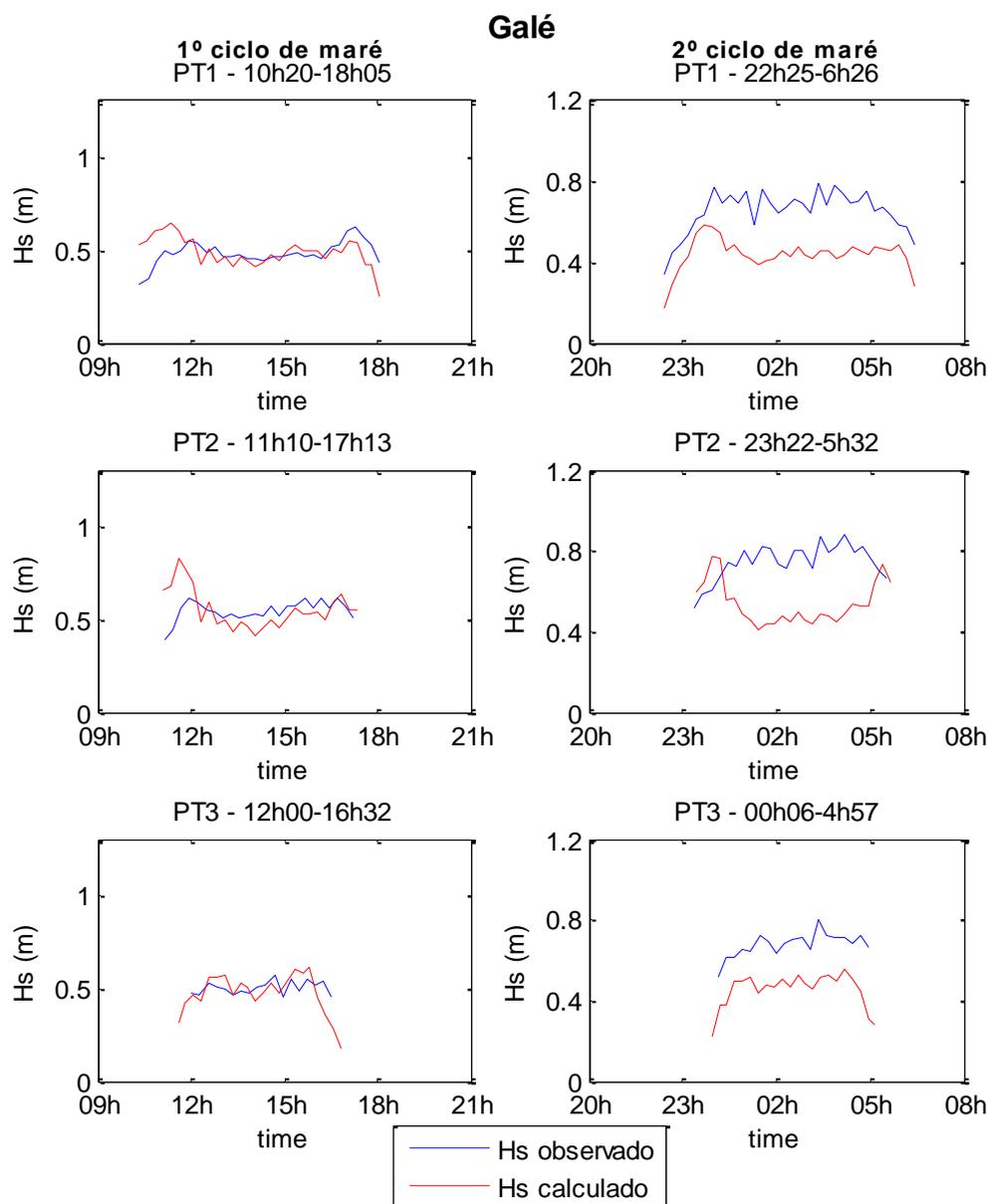


Figura 40 – Gráficos da altura significativa da onda,  $H_s$ , em função do tempo (00h00 do dia 8) para os dois ciclos de maré na plataforma rochosa da praia da Galé.

Na Figura 41, estão representados os sensores PT4, PT5 e PT6 localizados na areia. Para estes, o modelo apresenta outro tipo de resposta, nomeadamente para o PT4, cujos valores de altura significativa calculados pelo modelo são superiores no início e fim do registo das duas preias-mar. Como nos valores calculados para a plataforma, há desvio do primeiro para o segundo ciclo de cerca de 20 cm. Para o PT5 há uma boa resposta no cálculo do modelo para a primeira preia-mar e um desvio de 20 cm para a segunda preia-mar. O PT6 é o que apresenta um menor registo na praia, visto estar menos tempo submerso devido à sua localização na praia. A diferença entre os valores calculados e observados no segundo ciclo não é tão evidente como nos restantes sensores.

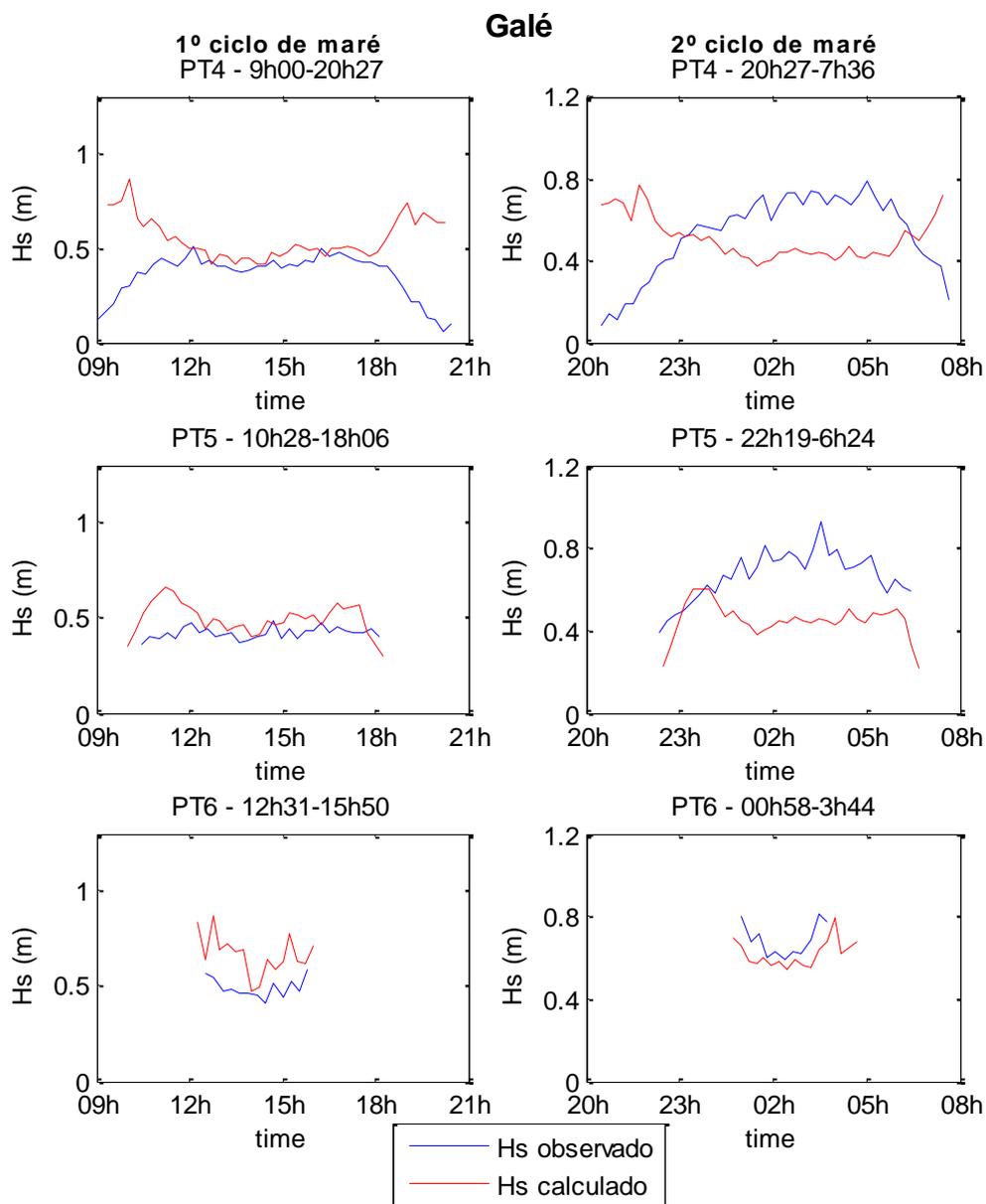


Figura 41 – Gráficos da altura significativa da onda,  $H_s$ , em função do tempo (00h00 do dia 8) para os dois ciclos de maré na areia da praia da Galé.

Observando os gráficos das duas figuras anteriores, verifica-se de um modo geral e para o primeiro ciclo de maré que os valores calculados são mais próximos dos observados quando o nível da maré está no máximo e/ou perto do máximo, coincidindo com os valores do meio do registo no gráfico. Há uma maior diferença nos valores observados e calculados no início e fim da preia-mar ou seja no início da enchente e no fim da vazante, respetivamente. No segundo ciclo de maré, a diferença é 20 cm.

Na tentativa de explicar as diferenças da altura significativa observada na campanha e a calculada pelo modelo no segundo ciclo de maré, comparou-se a elevação da superfície livre simulada pelo modelo, relativamente ao nível médio do mar para cada um dos seis sensores e nos dois ciclos de maré com a elevação da superfície livre medida em cada PT. Os resultados estão ilustrados nas figuras 42 e 43. Verifica-se na Figura 42, correspondente ao primeiro ciclo, que a diferença entre a elevação da superfície livre referente à maré e à medida no sensor é pequena comparativamente à registada no segundo ciclo de maré, onde é visível uma diferença um pouco maior. A Tabela IX apresenta os valores das diferenças calculadas. Assim, é possível verificar que de um ciclo para outro, a diferença no nível máximo da maré é de 10 cm e, confirmar esta mesma diferença para os sensores entre ciclos.

As diferenças existentes entre as curvas podem ser devidas a algum tipo de erro na referenciação dos instrumentos, tendo este erro influência nas diferenças entre a altura da maré da boia ondógrafo e na altura da superfície livre medida pelo sensor.

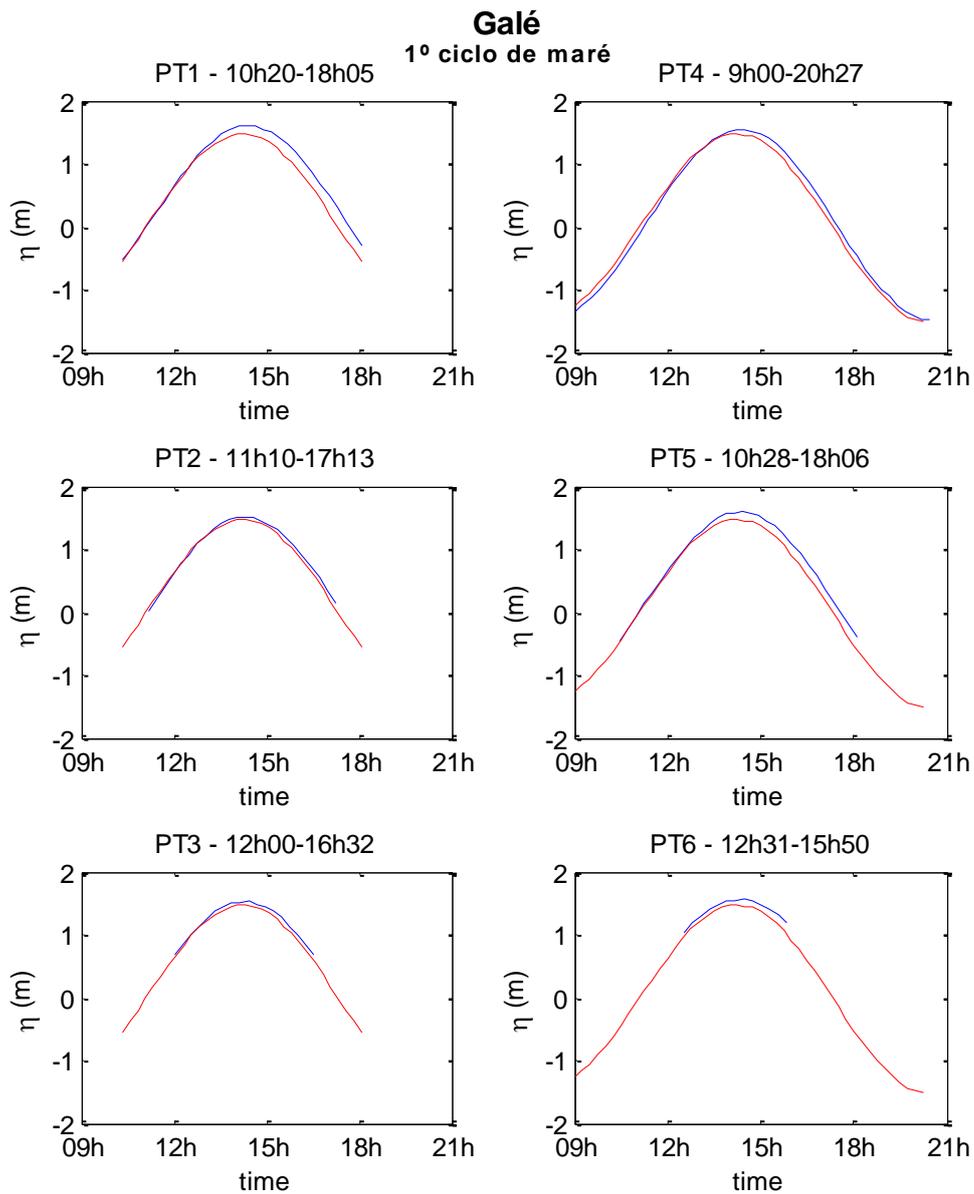


Figura 42 – Elevação da superfície livre ( $\eta$ ) relativamente ao nível médio do mar no primeiro ciclo. Linha azul – medição do PT; linha vermelha – maré astronómica em Faro.

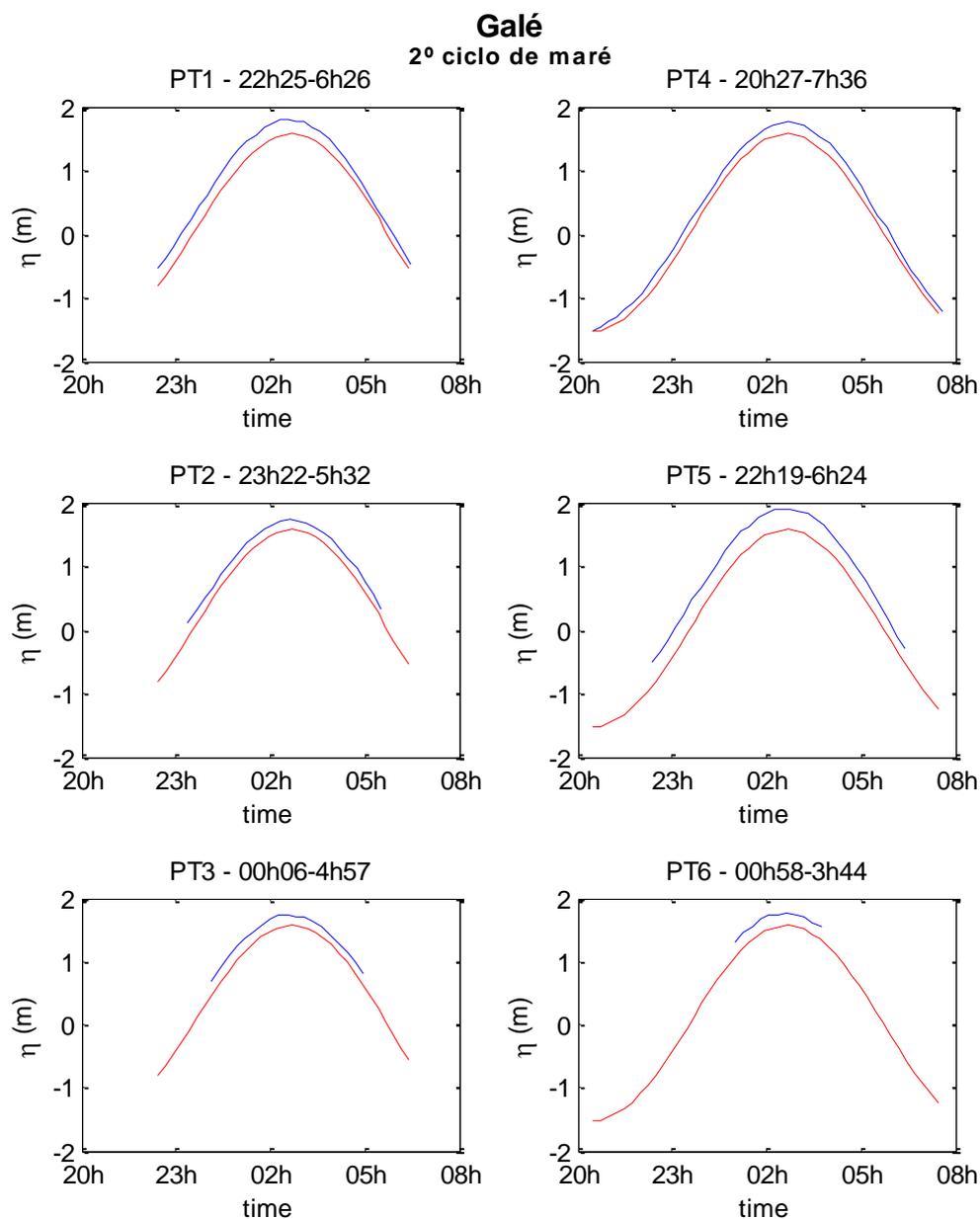


Figura 43 – Elevação da superfície livre ( $\eta$ ) relativamente ao nível médio do mar no segundo ciclo. Linha azul – medição do PT; linha vermelha – maré astronómica em Faro.

Tabela IX – Diferenças em centímetros entre o valor máximo da elevação da superfície livre de cada PT e o valor máximo de maré,  $\eta$  calculado pela síntese harmónica para cada preia-mar.

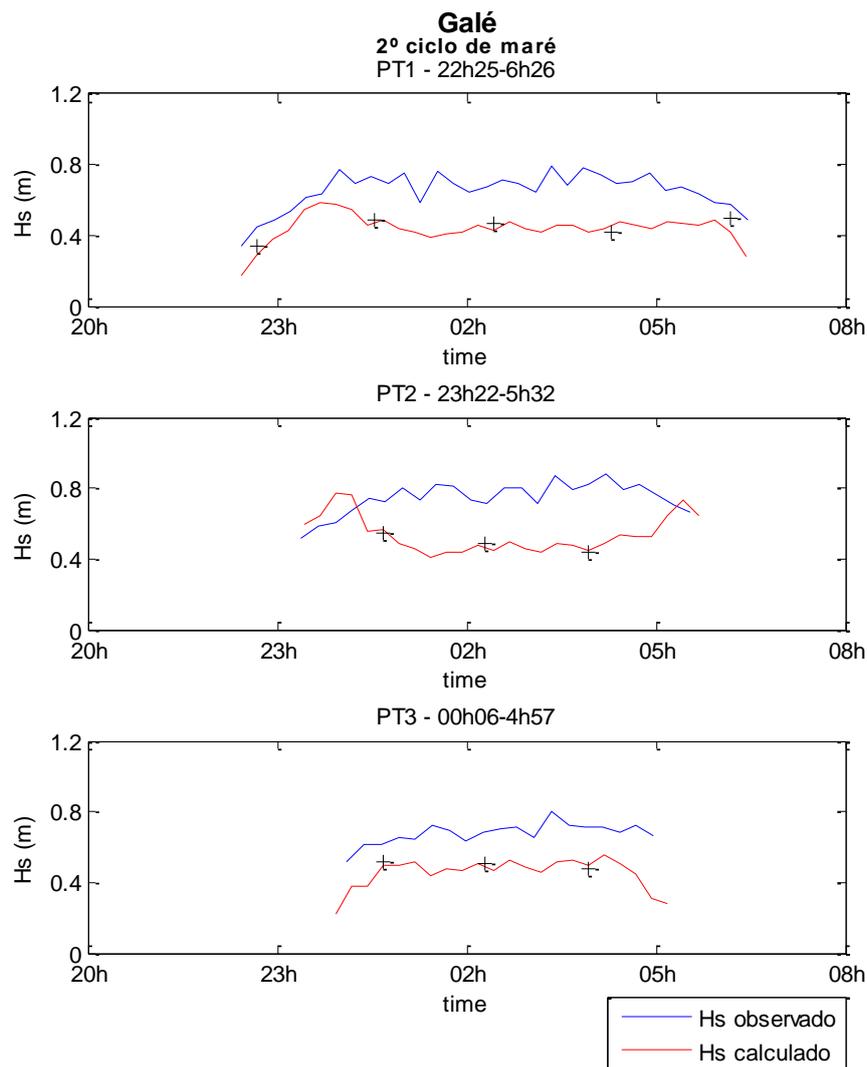
Sensores	$\eta = 1.47 m$	$\eta = 1.57 m$
	PM1	PM2
PT1	13	23
PT2	3	13
PT3	3	13
PT4	8	19
PT5	13	33
PT6	8	18

Para perceber o porquê de o modelo no segundo ciclo não corresponder de maneira semelhante ao primeiro ciclo, escolheram-se cinco instantes da maré da segunda preia-mar para a plataforma: um ponto no máximo de altura da maré e quatro durante a enchente (dois) e na vazante (dois), aos quais foi adicionado um valor constante de 15 cm ao nível médio (ver Tabela X). Calculou-se posteriormente o valor da altura significativa dos sensores posicionados na plataforma para comparar com os resultados anteriores.

Tabela X – Pontos em diferentes instantes da maré da segunda preia-mar relativa à plataforma.

$H_s$ (m)	$T$ (s)	$\eta + 0.15$ (m)	$\theta_0$ (°)
0.49	4.20	-0.50	22.50
0.49	4.70	1.00	22.50
0.51	4.20	1.72	22.50
0.44	4.45	1.41	22.50
0.57	3.70	-0.21	22.50

A Figura 44 mostra-nos que independentemente de se ter aumentado o nível médio da superfície livre, o resultado é muito idêntico ao anterior. Este resultado sugere que as ondas incidentes da boia ondógrafo de Faro, que estão a ser impostas no modelo, não são representativas daquele local para aquele ciclo de maré.



**Figura 44 – Representação da altura significativa da onda, observada pelos sensores e calculada pelo modelo, para os sensores localizados na plataforma rochosa durante o segundo ciclo de maré e dos cinco pontos com um aumento de 15 cm no nível médio (+).**

Como descrito no capítulo 2, o modelo numérico integra três critérios de rebentação. Para se perceber a resposta do modelo quanto à rebentação, nomeadamente o número de rebentações e o local onde a onda rebenta, compararam-se as soluções numéricas obtidas quando os critérios de Battjes e Janssen, Hansen e Svendsen foram considerados.

As figuras seguintes descrevem, para diferentes elevações de maré ( $\eta = 1.48$  m;  $\eta = 0.52$  m e  $\eta = -0.38$  m), para uma onda ( $H_s = 0.50$  m;  $T = 4.00$  s e  $\theta_0 = 22.50^\circ$ ) que foi mais frequente durante a campanha de campo e para cada morfologia (plataforma e praia) na Galé, o número de rebentações e o local de rebentação consoante o critério a ser utilizado – Figura 45 e Figura 46 – nestas estão identificadas a posição de cada sensor.

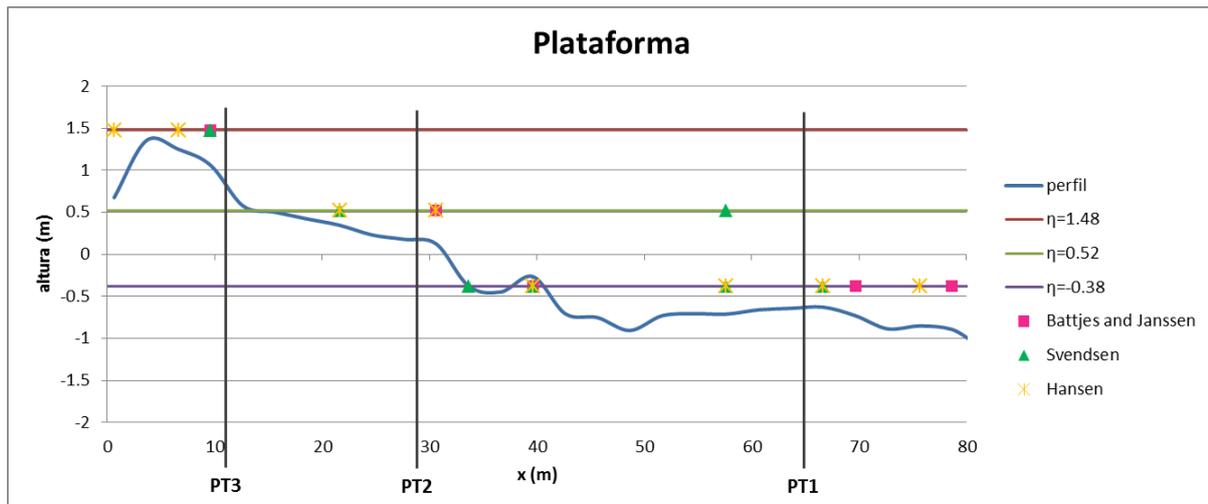


Figura 45 – Representação do local e o número de rebentações para os três níveis de maré dos critérios de rebentação na plataforma rochosa.

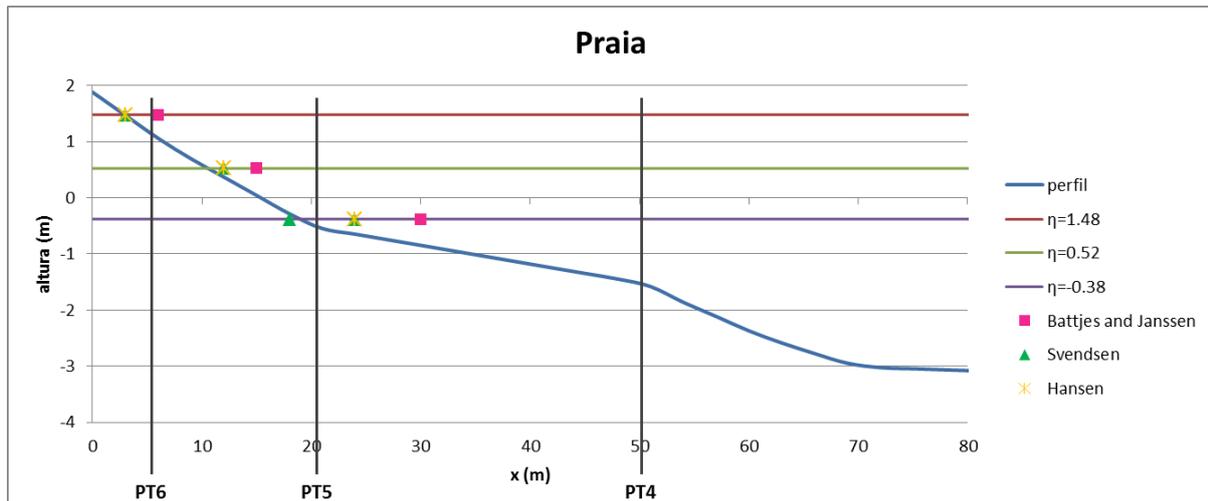


Figura 46 – Representação do local e o número de rebentações para os três níveis de maré dos critérios de rebentação na praia.

Sendo assim, é possível verificar que no menor nível de  $\eta = -0.38$  m as ondas rebentam mais ao largo e à medida que o nível sobe, a rebentação ocorre cada vez mais perto da costa. Na plataforma, é para o nível mais baixo da maré que existem mais rebentações. No perfil da praia, o primeiro ponto de rebentação é sempre o mesmo para os critérios Svendsen e Hansen. Este perfil contempla menos rebentações comparativamente ao da plataforma. Isto deve-se ao facto de os declives e as batimetrias das duas morfologias serem muito distintas: a praia tem um declive mais acentuado, ao contrário da plataforma que tem um perfil de fundo mais irregular e que reúne condições para existirem mais rebentações da onda.

Do cálculo anterior também resultaram as tabelas XI e XII, onde se apresentam os valores da altura significativa em cada PT para os mesmos casos e critérios de rebentação.

Tabela XI – Valores de  $H_s$  para cada PT e critério de rebentação em diferentes níveis de elevação da maré na plataforma.

	Plataforma								
	$\eta = 1.48 \text{ m}$			$\eta = 0.52 \text{ m}$			$\eta = -0.38 \text{ m}$		
	Battjes e Janssen	Svendsen	Hansen	Battjes e Janssen	Svendsen	Hansen	Battjes e Janssen	Svendsen	Hansen
$H_s \text{ (m)}$									
<b>PT1</b>	0.46	0.46	0.46	0.49	0.49	0.49	0.38	0.43	0.38
<b>PT2</b>	0.49	0.49	0.49	0.48	0.53	0.55	--	--	--
<b>PT3</b>	0.51	0.51	0.61	0.31	0.40	0.39	--	--	--

Tabela XII – Valores de  $H_s$  para cada PT e critério de rebentação em diferentes níveis de elevação da maré na praia.

	Praia								
	$\eta = 1.48 \text{ m}$			$\eta = 0.52 \text{ m}$			$\eta = -0.38 \text{ m}$		
	Battjes e Janssen	Svendsen	Hansen	Battjes e Janssen	Svendsen	Hansen	Battjes e Janssen	Svendsen	Hansen
$H_s \text{ (m)}$									
<b>PT4</b>	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.49	0.49	0.49
<b>PT5</b>	0.46	0.46	0.46	0.48	0.50	0.50	0.44	0.64	0.60
<b>PT6</b>	0.61	0.61	0.61	0.31	--	--	--	--	--

Nestas tabelas verifica-se que os valores da altura significativa para cada critério de rebentação para o mesmo PT são muito semelhantes, excetuando quando o nível da maré toma o valor mais pequeno, existindo pequenas diferenças de altura significativa entre os critérios de Svendsen e Hansen. Considerando, por exemplo, os valores de  $H_s$  da plataforma para  $\eta = 0.52 \text{ m}$  para os critérios de Svendsen e Hansen, verifica-se que para os PT2 e PT3 os valores são superiores quando utilizado o critério de Battjes e Janssen, portanto esses dois critérios dariam uma resposta mais próxima dos valores de  $H_s$  medidos nos sensores.

Para o critério de rebentação de Battjes e Janssen fizeram-se simulações para avaliar a dissipação da onda nas diferentes morfologias da Galé. As condições de ondulação foram

escolhidas de acordo como registo de onda mais frequente durante a campanha de campo, o regime de ondulação característico daquela região e, por fim, uma onda cuja altura seja de tempestade (ver Tabela XIII). A comparação dos resultados numéricos é feita e relacionada entre as duas morfologias.

**Tabela XIII – Condições impostas no modelo de altura significativa, período da onda, valor da maré e ângulo de incidência.**

$H_s$ (m)	$T$ (s)	$\eta$ (m)	$\theta_0$ (°)
		-0.38	
0.50	4.00	0.52	22.50
		1.48	
		-0.38	
1.00	8.00	0.52	22.50
		1.48	
		-0.38	
3.00	12.00	0.52	22.50
		1.48	

As figuras 47 a 60 representam os valores da dissipação da onda e da altura. Os primeiros gráficos referem-se à onda de  $H_s = 0.50$  m, nos gráficos estão representados a posição de cada PT, só para linha de orientação. A dissipação calculada tem a mesma ordem de grandeza. Na Figura 51, é bem visível que o modelo simulou três rebentações, calculando para cada rebentação a dissipação correspondente. O gráfico desta figura está em concordância com a solução da altura da onda, pois após a primeira rebentação,  $x = 80$  m neste caso, a altura da onda quando diminui existe dissipação e quando a altura volta a aumentar para empolar novamente, a dissipação é nula, como acontece em  $x = 73$  m, aproximadamente. Entre a plataforma e a praia, os valores da dissipação são semelhantes, excetuando-se o gráfico da Figura 52, onde a dissipação toma valores mais baixos que os anteriores. Verifica-se que a extensão da zona onde ocorre a dissipação é maior sobre a plataforma do que na praia.

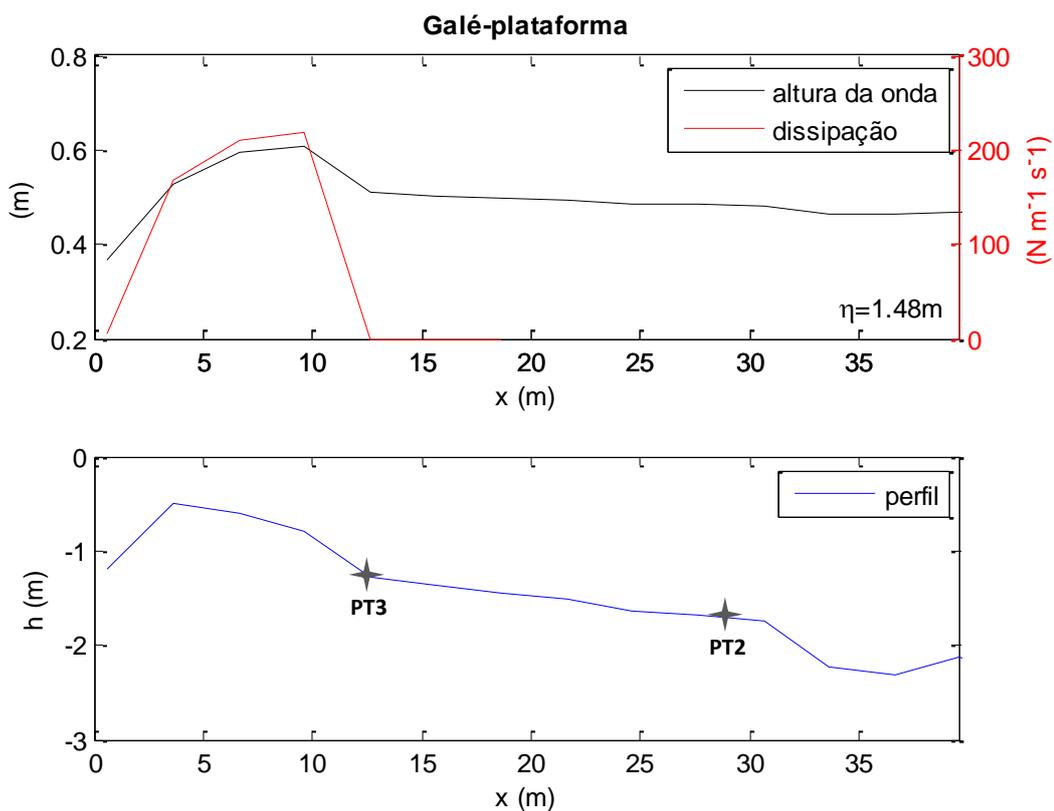


Figura 47 – Dissipação e altura da onda na plataforma para  $\eta = 1.48$  m.

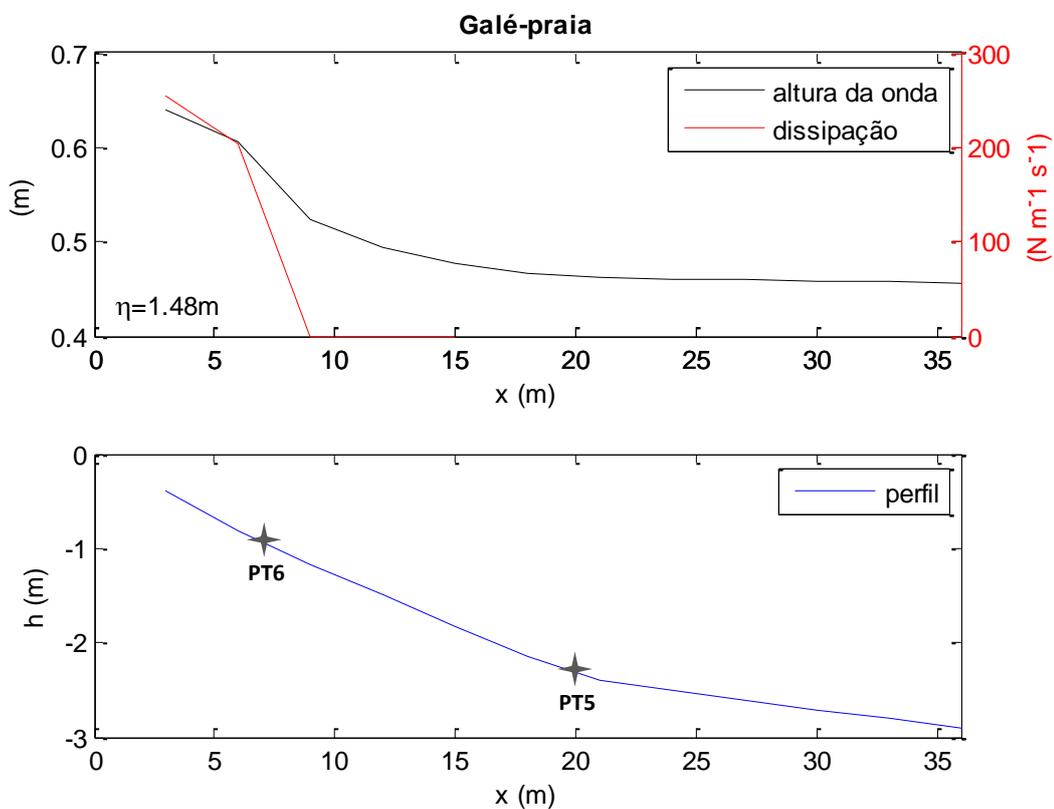


Figura 48 – Dissipação e altura da onda na praia para  $\eta = 1.48$  m.

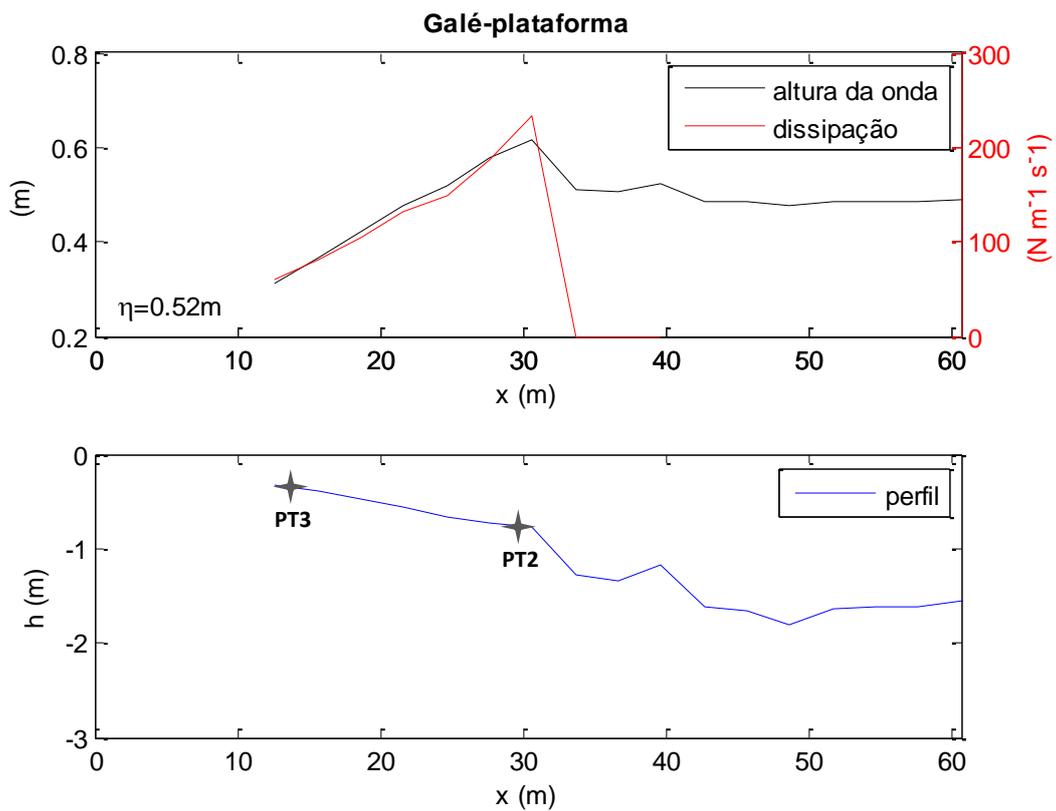


Figura 49 – Dissipação e altura da onda na plataforma para  $\eta = 0.52$  m.

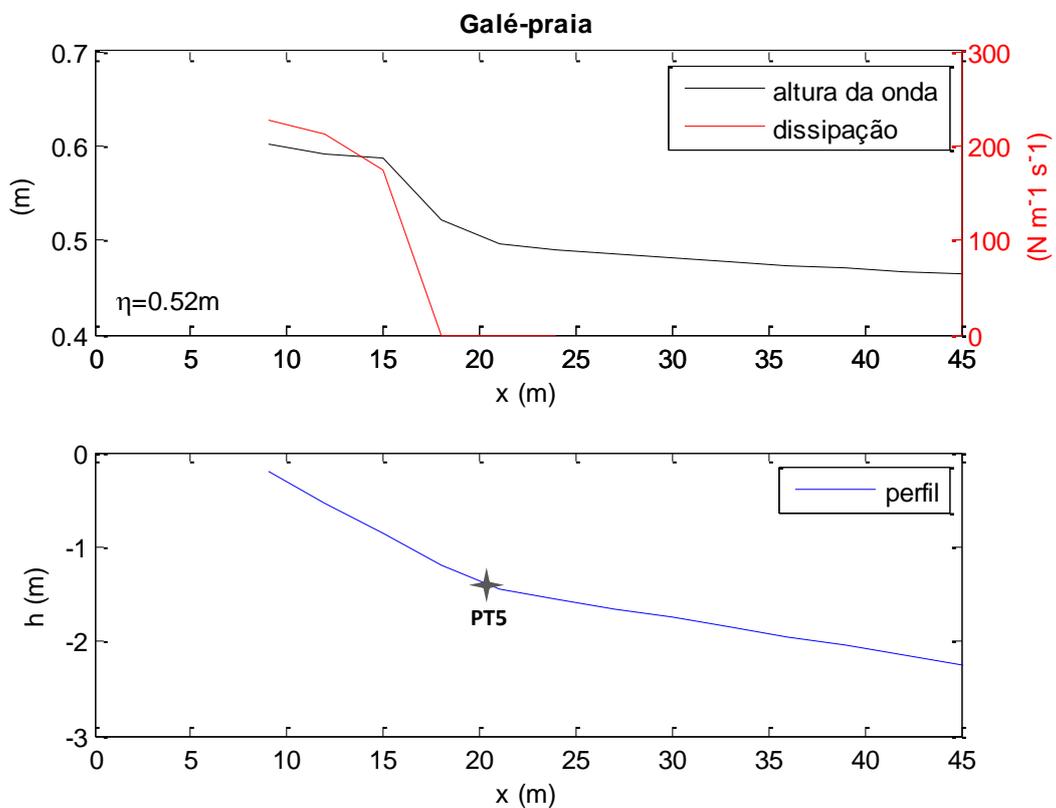


Figura 50 – Dissipação e altura da onda na praia para  $\eta = 0.52$  m.

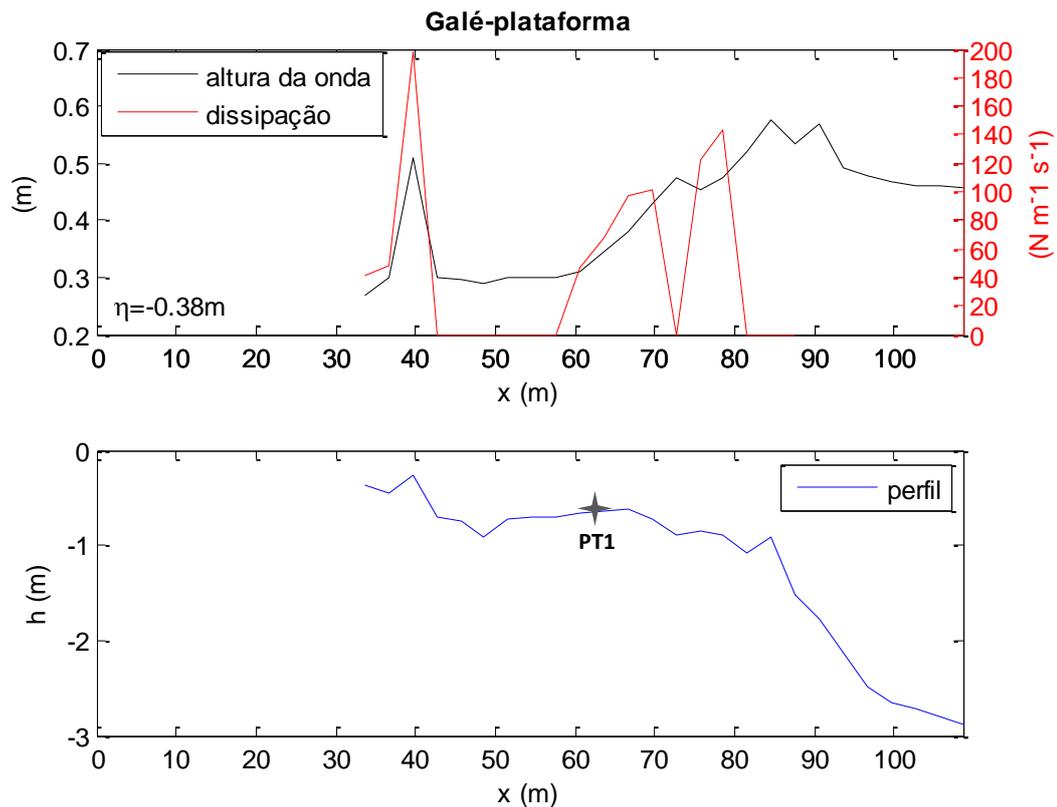


Figura 51 – Dissipação e altura da onda na plataforma para  $\eta = -0.38\text{ m}$ .

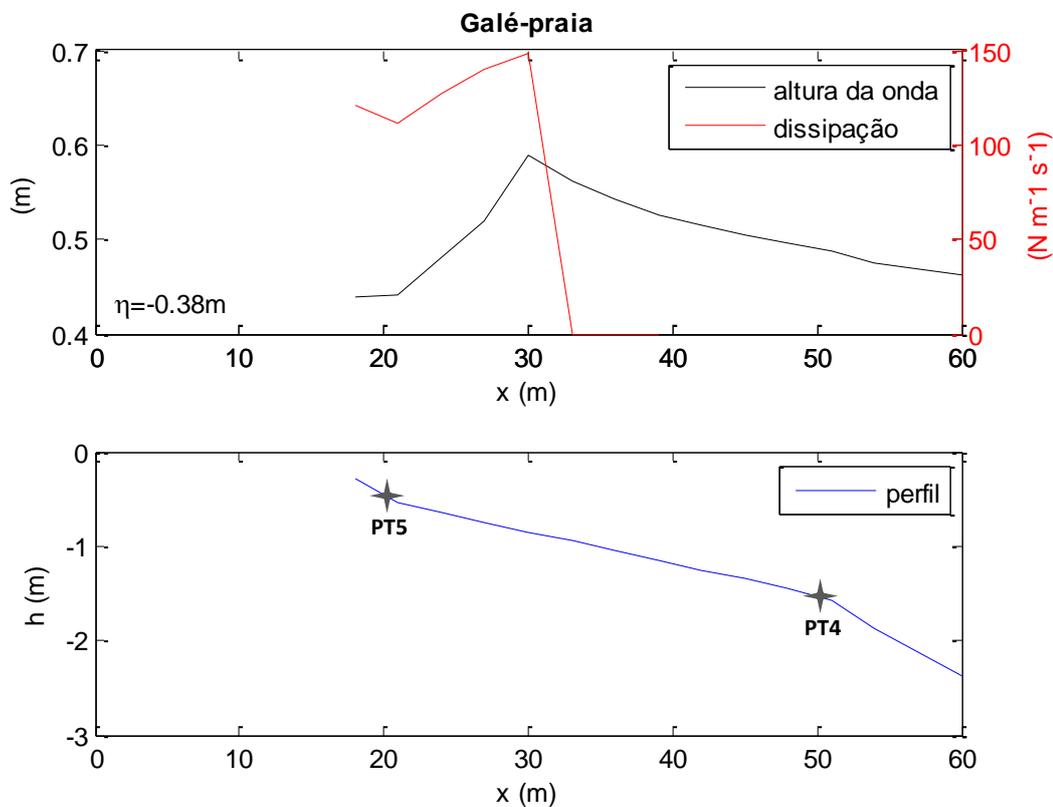


Figura 52 – Dissipação e altura da onda na praia para  $\eta = -0.38\text{ m}$ .

Para ondas de  $H_s = 1.00$  m, os valores da dissipação são agora maiores. A dissipação na praia é mais concentrada e na plataforma prolonga-se mais.

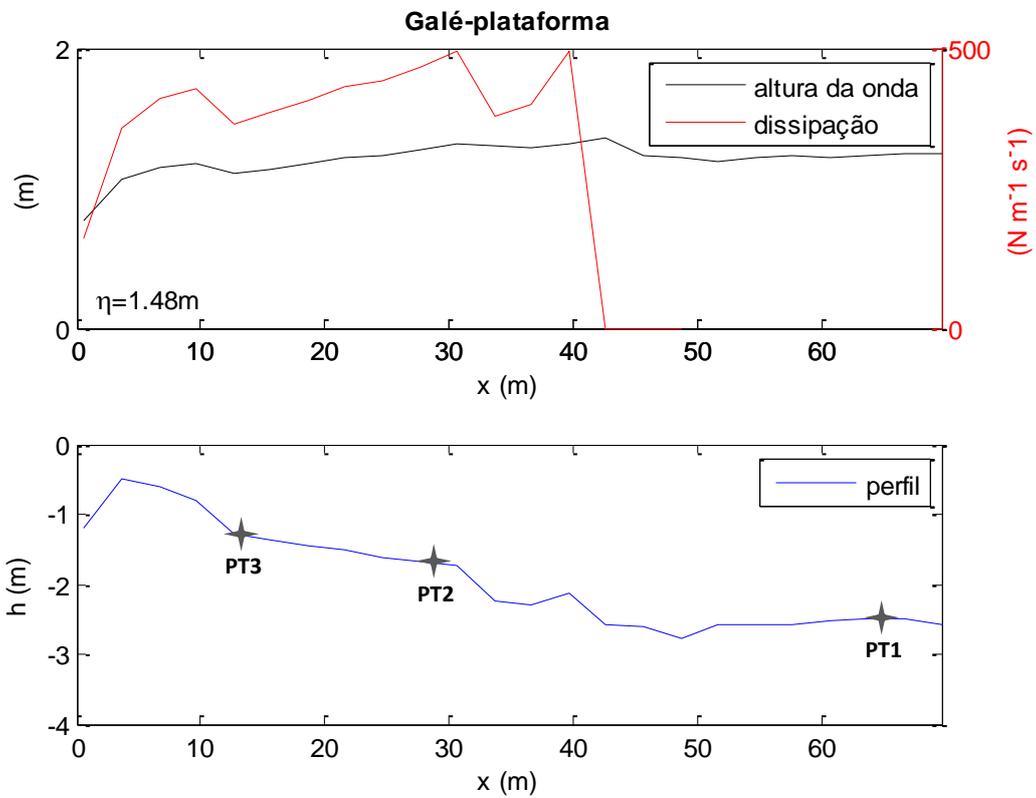


Figura 53 – Dissipação e altura da onda na plataforma para  $\eta = 1.48$  m.

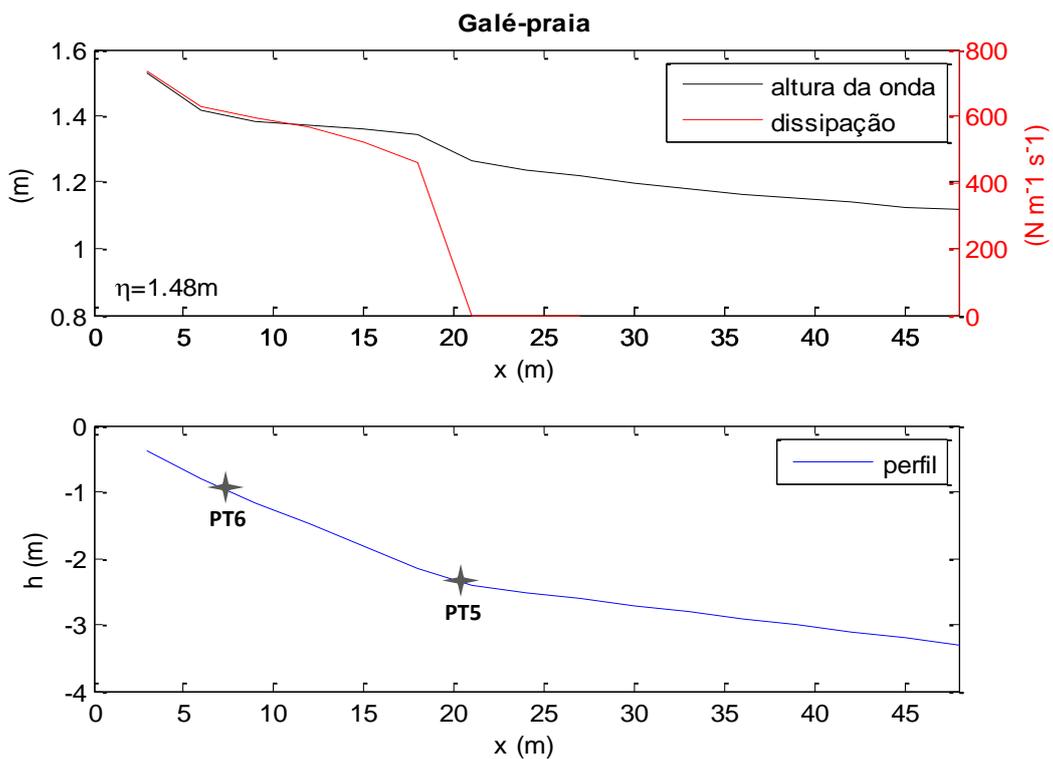


Figura 54 – Dissipação e altura da onda na praia para  $\eta = 1.48$  m.

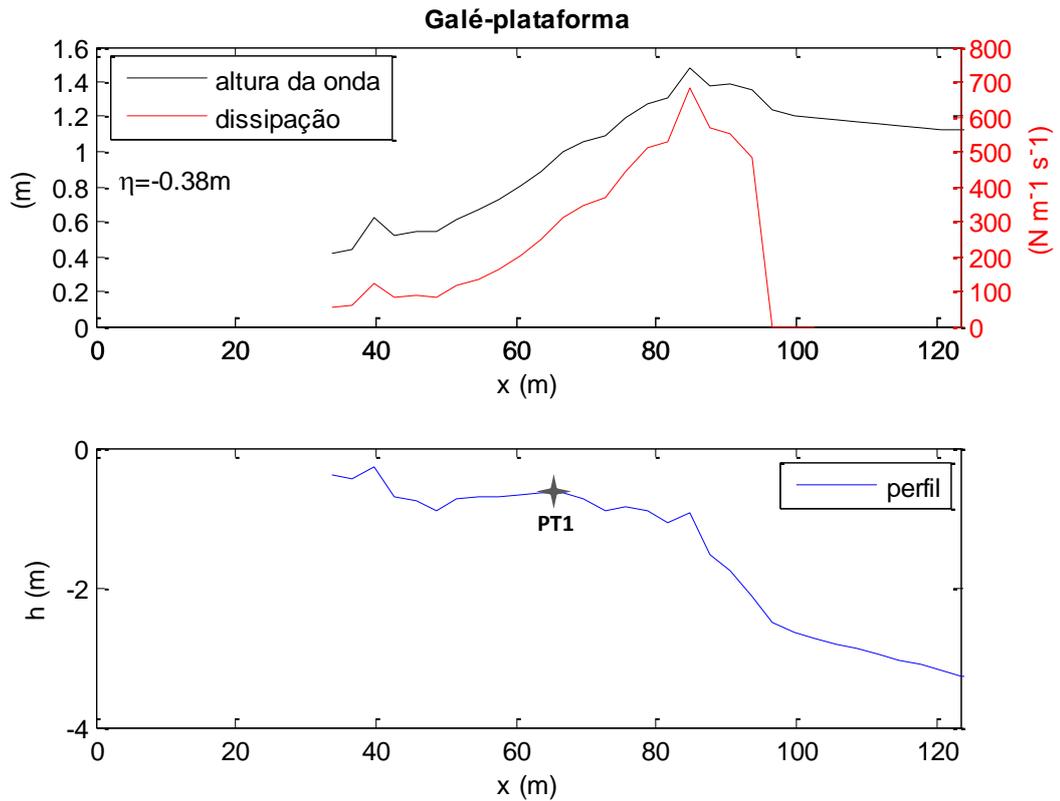


Figura 55 – Dissipação e altura da onda na plataforma para  $\eta = -0.38$  m.

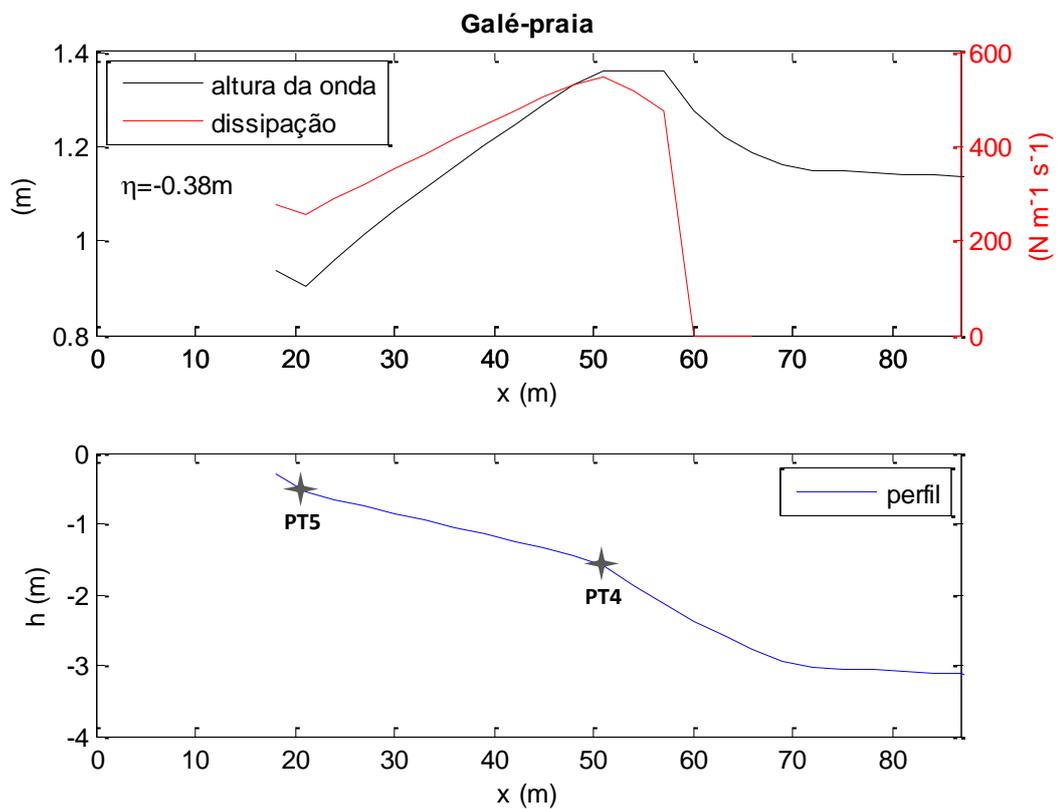


Figura 56 – Dissipação e altura da onda na praia para  $\eta = -0.38$  m.

Para finalizar, as ondas de  $H_s = 3.00$  m , associadas a um início de tempestade contemplam valores de dissipação muito superiores aos apresentados anteriormente e a rebentação para estas ondas começou mais ao largo, tanto na plataforma como na praia.

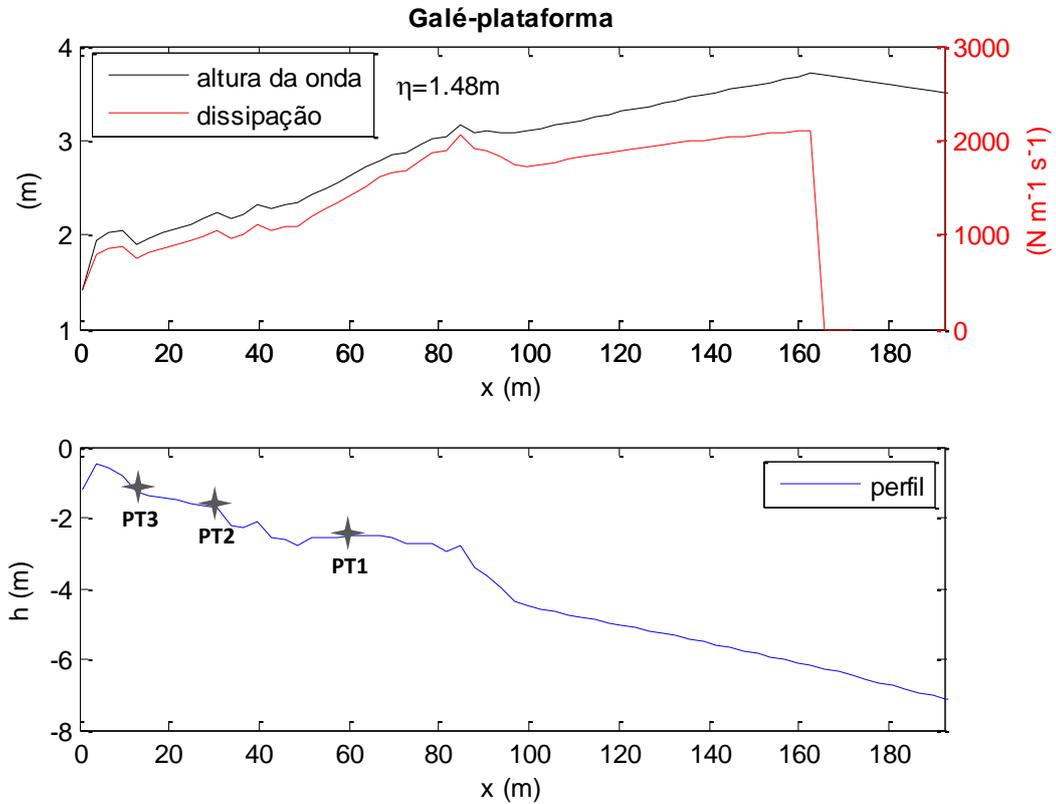


Figura 57 – Dissipação e altura da onda na plataforma para  $\eta = 1.48$  m.

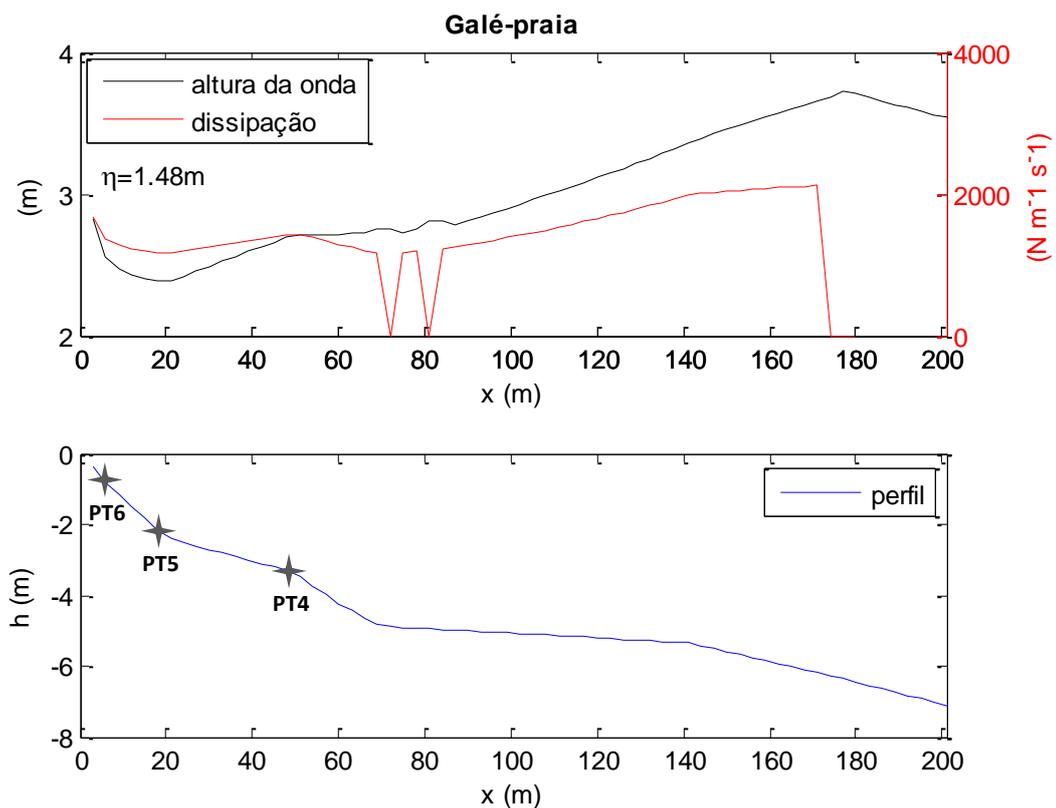


Figura 58 – Dissipação e altura da onda na praia para  $\eta = 1.48$  m.

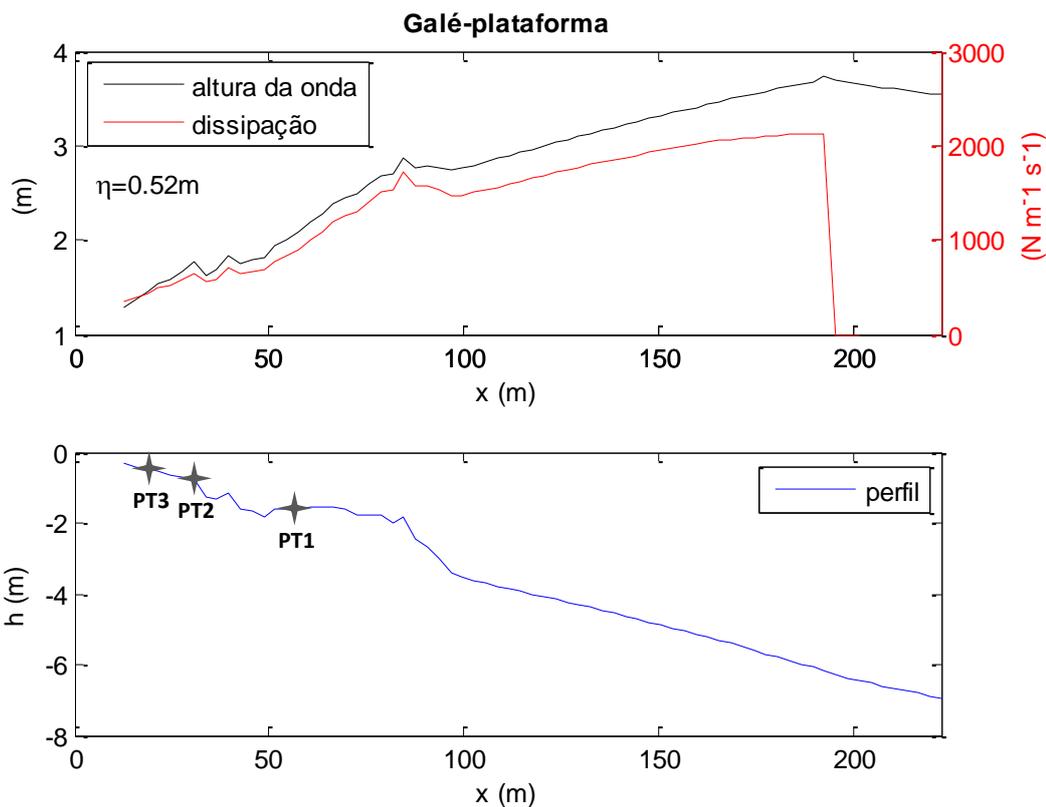


Figura 59 – Dissipação e altura da onda na plataforma para  $\eta = 0.52$  m.

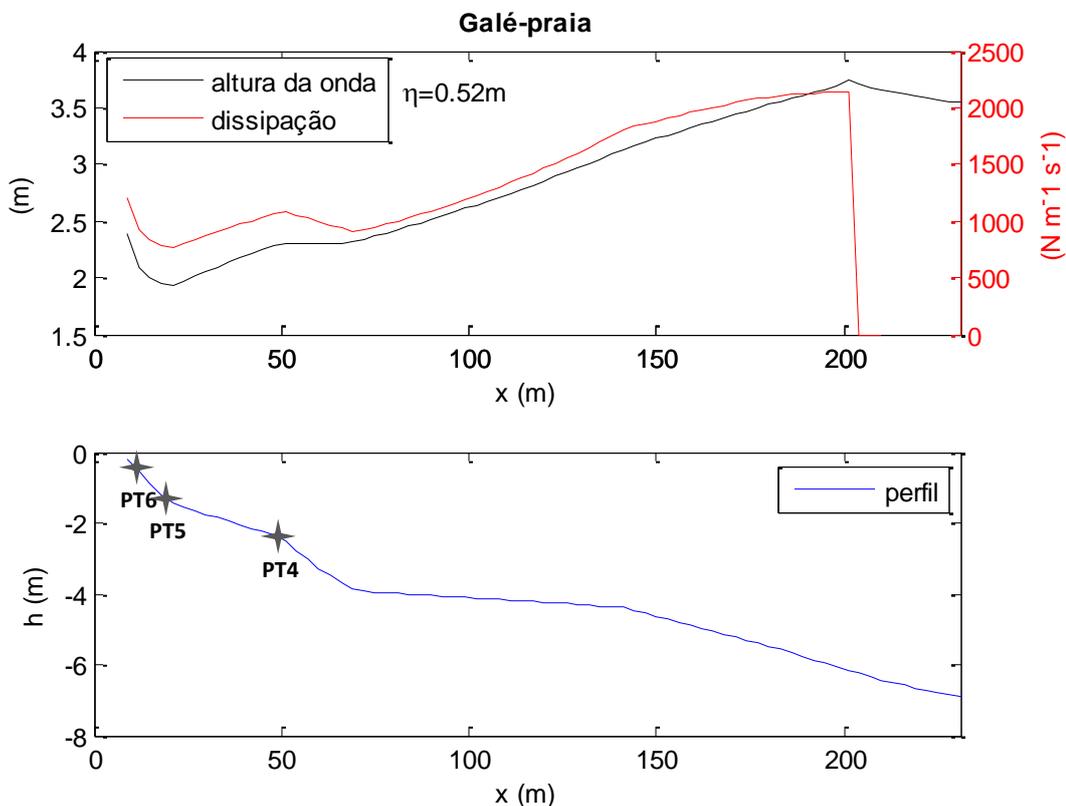


Figura 60 – Dissipação e altura da onda na praia para  $\eta = 0.52$  m.



## 5. CONCLUSÕES

A propagação das ondas junto à costa envolve processos como o empolamento, rebentação e dissipação das ondas. No cumprimento do objetivo proposto foi desenvolvido um modelo numérico de propagação das ondas com base na teoria linear e considerando a amplitude finita da onda.

A utilização dos dados da UPC serviu para validar e testar o modelo em cada um dos processos envolvidos na propagação da onda aqui mencionados. Para este conjunto de dados, o modelo conseguiu descrever o empolamento e, das expressões utilizadas, verificou-se que a equação que contemplava a altura finita da onda, Nielsen (2009), era a melhor opção para integrar o modelo. A equação que descreve o empolamento tem como base a conservação do fluxo de energia que conduz a um aumento não realista da amplitude da onda, pelo que se considerou o processo de dissipação. No modelo numérico os critérios de rebentação e a dissipação conseguiram descrever rebentações múltiplas.

O tratamento dos dados obtidos pelos sensores de pressão na campanha foi efetuado para obtenção das condições a utilizar para introdução no modelo numérico e ver qual a sua resposta a um caso mais realista, utilizando batimetrias de diferentes morfologias (plataforma rochosa e praia) na praia da Galé. O modelo reproduziu muito bem as alturas significativas para o primeiro ciclo de maré, mas para o segundo esteve um pouco abaixo do observado, pois o registo da boia ondógrafo de Faro, na segunda preia-mar, poderá não ser representativo do local.

O modelo talvez reproduziria melhores resultados se os perfis fossem uniformes longitudinalmente, mas na costa algarvia, devido à sua complexa morfologia, o que é representativo de uma ondulação num local pode já não o ser num outro local.

A aplicação do modelo nas duas morfologias serviu para analisar a dissipação da onda nos regimes de ondulação típicos e quantificar a extensão da zona de rebentação. Na praia da Galé verificou-se que a plataforma tem uma extensão de rebentação superior que a da praia, ou seja a dissipação na plataforma é mais gradual.

Em trabalho futuro, o presente modelo constitui uma boa ferramenta para tentar perceber a influência dos diferentes tipos de morfologia de praia na propagação da onda.



## 6. REFERÊNCIAS

- Abreu, T. (2006). *Transporte de sedimentos em zonas costeiras – Parametrização de momentos estatísticos de hidrodinâmica*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre, FCTUC.
- Baldock, T.E., Holmes, P., Bunker, S., Van Weert, P. (1998). *Cross-shore hydrodynamics within an unsaturated surf zone*. Coastal Engineering, Vol. 34, 173-196.
- Battjes, J. A., Janssen, J. P. F. M. (1978). *Energy loss and set-up due to breaking random waves*. Proc. 16<sup>th</sup> Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, Hamburg, Vol. 1, 569-587.
- Bowden, K. F. (1984). *Physical Oceanography of coastal waters*. Ellis Horwood Ser. Mar. Sci. John Wiley&Sons, Inc., Somerset, N. J. 302 pp.
- Costa, M., Silva, R., Vitorino, J. (2001). *Contribuição para o estudo do clima de agitação marítima na costa portuguesa*. 2<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária. Associação Nacional de Navegação. Sines, 20pp.
- Dean, Robert G. and Dalrymple, Robert A. (1991). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd
- Hansen, J. B. (1990). *Periodic waves in the surf zone: Analysis of experimental data*. Coastal Engineering, Vol. 14, 14-41.
- Moura, D., Gabriel, S., Jacob J., Fortes, C.J.E.M., Silva, P.A., Horta, J., Abreu, T. (2012). *Erosion of rocky shores-protection promoted by sandy beaches and shore plataforms*. 2<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Lisboa, Junho 2012.
- Nielsen, P. (2009). *Coastal and Estuarine Processes*. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 29, World Scientific, 360 pp.
- Relatório da campanha de campo EROS, Março de 2012.
- Ruessink, B. G., Walstra D. J. R., Southgate, H.N. (2003). *Calibration and verification of a parametric wave model on barred beaches*. Coastal Engineering, Vol. 3, 139-149.

- Sancho, F. E. P. e Jacob, J. M. (1992). *Estudo da refração-difração na região costeira de Faro-Olhão*. 3º Encontro Nacional de Mecânica Computacional, Coimbra, Portugal, pp. H4.1-H4,13.
- Sancho, F.E., Mendes, P.A., Carmo, J.A., Neves, M.G., Tomasicchio, G.R., Archetti, R., Damiani, L., Mossa, M., Rinaldi, A., Gironella, X. e Sanchez-Arcilla, A. (2001). *Wave hydrodynamics over a barred beach*. Proc. 4th Int. Symp. on Ocean Wave Measurement and Analysis - Waves 2001, S. Francisco, ASCE, 1170-1179.
- Santos, D. P., Abreu, T., Silva, P. A. e Sancho, F. (2012). *Empolamento, rebentação e dissipação das ondas junto à costa*. 2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Lisboa, Junho 2012.
- Silva, P. (2008). *Apontamentos da disciplina de Oceanografia Física*. Universidade de Aveiro.
- Svendsen, Ib. A. (1987). *Analysis of surfzone turbulence*. Journal of Geophysical Research, Vol. 92, 5115-5124.
- Svendsen, Ib A. (2006). *Introduction to Nearshore Hydrodynamics*. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 24, World Scientific.
- Svendsen, Ib. A. and J. B. Hansen. (1976). *Deformation up to breaking of periodic waves on a beach*. ASCE, Proc. 15<sup>th</sup> Int. Conf. Coastal Engineering.
- Weggel, J. R. (1972). *Maximum breaker height*. J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering Division, Vol. 98, No. WW4, 529-548.