



Programa de Projecto do 1ºCiclo
Meteorologia, Oceanografia e Geofísica
Ano lectivo 2009/2010

Título: Simulação da propagação de ondas na Praia de Faro



Orientador UA: Dr. Paulo Silva
Orientadora LNEC: Eng^a. Juana Fortes

Luís Miguel Amante Silva



*Este trabalho foi realizado no âmbito do projecto
"BRISA: Interação entre a rebentação das ondas e o transporte de areias"
PTDC/ECM/67411/2006*

**Índice**

Capítulo 1 – Apresentação	5
1.1 Enquadramento	5
1.2 Conceitos e definições	5
Capítulo 2 – Introdução	7
2.1 Objectivo	7
2.2 Campanhas realizadas no âmbito do Projecto Brisa	7
Capítulo 3 – Fundamentos teóricos das Ondas de Superfície	10
3.1. Teoria Linear de Ondas de Superfície no Oceano	11
3.1.1. Conceitos Básicos	11
3.2.1 Ondas Não-Lineares	13
3.2.2 Ondas Solitárias	14
3.2.3 Principais Transformações das Ondas	14
3.2.4 Refracção	15
3.2.5 Difraccção	15
3.2.6 Empolamento e Rebentação.	16
3.2.7 Zonas Costeiras	17
3.2.8 Efeitos da Rebentação das Ondas nas Regiões Costeiras	17
3.2.9 Alteração da Linha de Costa	18
3.2.10 Tipos de Rebentação	19
3.2.11. Tipos de Quebra de ondas	20
3.2.12 Definição e limites de uma praia	21
3.2.13 Zona morfológica	21
3.2.14 Níveis de Maré	22
Capítulo 4 – Teoria dos Modelos	23
4.1. Modelação Numérica	23
4.2. Formulação do modelo 1D (Teoria Linear)	23
4.3. Formulação do Coulwave	24
Capítulo 5 - Área de estudo	26
Capítulo 6 – Simulação da propagação da ondulação na praia de Faro	28
6.1 Soluções do Modelo 1D	31
6.2 Solução do modelo 2D comparada com a solução 1D, distribuição da altura da onda	33
6.3 Comparação do modelo 1D e 2D nos dados relativos ao PTL2(Honeywell) e PTL1 (Leveltroll)	36
Capítulo 7 – Conclusão	38
Bibliografia	41



Agradecimentos

Agradeço ao Dr. Paulo Silva, por tudo o que me ensinou, pela orientação em toda a fase do projecto e a sua incansável preocupação e disponibilidade.

Agradeço à Dr. Juana Fortes pela sua disponibilidade e empenho na orientação no projecto.

Agradeço aos meus pais e à Andreia por me apoiarem.

Capítulo 1 – Apresentação

1.1 Enquadramento

O presente projecto, é apresentado na Universidade de Aveiro (UA), intitula-se *Simulação da propagação de ondas da praia de Faro, Portugal*. O trabalho enquadra-se no âmbito do projecto de investigação BRISA

O trabalho pretende estudar a simulação da propagação de ondas praia de Faro com base na modelação numérica. Através da modelação numérica espera-se contribuir para um melhor conhecimento de caracterização e simulação numérica de ondas. São considerados dois modelos numéricos, um modelo simples (teoria linear) e o pacote de software, de nome “COULWAVE”, com os quais pretende-se simular os dados de campo.

1.2 Conceitos e definições

Modelo matemático

Representação matemática de um determinado fenómeno físico, isto é, a equação ou conjunto de equações que, de certa forma, descrevem o fenómeno físico.

Modelo Numérico

Representação do Modelo matemático no espaço e no tempo discreto, para a utilização em computador, sendo a modelação numérica o processo de construção do modelo numérico.

Em hidráulica marítima, os métodos numéricos assumem papel fundamental na caracterização da agitação marítima real.

Modelo Físico

Reprodução a escala reduzida de um determinado sistema físico. A modelação física é o processo de construção do modelo físico.

A modelação física tem, á partida, uma vantagem indiscutível em relação á modelação numérica, pois permite que o fenómeno em estudo possa ser observado directamente, por forma visual. Por outro lado, há uma maior flexibilidade na maneira como se podem incluir novos aspectos de simulação num sistema físico. A principal, e muitas vezes determinante, desvantagem do modelo físico em relação ao modelo numérico correspondente, é o seu custo elevado. Outra desvantagem é o aparecimento do chamado efeito de escala, que pode condicionar seriamente o rigor dos resultados.

Modelo Híbrido

Modelo de componentes numéricas e físicas que pretende conjugar algumas das vantagens dos modelos físicos com outras dos modelos numéricos. Realmente, tanto os modelos numéricos como os modelos físicos são actualmente imprescindíveis na análise de problemas complexos, mas ambos tem as suas vantagens e desvantagens, pelo que, de um ponto de vista prático, ou de engenharia, há que utilizar uns ou outros (ou ambos) conforme o fenómeno que se pretende estudar.

Modelação

Processo de construção de um modelo (matemático ou físico). A exploração do modelo para a caracterização e/ou simulação é também designada por modelação.

Simulação

Utilização de um modelo para a visualização da reprodução (artificial) do fenómeno físico, obtenção de dados, etc. Em termos simples, simulação da agitação marítima é o processo que permite a reprodução de ondas de superfície reais numericamente, em computador (simulação numérica), ou num ambiente de laboratório, em modelo físico (simulação física).

Com simulação numérica da agitação marítima, pretende-se obter, sob a forma digital, registos de onda com dadas características representativas dos estados de mar, reais ou conceptuais. Assim, a simulação numérica é geralmente concretizada sob a forma de um registo temporal das elevações da superfície da água, $\eta(t)$, num dado ponto, a que se chamará, daqui em diante, sinal ou simplesmente registo, definido mais abaixo.

Já a simulação e modelação física é a transposição do registo ou registos numéricos para a água de um canal ou de um tanque utilizados em experimentação física, o que permite obter informação estatística, difícil ou impossível de obter matematicamente. A informação que se obtêm da modelação física pode, por sua vez, ser usada para validar modelos numéricos, assim como para isolar o efeito de certas variáveis e parâmetros, uma vez que a simulação física permite trabalhar em condições controladas.

Sinal ou registo

Sinal e registo designam uma função contínua no tempo (representando, por exemplo, a elevação da superfície da água).

Capítulo 2 – Introdução

A quebra da onda é um fenómeno importante na região costeira, ligada a uma série de outros importantes processos costeiros, correntes de deriva litoral, entre outros. A quebra da onda, o transporte de sedimentos e as alterações morfológicas podem ser analisadas para as condições específicas, através de medições de campo. As medições de campo são, no entanto, de difícil execução e limitadas no tempo. O uso de validação de modelos numéricos podem ser de grande ajuda para definir a transformação de ondas em todas as condições de ondas, melhorar a determinação de transporte de sedimentos e as alterações morfológicas.

2.1 Objectivo

O objectivo principal deste trabalho é comparar os resultados do modelo numérico em relação aos dados de campo, a fim de validar os modelos e ganhar de sensibilidade para as diferenças entre as medições e previsões. Foram aplicados dois modelos numéricos para as condições observadas (um modelo 1D baseada na teoria linear, 1DL, e um modelo do tipo não-linear de Boussinesq, COULWAVE, Lynett e Liu, 2004) efectuada a comparação entre dados de campo e os resultados do modelo. Esses esforços têm como objectivo avaliar o desempenho dos modelos utilizados na área de estudo em condições de baixa energia e, de uma maneira geral, contribuir para atingir a abordagem ideal para aplicações do modelo em escalas maiores temporais e espaciais, necessárias para operacionalidade e perspectiva de gestão.

2.2. Campanhas realizadas no âmbito do Projecto Brisa

A caracterização da zona de rebentação é essencial em estudos de hidrodinâmica costeira e de transporte de sedimentos. A localização e a extensão da rebentação são dois dos principais parâmetros porque determinam o balanço sedimentar e a estabilidade das estruturas costeiras. Este projecto tem por objectivo contribuir para a compreensão e modelação numérica dos fenómenos de rebentação das ondas e do transporte de sedimentos em zonas costeiras.

No âmbito de um projecto de investigação intitulado "BRISA – Breaking Waves and Induced Sand Transport, foi desenvolvida uma metodologia para caracterizar as ondas reunindo medições in situ e modelos numéricos de propagação de ondas.

Assim foram efectuadas duas campanhas de campo (Praia de Faro e Costa da Caparica), para obter dados essenciais ao conhecimento da dinâmica da rebentação e ao transporte de sedimentos associado. As campanhas de campo fornecem um conjunto de dados com medições simultâneas de velocidades das partículas, de pressão, e da variação de fundo em diferentes pontos.

Neste trabalho serão tratados os dados relativos à praia de Faro, dados da campanha realizada em Março de 2009, onde se falará mais adiante.

A campanha da Costa da Caparica, foi realizada entre os dias 12 a 14 de Maio de 2010. Tive a oportunidade, e o prazer de participar nesta campanha no âmbito do trabalho do projecto, de modo a que tomasse conhecimento da realização de uma campanha com esta importância. Esta campanha teve o objectivo recolha de dados de campo para prosseguir os trabalhos do projecto Brisa.

Para esse efeito, toda a equipa se empenhou na montagem dos equipamentos para a campanha (equipa constituída por elementos da Universidade de Aveiro, da Universidade do Algarve, da Universidade de Lisboa e do LNEC).

Como se pode ver pela Figura 1, a instalação do equipamento foi planeada de forma a aproveitar a baixa-mar. A medição dos parâmetros hidrodinâmicos e sedimentares foi feita na preia-mar (ciclo vazante->enchente->vazante). A montagem dos equipamentos foi feita numa extensão de 150 metros, aproximadamente, colocando os aparelhos num perfil transversal à linha de costa. Equipamentos, como os transdutores de pressão (PT), varetas com anilhas para verificar até onde a areia deixava de ser mobilizada e assim verificar se houve acreção ou erosão dessa areia, correntómetros para a medição da velocidade e armadilhas de sedimentos fôrâmos equipamentos instalados em diferentes locais desse perfil.

Para cada um dos locais, foram efectuadas medições da velocidade, da pressão e da batimetria/topografia na zona de empolamento e de rebentação. As correntes foram medidas com ADV's e ECM. As medições de pressão e profundidade foram efectuadas com recurso a transdutores de pressão instalados ao longo do perfil submerso. A batimetria foi medida através de uma eco-sonda, sincronizada a RTK-DGPS para correcção de maré em tempo real. A topografia foi adquirida com o RTK-DGPS e também com uma técnica inovadora baseada em fibras ópticas.

O ADV-Acoustic Doppler Velocimeter é um instrumento criado para a medição de velocidade e direcção de correntes marítimas. Utilizaram-se ADV's de 2 e 3 dimensões para a medição dessas componentes. Utilizaram-se sensores de pressão e temperatura, para avaliar estes parâmetros.

Para todos estes equipamentos funcionarem de forma mais adequada, utilizaram-se computadores portáteis para aquisição de dados sincronizados entre si pela hora do Observatório Astronómico de Lisboa.



Figura 1: Fotografias relacionadas com a campanha realizada na praia da Caparica.



Figura 2: Fotografias relacionadas com a campanha realizada na praia da Caparica

Na Figura 2 observa-se um PT colocado junto de uma estrutura, assim como o ADV. A topografia adquirida com o RTK-DGPS, durante a campanha foi registada em cada baixa-mar, em todo o perfil de praia e junto dos equipamentos. Podemos verificar abaixo nesta figura os sensores de pressão e temperatura, e, o computador que adquire os dados da campanha.

Capítulo 3 – Fundamentos teóricos das Ondas de Superfície

As ondas podem ser definidas como manifestações de forças que agindo num fluido tendem a deformá-lo através da acção da gravidade e da tensão superficial, os quais juntos agem de modo a manter o nível da superfície do fluido. Desta forma, as ondas requerem algum tipo de força para que ocorra a sua formação na superfície do fluido; tais forças podem ser causadas pelo vento ou pelo impacto de um objecto no fluido. Na Figura 3 apresenta-se um esquema para uma melhor classificação das ondas. Dependendo da magnitude destas forças, as ondas podem ocorrer com vários tamanhos e formas (Dean e Dalrymple, 1998).

Pond e Pickard (1998) mostraram as principais classes de ondas e as suas causas:

1. *ripples*, ondas de vento e *swell* – originadas pelo efeito do vento na superfície do ar/água;
2. ondas internas – que podem ocorrer quando se verifica variações verticais de densidade.
3. *tsunamis* – geradas por movimentos tectónicos do fundo do mar ou da costa;
4. ondas giroscópicas gravitacionais – (superficiais e internas) de período suficientemente longo para que o efeito de Coriolis seja importante. Existem várias causas, tais como alterações na força do vento, alterações na pressão atmosférica;
5. *Rossby* ou ondas planetárias – de larga escala e longo período, evidenciadas em correntes variadas. Existem várias causas, tais como as variações temporais na tensão do vento;
6. Marés – devidas às interacções das forças gravitacionais da Lua e do Sol.

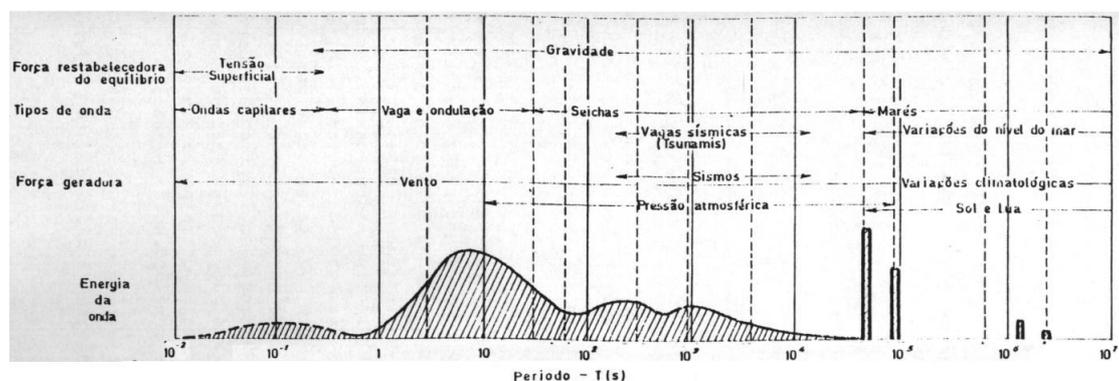


Figura 3: Classificação das Ondas. Fonte: Mota Oliveira, Hidráulica e Obras Marítimas

Na realidade, as alturas das ondas variam aleatoriamente no tempo e no espaço e as propriedades estatísticas das ondas variam diariamente. Estas ondas podem ser geradas por ventos locais ou por tempestades distantes da costa, mas que acabam alcançando a mesma.

Em qualquer discussão sobre ondas, alguns termos são usados para descrever o perfil da onda (ver Figura 4 dos parâmetros de ondas). A altura é a distância vertical entre o fundo da cava e o pico da crista. O comprimento de onda, por sua vez, é a distância horizontal entre duas cavas ou cristas sucessivas. O período da onda é o tempo gasto para duas cristas ou duas cavas sucessivas passarem por um ponto fixo.



3.1. Teoria Linear de Ondas de Superfície no Oceano

3.1.1. Conceitos Básicos

As ondas de superfície reais são inerentemente não-lineares. Porém, na teoria linear, assume-se que a amplitude das ondas é infinitamente pequena quando comparada com a profundidade (comprimento de onda) e por consequência a superfície do mar é quase plana. Para simplificar, assume-se que o fluxo é bidimensional e que as ondas viajam numa só direcção. Assume-se também, que o efeito de Coriolis e a viscosidade são negligenciáveis (Stewart, 2005). Fredsøe e Deigaard (1997) também assumem que a cinemática das ondas são usualmente descritas pela teoria potencial requerendo que o fluido seja invíscido e irrotacional. Nesse caso, um potencial pode ser introduzido, no qual está relacionado ao campo de velocidade por,

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x}; v = \frac{\partial \Phi}{\partial y}; w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (1)$$

onde x e y são as coordenadas horizontais, e z é a coordenada vertical. A origem dos sistemas de coordenadas é localizada no leito marinho. u, v, w são as componentes da velocidade nas direcções x, y, z . Pela introdução da equação 1.1 na equação da continuidade

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

é obtida a equação de Laplace

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \nabla^2 \Phi = 0 \quad (3)$$

As condições de fronteira são:

- 1) A velocidade do fluxo perpendicular ao fundo é zero. Para um fundo de plano horizontal é determinado:

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \text{ para } z = 0 \quad (4)$$

- 2) Uma partícula do fluido localizada na superfície livre deve permanecer na superfície livre:

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial z} \text{ para } z = h + \eta \quad (5)$$

Em que h é a profundidade média da água e η é a elevação da superfície livre.

- 3) A pressão na superfície da água deve ser igual á pressão atmosférica, pelo que a equação de Bernoulli pode ser escrita como:

$$h + \eta + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2g} + \frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = C(t) \text{ para } z = h + \eta \quad (6)$$

em que é apenas função do tempo, t .

Fredsøe e Deigaard (1997) mostraram que, como a elevação da superfície é pequena quando comparado com uma dimensão típica, por exemplo, o comprimento da onda L , o problema

pode ser linearizado e resolvido analiticamente. A solução para o problema com as condições de fronteira apresentadas é a seguinte:

$$\begin{aligned}\Phi &= -\frac{H g \cosh kz}{2 w \cosh kh} \sin(kx - \omega t) \\ \eta &= \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \\ C_f^2 &= \left(\frac{\omega}{k}\right)^2 = \frac{g}{k} \tanh kh \\ u &= \frac{\pi H \cosh kz}{T \sinh kh} \cos(kx - \omega t) \\ w &= -\frac{\pi H \sinh kz}{T \sinh kh} \sin(kx - \omega t)\end{aligned}\quad (7)$$

Esta é a solução linear de onda, também chamada de onda de Airy ou onda de primeira ordem de Stokes, em que H é a altura da onda (distância da cava à crista), k é o número de onda, e ω a frequência angular (ver Figura 4), k e ω sendo definido como:

$$\begin{cases} k = \frac{2\pi}{L} \\ \omega = \frac{2\pi}{T} \end{cases}\quad (8)$$

A relação de dispersão, que relaciona a frequência angular (ω) com o número de onda (k), pode ser escrita como (Stewart, 2005):

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad (9)$$

onde h é a profundidade de água e g é a aceleração devido á gravidade. Conforme a relação entre o comprimento de onda e a profundidade local obtém-se expressões aproximadas da relação de dispersão:

- Aproximação de água profunda: é válida se a profundidade de água h é muito maior que o comprimento de onda L . Neste caso, $h \gg L$, $kh \gg 1$ e $\tanh kh = 1$. Então a equação (9) escreve-se como $\omega^2 = gk$.
- Aproximação de pequenas profundidades: é válida se a profundidade da água h é muito menor que o comprimento de onda L . neste caso, $h \ll L$, $kh \ll 1$ e $\tanh kh = kh$. Então a equação fica: $\omega^2 = gk^2 h$.

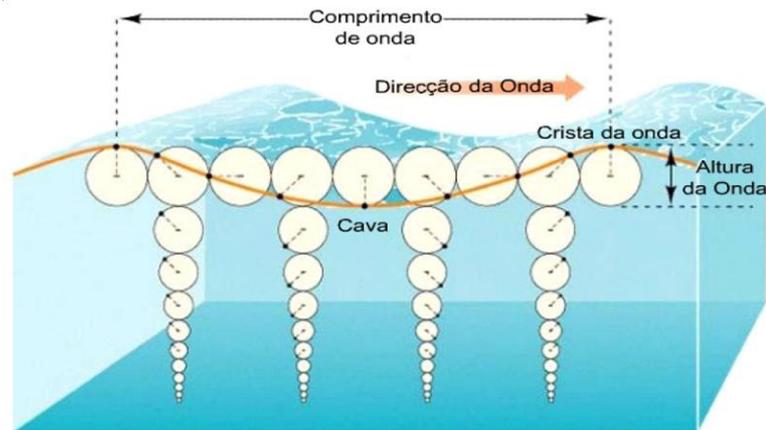


Figura 4: parâmetros das ondas. Fonte: Coleman (2001)

Velocidade de Fase

A velocidade de fase da onda, C_f , é a velocidade com que a onda se propaga e é definida como (Stewart, 2005):

$$C_f = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (10)$$

Como consequência das aproximações da equação de dispersão, obtemos:

- velocidade de fase em águas profundas: $C_f = \sqrt{\frac{g}{k}} = \frac{g}{\omega}$
- velocidade de fase em águas pouco profundas: $C_f = \sqrt{gh}$

Como pode ser observada nas equações acima, em águas profundas, a velocidade de fase depende do comprimento da onda ou da frequência da onda, isto é, uma onda com um maior comprimento de onda viaja mais rápido. Em águas pouco profundas a velocidade de fase depende somente da profundidade local.

Velocidade de Grupo

A velocidade de grupo é a velocidade de propagação da energia da onda. A definição da velocidade de grupo é:

$$C_g = \frac{\Delta\omega}{\Delta k} \quad (11)$$

Usando a equação de dispersão na equação anterior, obtém-se para a velocidade de grupo (Fredsoe e Deigaard, 1997):

$$C_g = C_f + k \frac{dC_f}{dk} = \frac{C_f}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \quad (12)$$

em que h é a profundidade média

Usando as aproximações da equação de dispersão, temos que:

- velocidade de grupo em águas profundas: $C_g = \frac{g}{2\omega} = \frac{C_f}{2}$
- velocidade de grupo em águas pouco profundas: $C_g = \sqrt{gh} = C_f$

Nota-se que, em águas profundas, a velocidade de grupo é menor que a velocidade de fase. Desta forma, com as definições anteriormente descritas verifica-se que a dispersão das ondas pode ser usada para identificar tempestades. Como uma tempestade distante produz ondas de muitas frequências, as ondas de baixas frequências viajam mais rapidamente e alcançam a costa mais depressa do que as ondas de alta frequência. Quanto mais longe da tempestade, maior o atraso entre as ondas de diferentes frequências (Stewart, 2005).

3.2 Ondas Não-Lineares

3.2.1 Conceitos Básicos

As propriedades das ondas de superfície do oceano foram apresentadas assumindo que a amplitude de onda é muito pequena. Na verdade, a amplitude não é pequena, mas sim o produto ka , e as propriedades da onda podem ser expandidas numa série de potências de ka (Stokes, 1847 e Stewart, 2005). O cálculo das propriedades da onda de amplitude finita resulta numa série de Fourier:

$$\eta = a \cos(kx - \omega t) + \frac{1}{2} ka^2 \cos^2(kx - \omega t) + \frac{8}{3} k^2 a^3 \cos^3(kx - \omega t) + \dots \quad (13)$$

A expansão da série de Fourier para η mostra que as ondas não-lineares têm cristas aguçadas e cavas achatadas (ondas de Stokes).

3.2.2 Ondas Solitárias

Ondas solitárias são outra classe das ondas não-lineares. Estas ondas propagam-se sem mudar a sua forma, e duas ondas solitárias podem-se cruzar sem interagir. As propriedades das ondas solitárias resultam de um balanço exacto entre a dispersão e efeitos não-lineares que tendem a encurtar e elevar a onda. O tipo de onda solitária em águas pouco profundas vista por Russell, tem a forma:

$$\eta = a \operatorname{sech} k^2 \left[\left(\frac{3a}{4h^2} \right)^{\frac{1}{2}} (x - ct) \right] \quad 14$$

propagando-se com uma velocidade:

$$c = c_0 \left(1 + \frac{a}{2h} \right) \quad 15$$

As ondas de águas pouco profundas mudam de forma quando se propagam (dependem da profundidade), enquanto as ondas solitárias não (Stewart, 2005).

Pond e Pickard (1989) realizaram uma comparação com a onda de segunda ordem de Stokes, Figura 5 (b) e com a simples onda (linear) sinusoidal, Figura 5 (a). O formato agudo da crista é facilmente observado em ondas reais. Há ainda a correcção de fase:

$$c_s = \left(\frac{g}{k} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{1}{2} a^2 k^2 \right) \quad 16$$

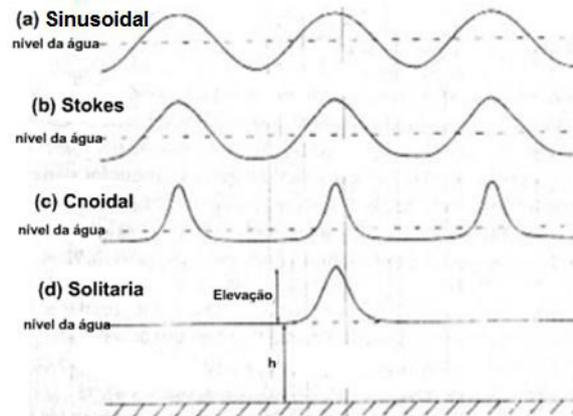


Figura 5: Comparação de formas de ondas. Fonte: Pond e Pickard (1989)

Em águas profundas, as ondas de maior comprimento de onda viajam mais rápido que as de menor comprimento de onda. Em águas pouco profundas haverá variações na velocidade, comprimento de onda e na amplitude. Quando atingem águas pouco profundas não haverá dispersão de ondas de comprimentos diferentes, mas as ondas de amplitudes maiores viajam mais rápido que as de amplitudes menores. Além disso, as cristas tornam-se mais rápidas que as cavas, tornando a face frontal mais íngreme.

3.2.3 Principais Transformações das Ondas

As ondas geradas em águas profundas propagam-se em direcção à costa, dirigindo-se para águas com profundidades mais baixas, em geral. À medida que estas ondas se movem para

águas pouco profundas, $\frac{h}{L} \leq \frac{1}{2}$, onde h é a profundidade de água e L o comprimento de onda, a onda começa a sentir influência do fundo, causando atrito entre o fundo e o movimento

orbital da água (Davis, 1985). Hoefel (1998) diz que após este ponto, $\frac{h}{L} \leq \frac{1}{2}$, as ondas sofrem cinco processos básicos:

1. empolamento (stepness ou shoaling);
2. refacção;
3. difracção;
4. atrito de fundo
5. rebentação.

3.2.4 Refracção

A refracção é alteração da altura e direcção da onda por modificação da batimetria do fundo. Deste modo, à medida que as ondas se aproximam da costa as ondas são influenciadas pela configuração batimétrica do fundo marinho, de modo que a sua crista tende a se alinhar à linha de costa denominando assim os processos de refracção, Figura 6.

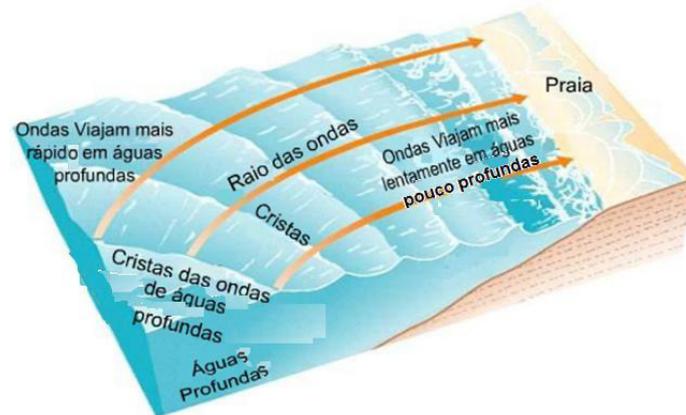


Figura 6: Refracção de ondas. Fonte: Coleman (2001)

3.2.5 Difraccção

A difracção é o fenómeno de transmissão lateral de energia durante a propagação das ondas. Tal pode ser devido à configuração batimétrica ou à existência de obstáculos, como por exemplo, ilhas, quebra mares e até mesmo recifes. Nesta situação a energia espalha-se lateralmente perpendicular à direcção dominante da propagação da onda, Figura 7. Assim, por exemplo, se ao longo da propagação das ondas surgem obstáculos como os molhes de um porto ou marina ou zona abrigada, a zona de entrada dessas regiões irão actuar como uma fonte de onda para a mesma área da marina, Pond e Pickard (1989). Se a abertura da entrada é larga (comparada com o comprimento de onda) grande parte da quantidade de energia da onda entrará na marina na mesma direcção da propagação da onda, mas, perto dos lados da abertura da entrada, alguma da energia da onda será difractada na área de sombra, atrás das paredes da marina. Quando a abertura da entrada, numa parede ou recife no mar, é estreita a energia da onda irá espalhar-se pela área da marina como ondas difractadas na forma de arcos circulares centrados na abertura da marina.

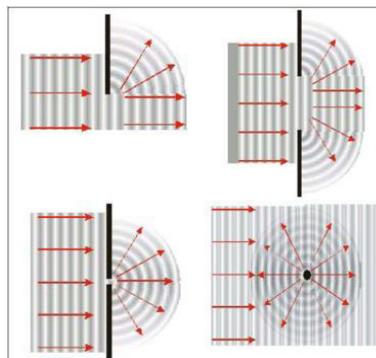


Figura 7: Difraccção de ondas propagando-se em direcção a uma estrutura. Fonte: Hoult (2004)

3.2.6 Empolamento e Rebentação.

A diminuição da velocidade da onda e o decréscimo no comprimento de onda devido à diminuição da profundidade, provoca um aumento da energia da onda, expresso fisicamente através do aumento da altura da onda caracterizando o processo de empolamento (Davis, 1985; Hoefel, 1998).

Este processo de empolamento contínuo da onda, Figura 8, no qual a velocidade orbital excede a velocidade da onda, culmina na rebentação, i.e., instabilidade da onda. (Davis, 1985). A rebentação causa a dissipação da energia da onda e redistribuição da restante energia sobre uma ampla variação de frequências (Henderson, 2001). Quando as ondas começam a rebentar,

uma parte da energia da onda é transformada em turbulência e calor, e a altura diminui em direcção à costa (Rattanapitikon e Karunchintadit, 2000). Deste modo, dependendo do tipo de rebentação, a turbulência associada com a rebentação das ondas é importante no transporte de sedimentos nas zonas costeiras, já que podem causar a suspensão de sedimentos que posteriormente podem ser transportados pelas correntes (Davis, 1985).



Figura 8: Empolamento e rebentação da onda devido à influência do fundo marinho. Fonte: Coleman (2001)

3.2.7 Rebentação de Ondas

Conceitos Básicos

No estudo da teoria da rebentação das ondas há que definir os processos que identificam a ocorrência de rebentação das ondas nas regiões próximas da costa. Estes processos podem ser associados à pré-rebentação, à rebentação propriamente dita e aos processos ocasionados após a rebentação das ondas. Em relação à fase de pré-rebentação das ondas, pode ser definido como todos os processos que as ondas vindas de águas profundas sofrem quando chegam às regiões próximas da costa. Nos próximos tópicos abordar-se-á o processo de rebentação das ondas.

3.2.7 Zonas Costeiras

Segundo Peregrine (1998), quase todas as ondas geradas pelo vento incidem nas praias rebentando e propagando-se em direcção à linha de costa. A partir daí, baseando-se em Hoefel (1998), pode-se delimitar três zonas da acção da rebentação das ondas numa praia:

- zona de rebentação (*breaking zone*) – é a porção do perfil de praia caracterizada pela ocorrência do processo de rebentação da onda, que representa o modo de dissipação de energia da onda sobre a praia;
- zona de surf (*surf zone*) – compreende a região em que as ondas se propagam após a rebentação, no caso de praias de baixo declive as ondas sofrem decaimento exponencial de altura, até atingir a linha de praia. Em praias que predominantemente reflectem a energia das ondas incidentes, ou seja, em praias muito íngremes, a zona de surf tende a ser dominada por movimentos de ocorrência de sub-harmónicas, de período igual ao dobro da onda incidente (Hoefel, 1998);
- zona de espraimento (*swash zone*). Nesta zona, a linha de costa não é uma linha fixa, mas move-se para trás e para a frente sobre a zona de espraimento (Peregrine, 1998).

Segundo Govender *et al.* (2002), as medições do nível de água e de campo de velocidades das zonas de surf são cruciais para projectos de estruturas costeiras e para a quantificação de poluentes e processos de transporte de sedimentos. A acção da rebentação das ondas resulta num movimento altamente complexo, compreendendo movimentos médios, orbitais e flutuações (turbulência) que tem, até agora, desafia as precisões das medições e a modelação.

3.2.8 Efeitos da Rebentação das Ondas nas Regiões Costeiras

A energia das ondas é dissipada ao longo da zona de surf e grande parte desta energia é muitas vezes transferida para gerar correntes costeiras e, assim, provocar alterações na linha de costa, Figura 9. As principais correntes geradas na linha de surf são as correntes longitudinais e as correntes de retorno.

As correntes longitudinais (*longshore currents*) são aquelas que se movem paralelamente à costa, Figura 10, e que causam a maior quantidade de transporte de sedimentos (Davis, 1985).

As correntes de retorno (*rip currents*) consistem naquelas que se movem no sentido transversal à costa dirigindo-se para a região *offshore*, Figura 11

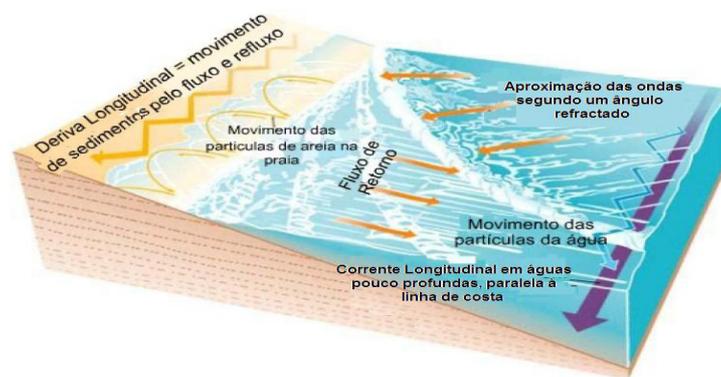


Figura 9: Principais processos devido a acção das ondas na região costeira. Fonte: Coleman (2001)

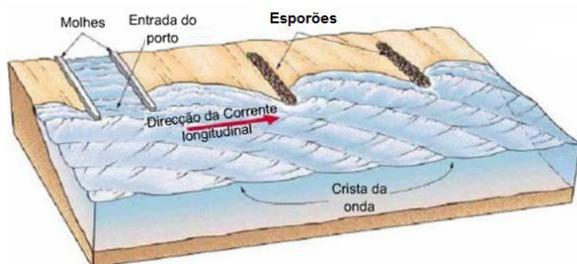


Figura 10: Corrente longitudinal ou deriva longitudinal. Fonte: Coleman (2001)

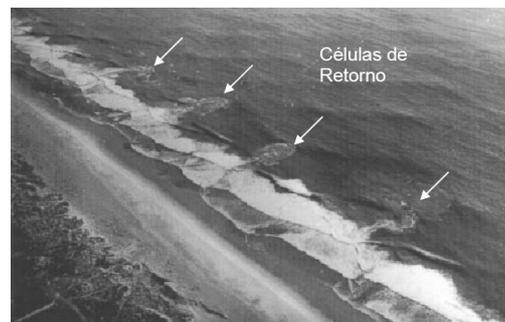


Figura 11: Correntes de retorno – Rosarita Beach, Baja Califórnia, México. Fonte: Peregrine (1998)

3.2.9 Alteração da Linha de Costa

As alterações da linha de costa devem-se principalmente à acção de ondas, com características de longo ou curto período. Em situações de tempestade, as condições de alta energia associadas às ondas podem criar consideráveis mudanças na praia e na zona de surf num curto período de tempo. Na ausência de situações de tempestade, as praias sofrem a acção de ondas que têm condições de energias físicas moderadas ou baixas, e são designadas por ondulação (*swell*). Nestas condições, as mudanças na praia processam-se de forma mais lenta

uma vez que a taxa de transporte de sedimentos é muito menor. Consequentemente, esta fase tende a “reconstruir” a praia das mudanças causadas por situações de tempestade. Após o final da rebentação da onda na sua progressão até à zona costeira, existe um espraio (*uprush*), um fluxo de água sobre a face da praia (*beachface*). Logo em seguida, ocorre a ressaca (*backwash*) causado pela gravidade, o que resulta num refluxo de água com velocidade inicialmente baixa; entretanto, a aceleração pode ser rápida com as condições de regime de fluxo superficial avançado. A velocidade do refluxo depende do declive da face da praia, do volume de água neste refluxo, e da adição de água da zona efluente. Estes fluxos e refluxos definem o espraimento (*swash*) da face da praia que são importantes na morfologia da linha de costa, Figura 12.

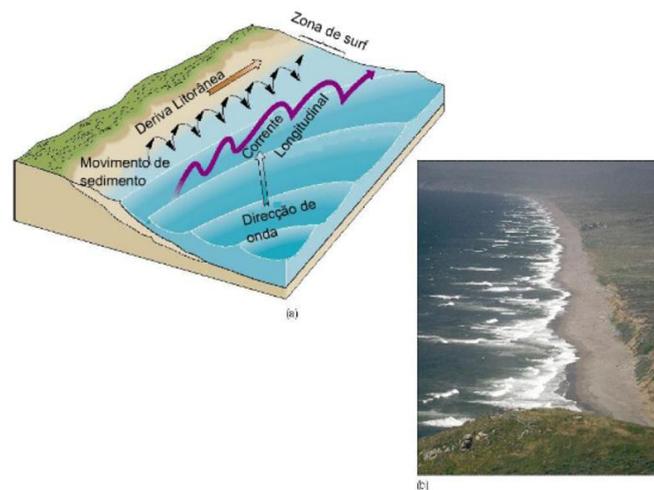


Figura 12: Acção das ondas na zona de espraimento da praia. Fonte: Coleman (2001)

3.2.10 Tipos de Rebentação

Deste modo, dependendo do declive da praia, da altura e do comprimento da onda, as ondas podem rebentar, basicamente, de quatro modos (Hoefel, 1998, Henderson, 2001, Fredsøe e Deigaard, 1997), ver Figura 13.

- $\xi_0 \leq 0,4$ Progressiva (*spilling breaker*) – Ocorre em praias de baixo declive, nas quais a onda gradualmente rebenta deslizando sobre a cava, dissipando a sua energia através de uma faixa larga.
- $0,4 < \xi_0 \leq 1,2$ Mergulhante (*plunging breaker*) – Ocorre em praias com declive moderado a alto. A onda empola abruptamente ao aproximar-se da costa e quebra violentamente formando um tubo, dissipando a sua energia sobre uma pequena porção do perfil, através de um vórtice de alta turbulência.
- Colapsante (*collapsing breaker*) – é o tipo de mais difícil identificação. Ocorre, também, em praias de pendente abrupta e é considerado um tipo intermédio entre o mergulhante e o de fundo.

- $\xi_0 \geq 1,2$, de fundo (*surging breaker*) – Ocorre em praias de declive tão elevado que a onda não chega a rebentar propriamente, ascendendo sobre a face da praia e interage com o refluxo das ondas anteriores.

Esta definição dos intervalos de diferentes tipos de rebentação, sintetizado por resultados alcançados por Battjes (1974) e Smith e Kraus (1990), é a através do conhecimento ξ_0 , para este estudo em praias do tipo barra-fossa.

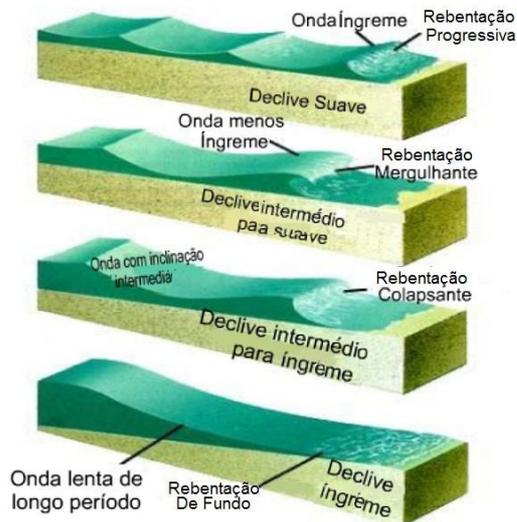


Figura 13: Tipos de rebentação, de cima para Baixo, progressivas, mergulhantes, colapsantes e De fundo. Fonte: Coleman (2001).



Figura 14: Surfista realizando uma manobra denominada de tubo numa Onda mergulhante. Fonte: Mead e Black (2001).

3.2.11. Tipos de Quebra de ondas

A maioria de estudos de transformações e quebra de ondas em águas pouco profundas tem sido conduzida em declives relativamente planas de baixo gradiente. Esses estudos mostraram que as características de uma quebra de onda são primariamente dependentes das condições de ondas de águas profundas (a altura de onda, H_0 , e o comprimento de onda, L_0) e o gradiente do leito no qual as ondas quebram, com as declividades mais inclinadas causando quebra de ondas mais fortes (BLENKINSOPP, 2003). A forma da quebra pode ser determinada pela equação (HENDERSON, 2001):

$$\xi_0 = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}};$$

17

onde ξ é o numero de Iribarren, H_0 é a altura de onda de água profunda, L_0 é o comprimento de onda de água profunda, β é a declividade da praia.

3.2.12 Definição e limites de uma praia

A actual linha de costa resulta da última idade do Gelo, que terminou à cerca de 10 000 anos. Nessa altura, a massa de gelo que cobria uma grande extensão da Terra, maior do que a presente hoje em dia, foi derretendo e aumentando o nível da água do mar. A vasta quantidade de sedimentos que se encontrava nas praias fora arrastada pelos rios. A maior parte das praias de hoje são compostas por areia e cascalho, provenientes dessa altura. Alguns desses sedimentos têm origem a partir da erosão das costas e pequenas arribas, mas as praias são continuamente alimentadas pelos rios (Reeve et al., 2004).

Segundo Komar (1976), a praia como uma acumulação de sedimentos não consolidados (areia ou cascalho), é a zona que se estende do limite médio de maré baixa até alguma mudança fisiográfica como um rochedo, campo de dunas ou uma vegetação permanente. O termo litoral é mais abrangente, incluindo, além da porção emersa descrita acima, também a porção submersa até uma profundidade onde os sedimentos são menos transportados activamente pelas ondas superficiais. Esta profundidade é imprecisa, sendo designada como a profundidade de fecho.

A figura seguinte, ilustra a terminologia usada para o perfil de uma praia.

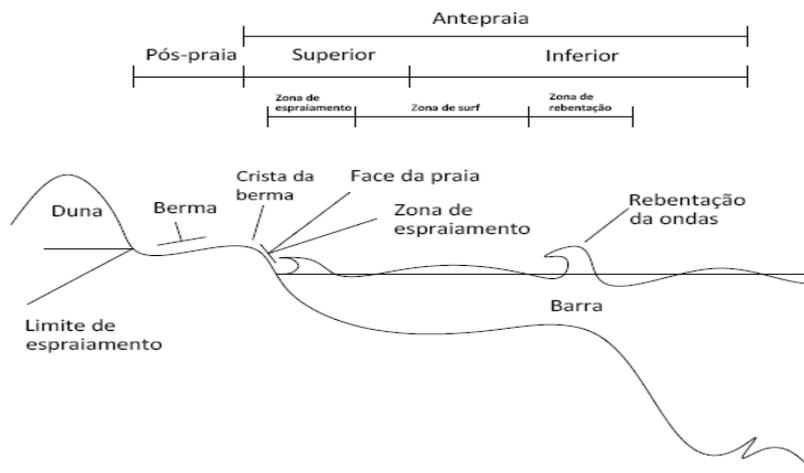


Figura 15: Diagrama geral do perfil de praia

3.2.13 Zona morfológica

Morfológicamente, a praia pode ser dividida em pós-praia e antepraia. A pós-praia (*Backshore*) define-se como a parte da praia coberta pela água apenas durante as tempestades e que, conseqüentemente, está acima do nível da preia-mar. Esta região é constituída por uma porção praticamente plana, de inclinação suave denominada por berma. Algumas praias possuem mais de uma berma em níveis levemente diferentes, separados por uma escarpa. A zona de pós-praia é limitada por uma mudança abrupta na inclinação na crista da berma. O termo antepraia superior (*Foreshore*) é limitado pela altura máxima de preia-mar e pela mínima de baixa-mar. É nesta zona inclinada da face da praia que ocorre o espraimento das ondas. A zona descrita como antepraia inferior (*Nearshore*) é caracterizada por uma parte do perfil submerso, entre o nível de maré baixa até aos bancos de areia (barra). A barra longitudinal é definida como o cume de areia estendido paralelamente à costa que poderá ficar exposto em caso de baixa-mar. Poderá existir mais que uma barra a profundidades diferentes (Komar, 1976). É também definido por Komar (1976), uma zona (não representada na figura), após a antepraia inferior como, offshore, zona mais distante da linha de costa.

3.2.14 Níveis de Maré

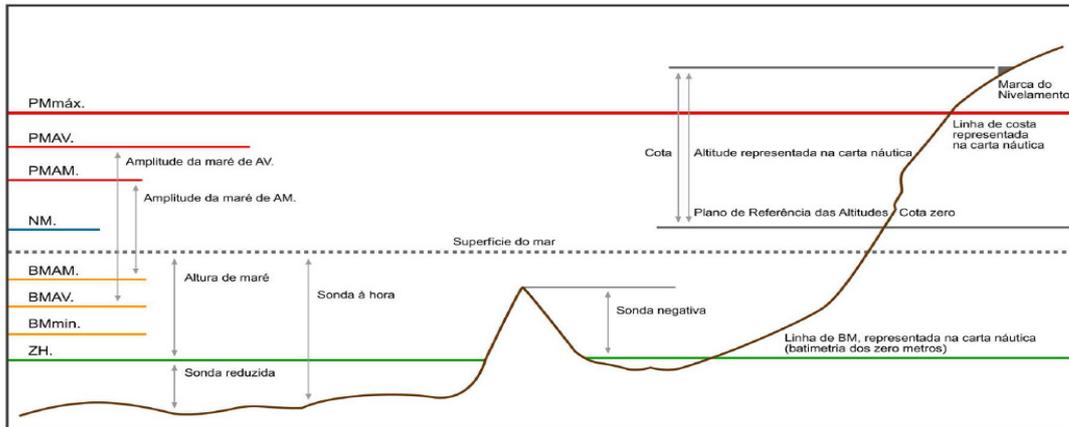


Figura 16: Níveis de maré ou planos de referência

PMmáx= preia-mar máxima

PMAV= preia-mar de maré viva

PMAM= preia-mar de maré morta

NM= nível médio das águas do mar

BMAM= baixa-mar de amplitude máxima

BMAV= baixa-mar de maré viva

BMmin= baixa-mar mínima

ZH= zero hidrográfico - é a altitude de referência a partir da qual são medidas as profundidades. As altitudes são geralmente medidas a partir do Nível Médio das Águas do Mar. Após verificados os registos de baixas mar durante vários anos (50 +/-), escolhe-se a baixa-mar mais baixa desse período, e ainda se tiram cerca de 20/30 cms, achando assim o zero hidrográfico.

Capítulo 4 – Teoria dos Modelos

4.1. Modelação Numérica

Dois modelos numéricos (um modelo 1D linear, 1DL e o COULWAVE) foram utilizados para simular a propagação de ondas para as condições da campanha (27 de Março de 2009) e os resultados comparados com os dados de campo. Enquanto o 1DL é um modelo muito simples de refração linear associado a uma onda quebrando simples condição, a COULWAVE é um modelo do tipo não-linear de Boussinesq especialmente adaptado para a caracterização de onda na região do nearshore, uma vez que leva em conta os principais fenómenos presentes na propagação da onda (por exemplo de refração de ondas, difracção, reflexão de ondas quebrando baixo atrito e fenómenos não-lineares). COULWAVE é um modelo bastante exigente em termos de tempo de CPU computacional e de armazenamento de memória e da maioria dos parâmetros relacionados com a quebra das ondas, o atrito das ondas, entre outros, devem ser calibrados.

Os modelos acima foram utilizados para propagar as condições das ondas offshore observado no PT Infinity (-11,7 m de profundidade) até o surf e as zonas de varrido. Dois tipos de simulações foram realizados:

- Utilização de uma onda regular, como condição de contorno para o 1DL e COULWAVE modelos, dada por parâmetros de ondas campo offshore (alturas e períodos de onda) medida ao longo do dia 27 de Março. As soluções numéricas correspondentes e os valores medidos de altura significativa da onda são comparados na posição PTL2;

4.2. Formulação do modelo 1D (Teoria Linear)

O modelo linear 1D (1DL) para a propagação das ondas é baseado na teoria linear e sob o pressuposto de contornos rectos e paralelos da batimétrica e conservação de energia das ondas (Dean e Dalrymple, 1991). Nestas condições, a altura da onda, H , a uma profundidade h é calculado a partir da altura da onda mais offshore, H_0 :

$$H = H_0 K_s K_r \quad (18)$$

$$K_s = \sqrt{\frac{C_{g0}}{C_g}} \quad (19)$$

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \theta_0}{\cos \theta}} \quad (20)$$

K_s e K_r representam, respectivamente, o coeficiente de empolamento e o coeficiente de refração, C_g da velocidade de grupo e θ o ângulo de direcção local da onda que é avaliada a partir de lei de Snell. Nesta formulação assume-se que a altura de onda não ultrapassa um valor limite de k da profundidade da água e que a rebentação é alcançada se essa condição for atendida. Um segundo critério considera a inclinação da praia (por exemplo, Dean e Dalrymple, 1991).

4.3. Formulação do Coulwave

O modelo COULWAVE (Lynett e Liu, 2004), permite reproduzir a maioria dos fenómenos intervenientes na transformação da onda em fundos de profundidade variável e na presença de correntes: dispersão de frequência, dispersão de amplitude, empolamento (linear e não-linear), difracção, refracção pelo fundo e devida às correntes, geração de harmónicas e dissipação de energia por rebentação da onda.

Neste sentido, julgou-se interessante avaliar o desempenho do modelo COULWAVE, na simulação da hidrodinâmica em torno da praia de Faro, utilizando, para tal análise, os resultados experimentais obtidos na campanha.

Descrição do modelo numérico

O modelo numérico utilizado neste estudo foi o COULWAVE, versão 2005 de Lynett & Liu. Trata-se de um modelo de propagação de ondas não-lineares baseado em uma abordagem multicamada para a integração das equações primitivas do movimento (equações de continuidade e momento). Esta abordagem leva a um conjunto de equações do modelo sem a ordem de alto derivadas espaciais associados com aproximações polinomiais de ordem superior.

As equações de modelo optimizado mostram boas características de onda linear até um kh de 8, enquanto, a segunda ordem de comportamento não-linear está bem capturado para $kh \sim 6$. Esta é uma extensão superior a duas vezes a maior kh mais em vigor (1) do tipo Boussinesq. Para habilitar o modelo de Boussinesq para simular a hidrodinâmica zona de rebentação, a dissipação de energia devido à rebentação das ondas é tratada através da introdução de um termo de viscosidade turbulenta para as equações de momento, com a viscosidade fortemente localizadas na face frontal das ondas. O run-up da onda na praia é simulada usando uma técnica permeável fundo do mar.

Ficheiros de entrada e de saída

Através do modelo COULWAVE, foi possível identificar que tipo de ficheiros deveriam ser dados como entrada no modelo, e como estes deveriam ser estruturados.

Nesta secção, descrevem-se os ficheiros necessários para efectuar uma simulação com este modelo, bem como os resultados que se obtêm com cada simulação.

O modelo COULWAVE requer os seguintes ficheiros de dados:

- um ficheiro *f_topo.dat*, que contem os valores da profundidade em cada ponto da malha, identificados pelas coordenadas x e y . Este Ficheiro está organizado numa única coluna em que o y é mantido constante até estarem registados todos os valores de x e só aí se passa para os valores associados ao y seguinte e assim consecutivamente;
- um ficheiro *x_topo.dat* e um *y_topo.dat* que contém as dimensões em x e y respectivamente com o espaçamento pretendido;
- um ficheiro designado por *size_topo.dat* que é constituído por um vector coluna de dois valores, o primeiro sendo a dimensão do vector *x_topo* e o segundo a dimensão do vector *y_topo*. Estes dois últimos valores, quando multiplicados têm de corresponder à dimensão de *f_topo*;
- um ficheiro *sim_set.dat* que contém todos os parâmetros necessários à execução do modelo. Este *sim_set.dat* pode ser criado pelo COULWAVE através de uma interface. Uma vez construído, é sempre possível refazer ou recomeçar cada simulação que por qualquer motivo não tenha terminado, sem que seja necessário voltar a definir os parâmetros pretendidos.



Após realizada uma simulação, são obtidos resultados em termos de séries temporais e espaciais da elevação da superfície livre e velocidades horizontais nos pontos para todo o domínio de cálculo. No presente trabalho, os ficheiros utilizados para o tratamento dos resultados obtidos, foram

- ts_group*.dat que são os ficheiros das séries temporais de elevação da superfície livre. Já o * representa o respectivo número associado ao ponto da malha pretendido (para cada simulação foram criadas 60 pontos).
- tide...dat – são ficheiros relativos á amplitude maré.

Capítulo 5 - Área de estudo

Descrição da área de estudo

A área de estudo é a Praia de Faro (Península do Ancão), localizado no sistema de ilha barreira da Ria Formosa, sul de Portugal (Figura 17). O comprimento da Península do Ancão é variável (8,5-12,8 km entre 1947 e 2001) (Matias et al. 2008) devido a mudanças na posição de entrada do Ancão, que migra para Leste a uma taxa de 40 a 100 m / ano (Vila-Concejo et al. 2006). A península é estreita, com largura variando de 50 a 250 m, e as dunas podem ser de uma única crista e chegar a 5,5 m acima do nível médio do mar (MSL) (Matias et al. 2008).

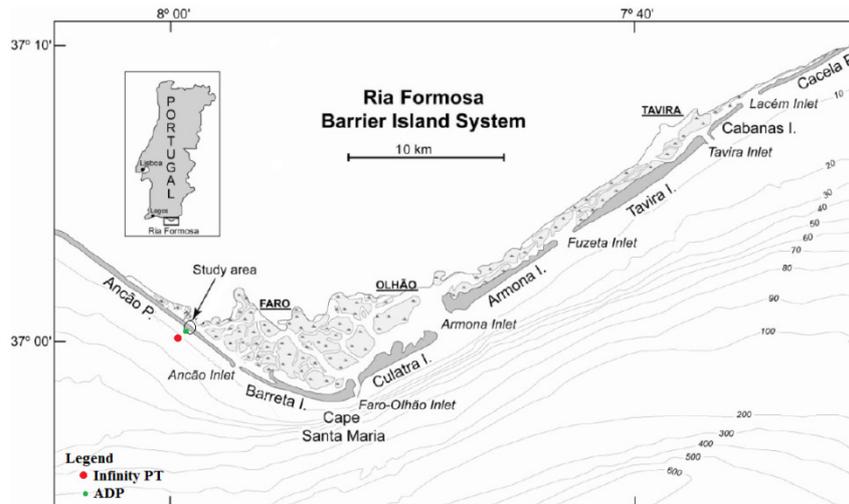


Figura 17: Localização da área de estudo, Infinity PT e ADP (mapa base adaptado de Matias et al. 2009).

A área de estudo é mesotidal com uma gama média das marés de 2,8 m nas marés de sizígia e 1,3 m nas marés de quadratura com um alcance máximo de maré de 3,5 m (IH, 1998). O clima de agitação marítima é dominado por ondas de W-SW (de 71% das ocorrências) (Costa et al., 2001). Ondas de curto período provenientes de Sudeste, gerada pelos ventos regionais também são frequentes (cerca de 23%) (Costa et al., 2001). A energia das ondas é moderada com uma altura significativa média anual de 1,0 m *offshore* e um período de pico médio de 8,2 s (Costa et al., 2001). De acordo com Costa et al. (2001), a altura de onda significativa inferior a 1 m é registado durante 68% do ano. A tempestade, nesta parte do litoral Português, é definida como um evento com altura de onda significativa offshore superiores a 3 m (Pessanha e Pires, 1981; Melo, 1989; Costa, 1994). Ondas de tempestade SW têm uma altura média significativamente maior do que as tempestades Sudeste (Costa, 1994). As tempestades SW representam 64% de ocorrência de tempestades e sudeste por 32% (Costa et al., 2001). A 5 m tempestade SE como altura significativa de 5 m tem um período de retorno estimado de 50 anos, enquanto uma tempestade SW 5.7 m é esperado a cada 5 anos (Pires, 1998). A Península do Ancão está directamente exposto às ondas de W-SW, e relativamente protegida das ondas de sudeste.

Campanha do projecto BRISA na praia de Faro

No âmbito do projecto BRISA, decorreu entre 25 e 28 de Março de 2009, uma campanha de medição de campo na praia de Faro. Esta secção resume as características dos instrumentos e das medições efectuadas.

Ondas e correntes

Para medições de ondas e correntes, foi instalado uma série de equipamentos tanto em nearshore e na face da praia de Faro. O ADP (Acoustic Doppler Profiler) e um PT Infinity (transdutor de pressão) foram colocados no nearshore de 2,5 m e 11,7 m abaixo do nível médio do mar (MSL), respectivamente. O restante equipamento foi instalado ao longo de dois transectos costa-cross (P3 e P4) na Praia de Faro, perto do restaurante "O Pacote" (Figura 18). Os equipamentos utilizados nesses perfis consistiram em:

- Valeport Midas - 6 pts (transdutores de pressão) array (PTV);
- ECM (medidores de corrente eletromagnética) (ECMV e ECML);
- Acoustic Doppler Velocímetros (ADVA e ADVL)
- Transdutor de pressão PT Single () (PTA)
- Matriz de 3 pts (PTL)

Todos os instrumentos foram geo-referenciados, após a instalação em maré baixa, usando uma RTK-GPS. Além disso, todos os equipamentos foram sincronizados com o Observatório Astronómico de Lisboa no tempo. Os Instrumentos começaram a gravar em 26/03/09, 07h00, e aquisição de dados foi realizada durante cinco ciclos de maré. A campanha terminou em 28/03/09 às 22:00.

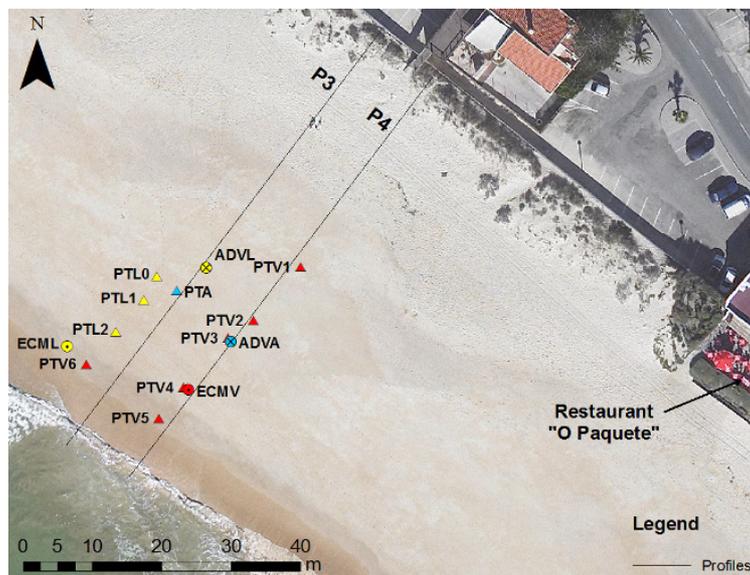


Figura 18 - Localização dos principais equipamentos utilizados (cores azul, vermelho e amarelo correspondem aos equipamentos da Universidade de Aveiro, a Universidade do Algarve eo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, respectivamente). PT - transdutor de pressão; ADV - Acoustic Doppler velocímetro; ECM - medidor de corrente eletromagnética. Base: Mapa ortofotocartas de 2009.

Capítulo 6 – Simulação da propagação da ondulação na praia de Faro

Para obter uma visão sobre a hidrodinâmica da área de estudo durante a campanha, esta secção apresenta os dados de elevação de superfície livre obtidos tanto a offshore e na costa de instrumentos seleccionados. As medidas obtidas durante o trabalho de campo com o PT Infinity, a uma profundidade de água de 11,7 m abaixo do MSL e com dois tipos de transdutores de pressão na antepraia (um transdutor de pressão ventilada "Honeywell", PTL2, e um transdutor de pressão não-ventilados, LevelTROLL500", com datalogger, PTL1) são apresentados e analisados. As posições desses equipamentos são mostradas na Figura 18. Estes dados, embora representem apenas uma parte dos dados hidrodinâmicos que foram recolhidos durante a campanha, foram os utilizados como condições de contorno (dados offshore) dos modelos numéricos, bem como utilizados na comparação para avaliar o desempenho desses modelos em áreas pouco profundas (dados na costa).

O domínio computacional do modelo 1D baseado na teoria linear e do modelo Coulwave e do perfil da praia correspondente, obtido a partir das medições batimétricas e topográficas realizadas durante a campanha, são apresentados na Figura 19.

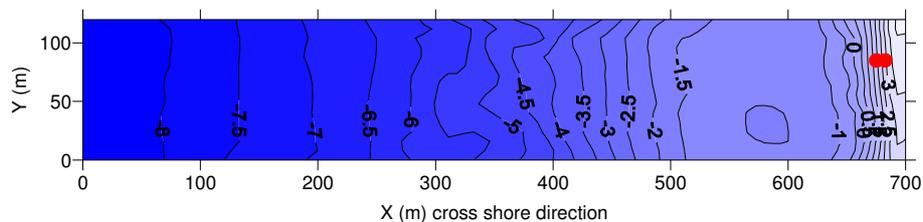


Figura 19 : Domínio e batimetria do domínio computacional; posição dos transdutores de pressão (PTL1 e PTL2) (pontos vermelhos).

Os dados relativos aos transdutores PTL1 (LevelTROLL) e PTL2 (Honeywell)

No presente trabalho serão comparados os resultados do modelo apenas com os dados relativos aos dois transdutores de pressão "LevelTROLL" (PTL1) e "Honeywell" (PTL2) assinalados na Figura 19. A profundidade do PTL2 (zh) é de 2 m e a do LevelTroll de 2,9 m (zh). A condição de fronteira a Offshore consistiu em valores de HS e TS dados pelo Infinity, profundidade local (zh) 8.5 m, e considerou-se que o ângulo de incidência da onda é de 0° . No 1DL considerou-se também 30° . Teve-se também em consideração a oscilação do nível médio da superfície livre associada à maré, cuja variação se mostra na Figura 20.

A análise dos registos envolvidos no seguinte conjunto de procedimentos:

- O registo de medição total de ambos os PTL1 e PTL2 tem duração de 10 minutos, cada um representa um estado de mar parado, pronto para o momento posterior e análise da altura da onda.

Número de hipóteses	Hora de estudo	P02		Leveltroll		Amplitude de Maré
		HS2	TS2	HS1	TS1	
1	1:14	0.32	9.14	0.36	10.56	3.37
2	1:24	0.33	8.52	0.35	9.86	3.42
3	1:34	0.30	8.70	0.38	9.97	3.47
4	1:44	0.30	8.97	0.38	9.12	3.53
5	1:54	0.31	9.08	0.36	9.33	3.55
6	2:04	0.31	10.09	0.35	9.21	3.58
7	2:14	0.35	10.07	0.33	9.17	3.61
8	2:24			0.33	8.96	3.63
9	2:34			0.30	9.59	3.63
10	2:44			0.33	9.65	3.61
11	2:54			0.35	10.76	3.53
12	3:04			0.34	10.54	3.47
13	3:14			0.39	9.95	3.42
14	3:24			0.42	11.33	3.32
15	3:34			0.39	12.09	3.26
16	12:53	0.16	11.72			2.95
17	13:03	0.22	9.41			3.08
18	13:13	0.33	9.47			3.16
19	13:23	0.40	8.77	0.34	13.84	3.21
20	13:33	0.35	7.67	0.38	13.30	3.29
21	13:43	0.32	7.36	0.32	12.29	3.32
22	13:53	0.31	6.74	0.35	11.62	3.37
23	14:03	0.27	7.30	0.35	10.58	3.42
24	14:13	0.29	7.75	0.31	10.36	3.47
25	14:23	0.29	7.95	0.33	10.09	3.50
26	14:33	0.29	8.36	0.33	11.66	3.53
27	14:43	0.27	8.42	0.31	10.98	3.50
28	14:53	0.26	9.04	0.33	11.00	3.47
29	15:03	0.27	8.86	0.32	10.46	3.42
30	15:13	0.27	9.51	0.33	11.80	3.39
31	15:23	0.28	9.89	0.37	11.33	3.37
32	15:33	0.27	9.44	0.39	12.99	3.32
33	15:43	0.29	9.75	0.38	13.57	3.21
34	15:53	0.24	8.21	0.41	17.49	3.11
35	16:03	0.27	9.29			3.05
36	16:13	0.24	8.19			2.95
37	16:23	0.24	9.34			2.84
38	16:33	0.28	8.91			2.74
39	16:43	0.26	8.53			2.63
40	16:53	0.25	8.13			2.53
41	17:03	0.27	8.53			2.47
42	17:13	0.27	7.71			2.32
43	17:23	0.29	7.85			2.21
44	17:33	0.25	7.12			2.11
45	17:43	0.25	7.62			1.89
46	17:53	0.26	7.90			1.74
47	18:03	0.27	7.47			1.68
48	18:13	0.31	7.46			1.58

Tabela 1: Tabela de dados da posição PTL2 e PTL1, relativos ao dia 27 de Março, com respectiva correcção da amplitude de maré.

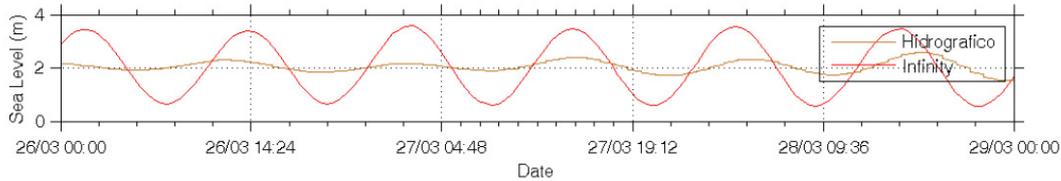


Figura 20: Amplitude de maré.

A Figura 21 mostra o perfil de fundo 1D, relativamente à distância, foi considerada zero no ponto onde se localizava o infinity a offshore. Pode verificar-se que o declive desta secção não é constante, pois caracteriza-se pela existência de uma barra-fossa, que se localiza na parte emergente da praia e assim condiciona o tipo de rebentação. O valor de rebentação considerado no modelo 1D é de 0.4.

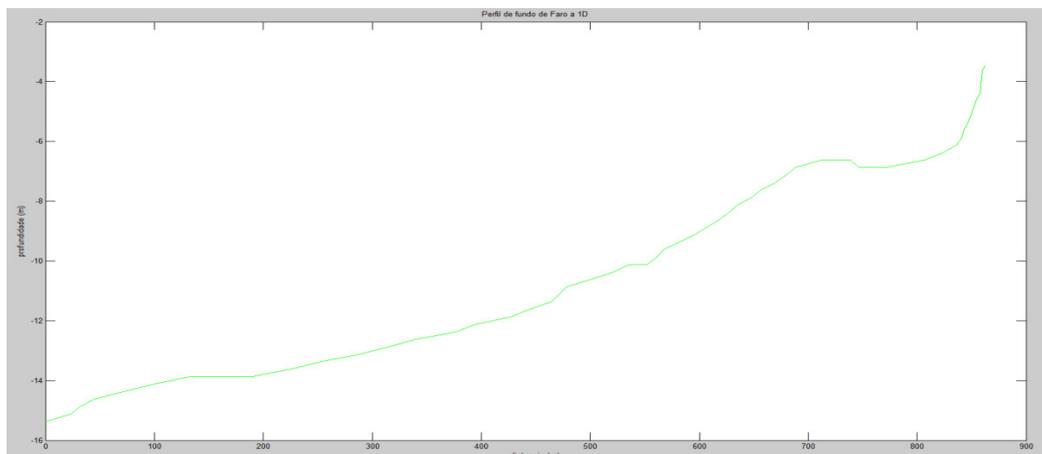


Figura 21: Perfil de fundo da praia de Faro (representação a uma dimensão (1D)), dado pela profundidade (eixo y), em função da distância (eixo x).

6.1 Soluções do Modelo 1D

Pretende-se mostrar a solução do modelo 1D, escolhendo uma onda com o registo de altura e período significativo (HS e TS), escolhido na tabela1.

A Figura 22, representa a solução numérica do modelo 1D para uma onda com valor de $HS=0.32(m)$ e $TS=10(s)$ e o ângulo de incidência de 30° . Os valores de K_r são sempre inferiores à unidade, estão compreendidos entre 1 e 0.95 aproximadamente, o seu valor diminui ao aproximar-se á costa. O fenómeno de refração manifesta-se em consequência da redução da velocidade da de fase, quando a mesma se propaga de águas profundas para zonas de menor profundidade, devida á incidência oblíqua. Para os troços da crista em que a profundidade é menor desloca-se mais lentamente que os troços em que a profundidade é maior, e assim, a crista tende a encurvar-se adaptando-se à morfologia do fundo, observando-se assim o ângulo de incidência a diminuir, valor este que inicialmente é de 30° acabando com um ângulo próximo de 15° . Os valores de K_s , são superiores á unidade, estão compreendidos entre 1 e 1,25 aproximadamente: o seu valor aumenta, o que unicamente traduz o empolamento da onda à medida que se aproxima da costa.

As condições de onda correspondem às condições de baixa energia. O fluxo de energia vai diminuindo.

Com o período $TS=9.14 s$, ou seja constante, podemos verificar pela dispersão, que a velocidade diminui logo o seu comprimento de onda também diminui em direcção á costa.

A altura de onda aumenta na chegada á costa devido á diminuição da profundidade, logo esta onda sente o fundo.

Em todos os casos a barra-fossa determina a modificação do comportamento de todas as variáveis representadas.

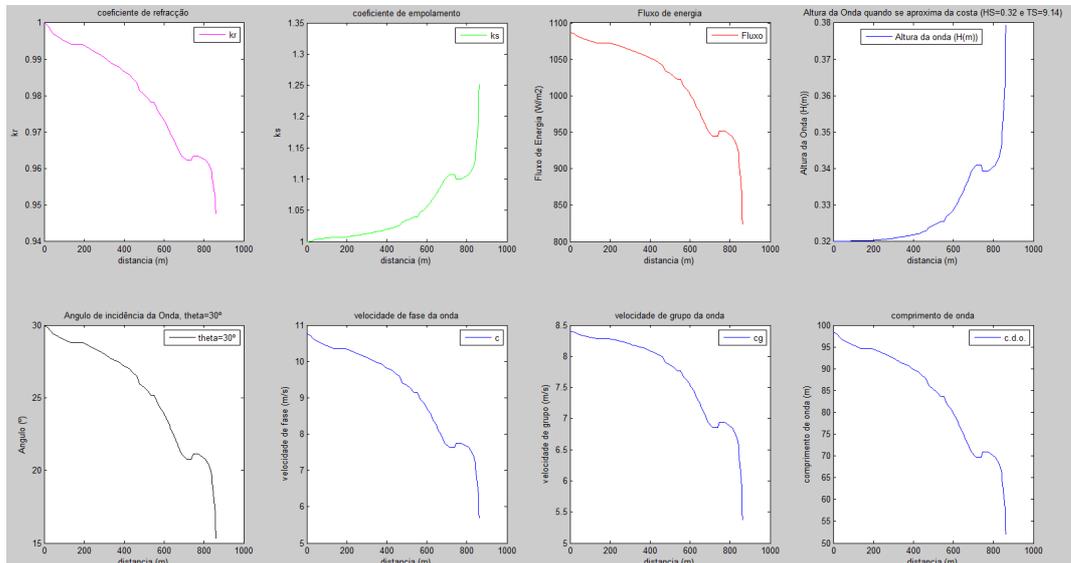


Figura 22: Representação dos valores de K_r , k_s , fluxo de energia, altura da onda (H), ângulo de incidência ($\theta=30^\circ$), velocidade de fase (m/s), velocidade de grupo (m/s) e comprimento de onda (m). Todos estes valores calculados para a $HS=0.32$ (m) e $TS=9.14$ (s). A correcção da amplitude de maré é de 3.07 (zh) m para esta onda.

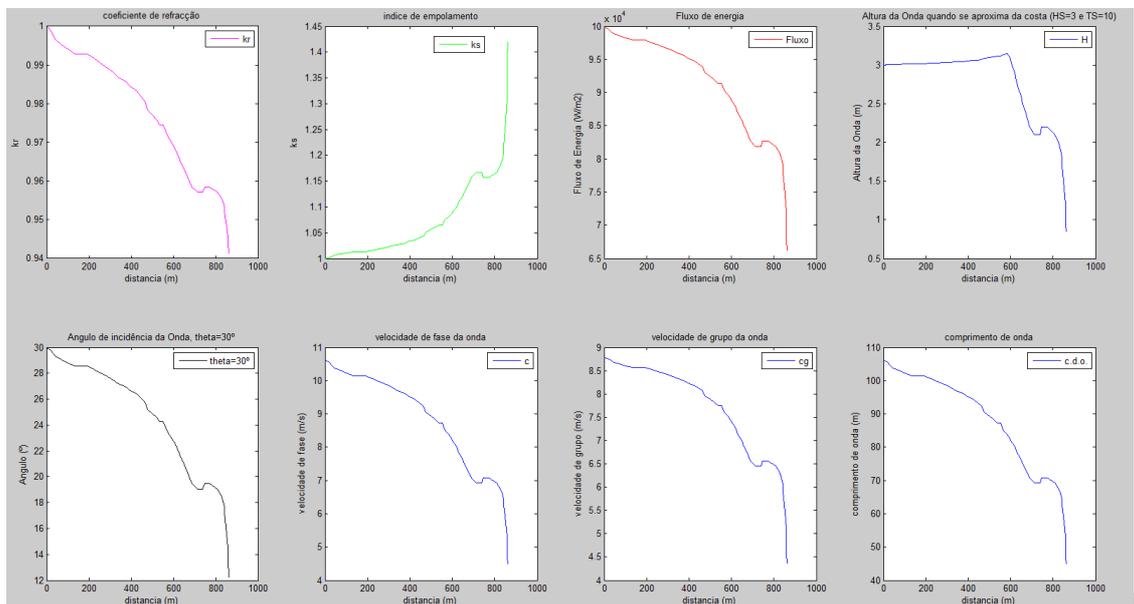


Figura 23: Representação dos valores de K_r , k_s , fluxo de energia, altura da onda (H), ângulo de incidência ($\theta=30^\circ$), velocidade de fase (m/s), velocidade de grupo (m/s) e comprimento de onda (m). Todos estes valores calculados para a $HS=3$ (m) e $TS=10$ (s). A correcção da maré é de 2 (zh) m para esta onda considerada.

Na Figura 23, mostra-se a solução numérica quando se considerou uma altura da onda $HS=3$ m e $TS=10$ s é de salientar que a rebentação é realizada antes de chegar á costa, pois o valor é inferior á condição inicial imposta, quando a onda chega à costa. O comprimento de onda tem valores ligeiramente superiores ao largo, e com a aproximação feita à costa esses mesmos

valores são inferiores á condição anterior. O valor de índice de empolamento (k_s) é superior ao anterior, dado ao valor da altura de onda ser maior.

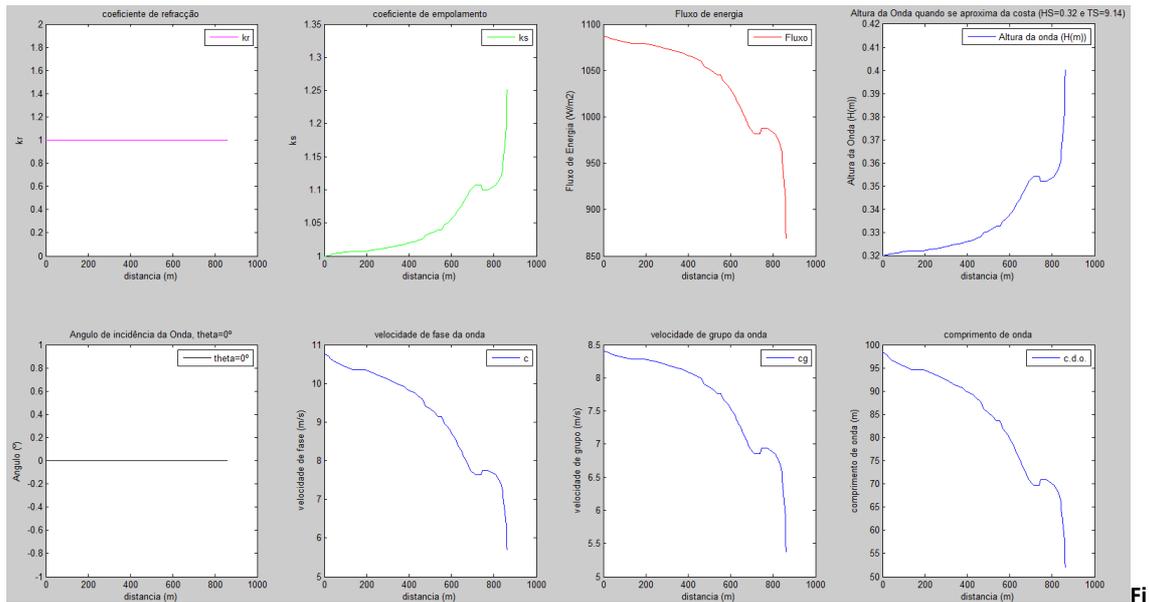


Figura 24: Representação dos valores de K_r , k_s , fluxo de energia, altura da onda (H), ângulo de incidência ($\theta=0^\circ$), velocidade de fase (m/s), velocidade de grupo (m/s) e comprimento de onda (m). Todos estes valores calculados para a $HS=0.32$ (m) e $TS=9.14$ (s). A correcção da amplitude de maré é de 3.07 (zh) m para esta onda. Hora

Na Figura 24, para um ângulo de 0° , os valores de K_r são sempre nulos devido a este mesmo ângulo de incidência. Para os restantes componentes os valores são coincidentes com a Figura 22.

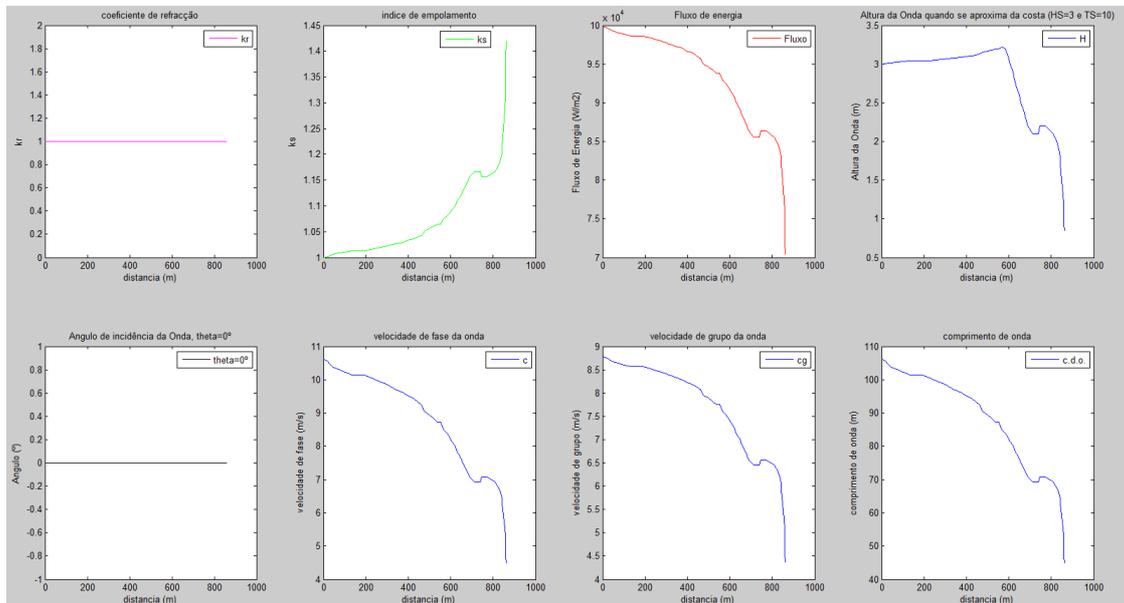


Figura 25: Representação dos valores de K_r , k_s , fluxo de energia, altura da onda (H), ângulo de incidência ($\theta=0^\circ$), velocidade de fase, velocidade de grupo. Todos estes valores calculados para a $HS=0.3$ (m) e $TS=9.14$ (s). A correcção da amplitude de maré é de 2 (zh) m para esta onda considerada.

Na Figura 25, comporta-se da mesma forma que o que se representou na Figura 23, apenas diferenciamos o ângulo de incidência dado por 0° , ao demais a altura da onda volta a quebrar antes de chegar á costa, pois a zona de rebentação situa-se mais para offshore.

6.2 Solução do modelo 2D comparada com a solução 1D, distribuição da altura da onda

Pretende-se comparar a solução do modelo 1D, com a solução do modelo 2D, na distribuição da altura.

Dada a altura e período significativo da onda ($H_S=0.30$ (m) e $T_S=8.97$ (s)) corresponde às 1h44m, é evidente a altura da onda devido ao empolamento, o seu valor aumenta consoante a diminuição da profundidade. Na presença da barra-fossa, o valor da altura decresce ligeiramente, logo de seguida aumenta até a zona de rebentação ao qual ocorre o espraio da onda.

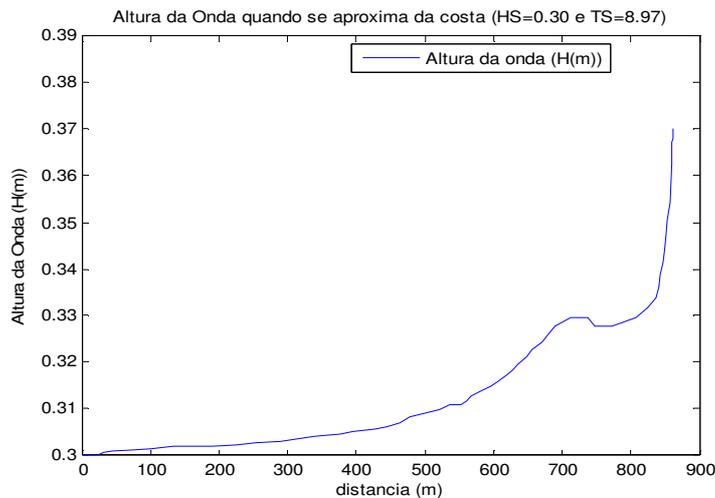


Figura 26: Altura da onda simulada pelo 1D em função da distância para um $H_S=0.30$ e $T_S=8.97$ (amplitude de maré=3.53), hora 1h44m

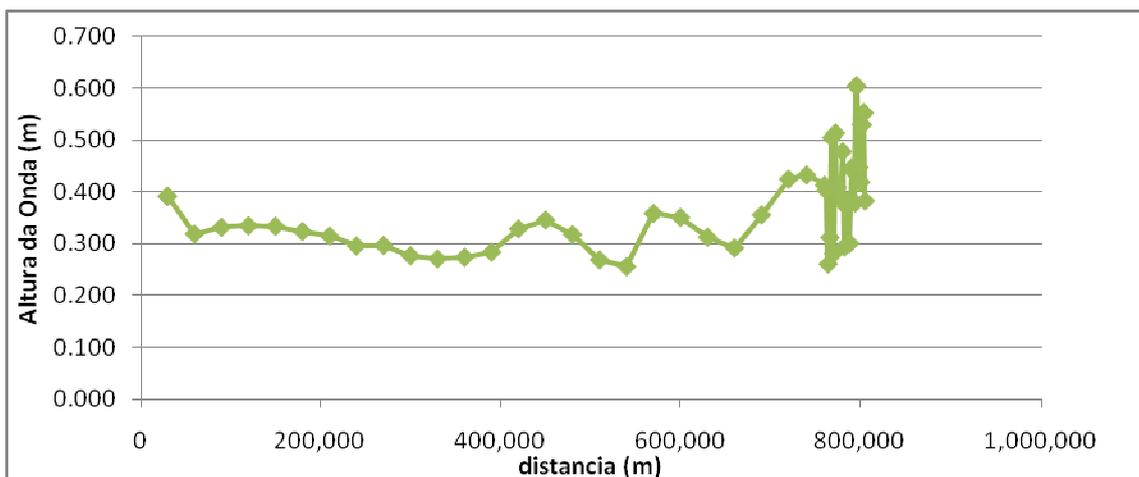


Figura 27: Altura da onda simulada pelo COULWAVE em função da distância para um $H_S=0.30$ e $T_S=8.97$ (amplitude de maré=3.53), hora 1h44m.

Na Figura 27, é apresentada a 4ª solução numérica correspondente ao dia 27 de Março, obtida pelo modelo COULWAVE. Foram realizadas 140 simulações, para os dias 26, 27 e 28 de Março. Cada dia, respectivamente, contou com 48, 48 e 44 soluções.

Para o dia 27 (dia do estudo) foram realizadas 48 soluções ao qual procurou-se obter a altura da onda em função da distância.

Foi escolhida a 4ª solução numérica para 1D assim como para o modelo COULWAVE, podendo comparar os dados de altura da onda na aproximação á costa. Assim para o HS e TS determinado na Figura 27, cerca dos 650 m, observa-se a rebentação de ondas. É também evidente que a reflexão de ondas ocorre devido á inclinação do perfil de fundo perto da antepraia (verificado no COULWAVE). Além disso, a geração de uma onda monocromática no limite de entrada é provavelmente responsável para produzir esta forma regular das ondas de reflexão. Isto é evidente nos resultados de modelos numéricos e afecta todas as alturas de onda ao longo do perfil. Em relação ao modelo 1DL (Figura 26), o comportamento dos dois modelos é semelhante, pois em ambos os casos observa-se o aumento da altura de onda devido ao empolamento seguido pela rebentação das ondas, que ocorre em torno de $x = 650$ m

As diferenças estão relacionadas apenas com a altura das ondas perto da zona de rebentação, pois o modelo COULWAVE apresenta um valor superior ao valor do modelo apresentado em 1D e com a reflexão de onda que não é considerado no modelo 1D e que apresenta no COULWAVE, não influenciando os resultados do modelo não-linear.

No modelo 1D, temos a altura da onda que varia no sentido do offshore para a costa de 0.3 m para 0.37 m, não considerando a reflexão. Já no modelo 2D, a altura da onda varia entre os 0.3 m aproximadamente, e 0.6m, observando-se a reflexão da onda.

Foi considerada mais duas ondas, uma com HS=25 m e TS=7.12 s e outra com HS=0.26 m TS=7.90 s e as soluções numéricas estão apresentadas pelas figuras 28,29,30 e 31. Todas estas soluções apresentam valores muito idênticos de altura da onda, dada pela primeira solução numérica apresentada.

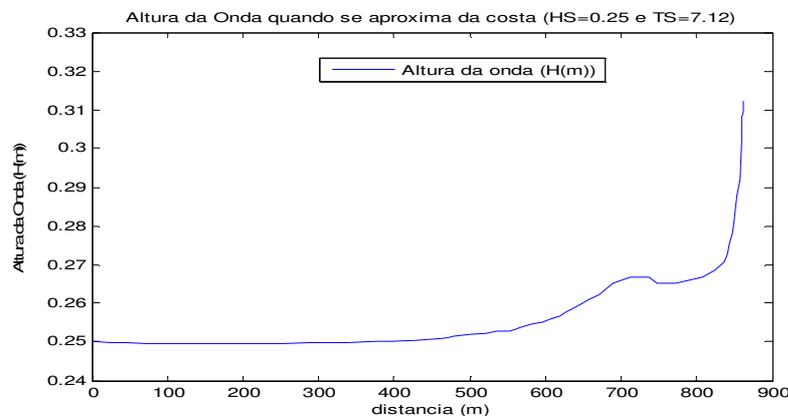


Figura 28: Altura da onda simulada com o modelo 1D em função da distância para um HS=0.25 m e TS=7.12 s, com amplitude de maré 2.11

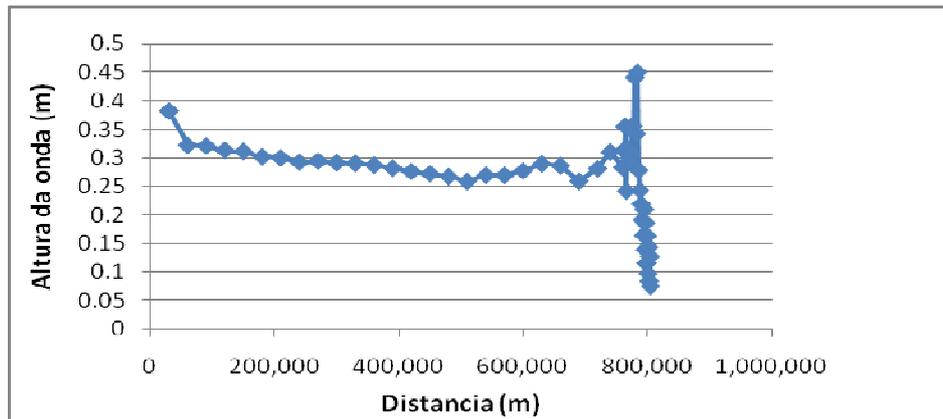


Figura 29: Altura da onda simulada com o modelo COULWAVE em função da distância para um $HS=0.25$ m e $TS=7.12$ s, com amplitude de maré 2.11

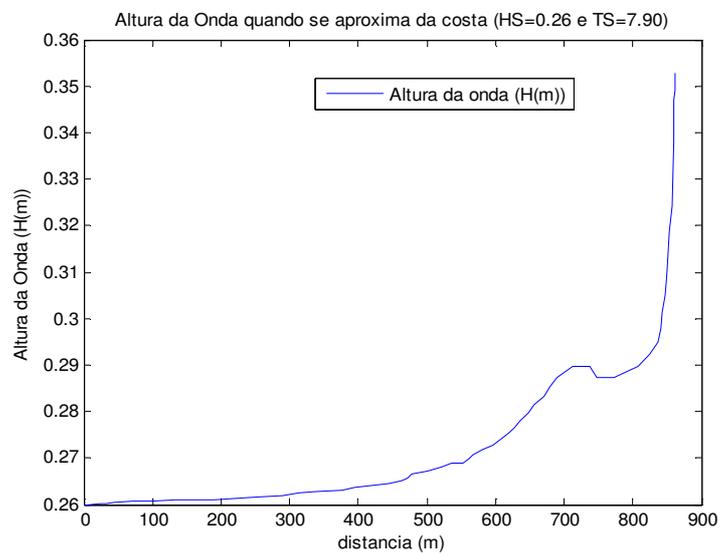


Figura 30: representa a altura da onda em 1D em função da distância para um $HS=0.26$ m e $TS=7.90$ s, com amplitude de maré 1.74

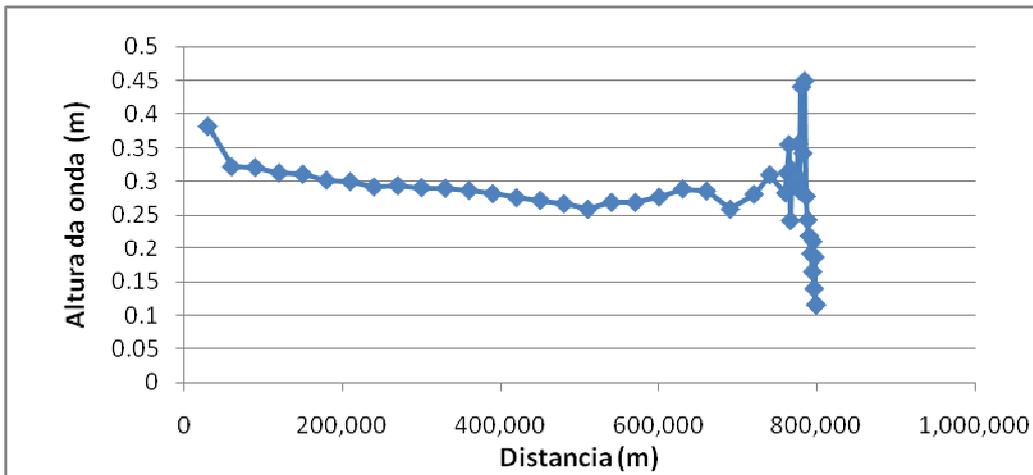


Figura 31: solução numérica relativa ao dia 27, dada altura da onda em função da distância.

6.3 Comparação do modelo 1D e 2D com os dados dos sensores de pressão PTL2 (Honeywell) e PTL1 (Leveltrol)

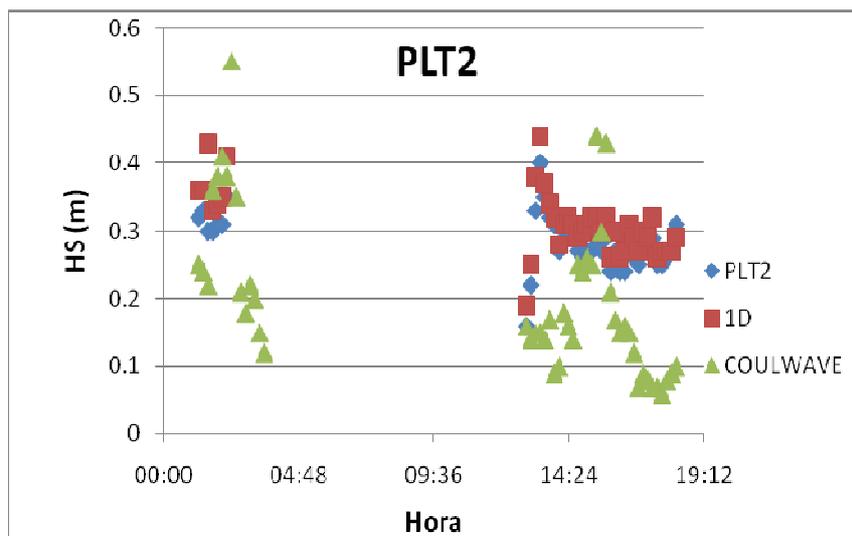


Figura 32: valores de HS na posição PLT2, obtida com o Honeywell(PLT2), com as soluções numéricas 1D e COULWAVE.

Para as posições do sensor de pressão PTL2:

Em geral, os valores numéricos mostram pequenas diferenças no comportamento e magnitude, quando comparados aos observados nos sensores de pressão, para o período analisado (com a profundidade da coluna de água suficiente para permitir as condições de ruptura). Além disso, ambos os resultados mostram que os valores não mudam significativamente de offshore para a costa, embora haja um pequeno aumento devido ao empolamento.

Existem, no entanto, diferenças entre os valores numéricos e medidos. Em geral, os valores medidos são inferiores aos resultados do modelo numérico 1D, especialmente entre as 00:00-

03:00 e 13:00-19:00. Em comparação com o modelo COULWAVE, os valores do sensor são superiores ao do COULWAVE.

O modelo 1D só tem em conta o empolamento e a refração e um modelo muito simples de rebentação. Portanto, em águas pouco profundas o comportamento do modelo 1D não é o melhor.

O modelo COULWAVE, os valores não estão conforme o esperado. A possibilidade deste facto será os valores calculados não estarem bem calculados ou a escolha da localização onde o PT faz o registo no modelo calculado não estar correcta.

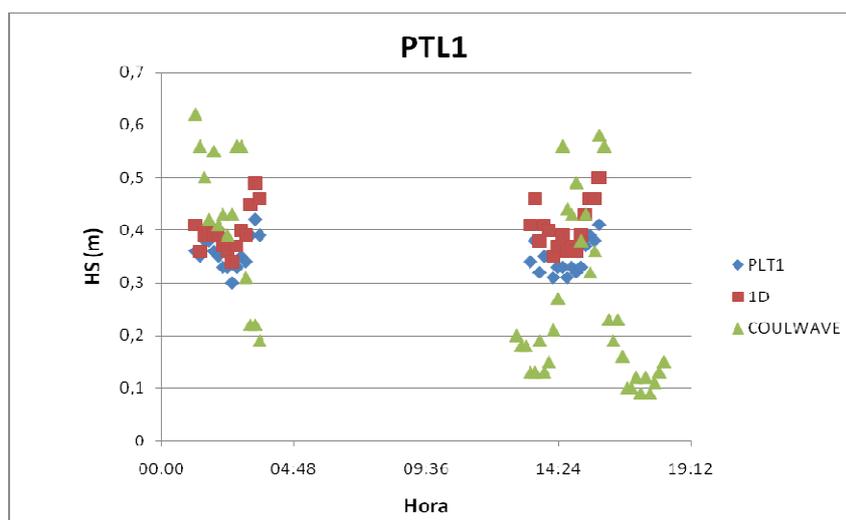


Figura 33: valores de HS na posição PTL1, obtida com o Leveltool(PTL1), com as soluções numéricas 1D e COULWAVE.

Para as posições do sensor de pressão PTL1:

Os resultados medidos e numéricos são semelhantes, aos do PLT2, para o período analisado. Os valores obtidos no modelo 1D são maiores do que os correspondentes da posição PLT2. Para PTL1 sensor de posição, em geral, os resultados medidos e numéricos são semelhantes, para o período analisado. Os valores numéricos estão muito próximos, assim como os valores do sensor, apenas se verifica que os valores do sensor se encontram um pouco abaixo dos valores dos modelos 1D.

No entanto, existem diferenças que podem ser devido ao facto de que o sensor está localizado em uma posição entre a ruptura e zona de espraio das ondas, que possa não atingir o sensor da posição PTL1.

O modelo COULWAVE, apresenta valores diferentes aos esperados, com maior variabilidade em relação aos modelos 1D e aos medidos. Uma vez que, os valores não estarem correctamente calculados ou a escolha da localização onde o PT faz o registo no modelo calculado não estar correcta.

A finalidade neste contexto, seria considerar que ambos os modelos 1D (Linear) e 2D (COULWAVE) seriam capazes de simular as condições de medida, para ambos os sensores de pressão.

Nas Figuras 34 e 35, são apresentadas as soluções numéricas obtidas no artigo do ICCCM10_Fortesimal10, em que os valores numéricos mostram pequenas diferenças no comportamento e magnitude, quando comparados aos observados nos sensores de pressão,

para o período analisado. Além disso, ambos os resultados mostram que os valores não mudam significativamente de offshore para costeira, embora haja um pequeno aumento devido ao empolamento;

Os valores medidos são inferiores aos resultados de modelos numéricos, especialmente 00:00-03h00 para ambos os modelos e 01:00-19:00 para 1DL resultados. Na verdade, entre 01:00-15:00, 1DL resultados mostram as diferenças maiores para as medições. Deve ser notado que este modelo só tem em conta empolamento e a refração e uma onda muito simples.

Portanto, em águas pouco profundas, o comportamento do modelo não é a melhor.

Para PTL1 sensor de posição, em geral, os resultados medidos e numéricos são semelhantes, para o período analisado. Além disso, em comparação com a posição do sensor PLT2, este acordo é melhor.

. Ambos os valores de IC e COULWAVE 1DL modelos são maiores do que os correspondentes da posição PTL2. No entanto, ainda existem diferenças que podem ser devido ao fato de que este sensor está localizado em uma posição de transição entre a ruptura e a zona de varrido das ondas e tão diversas que não atingir o sensor de posição.

Nestas soluções podem considerar que ambos os modelos são capazes de simular as condições de medida, para ambos os cargos. De qualquer forma com o modelo COULWAVE, é alcançado uma melhor coerência com as medições.

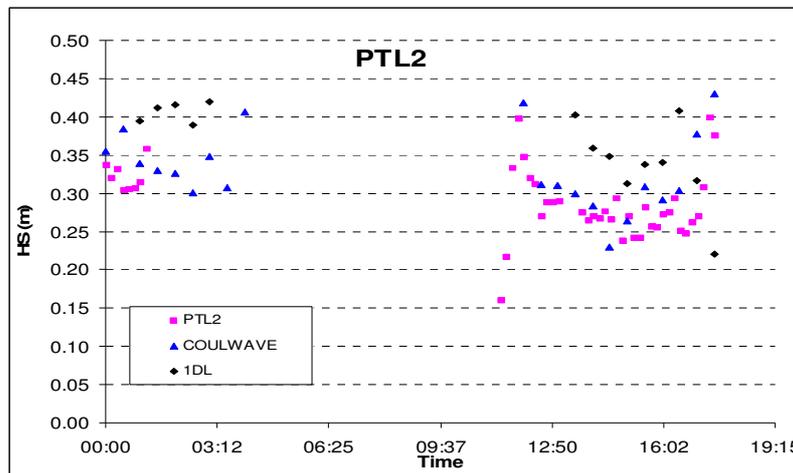


Figura 34: valores de HS na posição PLT2, obtida com o Honeywell(PLT2), com as soluções numéricas 1D e COULWAVE. (Fonte: ICCCM10_Fortesetal10)

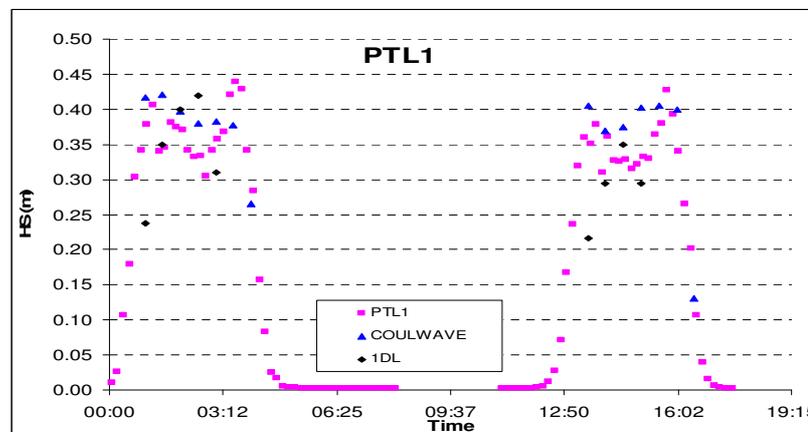


Figura 35: valores de HS na posição PLT1, obtida com o Leveltrool(PLT1), com as soluções numéricas 1D e COULWAVE. (Fonte: ICCCM10_Fortesetal10)

Capítulo 7 – Conclusão

Este trabalho foi realizado, para a análise dos dados relativos á campanha de Faro realizadas nos dias 25 a 28 de Março de 2009, e, finalmente, as simulações numéricas de propagação de ondas para o dia 27 Março. Estas simulações foram realizadas com dois modelos numéricos (1DL e COULWAVE).

Em primeiro lugar, uma onda regular com parâmetros estatísticos (SH e TS) semelhantes aos observados no sensor de pressão offshore (11,7 m de profundidade abaixo MSL (nível médio do mar)) foi instituído como condições de contorno, para ambos os modelos. A comparação entre resultados numéricos e medido, em termos de altura significativa de vaga na PLT2 sensor de pressão e PTL1 foi realizada para essa condição de onda.

Em segundo lugar, para o modelo COULWAVE, uma série de tempo de 10 minutos de duração da elevação da superfície livre se impôs como condições de contorno e uma comparação entre os resultados numéricos e medido.

No que diz respeito a simulações numéricas, a tendência geral da altura de onda significativa estimada utilizando os dois modelos (1DL e COULWAVE) é semelhante às medidas em campo, por pressão PLT2 posições do sensor e PTL1.

Além disso, o acordo com as medições é melhor para o modelo COULWAVE. No entanto, as diferenças entre as observações e as previsões continuam a existir, especialmente para o modelo 1DL, uma vez que este é um empolamento linear simples / modelo refração com uma condição de onda rebentação simples. Além disso, devido à falta de informação, a direcção das ondas não foi considerado nas simulações numéricas e uma onda regular foi considerado como condição de fronteira marítima, sendo que ambos não representam totalmente o que aconteceu em campo.

Foram escolhidas estas soluções numéricas para 1D assim como para o modelo COULWAVE, podendo comparar os dados de altura da onda na aproximação á costa. Assim para o HS e TS determinado, observa-se a rebentação de ondas. É também evidente que a reflexão de ondas ocorre devido á inclinação do perfil de fundo perto da ante-praia. A geração de uma onda monocromática no limite de entrada é provavelmente responsável para produzir esta forma regular das ondas de reflexão. Isto é evidente nos resultados de modelos numéricos e afecta todas as alturas de onda ao longo do perfil.

Na situação em que das ondas tem um ângulo igual a 30° . Os valores de K_r são sempre inferiores à unidade. O fenómeno de refração se manifesta em consequência da redução da velocidade da onda, quando a mesma se propaga de águas profundas para zonas de menor profundidade, devida á incidência oblíqua. Os valores de K_s , são superiores á unidade, o que unicamente traduz a sua aproximação á costa. As condições de onda correspondem às condições de baixa energia. Como o período constante, podemos verificar pela dispersão, que a velocidade diminui logo o seu comprimento de onda também diminui em direcção á costa. A altura de onda aumenta na chegada á costa devido á diminuição da profundidade, logo esta onda sente o fundo.

Para todos os casos a barra-fossa determina a inversão do sentido de todas as componentes aqui calculadas, retomando depois á sua evolução normal, à excepção da altura da onda que provoca ainda mais o empolamento.

Para um ângulo de 0° , os valores de K_r são sempre nulos devido a este mesmo ângulo de incidência. Para os restantes componentes os valores são coincidentes.



Para as posições do sensor de pressão PTL2, os resultados apresentam algumas diferenças. Os valores numéricos do COULWAVE são inferiores aos do sensor e do modelo 1D. O modelo 1D só tem em conta o empolamento e a refração e um modelo muito simples de rebentação.

Portanto, em águas pouco profundas o comportamento do modelo 1D não é o melhor.

Para as posições do sensor de pressão PTL1, os resultados medidos e numéricos são semelhantes. Apenas se verifica que os valores do sensor se encontram um pouco abaixo dos valores dos modelos 1D.

Existem diferenças que podem ser devido ao facto de que o sensor está localizado em uma posição entre a ruptura e zona de espraio das ondas, que possa não atingir o sensor da posição PTL1.

Então, pode considerar-se que ambos os modelos 1D (Linear) e 2D (COULWAVE) são capazes de simular as condições de medida, para ambos os sensores de pressão.

O modelo COULWAVE, apresenta valores diferentes aos esperados, com maior variabilidade em relação aos modelos 1D e aos medidos. Uma vez que, os valores não estarem correctamente calculados ou a escolha da localização onde o PT faz o registo no modelo calculado não estar correcta.

Bibliografia

- [1]. Fortes, C. J. E. M.; Neves, M. G.; Mendes, L. S.; Monteiro, P. P.; Palha, A.; Capitão, R.; Bicudo, P.; Custódio, A.; Costa, H.; Almeida, N.; Cardoso, N.; Carias, L.; Fialho, M. J.; Carvalho, L., *Estudo da Viabilidade de um Recife Artificial para surf na Praia de São Pedro do Estoril*, Comunicação para o IV Congresso de Planeamento das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa (IVCPGC), Madeira, Outubro de 2007, (CMC/IST/FCUL/LNEC- AIA/32 - 03/08/2007).
- [2]. Bicudo, P.; Cardoso, N., *Modelação Numérica para Apoio à Direcção dos Batedores do Modelo Físico*, CMC/IST/FCUL/LNEC-MOD_IST/06-30/11/2007.
- [3]. Bicudo, P.; Cardoso, N., *Modelação Numérica para a Orientação e Declive do Topo do Recife*, CMC/IST/FCUL/LNEC-MOD_IST/07-30/11/2007.
- [4]. Bicudo, P.; Cardoso, N., *Modelação Numérica para a Protecção da Costa Efectuada pelo Recife*, CMC/IST/FCUL/LNEC-MOD_IST/08-30/11/2007.
- [5]. Cardoso, N.; Almeida, N.; Fortes, C. J. E. M.; Neves, M. G., *Modelos de Simulação. REF/DIF e FUNWAVE*, Relatório /07 LNEC, 2007.
- [6]. Dalrymple, R.A.; Kirby, J.T., *REF/DIF 1 Version 2.3 Documentation Manual. Combined Refraction/Diffraction Model*, CACR Report nº 912, University of Delaware (USA), Janeiro, 1991.
- [7]. Chen, Q.; Kirby, J.T.; Dalrymple, R.A.; Kennedy, A.B. & Chawla, A., *Boussinesq modeling of wave transformation, breaking and runup. II: Two Horizontal Dimensions*, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engng.* 126: 48-56, 2000.
- [8]. Kennedy, A.B.; Chen, Q.; Kirby, J.T. & Dalrymple, R.A., *Boussinesq modeling of wave transformation, breaking and runup. I: One Dimension*, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engng.* 126: 39-47, 2000.
- [9]. Kirby, J.T.; Wei, G.; Chen, Q.; Kennedy, A. B.; Dalrymple, R. A. 1998. *FUNWAVE 1.0 – Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model Documentation and User’s Manual*. Research Report No.CACR-98-06. Center for Applied Coastal Research, University of Delaware.
- [10]. Vieira, F.; Fortes, C. J. E. M.; Aguiar, L. G. M.; *Recifes Artificiais para o Surf. Engenharia e Vida*, Nº 23. Abril, 2006.
- [11]. Kirby, J.T.; Dalrymple, R.A., *Combined refraction/diffraction model REF/DIF 1, version 2.5. Documentation and User’s Manual*, Research Report CACR-94-22, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware.
- [12]. Zelt, J. A., *The run-up of nonbreaking and breaking solitary waves*, *Coastal Engrg.*, 15, 205-246, 1991.
- [13]. Wei, G.; Kirby, J. T.; Grilli, S.T. & Subramanya R., *A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations*, *J. Waterway, Port, Coastal Ocean Engng.* 120: 251-261, 1995.
- [14]. Aguiar, L.G.M., *Em busca da forma ideal de um fundo artificial para surf I*, M.Sc. em Engenharia Oceânica, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- [15]. Aguiar, L.G.M.; Valentini, E., *Proposed Artificial Surfing Reef for Macumba Beach, Rio de Janeiro – Brazil*, Proceedings 4th Surfing Reef Symposium, Manhattan Beach, California, USA. pp.19, Jan. 2005