



REBENTAÇÃO DAS ONDAS E O TRANSPORTE DE SEDIMENTOS. O PROJECTO BRISA

C.J.E.M. Fortes¹, Ó. Ferreira², P. Silva³, D. Neves¹, M. Rocha¹, J.A. Santos¹, L. Pinheiro¹, E. Didier¹, L. Endres⁴, R. Capitão¹, M.G. Neves¹, M.M. Bezerra², T. Abreu⁵, A.C. Zózimo^{1,6}, F. Sancho¹, T. Moura¹, T. Okamoto⁷

⁽¹⁾ Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700 066 Lisboa, Tel. +351 21 844 3912, Fax. 351 21 844 3019, jfortes, dneves, mmrocha, jasantos, lpinheiro, edidier, rcapitao, gneves, fsancho, @lnec.pt, theogrm@gmail.com

⁽²⁾ CIMA, Universidade do Algarve, Edifício 7, Campus de Gambelas, 8005-139, Faro, offerreir@ualg.pt, mbezerra@ualg.pt.

⁽³⁾ CESAM & Departamento de Física da Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193, Aveiro, psilva@ua.pt

⁽⁴⁾ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, 91501-970, Brasil, endres@ufrgs.br

⁽⁵⁾ Departamento de Engenharia Civil, ESTGV, Instituto Politécnico de Viseu, Campus de Repeses, 3504-510, Viseu, tabreu@estv.ipv.pt

⁽⁶⁾ WW – Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, SA, Lisboa, Portugal, catarina.zozimo@wwsa.pt

⁽⁷⁾ 1-5-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8529, Japão, tokamoto@hiroshima-u.ac.jp

Resumo

Nesta comunicação descreve-se o projecto BRISA (Interacção entre a rebentação das ondas e o transporte de sedimentos) que tem como objectivo contribuir para a compreensão e modelação numérica dos fenómenos de rebentação das ondas e do transporte de sedimentos em zonas costeiras. Para este efeito, o projecto envolve a modelação numérica e experimental e a recolha de dados de campo relativos à hidrodinâmica da rebentação das ondas e ao transporte de sedimentos.

Neste trabalho são descritas as várias tarefas efectuadas ao longo do projecto. Apresentam-se os ensaios experimentais em modelo físico num canal de ondas, considerando diferentes batimetrias de fundo, e as campanhas de campo realizadas na Praia de Faro e na Praia da Cornélia (Costa da Caparica). Descrevem-se novas formulações associadas à rebentação, às tensões de atrito no fundo e ao transporte sedimentar, bem como a sua implementação e validação em modelos numéricos. Apresenta-se a aplicação de modelos numéricos na simulação dos casos estudados em modelo físico e das condições de agitação verificadas nas campanhas de campo, que permitem validar e analisar o seu desempenho.

Palavras-chave – Projecto BRISA, Rebentação das Ondas, Transporte de Sedimentos, Zonas Costeiras, Modelação numérica, Modelação física, Campanhas de aquisição de dados.

1 INTRODUÇÃO

A caracterização da zona de rebentação é essencial em estudos de hidrodinâmica costeira e de transporte de sedimentos. A localização e a extensão dessa zona são dois dos principais parâmetros a estabelecer, uma vez que determinam o balanço sedimentar e a estabilidade da morfologia das zonas costeiras.

Nesse sentido, o projecto BRISA tem como objectivo contribuir para a compreensão e modelação numérica dos fenómenos de rebentação das ondas e do transporte de sedimentos em zonas costeiras, tendo por base três diferentes tipos de metodologia: a aquisição de dados em campo, a modelação física e a modelação numérica.

No âmbito da hidrodinâmica da rebentação de onda, o trabalho desenvolvido abordou os seguintes itens:

- Análise da rebentação em perfis de fundo complexos (perfis do tipo barra-fossa ou com diferentes inclinações de fundo), através de um vasto conjunto de ensaios em modelo físico em que se obtiveram dados de elevação da superfície livre e velocidade nas fases antes, durante e após a rebentação das ondas;
- Desenvolvimento de um modelo de rebentação, recorrendo ao conceito do ressalto hidráulico, com base nos dados dos ensaios experimentais realizados. Este novo modelo pretende ser, face aos modelos existentes, menos dependente da calibração de parâmetros empíricos para cada caso de estudo;
- Incorporação da rebentação em formulações teóricas existentes, para que estas se tornem mais abrangentes;
- Desenvolvimento/aperfeiçoamento de modelos de propagação de ondas na simulação da rebentação, incorporando as novas formulações desenvolvidas para a rebentação;
- Aplicação/calibração/validação dos modelos numéricos na simulação da propagação e rebentação de ondas nos diferentes casos estudados em modelo físico e nas campanhas de aquisição de dados.

No âmbito do transporte de sedimentos, o foco do trabalho foi a análise dos efeitos da não-linearidade das ondas no fluxo de sedimentos e na morfodinâmica de praias. Foram analisados vários conjuntos de dados relativos à propagação de ondas em praias, adquiridos em laboratório (canais de ondas) ou no campo, quantificando-se, para cada caso, diferentes parâmetros que permitem caracterizar as assimetrias da velocidade orbital do escoamento. Propôs-se uma formulação que descreve adequadamente as não linearidades associadas à onda, nomeadamente as assimetrias associadas à velocidade e aceleração do escoamento. Essa formulação serviu de base para estabelecer uma nova parametrização para a tensão de atrito no fundo com base na qual se melhorou o desempenho dos modelos de transporte de sedimentos.

O projecto englobou também a recolha de dados *in situ*, nas praias de Faro e da Cornélia (Costa da Caparica). As campanhas de aquisição de dados forneceram um conjunto de dados essenciais ao conhecimento da dinâmica da rebentação e ao transporte de sedimentos associado, através de medições simultâneas da velocidade da corrente, da elevação da superfície livre e do transporte sedimentar. Foram também realizados levantamentos topobatimétricos nas zonas de estudo.

Nesta comunicação descrevem-se as metodologias e actividades desenvolvidas ao longo do projecto BRISA, referindo-se os principais resultados até agora alcançados. Nas secções 2 e 3 descrevem-se sucintamente os ensaios experimentais em canal de ondas e as campanhas de aquisição de dados realizadas no âmbito do projecto, respectivamente. Na secção 4 é descrito o trabalho de modelação numérica da hidrodinâmica da rebentação e na secção 5 o relativo à componente do transporte de sedimentos. A secção 6 é referente a comentários finais.

2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

2.1 INTRODUÇÃO

A hidrodinâmica na zona após a rebentação é um aspecto pouco estudado, principalmente para perfis de fundo complexos. No perfil barra-fossa, por exemplo, existe uma primeira rebentação e, posteriormente, um novo empolamento da onda com nova rebentação, em perfis com várias inclinações ao longo da sua extensão a onda sofre diferentes transformações antes de rebentar.

Nesse sentido, foi efectuado em canal de ondas um conjunto de ensaios experimentais para os dois tipos de perfil de praia (perfil barra-fossa e perfil com diferentes declives de fundo), cujos resultados são a base para a análise detalhada das diferentes fases da rebentação (antes, durante e, principalmente, após a rebentação), e para a calibração/validação de diferentes modelos numéricos. Estes ensaios têm como objectivo final o cálculo de um modelo de rebentação introduzido por Utku (1999) baseado no conceito do *Relative Trough Froude Number* (RTFN), por sua vez associado ao conceito do ressalto hidráulico móvel. Este modelo poderá diminuir o empirismo associado aos modelos de rebentação existentes.

2.2 PRAIA COM PERFIL BARRA-FOSSA

2.2.1 Condições de ensaio

Os testes experimentais foram realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), num canal de ondas com cerca de 32 m de comprimento, equipado com um gerador de ondas irregular, Okamoto *et al.* (2008, 2009). A batimetria do fundo do canal foi constituída por uma zona plana, seguida de um conjunto de três rampas, sendo as inclinações da 1^a e 3^a rampas de 1:20. Para a 2^a rampa foram testadas as inclinações: 1:20, 1:40 e 1:80 (Figura 1).

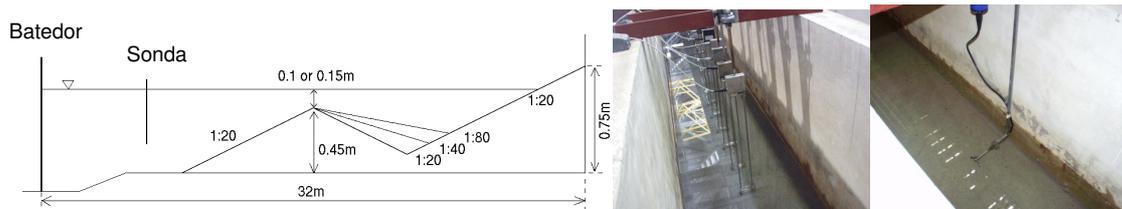


Figura 1 – Canal de ondas e perfil do fundo. Equipamento (sondas resistentes e sensor ADV).

O objectivo destes ensaios foi a medição da elevação da superfície livre e da velocidade, desde a zona pouco antes da ocorrência da rebentação até ao seu final. As condições de ondas regulares simuladas no canal corresponderam a períodos de onda de $T=1.1, 1.5, 2.0,$ e 2.5 s e alturas de onda de $H=8, 10, 15,$ e 20 cm. Contudo, no caso de $T=1.1$ s e $H=20$ cm, as ondas rebentavam imediatamente após a sua formação devido à declividade da onda, pelo que este teste foi excluído. Testaram-se duas profundidades de água sobre a crista da barra: $d=10$ cm e 15 cm.

Para as medições da elevação da superfície livre, utilizaram-se um conjunto de sondas resistentes (Figura 1), cuja frequência de amostragem foi de 100 Hz. As sondas foram instaladas ao longo de 8.0 m, espaçadas 0.1 m. O medidor acústico de velocidades por efeito de Doppler, ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) foi usado para medir a velocidade das partículas em suspensão. Esta velocidade foi medida desde $x = 10$ cm, até, pelo menos, $x = 100$ cm à frente da zona em que terminava a rebentação, dependendo do período da onda. O sensor do ADV foi primeiramente colocado a meia altura da coluna de água. No entanto, foi também medida a velocidade próximo da superfície a partir do término da rebentação. A frequência de amostragem do ADV foi de 25Hz.

Os registos das sondas foram obtidos durante 120 s para $T=1.1$ s e 1.5 s e 150 s para $T=2.0$ s e 2.5 s. A velocidade das partículas foi medida durante 90 s para $T=1.1$ s e 120 s para os restantes períodos de onda. A medição dos valores só se efectuou após um período de 300 s, de modo a estabilizar as condições naturais de oscilação do canal.

Procedeu-se também à identificação da localização do início e fim da rebentação por observação visual. As zonas da crista da onda onde as bolhas de ar começam a aparecer ou a desaparecer são consideradas o início e o fim da rebentação, respectivamente. Desta forma, foram obtidas cerca de 50 amostras e determinados valores médios das posições inicial e final da rebentação.

2.2.2 Resultados

Para cada ensaio e para as várias condições de agitação, foram obtidos ao longo do canal os valores da elevação da superfície livre e da velocidade das partículas a meia altura da coluna de água e as localizações do início e fim da rebentação. Para certas posições seleccionadas obteve-se também o perfil de velocidades.

O tratamento dos dados obtidos permitiu o cálculo, entre outros, de parâmetros como (i) a altura de onda, (ii) a altura de onda relativa, (iii) a velocidade da onda na cava, (iv) a celeridade da onda, (v) a energia associada às harmónicas presentes no registo de elevação da superfície livre e (vi) o índice de rebentação RTFN introduzido por Utku (1999). Este índice, com o qual se

pretende diminuir o empirismo associado aos modelos de rebentação existentes, é dado por $RTFN = C_{crista} - u_{cava} / C_{crista}$, em que C_{crista} é a celeridade na crista e u_{cava} a velocidade na cava. A título de exemplo, apresentam-se na Figura 2, alguns destes resultados.

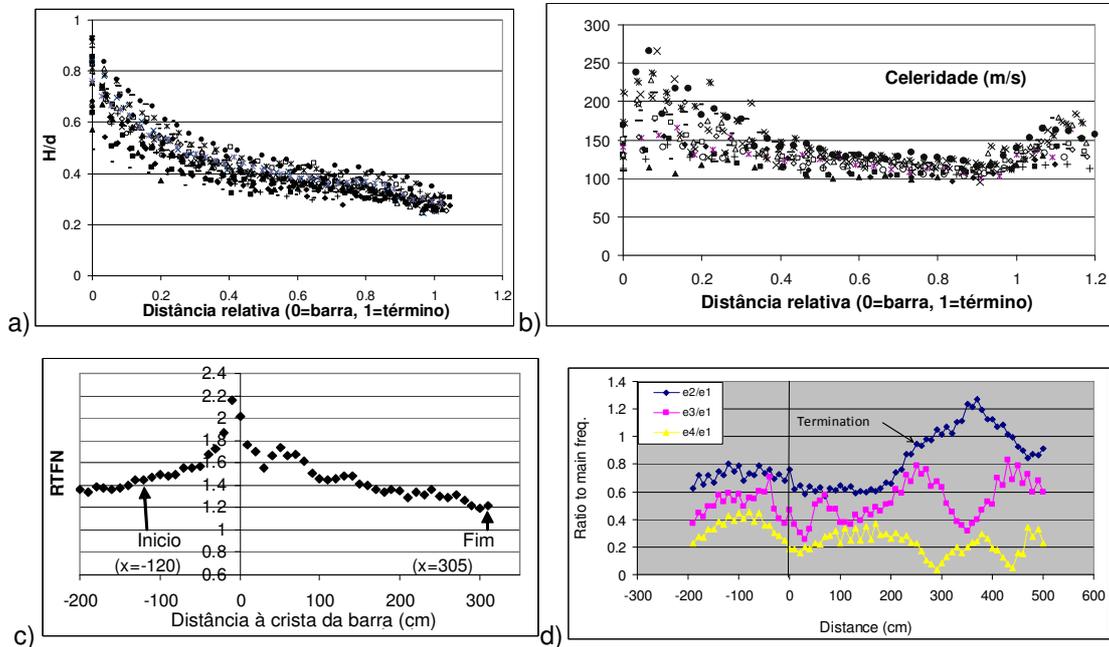


Figura 2 - (a) Altura relativa da onda (H/d) e (b) Celeridade da onda, para todos os casos testados sobre o fundo de inclinação 1/20 do lado direito da barra; (c) Evolução do RTFN durante a rebentação ($T=2.0$ s, $H=8$ cm, declive 1:40); (d) Evolução da densidade de energia associada às harmónicas geradas durante e após a rebentação ($T=2.0$ s, $H=8$ cm, declive 1:20).

2.3 PRAIA DE DECLIVE VARIÁVEL

2.3.1 Condições de ensaio

No 2º tipo de ensaios efectuados no mesmo canal do LNEC (Neves *et al.*, 2010), considerou-se um perfil de fundo que consiste numa zona de inclinação variável, de cerca de 6.82 m, seguida de uma secção com inclinação de 1:20, terminando numa rampa com declive de 1:80, Figura 3. Foi definida uma profundidade de 10 cm de coluna de água no topo da rampa 1:20. Os ensaios nesta batimetria seguiram uma metodologia muito semelhante à descrita na secção 2.2.

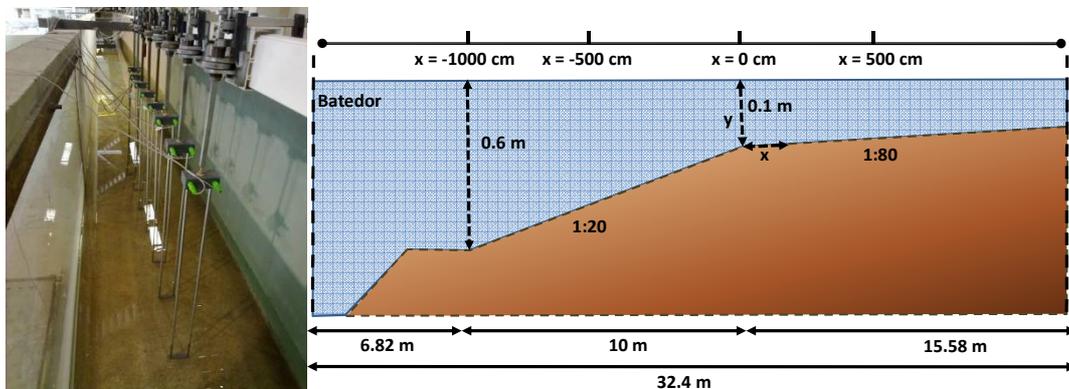


Figura 3 – Canal de ondas e perfil de fundo.

Foram realizados ensaios para as condições de agitação regular correspondentes à combinação de períodos de onda de $T=1.1, 1.5, 2.0$ e 2.5 s e alturas de onda de $H=12, 14, 16$ e 18 cm. As medições foram efectuadas em diferentes fases:

- Fase I - medição dos valores da elevação da superfície livre ao longo do canal, com uma estrutura móvel de 8 sondas resistivas (Figura 3). Foram efectuadas medições de 10 em 10 cm desde a posição $x=-1000$ cm até à posição $x=560$ cm;
- Fase II - medição simultânea da velocidade das partículas com um sensor ADV e da elevação da superfície livre ao longo do canal. Foram efectuadas medições de 10 em 10 cm desde a posição $x = -200$ cm até à posição $x = 560$ cm, e de 100 em 100 cm desde a posição $x = -1000$ cm até à posição $x = -200$ cm;
- Fase III - medição de perfis verticais de velocidade com um sensor ADV, abaixo da superfície livre, em determinados locais do canal. As medições dos perfis verticais foram efectuadas em $x = -1000, -500, -100, 0, 50$ e 150 cm.

Efectuaram-se também observações visuais da localização do início e fim da rebentação.

2.3.2 Resultados

Para cada condição de agitação incidente, obtiveram-se as séries temporais da elevação da superfície livre e da velocidades das partículas ao longo do canal. Com base nestes resultados, efectuou-se, primeiramente uma análise temporal, espectral e estatística dos dados recolhidos, e, posteriormente, uma análise mais aprofundada, que consistiu no cálculo dos seguintes parâmetros: (i) a altura de onda relativa (H/d); (ii) a celeridade das ondas; (iii) a distribuição bidimensional das componentes da velocidade das partículas segundo os planos x - y , x - z e y - z ; (iv) a direcção da onda e do ângulo de dispersão.

A título de exemplo, na Figura 4a apresenta-se a altura de onda relativa (H/d), que é usada frequentemente como índice para a secção característica da rebentação de onda em águas pouco profundas. Da Figura 4a pode concluir-se que o valor médio de H/d no fim da secção de rebentação de onda se encontra entre 0.40 e 0.50. Na Figura 4b são apresentados resultados de celeridade da onda ao longo do canal, para as condições de onda incidente de $H = 18$ cm e períodos de $T = 1.5, 2.0$ e 2.5 s. Os resultados da celeridade da onda demonstram que no começo da rampa 1:20 existe um aumento da celeridade, seguido de um claro decréscimo associado à redução da profundidade do canal. Na secção final do canal, a redução drástica no declive da rampa e o final da zona de rebentação da onda motiva o alisamento da curva de celeridade mostrando uma tendência para as curvas se juntarem numa só, independente dos diferentes períodos de onda.

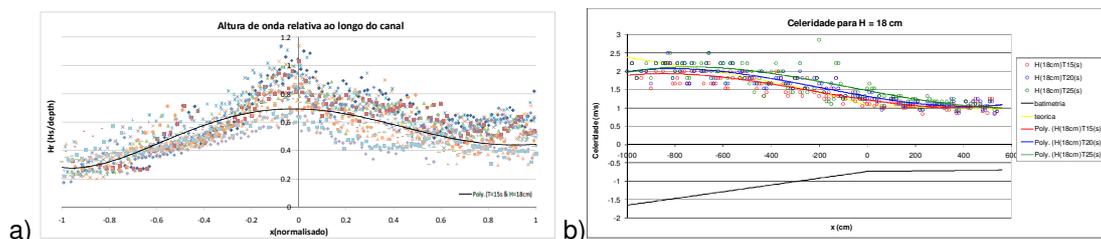


Figura 4 – (a) Evolução da altura de onda relativa ($x = 0$ é o início e $x = 1$ o final da rebentação) para as todas as condições de onda incidentes testadas; (b) Celeridade da onda ao longo do canal para $H = 18$ cm e $T = 1.5, 2.0$ e 2.5 s.

Relativamente às distribuições bidimensionais das componentes da velocidade das partículas segundo os planos x - y , x - z e y - z , foram avaliados os parâmetros (E_x, E_y, E_z) que traduzem, respectivamente, a diferença entre as médias dos valores positivos e dos negativos para cada componente da velocidade medida pelo sensor ADV, x (longitudinalmente ao canal), y (transversalmente ao canal) e z (componente vertical). A Figura 5a apresenta a razão E_z/E_x , para uma onda incidente de $T=1.5$ s e $H=18$ cm, demonstrando claramente que o começo da zona de

rebentação da onda acontece sensivelmente na posição $x \cong -400$ cm, sendo que seguidamente essa razão sofre um aumento abrupto (aumento de E_z), decrescendo posteriormente (decréscimo de E_z), o que obriga a um alongamento da forma da onda na direcção longitudinal do canal.

Aproveitando as medições simultâneas de velocidade das partículas e da elevação da superfície livre ao longo do eixo x do canal, foi obtida a direcção média da onda, tendo sido para tal adoptado o método descrito em Trageser e Elwany (1990). Para os dados recolhidos neste trabalho foram calculadas a direcção média e o ângulo de dispersão (espalhamento). A Figura 5b apresenta os ângulos da direcção média e de dispersão para uma onda incidente de $T=1.5$ s e $H=18$ cm. Os resultados obtidos evidenciam uma direcção de propagação da onda próxima dos 270° (segundo o eixo x) ao longo de todo o canal, e é visível uma oscilação do ângulo de dispersão na zona de rebentação de onda. Os resultados desta análise apontam para uma possível relação directa entre os valores do ângulo de dispersão provenientes da análise direccional e os efeitos turbulentos devidos à rebentação das ondas.

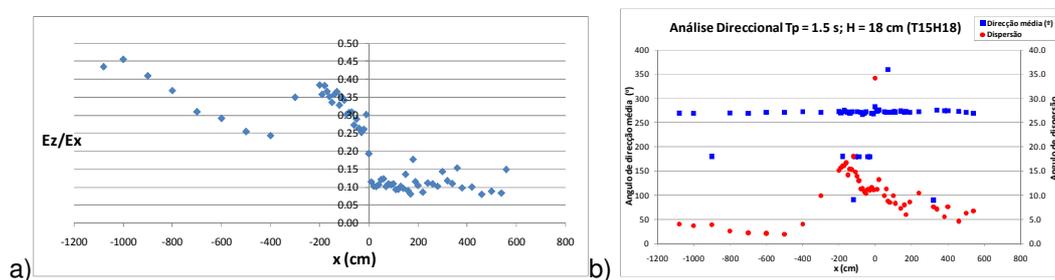


Figura 5 - (a) E_z/E_x ; (b) Direcção média e ângulo de dispersão para uma onda incidente de $T=1.5$ s e $H=18$ cm, ao longo do eixo x do canal.

3 CAMPANHAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

3.1 INTRODUÇÃO

O objectivo das campanhas de aquisição de dados de campo foi a recolha de dados *in situ* visando o conhecimento da dinâmica da rebentação e do transporte de sedimentos nas praias em estudo. Mais concretamente, pretendeu-se:

- Determinar a agitação marítima local na zona de rebentação, através da medição da pressão em diversos pontos, ao longo de um perfil de praia;
- Medir as variações morfológicas (transversais e longitudinais) e estimar o transporte sedimentar transversal;
- Caracterizar o campo de correntes litorais;
- Cruzar dados de correntes com dados do transporte sedimentar (obtidos com armadilhas de sedimentos) e variações morfológicas (avaliadas com levantamentos topográficos e um sistema de sensores de pressão), de forma a caracterizar a dinâmica sedimentar.

Neste âmbito, foram efectuadas duas campanhas: uma na Praia de Faro (Península do Ancão, Faro), entre 25 e 28 de Março de 2009 e outra na Praia da Cornélia (200 m a sul da Praia da Saúde, Costa da Caparica), entre 11 e 15 de Maio de 2010. As campanhas envolveram diversa instrumentação, tal como transdutores de pressão, correntómetros electromagnéticos e acústicos, sensores para medições de sedimentos em suspensão e armadilhas de sedimentos. Os levantamentos batimétricos foram efectuados recorrendo a um sistema RTK-DGPS acoplado a uma eco-sonda. As variações topográficas para além de serem registadas com DGPS foram também estimadas através de uma técnica inovadora que têm como princípio de funcionamento a deformação de redes de Bragg gravadas em fibra óptica, por acção da pressão exercida pela areia/água acima destes (Ferreira, 2009).

3.2 1ª CAMPANHA – PRAIA DE FARO, 25 A 28 DE MARÇO DE 2009

3.2.1 Descrição geral

A praia de Faro situa-se na Península do Ancão, que delimita a Ria Formosa (Algarve) a poente (Figura 6). Com uma extensão de areal de vários quilómetros, é uma praia com declives médios de 0.1, na face de praia, transitando para cordão dunar na parte superior.

O principal objectivo desta campanha foi a aquisição de dados hidrodinâmicos e morfológicos para futuros testes e validação de modelos numéricos. Além disso, esses dados contribuem para o conhecimento da rebentação das ondas, da dinâmica sedimentar e da morfodinâmica específica da praia.



Figura 6 – Localização da Praia de Faro e da área de instalação de equipamentos.

3.2.2 Medições *in situ*

A batimetria da zona costeira adjacente à área de estudo foi obtida através da utilização de um sistema RTK-DGPS acoplado a uma eco-sonda e a um sistema de navegação e foi adquirida no âmbito do projecto do 7º PQ europeu MICORE (*Morphological Impacts and Coastal Risks Induced by Extreme Storms*). Este levantamento foi realizado ao longo de 4 transectos transversais, desde a face de praia até à profundidade de 10 m (profundidade de fecho), com um espaçamento de 30 m e 16 transectos longitudinais (perfis numerados de P1 a P11), com um espaçamento de 30 m, até à profundidade de 5 m, e um espaçamento de 100 m, entre os 5 e os 10 m de profundidade (Figura 7a e Figura 8a). A topografia da face de praia foi obtida com um GPS, ao longo de 11 transectos transversais e 8 transectos longitudinais numerados de L1 a L8 (Figura 7b), em cada baixa-mar diurna durante os dias da campanha.



Figura 7 - Esquema dos levantamentos: (a) batimétrico (com identificação de local de instalação do transdutor de pressão – PT_Off) e (b) topográfico.

Durante a campanha, foram instalados diversos instrumentos, Figura 8b:

- dois transdutores de pressão individuais, um colocado à profundidade de ≈ 12 m, na direcção aproximada do perfil 4, P4, para recolha de dados da ondulação incidente ao largo (PT_Off).
- dois conjuntos de transdutores de pressão com 3 e 5 sensores cada, colocados ao longo dos Perfis 3 e 4 (PTL0, PTL1 e PTL2 e PTV1 a 5);
- dois correntómetros electromagnéticos, um no Perfil 4 (ECMV) e outro no Perfil 3 (ECML);
- três correntómetros acústicos, um colocado a profundidades entre 1 e 4 m, na direcção aproximada do Perfil 4 (ADP), para registar continuamente perfis de correntes e direcções e alturas das ondas durante as 4 primeiras marés, e os outros estacionados ao longo dos perfis 3 e 4 (ADVL e ADVA, respectivamente) (Figura 8c);
- um sensor de pressão em fibra óptica para medição das variações da topografia. O sensor foi colocado no subsolo a cerca de 50 cm da superfície da areia no perfil 3 (PTA).

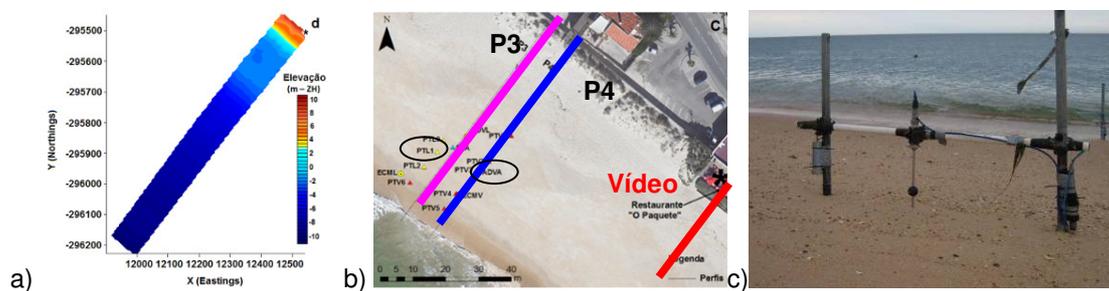


Figura 8 - (a) Perfis P3, P4 e Vídeo - Localização de instalação dos equipamentos utilizados; (b) Exemplo de modelo digital de terreno de levantamento topo-batimétrico; (c) Exemplo de instrumentação colocada.

Todos os instrumentos foram instalados durante a baixa-mar, georreferenciados através de um sistema DGPS e sincronizados com o Observatório Astronómico de Lisboa.

Para obtenção de informação sobre transporte longilitoral de sedimentos, foram colocadas armadilhas de sedimento na zona de rebentação por períodos de 10 minutos, durante a 1^a e a 5^a maré. Para a caracterização sedimentológica da zona da face de praia, foram recolhidas amostras de sedimentos de 10 em 10 m, ao longo do 3^o e 5^o transectos, em todas as baixamares (como não houve acção da onda na zona superior da praia, não foram aí recolhidas amostras depois do 1^o dia).

Foi utilizada uma câmara de vídeo portátil (para além da câmara fixa que se encontrava no restaurante Paquete a captar continuamente imagens da área em estudo) para registar níveis de espraio, em intervalos de 10 min, a cada ≈ 1 h. (ver Figura 8b).

3.2.3 Resultados

Com os dados obtidos nos sensores de pressão PT_Off e PTL1, foi efectuada uma análise temporal e espectral dos respectivos registos. A título de exemplo, apresentam-se na Figura 9, para o sensor PT_Off, os valores da altura significativa (H_s) e do período significativo (T_s) registados entre os dias 26 e 29 de Março.

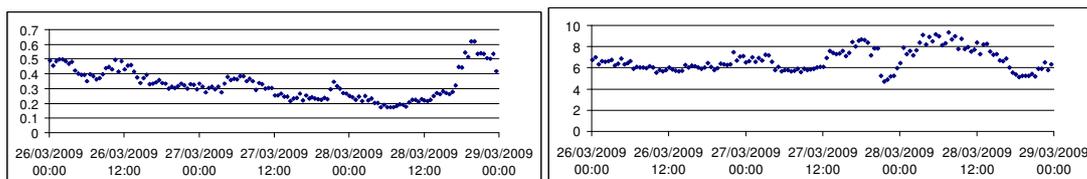


Figura 9 - Valores de H_s (m) e T_s (s) registados no PT_Off.

Na parte superior da Figura 10a, é apresentado um exemplo do registo obtido no transdutor PTL1 e o espectro de energia correspondente. Na Figura 10b pode observar-se o registo das componentes segundo x e y da velocidade medida no ADVA. O correntómetro acústico ADVA foi colocado na zona de espraio da praia, pelo que o registo da ondulação consiste na forma de uma sucessão de pulsos cada um correspondente às fases de espraio e refluxo da onda.

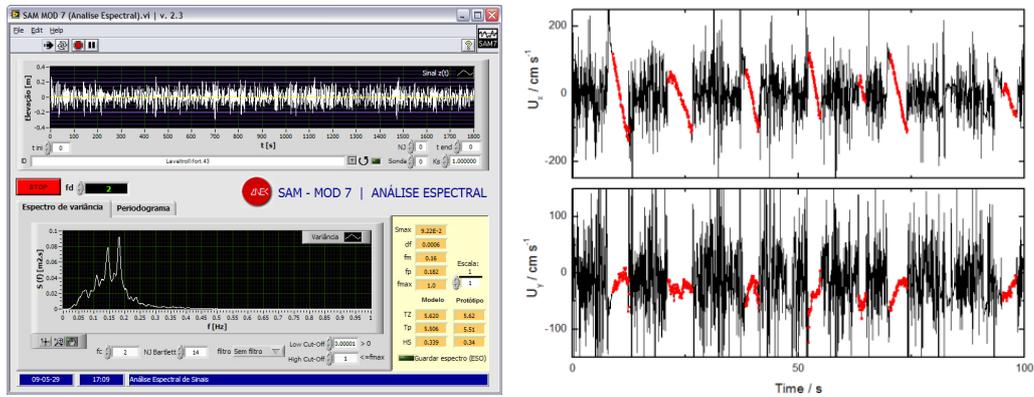


Figura 10 - Registo da elevação da superfície livre do transdutor PTL1 e correspondente espectro de energia (à esquerda). Registo das 02h14m; à direita, exemplo do registo das velocidades segundo xx e yy medidas com o ADVA no dia 26 de Março: a negro os dados em bruto e a vermelho as medições válidas representativas do espraio e refluxo da onda.

Na Figura 11 apresentam-se os perfis de praia adquiridos com o DGPS e reconstruídos a partir das imagens da câmara vídeo.

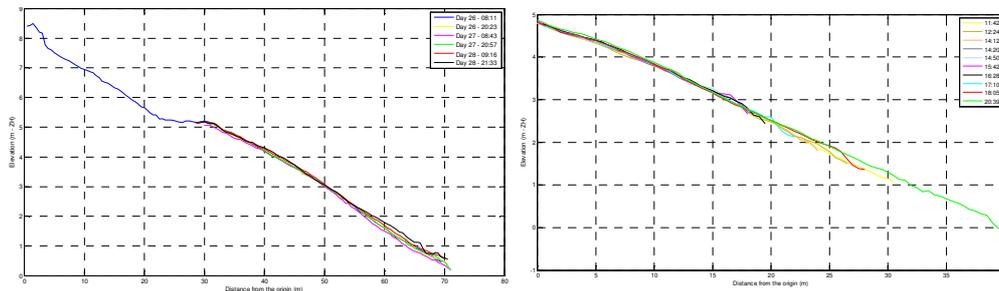


Figura 11 – Perfis de praia ao longo da campanha obtidos com o DGPS (esquerda) e com o sistema vídeo (direita).

3.3 2ª CAMPANHA – PRAIA DA CORNÉLIA, 11 A 15 DE MAIO DE 2010

3.3.1 Descrição geral

A 2ª campanha do projecto BRISA foi realizada entre os dias 11 e 15 de Maio de 2010, na praia da Cornélia, Costa da Caparica, Portugal (Figura 12). A área em estudo estende-se de uma altura de cerca de 5 m acima do zero hidrográfico (ZH), até profundidades de 7.6 m (ZH), na zona mais distante da costa. A praia apresenta um perfil barra-fossa típico, com uma barra submersa localizada a cerca de 650 m do extremo mais profundo do domínio, sem grandes variações batimétricas longitudinais.



Figura 12 - Local da campanha de aquisição de dados do Projecto BRISA (Google Earth): a) Costa da Caparica e b) Praia da Cornélia.

3.3.2 Medições in situ

No decorrer desta campanha foram instalados diversos equipamentos num único perfil transversal como se mostra na Figura 13 e na Tabela 1, tais como, um transdutor de pressão (PT_UAlg_Offsh), a uma profundidade de cerca de 9.4 m (NMM) para recolha de dados ao largo; dois correntómetros acústicos (ADV – UAlg e ADV – UA) e três correntómetros electromagnéticos (ECM – UAlg, ECM – LNEC e EMCM – FCUL), para medição das velocidades; dois conjuntos de sensores para medição de sedimentos em suspensão (4 OBS – UAlg e 3 OBS – FCUL), cinco transdutores de pressão individuais (2 PT – UAlg, 2 PT – LNEC e 1 PT – FCUL) (Tabela 1), e sensores de pressão de fibra óptica ao longo de um perfil transversal na zona da face de praia (Figura 13). Todos os instrumentos foram instalados durante a baixa-mar, geo-referenciados através de um sistema RTK-DGPS e sincronizados com o Observatório Astronómico de Lisboa.

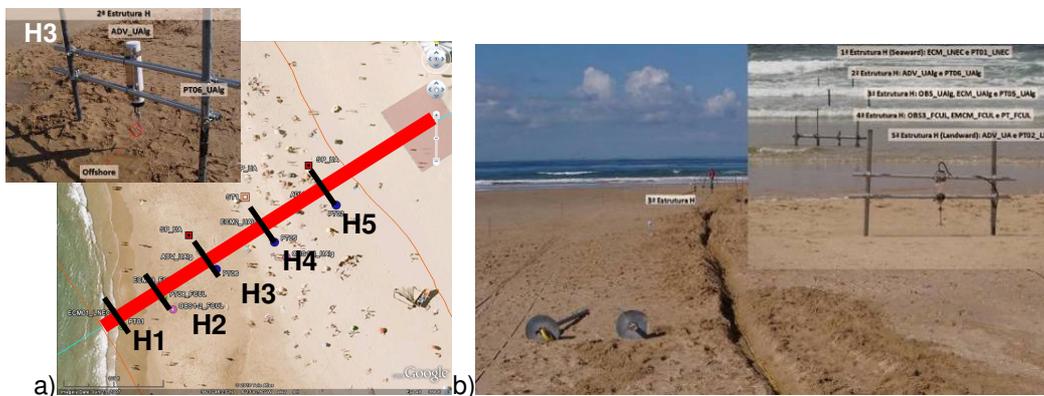


Figura 13 - Localização do perfil da praia onde foram posicionados os equipamentos em estruturas em H; b) Fotografia do perfil incluindo os equipamentos.

Tabela 1: Identificação dos equipamentos e das estruturas a que foram acoplados (Figura 13).

Estrutura	Equipamento			
	ECM	PT	ADV	OBS
+9.4 (NMM)		PT06_UAlg_Offsh		
H1	ECM_LNEC	PT01_LNEC		
H2		PT06_UAlg	ADV_UAlg	
H3	ECM_UAlg	PT05_UAlg		OBS_UAlg
H4	ECM_FCUL	PT_FCUL		OBS_FCUL
H5		PT02_LNEC	ADV_UA	

O levantamento topo-batimétrico (Sistema RTK-DGPS + Eco-sonda) da zona costeira em estudo foi realizado no dia 11 de Maio de 2010 durante a preia-mar diurna. Este levantamento foi feito

ao longo de 19 perfis perpendiculares à linha de costa, com espaçamento de 100 m entre si (Figura 14).

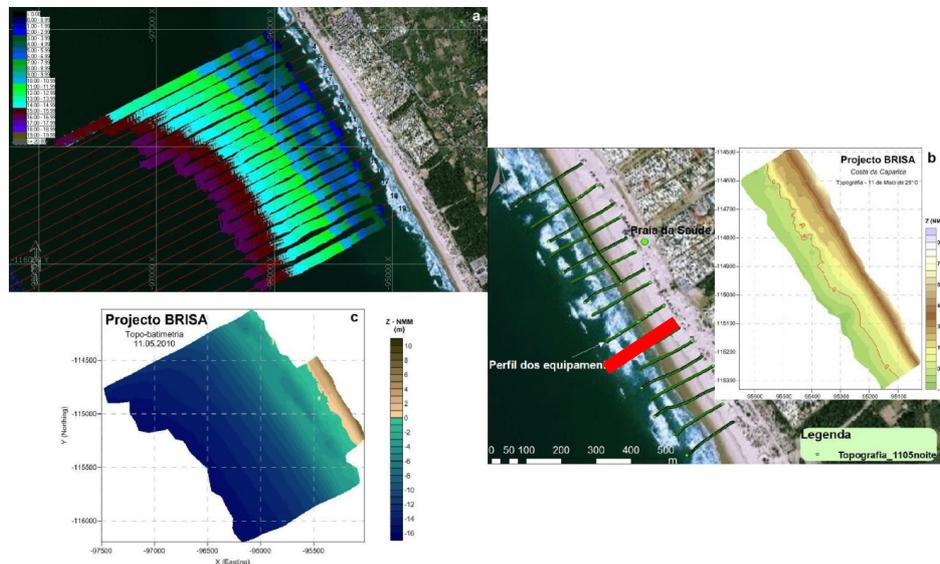


Figura 14 - Esquema dos levantamentos (a) batimétrico e (b) topográfico com exemplo de modelo digital de terreno dos respectivos dados. (c) Exemplo de modelo digital de terreno de levantamento topo-batimétrico

Durante a baixa-mar nocturna do dia 11 de Maio de 2010 foi realizado o primeiro levantamento topográfico (GPS) ao longo de 16 transectos perpendiculares à praia, com espaçamento entre si de cerca de 50 m, e 1 transecto longitudinal, ao longo da crista da berma (Figura 14). Este levantamento foi efectuado com o objectivo de complementar o levantamento batimétrico realizado no mesmo dia, permitindo a construção de um modelo digital do terreno topo-batimétrico. Durante a baixa-mar diurna do dia 12 de Maio de 2010 (dia da montagem dos equipamentos na face de praia) foi efectuado um levantamento topográfico ao longo de 9 transectos perpendiculares à praia (1 dos quais correspondente ao perfil ao longo do qual foram colocadas as estruturas H com os equipamentos). A partir daqui os levantamentos topográficos foram feitos apenas ao longo do perfil com os equipamentos, em cada baixa-mar. Estes levantamentos serviram de base para a determinação da evolução morfológica nos dias da campanha e de teste para os modelos.

Para se obter uma caracterização granulométrica ao longo do perfil de praia em foco, foram colhidas, no dia 12 de Maio de 2010, amostras de sedimento nos locais onde foram colocados os equipamentos. Para avaliação do transporte de sedimentos longitudinal foram recolhidas amostras de sedimento em transporte na coluna de água, com uma armadilha de sedimento, colocada próximo do local das estruturas H3 e H4, que tinham os OBS instalados, durante as enchentes diurnas. No total foram colhidas 12 amostras de sedimentos em transporte.

Os instrumentos iniciaram as medições às 09:00 AM do dia 12 de Maio de 2010 e a aquisição de dados foi efectuada durante 5 ciclos de maré. A campanha terminou no dia 14 de Maio às 19:00, apesar de o transdutor em águas mais profundas apenas ter sido retirado no dia 15 de Maio, às 11:00.

3.3.3 Tratamento de resultados

A partir das medições de pressão obtidas pelos transdutores (PT), foi possível inferir a elevação da superfície livre na zona de rebentação. A título de exemplo, apresentam-se na Figura 15 as séries temporais obtidas, para os sensores de pressão PT06_Offsh_UAlg e PT01_LNEC. Na mesma figura apresentam-se ambas as componentes da velocidade horizontal medidas pelo

ECM_LNEC. O correntómetro foi orientado de modo que U e V representassem, respectivamente, as componentes da velocidade perpendicular e paralela à linha de costa.

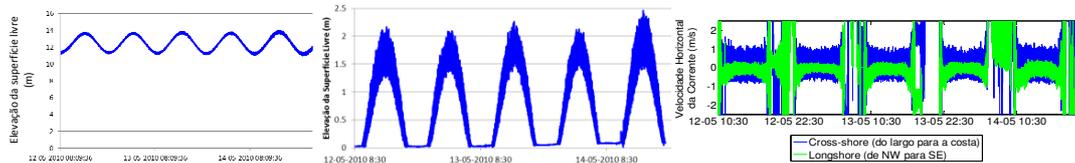


Figura 15 - Elevação da superfície livre obtida pelo sensor de pressão PT06_UAlg_Offsh e PT01_LNEC, das 08:14:23 de 12-05 às 23:59:59 de 14-05. Componentes cross-shore e longshore da velocidade horizontal medida pelo ECM_LNEC, nos períodos entre as 10:00:00 do dia 12-05 e as 9:29:00 do dia 13-05 e as 10:10:00 do dia 13-05 e as 22:51:19 do dia 14-05.

Com esses valores foi possível efectuar uma análise temporal e espectral. A título de exemplo, apresentam-se:

- Os valores de H_s e T_s calculados em PT06_Offsh_UAlg, a partir dos dados de elevação da superfície livre (Figura 16a,b);
- Análise espectral de Fourier e Wavelet de um intervalo de 30 min, obtido a partir da série de elevação de superfície livre medida em PT01_LNEC (Figura 16c,d);
- Velocidades máxima, mínima, média e média quadrática calculadas a partir da componente perpendicular à costa da velocidade horizontal (U), medida pelo ECM_LNEC (Figura 16e).

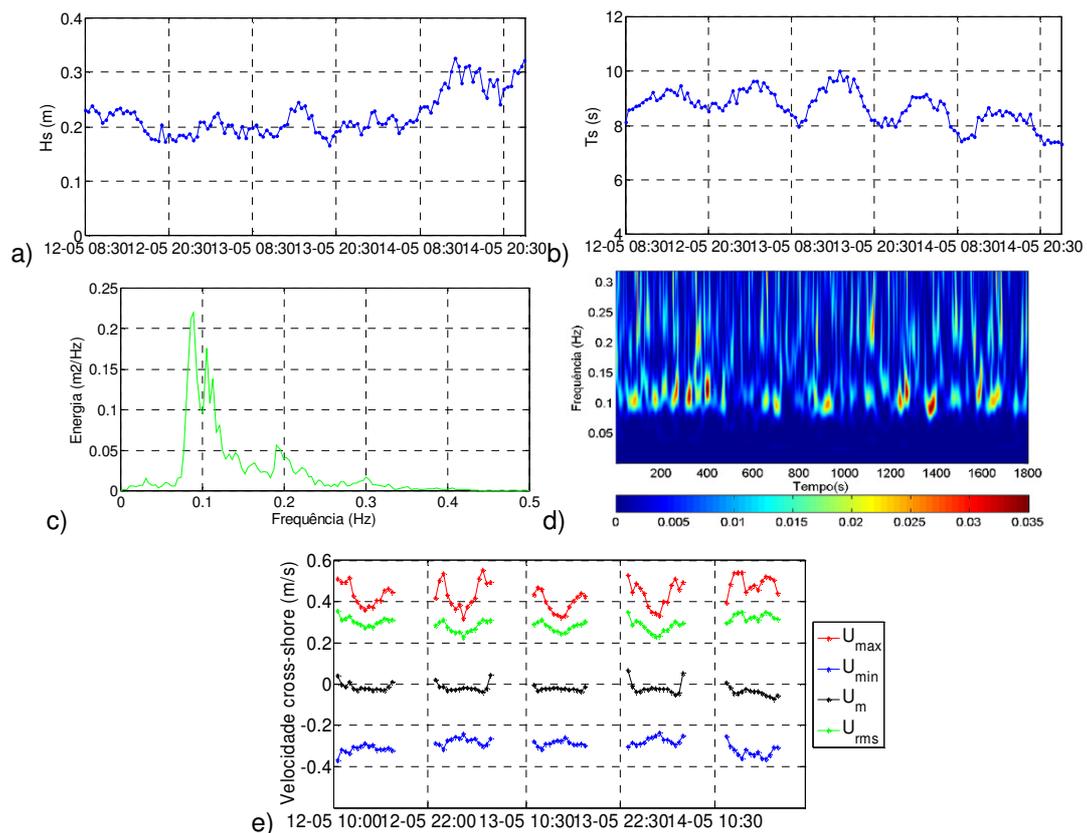


Figura 16 - Valores de a) H_s e b) T_s , obtidos transdutor PT06_Offsh_UAlg (Infinity_WH), entre 12-05 às 08:30 e 14-05 às 23:30. Análise espectral de c) Fourier e de d) Wavelet do intervalo de 30 min com início às 3:00 do dia 13 de Maio para PT01_LNEC. e) Representação da variação das velocidades máxima, mínima, média e média quadrática da componente da velocidade.

A Figura 17 representa a variação temporal da topografia da praia medida com um sensor óptico junto da estrutura H4, bem como elevação da superfície livre da água referente ao nível médio do mar. Os dados representados reportam-se desde o início da campanha, às 13h do dia 12 de Maio até às 18h do dia 15. O sinal bruto do sensor foi convertido em nível de areia, considerando um factor de calibração determinado (Ferreira, 2009). Os pontos representados na figura indicam os valores do nível de areia no local do sensor obtidos em cada baixa-mar com o equipamento RTK-GPS. Apesar das variações do nível da areia serem bastante pequenas, o sensor óptico foi capaz de as discriminar sendo os resultados confirmados por meio de medições GPS (Antunes *et al.*, 2010).

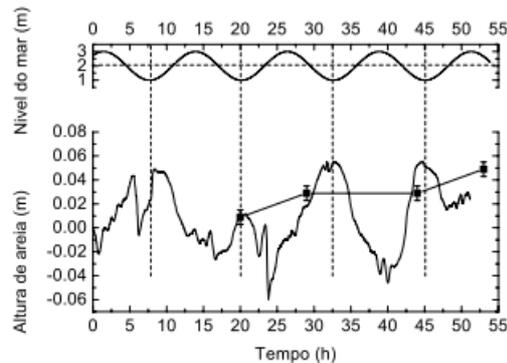


Figura 17 - Dados registados com o sensor óptico (em baixo) e nível do mar (em cima) Abaixo da linha a tracejado horizontal não existe água sobre a superfície de areia acima do sensor. As linhas a tracejado verticais marcam os pontos de maré baixa. Os pontos representam os dados recolhidos com o aparelho GPS e a linha os dados do sensor (adaptado de Antunes *et al.*, 2010).

4 MODELAÇÃO NUMÉRICA EM REBENTAÇÃO DE ONDAS

O trabalho que tem vindo a ser desenvolvido nesta componente pode ser dividido nos seguintes itens:

- Análise do desempenho de modelos numéricos (FUNWAVE, COULWAVE, BOUSS3W, COBRAS-UC e FLUENT) na simulação da rebentação nos casos de teste estudados em modelo físico e nas campanhas de campo;
- Extensão de formulações teóricas existentes para incluírem o fenómeno de rebentação;
- Desenvolvimento/aperfeiçoamento/validação de modelos de propagação de ondas na simulação da rebentação, através da incorporação de formulações ou de critérios de rebentação (existentes ou desenvolvidos no âmbito deste projecto).

Estes aspectos serão desenvolvidos em 3 secções: 1) aplicação dos modelos numéricos aos casos de teste simulados no modelo físico; 2) aplicação dos modelos numéricos às praias de Faro e Cornélia; 3) Desenvolvimento/análise de formulações teóricas e sua implementação em modelos numéricos incluindo a validação de modelos numéricos.

4.1 COMPARAÇÃO COM ENSAIOS EM MODELO FÍSICO

O trabalho desenvolvido consistiu numa análise do desempenho de modelos numéricos na simulação da rebentação de ondas sobre um perfil testado experimentalmente (secção 2). Os modelos envolvidos foram, essencialmente, o modelo bidimensional (x-y) de Boussinesq (integrados na vertical) - COULWAVE (Lynett e Liu, 2004), modelos bidimensional (x-z) que resolvem as equações completas de Reynolds na vertical (RANS) - COBRAS-UC (Lara *et al.*, 2006) e modelos tridimensionais (x-y-z) baseados nas equações de Navier Stokes - FLUENT (Fluent, versão 6.3.26).

O modelo COBRAS-UC e o modelo FLUENT permitem uma descrição mais adequada e precisa da propagação de ondas sobre fundos de profundidade variável ou da interação onda-estrutura,

em que a simulação da rebentação das ondas surge de forma natural sem o recurso à definição de parâmetros a calibrar pelo utilizador (como acontece no caso do modelo COULWAVE e BOUSS3W). Estes modelos descrevem também a estrutura vertical da velocidade das partículas, aspecto particularmente importante na análise do transporte de sedimentos.

Em contrapartida, o COBRAS-UC é um modelo bidimensional em perfil (x-z) que exige um elevado tempo de cálculo e recursos computacionais significativos, enquanto o COULWAVE é um modelo bidimensional em planta (x-y) que exige menos recursos e menor tempo de cálculo. Quanto ao modelo FLUENT sendo um modelo tridimensional tem como principal desvantagem ser o modelo com o maior tempo de cálculo associado e a necessidade de capacidade computacional mais significativa.

Na análise de desempenho, os resultados numéricos de elevação da superfície livre e da velocidade horizontal ao longo do canal são comparados com os resultados experimentais. São também realizadas análises no tempo, espectral e estatística, de modo a caracterizar o desempenho dos modelos e a sua capacidade na simulação dos efeitos não lineares. Para os modelos COBRAS-UC e FLUENT é ainda caracterizado o perfil de velocidades ao longo da coluna de água e comparado com os dados experimentais

Nas secções seguintes, apresentam-se alguns exemplos da aplicação dos modelos aos dois casos de teste estudados em modelo físico: perfil barra-fossa e perfil de declives variáveis.

4.1.1 Comparação dos modelos COULWAVE e COBRAS-UC no caso de teste de perfil-barra fossa

Para o caso do perfil barra-fossa, secção 2.2, os modelos COULWAVE e COBRAS-UC foram aplicados para a condição de agitação incidente correspondente a $T=1.5$ s e $H=8$ cm, para um declive da rampa de 1:20 e profundidade na crista da barra de 10 cm (Figura 3), Okamoto *et al.* (2008 e 2009). A título de exemplo apresentam-se, na Figura 18, os valores numéricos (COBRAS-UC e/ou COULWAVE) e experimentais da altura de onda (Figura 18a), a série temporal da componente U da velocidade horizontal (Figura 18b), os correspondentes valores máximos, mínimos e médios (Figura 18c) e o perfil de velocidades em $x=-150$ cm (Figura 18d).

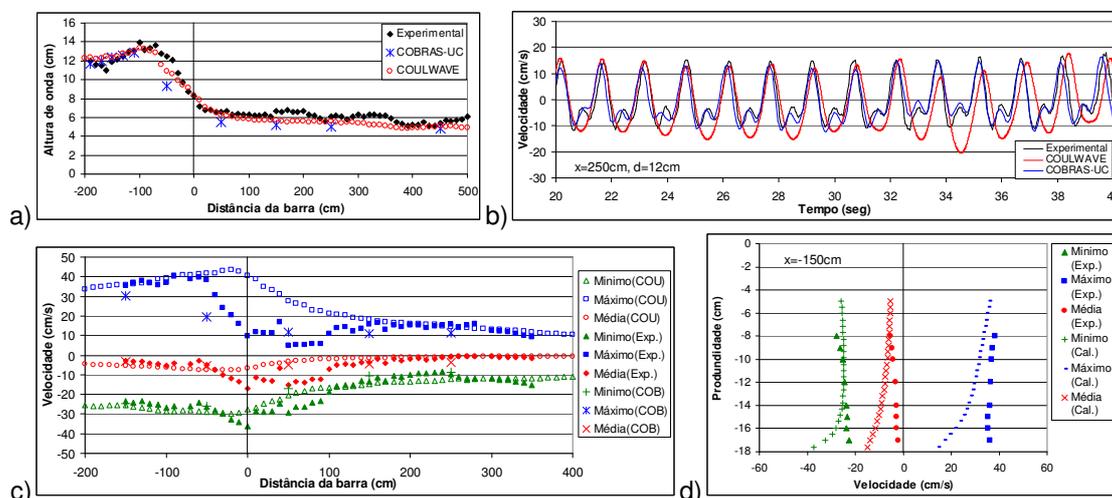


Figura 18 - Resultados numéricos e experimentais: a) Altura de onda; b) Componente horizontal U da velocidade orbital para $x=250$ cm e à profundidade de 12 cm; c) Máximos, mínimos e médias da componente horizontal U; Perfil de velocidades em $x=-150$ cm. $T=1.5$ s, $H=8$ cm.

Os resultados revelam que os modelos simulam adequadamente a maioria das transformações das características das ondas ao longo da sua propagação. Verifica-se que, de uma forma geral, os resultados dos modelos numéricos, para as séries temporais da elevação da superfície livre e velocidade horizontal, apresentam um andamento semelhante ao dos resultados experimentais. Com o modelo COBRAS-UC, como se pode observar na Figura 18b, a elevação da superfície

livre medida é reproduzida com excelente concordância. Em relação à altura média quadrática, os resultados dos modelos são bastante semelhantes antes da rebentação, apresentando após esta pequenas diferenças. Nessa zona, os valores dos modelos são inferiores aos resultados experimentais.

Quanto aos valores das velocidades das partículas (máximo, mínimo e médio), os modelos simulam bastante bem o escoamento médio e a envolvente antes da rebentação e depois da crista da barra, mas não conseguem reproduzir a amplitude máxima da velocidade horizontal na zona de rebentação. Este aspecto foi confirmado na análise estatística efectuada, em que se concluiu que a concordância entre resultados experimentais e numéricos, no que diz respeito à velocidade máxima, é o maior problema neste tipo de modelos numéricos. Relativamente à análise espectral, o modelo COULWAVE não conseguiu reproduzir as componentes de ordem superior nas secções após a rebentação. O modelo COBRAS-UC, conseguiu reproduzir a frequência fundamental e as harmónicas ao longo do domínio, mas em geral subestima a amplitude máxima.

Verificou-se também que em termos do perfil de velocidades o modelo COBRAS-UC apresenta melhor concordância com os resultados experimentais junto à superfície, mas piora quando se aproxima do fundo, antes da rebentação. Relativamente ao valor máximo, na zona após a rebentação as diferenças acentuam-se, na superfície, e diferem em todo o perfil. Esta diferença de comportamento com a distância à barra pode indicar a existência de uma corrente nos ensaios experimentais, que não é reproduzida no modelo numérico, já que este é bidimensional e esses efeitos são marcadamente tridimensionais.

A diferença de resultados numéricos e experimentais na zona de rebentação pode estar relacionada com o facto das condições de entrada dos modelos serem diferentes das do batedor, especialmente no que se refere ao perfil de velocidades imposto nas fronteiras de entrada e do canal, após a geração. A alteração deste perfil pode induzir comportamentos tridimensionais do escoamento.

4.1.2 Comparação dos modelos COULWAVE e FLUENT no caso de perfil de declive variável

Para o caso do perfil de declive variável (Neves *et al.*, 2011), secção 2.3, os modelos COULWAVE e FLUENT (Endres *et al.*, 2011) foram aplicados para a condição de agitação incidente correspondente a $T = 2.0$ s e $H = 12$ cm. Para análise do desempenho dos modelos, compararam-se os resultados numéricos com os experimentais em termos de: séries temporais de elevação da superfície livre e da velocidade horizontal em diversos pontos; valores de altura de onda significativa (Figura 19a); valores máximo, médio e mínimo da componente horizontal da velocidade das partículas ao longo do canal (Figura 19b); perfis de velocidade (Figura 19c); espectros de energia (Figura 19d). Calcularam-se também os parâmetros estatísticos (RMSE, BIAS e índice de concordância) relativos aos valores da altura de onda significativa e da velocidade. Note-se que no caso do modelo FLUENT foram considerados dois domínios computacionais, ambos respeitando a variação de fundo do canal físico mas as secções em planta consideradas são diferentes: no primeiro o canal é de secção constante e é utilizado o modelo bidimensional do FLUENT (FLUENT 2D); no segundo o canal é de secção variável, como o canal físico, e é utilizado o modelo tridimensional do FLUENT (FLUENT 3D). No caso do modelo COULWAVE, apenas o domínio de cálculo com secção constante foi considerada.

De uma forma geral, em relação à altura de onda significativa, os resultados dos modelos são semelhantes antes da rebentação. Na zona imediatamente após a rebentação, os valores dos modelos numéricos são inferiores aos resultados experimentais. No caso do modelo COULWAVE não foi possível simular a altura de rebentação, embora depois na zona de dissipação de energia, os valores numéricos voltaram a aproximar-se bastante dos experimentais, o que indicia que a dissipação da onda está a ser bem simulada no modelo. A análise através dos parâmetros estatísticos indica que o COULWAVE apresenta pior concordância com os valores experimentais que a versão FLUENT 3D.

Quanto aos valores das velocidades das partículas, os modelos simulam razoavelmente o escoamento médio e a envolvente antes e depois da rebentação mas não conseguem reproduzir correctamente a zona de rebentação. As diferenças face aos resultados experimentais de ambos os modelos em termos de velocidade são bastante mais acentuadas do que as encontradas relativamente à altura de onda significativa.

Relativamente à análise espectral, os dois modelos conseguem modelar as frequências de pico e as das várias harmónicas de ordem superior. No entanto, nenhum dos modelos consegue reproduzir os valores das densidades de energia nas secções após a rebentação. O FLUENT subestima a amplitude máxima das várias frequências enquanto o COULWAVE sobrestima-as. Em termos de perfil de velocidades, o modelo FLUENT apresenta melhor concordância com os resultados experimentais junto à superfície livre mas piora quando se aproxima do fundo.

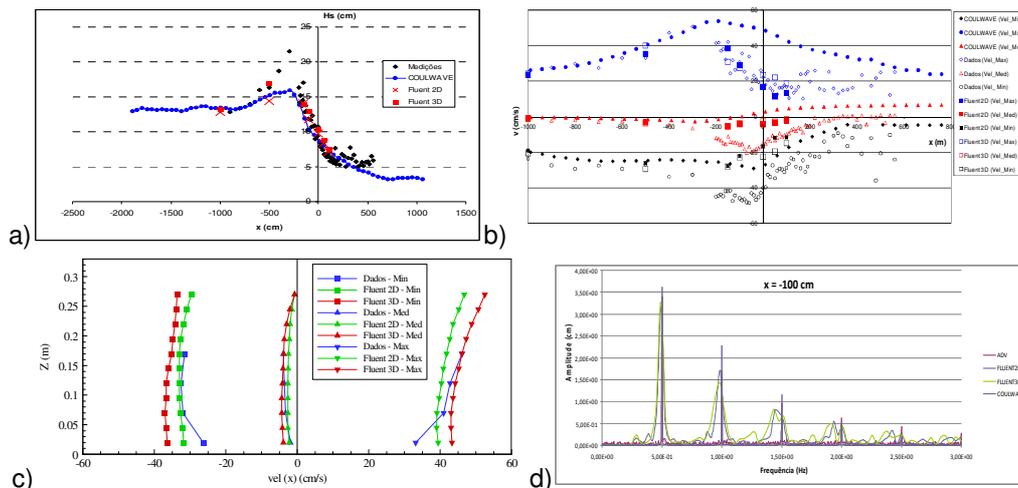


Figura 19 – (a) Altura de onda significativa; (b) Componente horizontal da velocidade ao longo do canal: valores máximos, médios e mínimos; (c) Perfis de velocidade 5.0m antes o fim da rampa: FLUENT e experimental; (d) Espectros de energia para uma sonda localizada 1.0 m antes do fim da rampa.

4.2 COMPARAÇÃO COM DADOS DE CAMPO DA PRAIA DA CORNÉLIA

Ilustra-se agora a aplicação e análise do desempenho do modelo COULWAVE na simulação da propagação de ondas durante os dias de 12 a 14 de Maio de 2010, secção 3.3. As condições de agitação impostas ao modelo corresponderam a ondas regulares com características baseadas nos valores medidos pelo transdutor PT06_Offsh_UAlg (Figura 16) na Costa da Caparica, durante o período de aquisição, entre 12 e 14 de Maio de 2010. Assumiu-se uma direcção de incidência das ondas perpendicular à costa, uma vez que os instrumentos no campo não permitiam o registo da direcção das ondas.

Para análise do desempenho do modelo numérico, foram comparados nas posições PT06_Offsh_UAlg, PT01_LNEC e PT02_LNEC: (i) os valores numéricos e medidos de alturas e períodos de onda significativos, para o período compreendido entre os dias 12 a 14 de Maio de 2010 e (ii) parâmetros estatísticos, nomeadamente o desvio (BIAS), o erro quadrático médio (RMSE) e o índice de concordância (IC - Willmott *et al.* (1985)), para as alturas e os períodos de onda significativos, para o período de tempo em estudo. Fez-se também uma breve análise espectral de Fourier e de Wavelet dos dados de campo e valores numéricos, para um intervalo de 30 min escolhido.

Compararam-se também, na posição do ECM_LNEC, os valores numéricos e medidos das velocidades máxima, mínima, média e média quadrática, no período de 12 a 14 de Maio de 2010, para as componentes transversal e longitudinal da velocidade horizontal e os mesmos parâmetros estatísticos calculados para os dados de agitação. A título de exemplo, apresenta-se

na Figura 20 uma comparação dos resultados numéricos e os dados de campo obtidos no sensor PT01_LNEC e no ECM_LNEC.

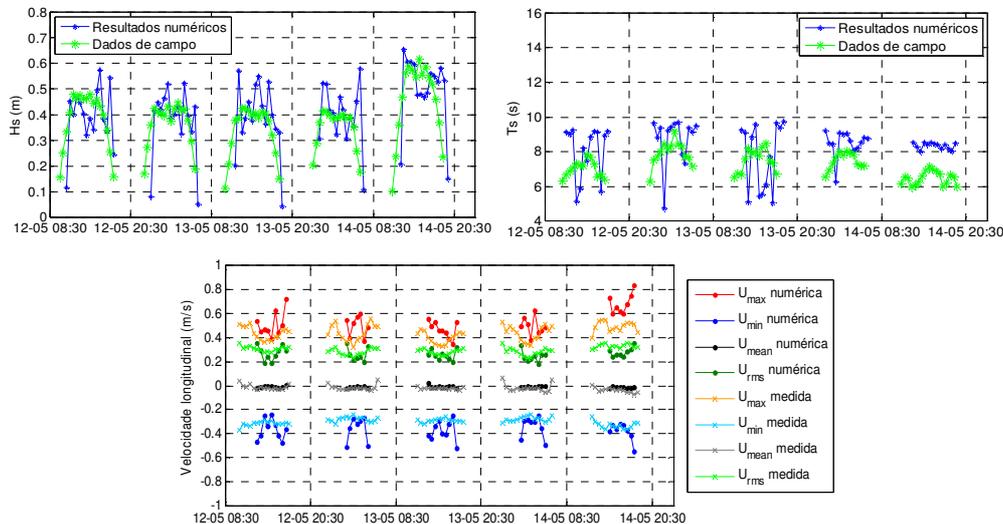


Figura 20 - Comparação as medições nos sensores PT01_LNEC e os resultados numéricos para H_s e T_s . Comparação dos valores numéricos (pontos) e medidos (cruzes) das velocidades máxima, mínima, média e média quadrática (ms^{-1}) da componentes longitudinal.

O modelo COULWAVE demonstrou ser bastante capaz de simular os dados de campo, particularmente os valores de H_s , sendo que para T_s as diferenças observadas entre valores de campo e numéricos foram superiores. Como seria esperado, à medida que a proximidade à costa aumenta, e os fenómenos não lineares assumem uma maior relevância, os resultados simulados pelo modelo tendem a divergir mais dos dados de campo, especialmente após a rebentação das ondas.

A ordem de magnitude da velocidade horizontal (máxima, mínima, média e média quadrática, em ambas as direcções paralela e transversal à costa) é bem representada pelo modelo, que simula de forma razoável os valores médios da velocidade. Em contrapartida, o modelo demonstrou ser menos capaz de descrever os valores máximos e mínimos dos dados de velocidade, exibindo os resultados numéricos maior oscilação entre intervalos de 30 minutos consecutivos.

4.3 NOVAS FORMULAÇÕES TEÓRICAS E NUMÉRICAS PARA A REBENTAÇÃO DAS ONDAS

No âmbito dos novos desenvolvimentos relacionados com a formulação teórica e numérica da rebentação das ondas, efectuou-se:

- o a dedução de uma nova equação não linear de declive suave dependente do tempo incluindo a rebentação e o desenvolvimento de um modelo numérico de diferenças finitas para a sua resolução;
- o aperfeiçoamento do modelo de elementos finitos baseado nas equações de Nwogu (1993) BOUSS3w através da inclusão quer da formulação da rebentação proposta por Kennedy *et al.* (2000) quer do critério de rebentação RTFN (*Relative Thought Froude Number*, i.e., número de Froude relativo à cava da onda) (Okamoto, 2003, Okamoto e Basco, 2006, Okamoto *et al.*, 2008)

O objectivo destes novos desenvolvimentos de modelos numéricos é tornarem-se alternativas de aplicação mais simples (com menor número de parâmetros a calibrar) aos modelos existentes COULWAVE e FLUENT e com custos computacionais mais baixos.

4.3.1 Dedução de uma nova equação e desenvolvimento do modelo numérico

Foi deduzida uma nova equação não linear de declive suave dependente do tempo que inclui a dissipação de energia por rebentação, através da consideração das tensões de Reynolds na equação da conservação da quantidade de movimento, Zóximo (2010). O coeficiente de viscosidade turbulenta é função da coordenada vertical, z , de forma a contabilizar os gradientes verticais. A equação deduzida é a indicada de seguida.

$$\begin{aligned}
 & C_g \eta_{tt} - C_p^3 \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} - \underbrace{\frac{(C_p - C_g)}{k^2} \frac{\partial^2 \eta_{tt}}{\partial x^2}}_{\text{termo dispersivo}} - \underbrace{C_p \frac{\partial}{\partial x} (C_p C_g)}_{\text{termo do empolamento linear}} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \\
 & - \underbrace{\frac{3}{2} g C_p \left(3 - 2 \frac{C_g}{C_p} - \frac{k^2 C_p^4}{g^2} \right) \frac{\partial^2}{\partial x^2} (\eta^2)}_{\text{termo não linear}} + \frac{2\alpha}{3} (E-2) \frac{\partial C_p}{\partial x} \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} - \\
 & - \alpha \frac{k C_p^5}{g^2} \left((F-2) \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{k C_p}{3} \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} \right) - (N_z)_\eta \left[C_g \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_p^2}{C_g} \right) \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \omega^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} \right] = 0
 \end{aligned} \quad (1)$$

sendo

$$\begin{aligned}
 E-2 &= \frac{1}{\cosh kh} \left[C_p + (C_p - 2(C_p - C_g)) \right] - \frac{k^2 C_p^5}{3g^2} + \frac{hk^4 C_p^7}{g^3(2n-1)} - \frac{hg}{C_p(2n-1)} - \frac{k^2 C_p^5}{g^2} - \frac{C_p^2 [C_p - 2(C_p - C_g)]}{gh} \\
 F-2 &= \frac{2C_p}{3} \frac{\partial k}{\partial x} + 2k \frac{\partial C_p}{\partial x} - \frac{k C_p}{3C_g} \frac{\partial C_g}{\partial x} \\
 (N_z)_\eta &= (\alpha F)_\eta = \alpha \left(\frac{\cosh k(h+\eta)}{\cosh kh} \right)
 \end{aligned} \quad (2)$$

onde η é a elevação da superfície livre C_p e C_g são a celeridade de fase e de grupo, respectivamente, obtidas através da teoria linear para uma frequência dominante ω e uma profundidade local h , g é a aceleração da gravidade, k é o número de onda, $n=C_g/C_p$ e α é um parâmetro a calibrar de dimensões m^2/s .

Esta equação descreve os efeitos combinados da refração e difracção não lineares para um dado campo de ondas incidente à medida que este se propaga em zonas de declive suave, que poderão variar desde águas infinitamente profundas até profundidades próximas de zero, tendo em conta a rebentação das ondas.

Como o modelo a desenvolver é um modelo de resolução da fase, foi necessário optar por um de entre os critérios de rebentação apresentados na bibliografia para modelos que resolvem a fase da onda. Como critérios de rebentação a implementar no modelo de ondas, seleccionaram-se os critérios de Kennedy *et al.* (2000) e de Schaffer *et al.* (1993).

As resoluções espacial e temporal da equação não linear de declive suave com dissipação de energia por rebentação são efectuadas através do método das diferenças finitas. As condições de fronteira do modelo são a fronteira de radiação de Sommerfeld, da condição de geração de Dirichlet e também a fronteira de geração-radiação. O modelo de diferenças finitas desenvolvido por Beji e Nadaoka (1997) foi adaptado para resolver a Eq. (1) e deu origem ao modelo NLMSE_1D_BR.

A validação do modelo compreendeu diversos casos de teste, Zóximo (2010, Zóximo e Fortes, 2011), entre os quais o da propagação de ondas sinusoidais sobre um fundo de profundidade monotonicamente decrescente (Hansen e Svendsen, 1979), da propagação de ondas regulares sobre um fundo de profundidade monotonicamente decrescente (Cox *et al.*, 1995) e da propagação de ondas sinusoidais sobre um perfil barra-fossa (Sancho *et al.*, 2001). Os principais objectivos foram: (i) Verificar qual o critério de rebentação mais adequado, entre o de Kennedy *et al.* (2000) e o de Schaffer *et al.* (1993), e quais os valores que deverão ser atribuídos à

respectiva condição crítica para o início da rebentação; (ii) Efectuar uma análise de sensibilidade aos valores a atribuir ao critério de rebentação com o intuito de estabelecer uma metodologia para a sua definição consoante as características de cada caso de teste; (iii) Verificar se o tipo de fronteira de entrada tem uma influência significativa no critério de rebentação a seleccionar, assim como nos seus valores óptimos e no valor de α ; (iv) Avaliar o desempenho do modelo relativamente a dados de ensaios em modelo físico em praias de declive constante e em praias barra fossa.

Na Figura 21 é apresentada a comparação dos resultados do modelo NLMSE_1D_BR com os valores experimentais para um dos casos de teste de Hansen e Svendsen (1979), para diferentes valores atribuídos à constante dos termos dissipativos.

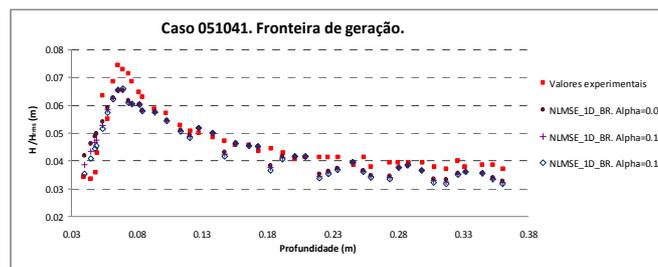


Figura 21 - Caso de teste 051041. Comparação dos resultados do modelo NLMSE_1D_BR para $\alpha = 0.09, 0.10$ e $0.11 \text{ m}^2/\text{s}$ com os valores experimentais, Hansen e Svendsen (1979).

No global foram obtidos bons resultados, embora o empolamento da onda tenha sido subestimado. Verificou-se uma estreita relação entre o valor a utilizar para a condição crítica de início da rebentação e a declividade da onda à entrada do domínio de cálculo, e entre o valor da constante dos termos dissipativos e o número de Ursell à entrada do domínio. O critério de rebentação que conduziu a melhores resultados foi o de Schaffer *et al.* (1993).

4.3.2 Desenvolvimentos no modelo BOUSS3W

Um dos objectivos do trabalho desenvolvido no âmbito do projecto era a introdução da dissipação de energia por rebentação na formulação do modelo numérico BOUSS3W Pinheiro *et al.* (2010). Este modelo resolve as equações de Boussinesq estendidas deduzidas por Nwogu (1993) com o método dos elementos finitos e tem como ponto de partida o modelo de ondas regulares BOUSS, desenvolvido por Walkley (1999), ao qual foram adicionadas algumas funcionalidades, Pinheiro (2007), que permitem: a) a geração de ondas regulares e irregulares no interior do domínio de cálculo; b) a absorção e a reflexão total ou parcial das ondas nas fronteiras do domínio; c) a dissipação de energia por atrito de fundo; d) o controlo das instabilidades numéricas. Assim, o modelo BOUSS3W permite simular a propagação não linear e dispersiva de ondas regulares e irregulares em zonas costeiras e portuárias, tendo em conta alguns dos fenómenos mais importantes presentes nestas regiões: difracção, refracção, empolamento, reflexão, geração de harmónicas e dissipação de energia por atrito de fundo.

De modo a alargar o domínio de aplicabilidade do modelo BOUSS3W, foi efectuada a implementação da rebentação da onda no modelo BOUSS3W, Pinheiro *et al.* (2010, 2011), através da inclusão de termos de viscosidade turbulenta nas equações de conservação da quantidade de movimento, seguindo a metodologia de Kennedy *et al.* (2000). A ocorrência ou não de rebentação obedece a dois critérios: o de início e o de fim da rebentação. Para critérios da rebentação consideraram-se duas formulações: a de Kennedy *et al.* (2000) e a do RTFN (Okamoto *et al.* 2008). A primeira formulação depende de quatro parâmetros: início, fim, duração da rebentação e um coeficiente de mistura. A segunda formulação foi desenvolvida no âmbito deste trabalho e apenas depende de um parâmetro, o valor crítico do número de Froude relativo à cava da onda - RTFN_c , que define tanto o início como o fim

da rebentação. A grande vantagem desta formulação é a de se calibrar apenas um parâmetro em vez de quatro pelo método tradicional.

A validação da implementação da rebentação foi efectuada recorrendo a casos de propagação e rebentação de ondas regulares em batimetrias de complexidade diferente (perfis de praia de inclinação constante e do tipo barra-fossa). Para estes casos, existem resultados experimentais, considerando diferentes condições de agitação. Foi realizada uma análise estatística de modo a caracterizar o desempenho do modelo e a sua capacidade na simulação da rebentação e dos efeitos não-lineares. Os casos de teste estudados foram: propagação de ondas em fundo de declive constante, Hansen e Svendsen (1979) e sobre um fundo do tipo barra-fossa, Sancho *et al.* (2001). Os resultados do BOUSS3W foram comparados com os resultados dos ensaios experimentais e numéricos obtidos com o modelo FUNWAVE.

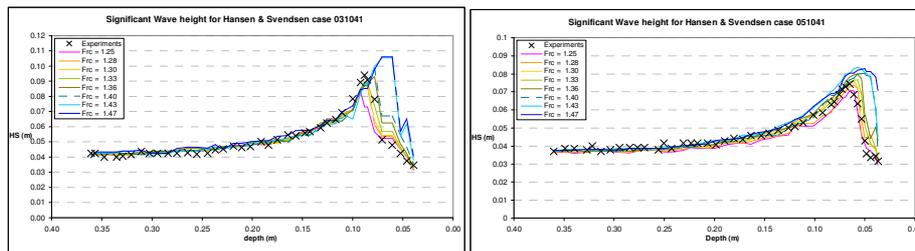


Figura 22 – Testes 031041 e 051041, Hansen e Svendsen (1979). Calibração do RTFN crítico.

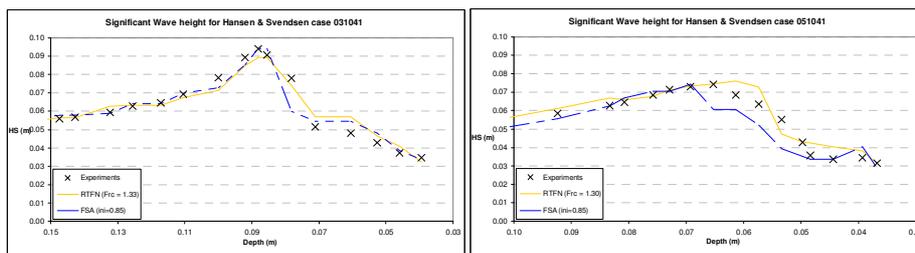


Figura 23 – Alturas de onda significativas H_s (m) para os casos de teste 031041 e 051041. Comparação dos critérios de rebentação de Kennedy e do RTFN.

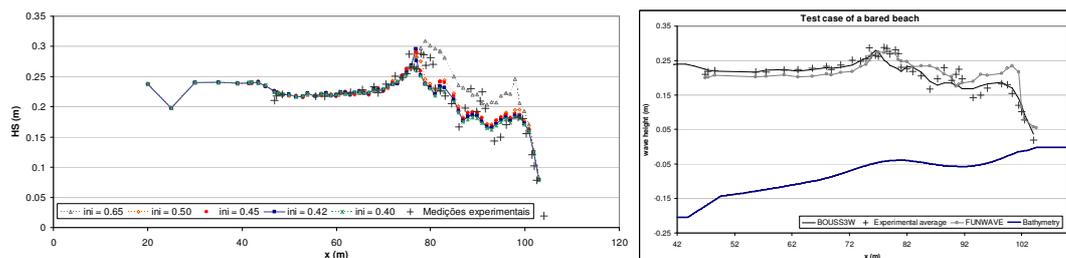


Figura 24 – Perfil Barra-Fossa, Sancho *et al.* (2001). Calibração do parâmetro de início da rebentação e comparação dos resultados dos modelos BOUSS3W e FUNWAVE com os valores experimentais.

A implementação da rebentação no modelo BOUSS3W foi bem sucedida e o modelo conseguiu reproduzir de forma adequada o empolamento e consecutiva rebentação da onda com a dissipação de energia esperada. Em mais detalhe, os resultados do modelo mostraram um grande acordo com os dados experimentais, simulando quer a localização, a altura de onda na rebentação e depois a dissipação de energia especialmente no caso simples de rebentação da onda sobre um declive constante. No caso do perfil do tipo barra-fossa, verificaram-se boas concordâncias na localização da rebentação e na altura de onda constatada, mas ocorreram algumas diferenças após a rebentação, principalmente na dissipação de energia. Comparando

os dois critérios de rebentação verificou-se que com ambos se obtêm bons resultados. As estatísticas mostram que o nível de concordância entre os resultados numéricos e experimentais é quase idêntico, salientando o facto de que com o novo critério implementado, apenas é necessário calibrar um parâmetro. Este facto torna-se ainda mais relevante quando não existem dados para calibração, uma vez que é possível atribuir uma gama de valores bastante estreita para o RTFN crítico de acordo com o tipo de fundo presente.

No futuro pretende-se implementar e validar a simulação da rebentação no modelo bidimensional usando os resultados obtidos nas campanhas de aquisição de dados realizadas no âmbito deste projecto.

5 CARACTERÍSTICAS DA ONDULAÇÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Uma onda de superfície ao propagar-se na zona costeira do oceano na direcção da costa modifica a sua forma, o que pode ser traduzido pela existência de processos não lineares. Em particular, a onda evolui tornando-se pontiaguda sobre a crista da onda, mais larga na cava e relativamente íngreme na face da crista que irá rebentar. Da mesma forma, a velocidade e aceleração orbitais, em profundidade, reflectem essas modificações progressivamente não lineares. As assimetrias da velocidade orbital da onda antes e na zona de rebentação desempenham um papel preponderante no transporte de sedimentos transversal (cross-shore). Esta relação não é ainda bem conhecida e o conjunto de dados experimentais disponível para o seu estudo é escasso.

O trabalho efectuado nesta componente consistiu em: (i) avaliar a distribuição espacial de diferentes momentos estatísticos da elevação da superfície livre, da velocidade (u) e da aceleração (a) do escoamento relacionados com as assimetrias das ondas; (ii) desenvolver uma formulação empírica que aproxima com bom grau de precisão as características não lineares da velocidade orbital da onda junto ao fundo; (iii) desenvolver uma nova formulação para o cálculo da tensão de atrito em escoamentos oscilatórios assimétricos; (iv) estudar a importância da assimetria da onda no transporte sedimentar.

5.1 ASSIMETRIA DAS ONDAS

A assimetria das ondas pode ser quantificada em termos do cálculo de momentos estatísticos das séries temporais ou da obtenção de parâmetros simples que relacionam alguns pontos singulares de cada onda dessas séries (p. ex., as magnitudes na crista e na cava). É exemplo, no primeiro caso, a assimetria μ de uma série temporal de uma variável genérica x , com N valores:

$$\mu_{3,x} = \frac{\sum_{i=1}^N (x - \bar{x})^3}{N \sigma_x^3} . \quad (3)$$

A Figura 25 ilustra os valores da assimetria para a velocidade e para a aceleração correspondentes a um conjunto de ensaios efectuados no canal de ondas da Universidade Politécnica da Catalunha (UPC) com ondas regulares e irregulares sobre um perfil de praia do tipo barra-fossa (Sancho *et al.*, 2001). Verifica-se o aumento das não linearidades à medida que as ondas se aproximam da barra. Nessa zona verifica-se que as assimetrias de velocidade e de aceleração coexistem simultaneamente.

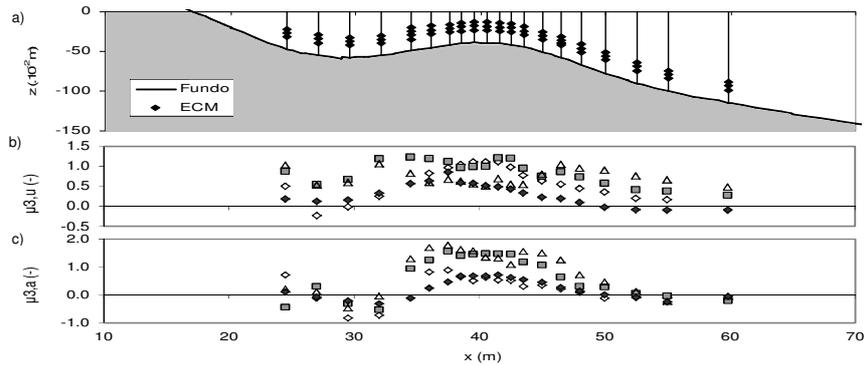


Figura 25 - Em cima: perfil de fundo (—) e posições dos velocímetros electromagnéticos (ECM) (◆) na experiência UPC; painel inferior: Variação espacial dos valores médios de $\mu_{3,u}$, $\mu_{3,a}$ para os quatro testes da experiência UPC (adaptado de Abreu *et al.*, submetido).

A Figura 26 mostra para o caso dos dados recolhidos pelo ECM na Praia de Faro (ECMV, ver Figura 8b) correspondente a um ciclo de preia-mar os valores dos intervalos de tempo T1-T4 representados. Verifica-se que os valores de T1 e T4 são sempre inferiores aos de T2 e T3, denotando importantes assimetrias no escoamento horizontal junto ao fundo (perfil da onda em *dente de serra*) sobretudo em condições de rebentação, que se observam no início da enchente e no final da vazante.

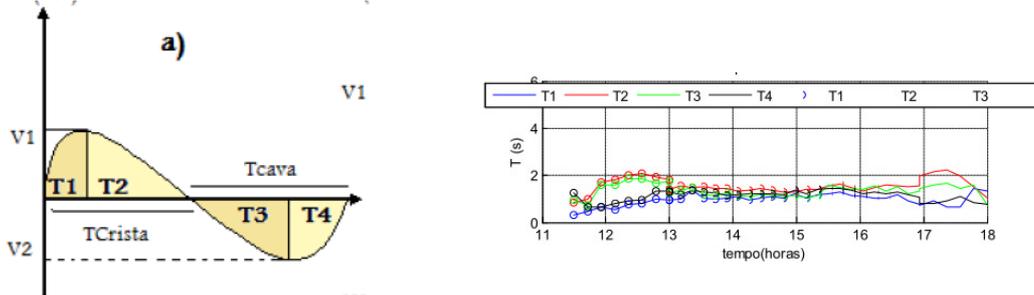


Figura 26 - a) Representação esquemática da velocidade orbital da onda e b) Valores de T1-T4 correspondentes aos dados do ECMV na Praia de Faro (adaptado de Taveira, 2010).

5.2 REPRESENTAÇÃO DAS NÃO LINEARIDADES

Abreu *et al.* (2010) propuseram uma expressão que aproxima com realismo a série temporal da velocidade orbital junto ao fundo associado à propagação de uma onda assimétrica:

$$u(t) = U_w \sqrt{1-r^2} \frac{\left[\sin(\omega t) + \frac{r \sin \phi}{1 + \sqrt{1-r^2}} \right]}{[1 - r \cos(\omega t + \phi)]}, \quad (4)$$

onde U_w representa a amplitude da velocidade orbital, ω a velocidade angular associada a uma onda de período T ($\omega = 2\pi/T$), r um índice que reflecte o grau da não linearidade ($-1 < r < 1$) e ϕ um parâmetro de forma da onda ($-\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2$). Os parâmetros r e ϕ estão relacionados com as assimetrias da velocidade e aceleração do escoamento.

O caso particular de $r=0$ corresponde à forma sinusoidal. Para $r \neq 0$, $\phi=0$ reflecte a assimetria da aceleração como o das ondas “em dente de serra” ($|u_{\max}| = |u_{\min}|$, mas $|a_{\max}| \neq |a_{\min}|$). O caso de $\phi = -\pi/2$ e $r \neq 0$ reflecte a assimetria da velocidade como a existente

nas formas reproduzidas pela teoria de ondas Cnoidal (1.^a ordem) ou de Stokes (2.^a ordem) ($|u_{\text{máx}}| \neq |u_{\text{mín}}|$, mas $|a_{\text{máx}}| = |a_{\text{mín}}|$). Valores de ϕ entre $-\pi/2$ e 0 resultam em combinações simultâneas de assimetrias de velocidades e acelerações.

Como exemplo da aplicação da Equação (4), na Figura 27 comparam-se os valores da velocidade observados e simulados num ponto do perfil de praia natural do tipo barra-fossa de Duck localizada ao largo da Carolina do Norte (E.U.A.) (Abreu *et al.*, 2010). Os valores estimados pela nova expressão analítica mostram a sua eficácia na reprodução de velocidades orbitais junto ao fundo sob a acção de ondas não lineares, reproduzindo adequadamente as assimetrias observadas.

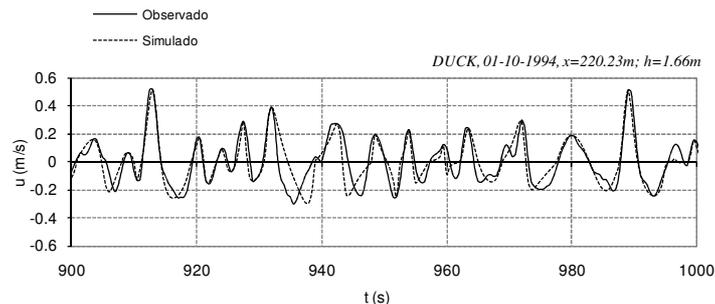


Figura 27 - Série temporal da velocidade orbital observada e simulada (adaptado de Abreu *et al.*, 2010).

5.3 TENSÃO DE ATRITO NO FUNDO

A Equação (5) foi utilizada para estimar a tensão de atrito junto ao fundo, τ , tendo em conta a não linearidade das ondas mediante a consideração dos parâmetros r e ϕ (Abreu *et al.*, 2011):

$$\tau(t) = \rho u_* (t) |u_* (t)| \quad (5)$$

u_* representa a velocidade de atrito determinada por:

$$u_* (t) = \sqrt{\frac{f_w}{2}} \left(\cos(\varphi_\tau) u(t) + \frac{\sin(\varphi_\tau)}{\omega} \left[\frac{\partial u(t)}{\partial t} - S(t, \phi, r) \right] \right), \quad (6)$$

Nesta equação ρ representa a massa volúmica da água, f_w é o factor de atrito da onda e φ_τ é aproximadamente igual à diferença de fase entre as tensões de atrito e a velocidade orbital do escoamento no topo da camada limite. A nova expressão contém um termo adicional face às expressões clássicas, $S(t, \phi, r)$, que adequa o efeito das acelerações sugerido por Nielsen (2006). Esse termo é descrito por:

$$S(t, \phi, r) = \omega \cdot f \cdot U_w \frac{r[-(-1+f)\cos\phi - 2r\cos(\omega t) + (1+f)\cos(2\omega t + \phi)]}{2(1+f)[-1+r\cos(\omega t)]^2} \quad (7)$$

onde $f = \sqrt{1-r^2}$. Quando comparada com estimativas de tensões de atrito obtidas através do método “momentum-integral”, em experiências em túnel de onda com fundos móveis obtém-se uma boa concordância (Abreu, 2011).

5.4 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM ONDAS ASSIMÉTRICAS

A importância da assimetria do escoamento associado a uma onda de superfície no transporte de sedimentos foi evidenciada a partir das experiências realizadas num túnel de ondas na Deltares, Holanda (Silva *et al.*, in press). A Figura 28a representa a taxa média de transporte

num ciclo de onda em função do parâmetro β que quantifica a assimetria da aceleração do escoamento (o valor de $\beta = 0.5$ corresponde a uma onda sinusoidal e para valores crescentes a onda aproxima-se de uma onda com a forma de dente de serra). Verifica-se que o aumento de β traduz-se num aumento do transporte na direcção de propagação da onda.

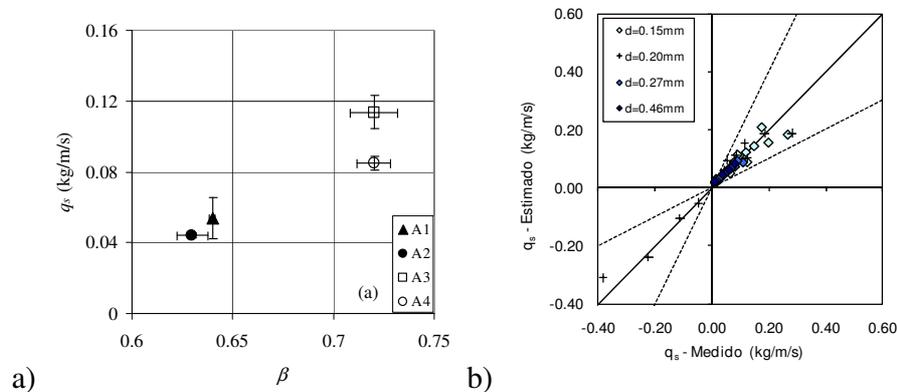


Figura 28 – a) Taxas de transporte médias no ciclo de onda em função do parâmetro β (Silva *et al.*, in press); b) Previsão do transporte sedimentar, q_s , para diversos grãos de sedimentos sob a acção de ondas assimétricas. Os dados de q_s medidos relativos a $d_{50} = 0.20$ mm e $d_{50} = 0.15$, 0.27 e 0.46 mm referem-se, respectivamente, às experiências de Silva *et al.* (in press) e van der A *et al.* (2010).

A simulação do transporte de sedimentos com fórmulas práticas para este tipo de ondas foi satisfatoriamente simulado através da formulação de Nielsen (2006) quando incorporada com o estimador da tensão de atrito de fundo descrito anteriormente, Equações (5)-(7). A Figura 28b ilustra a boa previsão da taxa de transporte sedimentar, q_s , para diferentes grãos de sedimentos sob acção de ondas não lineares, desde que seja considerada uma rugosidade adequada a cada sedimento. As experiências reportam-se a condições realizadas em túnel de ondas (van der A *et al.*, 2010; Silva *et al.*, in press). O novo modelo revela-se promissor na estimativa do transporte sedimentar sob ondas não rebentadas assimétricas e em que possam coexistir correntes opostas.

6 COMENTÁRIOS FINAIS

Descreveu-se nesta comunicação o projecto BRISA (Interação entre a rebentação de ondas e transporte de sedimentos). Este projecto envolve três vertentes complementares: a aquisição de dados; a modelação experimental e a modelação numérica e o seu principal objectivo é contribuir para o aprofundamento do conhecimento no âmbito da hidrodinâmica da rebentação e do transporte de sedimentos.

Dos resultados obtidos até ao momento salienta-se:

- o vasto conjunto de dados experimentais adquiridos nos ensaios em modelo físico em canal para fundos de batimetrias complexas: o perfil barra-fossa e o perfil de praia com declives diferentes;
- a determinação de um novo critério de rebentação para o início, duração e fim da rebentação RTFN, com base nos dados experimentais;
- o vasto conjunto de dados *in situ* obtidos nas duas campanhas de campo (Praia de Faro e Praia da Cornélia);
- o desenvolvimento inovador de sensores de pressão em fibra óptica para medição da variação da batimetria/topografia da praia;

- e) a avaliação comparativa do desempenho de modelos numéricos e sua calibração, utilizando os dados experimentais obtidos em modelo físico e a calibração dos parâmetros relacionados com a rebentação;
- f) a aplicação dos modelos numéricos na propagação de ondas na praia de Faro e na praia da Cornélia e comparação com os dados *in situ* obtidos nas campanhas;
- g) a dedução de uma nova equação não linear de declive suave dependente do tempo incluindo a rebentação e o desenvolvimento de um modelo numérico de diferenças finitas para a sua resolução;
- h) o aperfeiçoamento/validação do modelo de elementos finitos baseado nas equações de Nwogu (1993) BOUSS3Ww através da inclusão da formulação da rebentação pela metodologia proposta por Kennedy e tal (2000); a implementação e análise dos critérios de rebentação de Kennedy e RTFN (Okamoto *et al.*, 2008);
- i) a contribuição para o conhecimento dos mecanismos que determinam o transporte de areias em ondas assimétricas e o desenvolvimento de parametrizações para representação dessas ondas e para o cálculo das tensões de atrito no fundo e do transporte de sedimentos.

O trabalho futuro passa pelo desenvolvimento do novo modelo de rebentação com base no conceito RTFN, pela validação e calibração dos critérios baseados no RTFN implementados nos modelos numéricos de propagação de ondas, assim como aplicar e desenvolver formulações para o cálculo do transporte sedimentar ao conjunto de dados de campo obtidos e avaliar o seu desempenho mediante a comparação com os levantamentos topográficos e batimétricos.

7 Agradecimentos

Os autores agradecem o financiamento da FCT através do projecto BRISA PTDC/ECM/67411/2006. Agradem também à equipa da FCUL pela participação nas campanhas que colaborou no projecto com instalação de equipamento complementar

8 Referências

- Abreu, T. (2011) Coastal sediment Dynamics under asymmetric waves and currents: measurements and simulations. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, 255 pp.
- Abreu, T., Sancho, F., Silva, P. (2007). Parametrização de assimetrias da velocidade e da aceleração de ondas em praias com barra, PIANC07 - 5as JPECP, CD-ROM.
- Abreu, T., Silva, P.A., Sancho, F., Temperville, A. (2010) Analytical approximate wave form for asymmetric waves. Coastal Eng., 57, 656-667.
- Abreu, T., Sancho, F., Silva, P.A. Ondas assimétricas em praias com barra, Gestão costeira Integrada, submetido.
- Abreu, T., van der A, D.A., Silva P.A., Sancho, F., Michallet, H. (2011). New bed shear stress estimator for net sand transport rate predictions under non-linear waves, Journal of Coastal Research, SI64, 2007-2011.
- Antunes, P., Domingues, F, Ferreira, L., Silva P.A., André, P. (2011) Monitorização das variações da topografia de uma praia com sensores de fibra optica. Conferencia sobre Morfodinâmica Estuarina e Costeira MEC2011, LNEC, Lisboa, 3-4 de Fevereiro de 2011, livro de resumos.
- Beji, S., Nadaoka, K. (1997) A time-dependent nonlinear mild-slope equation for water waves, in Proc. Royal Society London A, Vol. 453, pp. 319-332.
- Cox, D.T., Kobayashi, N., Okayasu, A. 1995. Experimental and numerical modeling of surf zone hydrodynamics, CACR-95-07, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware, 293 pp.
- Endres, L., Neves, D.R.C.B., Didier, E., Fortes, C.J.E.M., Okamoto, T. (2011) Avaliação do desempenho de modelos numéricos na simulação de ondas ao longo de um canal de ondas. Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia, CMNE2011, Coimbra, Portugal, 14 a 17 de Junho.
- Ferreira, L. (2009) Monitorization of bed level changes using optical fiber sensors, Tese de Mestrado em Eng. Física da Universidade de Aveiro
- Ferreira, L., Silva, P.A., Abreu, T., Sancho, F., Ferreira, Ó, 2010. Avaliação do transporte sedimentar na praia da Praia de Faro a partir da medição de velocidades orbitais, 1^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica, IH, Lisboa, 21-22 Junho.



- FLUENT 6.3 User's Guide, ANSYS-FLUENT 2008.
- Hansen, J., Svendsen, I. (1979) Regular waves in shoaling water: experimental data. Tech. report. ISVA Series, 21.
- Kennedy, A.B., Chen, Q., Kirby, J.T., Dalrymple, R.A. (2000) Boussinesq Modeling of Wave Transformation, Breaking and Runup I: 1D. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 1, pp. 39-47.
- Lara, J.L., Garcia, N., Losada, I.J. (2006) RANS modelling applied to random wave interaction with submerged porous structures. *Coastal Engineering*, 53, pp. 395-417.
- Lynnet, P., Liu PL-F. (2004) Modelling wave generation, evolution and interaction with depth-integrated, dispersive wave equations. COULWAVE Code Manual. Cornell Univ. Long Inter. Wave Modelling Package.
- Neves, D.R.C.B., Endres L., Fortes, C.J.E.M., Okamoto, T. (2010) Rebentação das ondas. Análise e tratamento de dados obtidos em ensaios em modelo físico. Relatório do Projecto BRISA. LNEC, Lisboa, Dezembro.
- Nielsen, P. (2006) Sheet flow sediment transport under waves with acceleration skewness and boundary layer streaming. *Coastal Engineering* 53, 749–758.
- Nwogu, O. (1993) Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 119 (6): 618-638.
- Okamoto, T. (2003) Boussinesq Model and the Relative Trough Froude Number (RTFN) for wave breaking. PhD Thesis. Old Dominion University.
- Okamoto, T., Basco, D.R. (2006) The Relative Trough Froude Number for initiation of wave breaking: Theory, experiments and numerical model confirmation, *Coastal Eng.*, 53, 675-690.
- Okamoto, T., Fortes, C.J.E.M. Basco, D.R. (2008) Wave breaking termination on bar-trough shaped beaches, Proceedings of the 18th International Offshore and Polar Engineering Conference (Vancouver), 811-819.
- Okamoto, T., Fortes, C.J.E.M., Neves, M.G. (2009) Evaluation of nonlinear numerical model performance on the wave propagation over a bar-trough profile beach. *Journal of Coastal Research*, S1 56, 1020-1024. ISSN 0749-0258.
- Pinheiro. L.V. (2007) Um método de elementos finitos para a discretização das equações de Boussinesq estendidas. Tese de mestrado. Engenharia Mecânica, IST.
- Pinheiro L.V., Rodriguez, V., Fortes C.J.E.M. (2010) Implementação do atrito de fundo e rebentação no modelo BOUSS3W. 1as Jornadas de Engenharia Hidrográfica. Lisboa, 21-22 de Junho.
- Pinheiro L.V., Rodriguez, V., Fortes C.J.E.M., Fernandes J.L.M. (2011) Desempenho do modelo BOUSS3W na rebentação de ondas. Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia 2011 (CMNE2011), APMTAC, Coimbra, Portugal, 14 a 17 de Junho. Sancho, F., Mendes, P.A., Carmo, J.A., Neves, M.G., Tomasicchio, G.R., Archetti, R., Damiani, L., Mossa, M., Rinaldi, A., Gironella, X. & Arcilla, A.S. (2001) Wave hydrodynamics over a barred beach – Proc. Int. Symp. on Ocean Wave Measurement and Analysis – “Waves 2001”, S. Francisco, ASCE.
- Schäffer, H.A., Madsen, P.A., Deigaard, R. (1993) A Boussinesq model for waves breaking in shallow water, in *Coastal Engineering*, 20, pp. 185-202.
- Silva, P.A., Abreu, T., Van der A, D., Sancho, F., Ruessink, G.B., Van der Werf, J., Ribberink, J.S. Sediment transport in non-linear skewed oscillatory flows: the TRANSKEW experiments, *J. Hydraulic Research*, in press.
- Taveira, D. (2010) Características da ondulação na Praia de Faro. Projecto da licenciatura em Meteorologia, Oceanografia e Geofísica, Universidade de Aveiro.
- Trageser, J.H., H. Elwany (1990) The S4DW, an integrated solution to directional wave measurements. *Proc. IEEE Working Conf. on Current Measurement*, pp. 1-14.
- Utku, M. (1999) The Relative Trough Froude Number: A new wave breaking criteria, Ph.D. Dissertation, Dept. Civil and Environmental Engr., Old Dominion University, Norfolk, Virginia.
- Van Der A, DA., O'Donoghue, T. & Ribberink, JS. (2010). Measurements of sheet flow transport in acceleration-skewed oscillatory flow and comparison with practical formulations. *Coastal Engineering*, 57, pp. 331-342.
- Walkley, M.A.A (1999) Numerical method for extended Boussinesq shallow-water wave equations. Doctor of Philosophy Thesis. The University of Leeds, School of Computer Studies, Sept., 174pp.
- Willmott, C., Ackleson, S., Davis, R., Feddema, J., Klink, K., Legates, D., O'Donnell, J., Rowe, C. (1985) Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, 90 (C5): 8995-9005.
- Zozimo, A.C. (2010) Modelação Numérica da Rebentação das Ondas. Sistema Integrado de Modelação da Agitação Marítima” Tese de Doutoramento em Ciências da Engenharia no IST, Novembro.
- Zózimo, A.C., Fortes, C.J.E.M. (2011) “Equação não linear de declive suave dependente do tempo com inclusão de dissipação de energia por rebentação”. Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia, CMNE2011, Coimbra, Portugal, 14 a 17 de Junho.