

AVALIAÇÃO DA TRANSFORMAÇÃO DE ONDAS EM AMBIENTES COSTEIROS E ÁREAS PORTUÁRIAS COM OS MODELOS SWAN E FUNWAVE

Eugen Rusu, Marta Gonçalves e C. Guedes Soares

Centro de Engenharia e Tecnologia Naval (CENTEC),

Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal

eugen.rusu@mar.ist.utl.pt; marta.goncalves@mar.ist.utl.pt; guedess@mar.ist.utl.pt.

Resumo

Realizou-se uma avaliação da aplicabilidade e concordância de dois modelos de alta resolução costeiros, FUNWAVE e REFDIF. A zona escolhida para o estudo, está localizada na parte central da costa portuguesa, a sul da Figueira da Foz, tendo sido feitas várias simulações para três áreas distintas. As condições de fronteira utilizadas, para ambos os modelos, são fornecidas por um ADCP. Realizaram-se simulações com os modelos e FUNWAVE e REFDIF1 foram realizados em paralelo nestas três áreas para diferentes condições de maré. O principal parâmetro de comparação é a raiz quadrada média da altura das ondas. Os resultados mostram uma boa concordância entre as simulações com os dois modelos e os dados observados na área fora da zona de rebentação. No entanto verificam-se algumas discrepâncias nesta área quando foram utilizadas parametrizações de rebentação de onda, no FUNWAVE. Numa segunda fase do trabalho, realizou-se um estudo para a área portuária de Leixões utilizado os modelos SWAN e o FUNWAVE (já calibrado), revelando, de modo geral, boa concordância entre os modelos.

Palavras-chave: *Transformação de ondas, modelos de alta resolução, FUNWAVE, SWAN, Leixões*

Introdução

Nas últimas décadas a análise de ondas de gravidade têm sido estudadas com recurso a modelos de Boussinesq, que têm provado ser uma ferramenta de sucesso na simulação de propagação de ondas em águas pouco profundas. Estes modelos têm demonstrado dar resultados confiáveis quando comparados com dados, quer observados, quer simulados. De facto, as equações de Boussinesq coincidem com as equações de águas pouco profundas de fraca dispersão e propagação de ondas não-linear (Peregrine, 1967). Por este motivo, na sua forma inicial, estas equações não são válidas em águas intermédias e profundas. Além disso, as equações de Boussinesq também não são válidas na zona de rebentação, se a dissipação devido a quebra de onda não estiver incluída.

Estudos mais recentes têm sido realizados para superar as restrições em águas pouco profundas e foram desenvolvidas as equações de Boussinesq na sua forma estendida, adicionando termos com diferentes graus de precisão na representação da não-linearidade e dispersão de frequência. Assim Nwogu (1993) usou a velocidade, a uma profundidade de referência, como variável dependente nas equações de governo, desenvolvendo desta forma um novo conjunto de equações que são capazes de simular a propagação de ondas de águas relativamente profundas para águas pouco profundas. Baseado nestas equações Wei et al., (1995) implementaram um modelo, mas não consideraram nenhuma hipótese para pequenos efeitos não-lineares, obtendo assim as equações de Boussinesq que incluem termos dispersivos não-lineares. Neste caso, as equações podem ser aplicadas para simular a propagação de ondas não-lineares com interacção forte e para o modelar interacções entre correntes e ondas.

O principal objectivo deste trabalho é avaliar a transformação das ondas na área costeira de Portugal, utilizando o modelo FUNWAVE (com base nas equações de Boussinesq) e comparar os resultados fornecidos por este modelo, com os resultados obtidos com outro modelo de alta

resolução, o REFDIF1 (com base na equação de declive suave) bem como com alguns dados observados na área. A área escolhida para o presente estudo é um sector costeiro localizado na parte central da costa portuguesa (sul da cidade Português Figueira da Foz).

Realizou-se também um estudo para a área do Porto de Leixões, utilizando o modelo FUNWAVE e comparando os resultados deste com os resultados obtidos com o modelo SWAN.

Formulações Teóricas

O FUNWAVE é um modelo de propagação de ondas baseado as equações de Boussinesq derivadas por Wei et al., (1995). O modelo resolve as equações de conservação de massa

$$\eta_t + \nabla \cdot \left\{ (h + \eta) \left[u_\alpha + \left(z_\alpha + \frac{1}{2}(h - \eta) \right) \nabla (\nabla \cdot (hu_\alpha)) + \left(\frac{1}{2}z_\alpha^2 - \frac{1}{6}(h^2 - h\eta + \eta^2) \right) \nabla (\nabla \cdot u_\alpha) \right] \right\} = 0 \quad (1)$$

e de quantidade de movimento:

$$\begin{aligned} & u_{\alpha t} + (u_\alpha \cdot \nabla) u_\alpha + g \nabla \eta + z_\alpha \left\{ \frac{1}{2} z_\alpha \nabla (\nabla \cdot u_{\alpha t}) + \nabla (\nabla \cdot (hu_{\alpha t})) \right\} + \\ & + \nabla \cdot \left\{ \frac{1}{2} (z_\alpha^2 - \eta^2) (u_\alpha \cdot \nabla) (\nabla \cdot u_\alpha) + \frac{1}{2} [\nabla \cdot (hu_\alpha) + \eta \nabla \cdot u_\alpha]^2 \right\} + \\ & + \nabla \cdot \left\{ \frac{1}{2} (z_\alpha - \eta) (u_\alpha \cdot \nabla) (\nabla \cdot hu_\alpha) - \eta \left[\frac{1}{2} \eta \nabla \cdot u_\alpha + \nabla \cdot (hu_{\alpha t}) \right] \right\} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

onde, η representa a elevação da superfície, h é a profundidade da água em repouso, u_α é o vector de velocidade horizontal obtido à profundidade $z = z_\alpha = -0.531h$, g é a aceleração da gravidade e o subscrito t é a derivada parcial no tempo.

Estas equações descrevem a evolução da onda sem fricção, nem quebra, sobre um fundo liso impermeável. Kennedy et al. (2000) e Chen et al. (2000) introduziram termos adicionais nas equações de modo a ter em conta o atrito de fundo, a rebentação de ondas, a geração de ondas no interior do domínio e fronteiras dinâmicas (variáveis na forma e na posição ao longo do tempo).

No que respeita a geração de ondas no domínio, verifica-se que esta é efectuada com a introdução de um termo na equação de conservação de massa que representa uma fonte de espacialmente distribuída. É utilizada uma função-fonte (source function) linear colocada numa determinada posição do domínio de cálculo, onde a partir, deste ponto, são geradas as ondas que se propagam em ambas as direcções. Este mecanismo é dividido em duas partes e é dado por:

$$f(x, y, z) = g(x)s(y, t) \quad (3)$$

onde $g(x)$ representa uma função gaussiana e $f(X)$ o input de séries temporais da magnitude da função-fonte.

De um modo geral pode-se considerar 2 tipos e condições de fronteira: uma fronteira nas paredes para uma reflexão total numa parede vertical (a velocidade normal horizontal à parede é sempre zero); e fronteiras absorventes que permitem que as ondas se propaguem para fora do domínio com reflexão mínima através do amortecimento das ondas para uma vasta gama de frequências e direcções.

O esquema numérico utilizado para a discretização temporal das equações é o método de Adams-Bashfort-Moulton de 4ª ordem, que utiliza um passo de previsão de 3ª ordem Adams-Bashfort e um passo de correcção de 4ª ordem Adams-Moulton. As derivadas espaciais de 1ª ordem são discretizadas por diferenças finitas centrais, com uma precisão de 4ª ordem. As derivadas espaciais e temporais de ordem superior, são efectuadas com precisão de 2ª ordem.

Por outro lado, o REFDIF usa a equação de Berkhoff (1972), também conhecida como "Mild Slope Equation", que está escrita em termos da elevação da superfície livre e é válida para

fundos de inclinação suave. A equação, em termos do operador gradiente horizontal é dada por:

$$\nabla(cc_g \nabla \eta) + k^2 cc_g \eta = 0, \quad (4)$$

onde, $\eta(x, y)$ representa a elevação da superfície, c a velocidade de fase, c_g a velocidade grupo, k é o número de onda e relaciona-se com a frequência relativa das ondas, σ , e com a profundidade, h , pela relação:

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh) \quad (5)$$

A dissipação da energia é descrita de diferentes formas dependendo do caso a ser modelado. Um termo de perda de energia, proposto por Booij (1981), posteriormente expandido por Dalrymple (1984), permite ao modelo tratar a dissipação devida à porosidade, viscosidade ou rebentação. A forma linear da equação de Berkhoff é dada por:

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{i}{2k} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \omega A \quad (6)$$

onde A é a amplitude complexa relacionada com o deslocamento da superfície da água, dado por: $\eta = Ae^{i(kx - \sigma t)}$, ω o factor de dissipação, dado por um número diferente de factores, dependendo da natureza da dissipação de energia.

No que respeita ao modelo SWAN, este é um modelo espectral de terceira geração que permite resolver a equação de balanço de energia espectral e dar uma estimativa realista da evolução do espectro de onda para diversas condições.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla[(\bar{c}_g + \vec{U})N] + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (7)$$

onde N representa a densidade de acção e S a fonte total, definida como a soma de todas as fontes, representando processos de geração do vento, dissipação, interacções não lineares em águas profundas, (quadrupletos) e em águas de profundidade finita (tríades, fricção com o fundo e rebentação). \vec{U} é velocidade da corrente, g , e d representam a aceleração gravítica e a profundidade, respectivamente, k o número de onda, c a velocidade de fase, c_g a velocidade grupo.

Para introduzir no modelo SWAN o processo da difracção considerou-se uma aproximação desacoplada de fase para refracção - difracção, (Holthuijsen et al., 2003). Esta é baseada na equação do declive suave omitindo informações de fase. As velocidades no espaço geográfico e no direccional, não consideram a difracção, $c_{x,o}$, $c_{y,o}$, $c_{\theta,o}$ sendo dadas por:

$$\begin{aligned} C_{x,o} &= \frac{\partial \omega}{\partial k} \cos \theta, \quad C_{y,o} = \frac{\partial \omega}{\partial k} \sin \theta \\ C_{\theta,o} &= -\frac{1}{k} \frac{\partial \omega}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial n} \end{aligned} \quad (8)$$

onde k corresponde ao número de onda e n é à direcção perpendicular ao raio da onda. O parâmetro da difracção δ é dado por:

$$\delta = \frac{\nabla(cc_g \nabla \sqrt{E})}{cc_g \sqrt{E}} \quad (9)$$

onde $E(x, y)$ é a energia total do campo de onda ($\sim H_s^2$). Devido à difracção as velocidades de propagação passam a ser:

$$c_x = c_{x,o} \bar{\delta}, \quad c_y = c_{y,o} \bar{\delta}$$

$$c_\theta = c_{\theta,o} \bar{\delta} - \frac{\partial \bar{\delta}}{\partial x} c_{y,o} + \frac{\partial \bar{\delta}}{\partial y} c_{x,o} \quad (10)$$

Estudo Prévio Realizado na Área da Figueira da Foz

A área escolhida para o estudo está localizada na parte central da costa portuguesa, a sul da Figueira da Foz. Esta é uma área de 9km ao longo da costa onde a batimetria é paralela à linha de costa, (Figura 1) orientada a 21N.

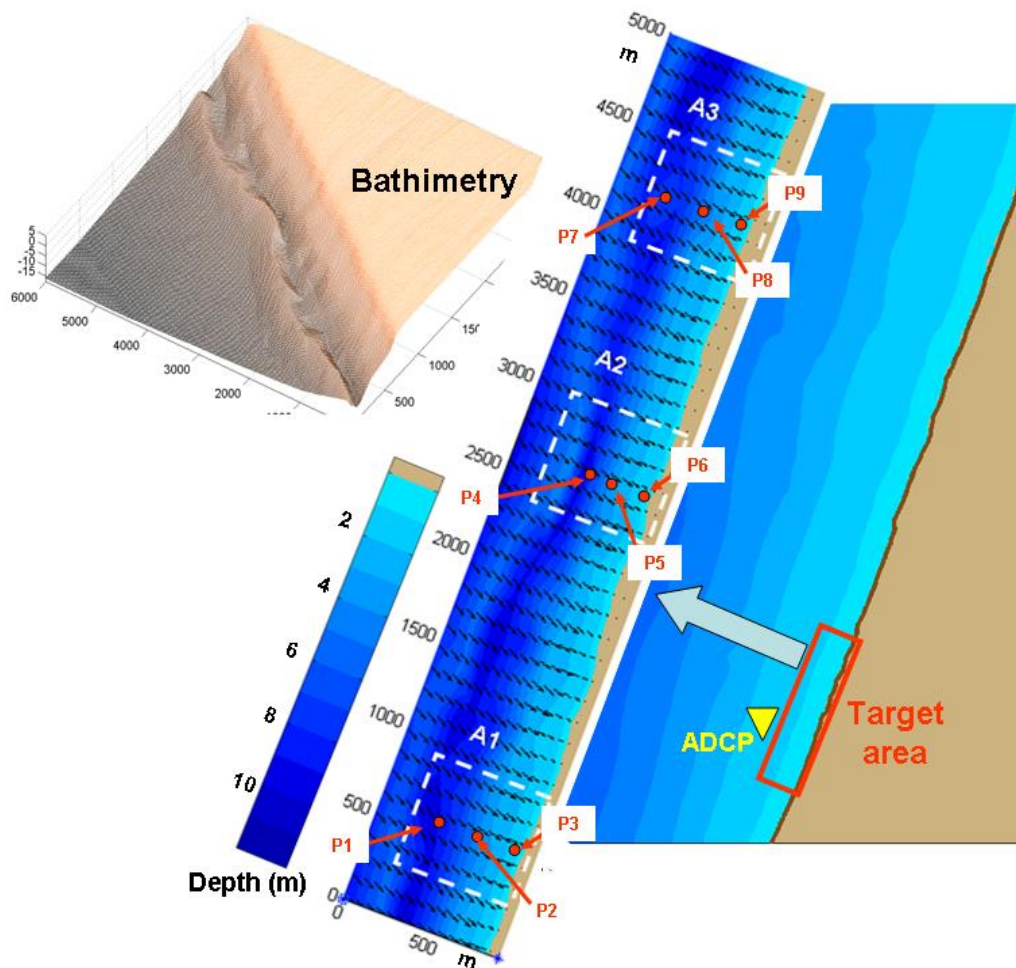


Figura 1 – Localização da área escolhida

Esta área é caracterizada pela ausência de estruturas costeiras, tanto naturais (como afloramentos rochosos) ou artificiais (como quebra-mares), e livre de discontinuidades (como entradas de rios). É uma área com fundos arenosos, sem fontes nem sumidouros de sedimentos. Pode observar-se uma longa barra submarina a uma profundidade de 10m com 3,5-6m de altura e 350-450m de largura.

A fim de proporcionar uma estimativa realista das ondas e das correntes costeiras, (Silva et al., 2004) realizaram um estudo de campo na área libertando e acompanhando, através de uma sequência de fotografias aéreas georreferenciadas, um substancial número de marcadores de deriva em dois pontos previamente seleccionados fora da zona de rebentação. Os locais de lançamento foram determinados com base em estudos numéricos e analíticos realizados durante a fase de planeamento, fiscalização e análise de fotografias históricas da zona de rebentação. Realizaram-se 3 operações de lançamento, espaçadas de 35-60 minutos, ao longo de 2 dias (6 e 7 de Outubro de 2003). Foram lançados, a partir de um barco, conjuntos de 250 marcadores, num total de 3000. A nível de voo, foram feitos levantamentos a cerca de 800m, o

que corresponde a uma escala de levantamento de 1:5 000. Foram realizados seis voos, separados por 30 minutos, sobre a área de estudo durante o dia 6 de Outubro e nove voos a 7 de Outubro, separados por 11-33 minutos. O estado do mar, bem como a maré e correntes de fundo, foram monitorizados no limite exterior da área de observação com recurso a um ADCP fundeado a 13m de profundidade (Figura 1). A ondulação predominante nesta zona é de NW, com altura significativas de onda de 1 a 2m e períodos de 5 a 7s. As condições de vento foram observadas numa estação costeira a 60km da área de estudo. Desta experiência resultaram 120 fotografias que foram digitalizadas e georreferenciadas. Estas foram comparadas com dados fornecidos pelo sistema de navegação de bordo, dando diferenças máximas de 10m na direcção NS e 2m na direcção EW.

Simulações com modelos numéricos REFDIF1 e SHORECIRC (Svendsen et al., 2002) para avaliar a circulação costeira, realizam-se a cada 15 minutos para um intervalo de tempo de 2 horas e 45 minutos (entre as 9h – 11h45) para o dia 7 de Outubro de 2003.

Em cada passo de tempo, as condições de entrada do nível da maré foram variados. Em geral, verifica-se um bom acordo no que respeita as ondas e correntes costeiras entre os resultados das simulações com o modelo (Rusu e Guedes Soares, 2010) e os dados de campo. No entanto, há que referir que, a fim de calibrar os dados de campo aos parâmetros do modelo, tiveram de ser modificado os valores padrão para os valores indicados na.

Tabela 1.

Tabela 1 - Principais configurações dos dois modelos de onda

Parameter	Δx (m)	Δy (m)	n_x	n_y	Δt (s)	nt	ibc	$iftr$ wc	$break$	ck_bt FCW
FUNWAVE (F. Foz)	2	2	301	301	0.1	9001	2	100	$cbkv= 0.35$ $cbrk = 1.2$	0.001
REFDIF1+ SHORECIRC	2	2	301	301	0.04 5	12001	2,6 5,5	1000	$k=0.5$ $\gamma=0.3$	0.012
SWAN	25	25	261	201	3600	-	-	-	-	-
FUNWAVE (Lexões)	5	5	401	401	0.1	9001	2	50	$cbkv= 0.22$ $cbrk = 1.8$	0.001

Na Tabela 1, Δx e Δy , n_x e n_y representam o tamanho das malhas e o número de pontos na malha respectivamente; Δt e nt representam o passo no tempo e o número de passos no tempo respectivamente; ibc representa o tipo de condições de fronteira activado para o modelo. Enquanto no FUNWAVE o passo de tempo é um dado como entrada no SHORECIRC este é controlado pelo numero de Courant, definido por:

$$Cr = \sqrt{gh_m} \Delta t / \Delta x, \quad (11)$$

onde h_m representa a profundidade máxima da água no domínio computacional, Δx é o passo espacial, perpendicular a costa, e g a aceleração gravítica. Para o estudo, o número de Courant foi 0,1 e o passo temporal de 0.045s.

Realizou-se ainda um estudo para o Porto de Leixões. Este é considerado um dos portos mais importantes da costa norte de Portugal, recebendo cerca de 3000 navios todos os anos. Dada esta afluência, foram já vários os acidentes com petroleiros que se registaram nesta zona, como por exemplo o Jacob Maersk a Janeiro de 1975 e o Cercal a Outubro de 1994, ambos de consequenciais bastante devastadoras tanto a nível ambiental como a nível económico.

Estratégia Computacional e Ajustes

Uma vez que os resultados obtidos nas comparações entre REFDIF1-SHORECIRC já se encontram validados para a área escolhida, o objectivo do presente trabalho foi fazer uma

comparação entre os resultados fornecidos pelo modelo FUNWAVE com os resultados dados pelo REFDF1, para o mesmo período de tempo acima referido (7 de Outubro de 2003).

A estratégia adoptada está definida na Figura 1. Os parâmetros obtidos pelo ADCP são utilizados como dados de entrada para um modelo de propagação de agitação baseado no REFDF1, numa área com resolução espacial de 10m em ambas as direcções (perpendicular e paralelo a costa).

Dentro desta área foram considerados 3 domínios de alta resolução que se encontram definidos na Figura 1. Estas áreas mais pequenas (A1, A2 e A3) com comprimento de 600m e 2m de resolução espacial em ambas as direcções. Os dados de entrada para ambos os modelos são parâmetros de onda correspondentes às simulações do domínio maior. Os parâmetros utilizados são: amplitude de onda (definida como $H_{rms}/2$), período do pico (T_p), direcção da onda (Dir) e nível da maré (TI). A raiz quadrada média da altura de onda (H_{rms}) é dada por:

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N H_j^2} \quad (12)$$

Onde H_j é a altura das ondas individuais.

Casos de Estudo

Realizou-se um estudo em paralelo com os modelos FUNWAVE e REFDF1 para as três áreas referidas, A1, A2 e A3 (Figura 1). Pode-se então considerar: a Caso 1 (CS1) que corresponde as simulações realizadas no dia 07/10/2003, 09h03; o Caso 2 (CS2) que corresponde as simulações realizadas no dia 07/10/2003, 09h51; e finalmente o Caso 3 (CS3) que corresponde as simulações realizadas no dia 07/10/2003, 11h42. Para cada uma das 3 áreas foram escolhidos três pontos de referência que definem uma direcção perpendicular à costa. As posições desses nove pontos de referência estão indicadas na Figura 1.

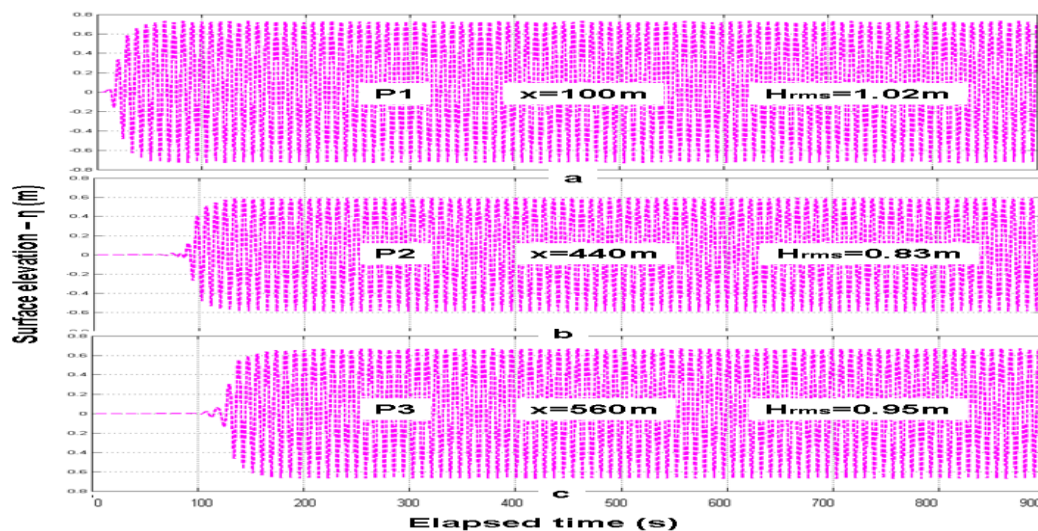


Figura 2 – Resultados do FUNWAVE, para os pontos assinalados a) P1; b) P2; c) P3 – CS1

Na Figura 2 estão ilustrados os registos de onda resultantes do FUNWAVE para 3 pontos da área A1 (P1, P2e P3) para o caso de estudo CS1. As distâncias dos pontos de referência a partir do limite exterior e o H_{rms} também são indicados na figura. Uma vez que não houve uma condição de inicialização, pode verificar-se na Figura 2 que para P1 são necessários menos de 500 passos de temporais para estabilizar, enquanto para P3 são necessários cerca de 1500 passos de temporais.

A transformação das ondas devido à batimetria pode ser observada seguindo a variação do parâmetro de onda H_{rms} , que foi calculado a partir do registo da onda usando a definição dada pela equação (12).

Alguns outros resultados relativos à transformação das ondas ao longo do perfil transversal da praia para a área A1, referentes ao CS1, estão ilustrados na Figura 3. Assim, a Figura 3a apresenta os resultados das saídas do REFDF1, em termos de H_{rms} e Figura 3b apresenta a elevação da superfície correspondente à simulação com o FUNWAVE (após 9001 passos de tempo).

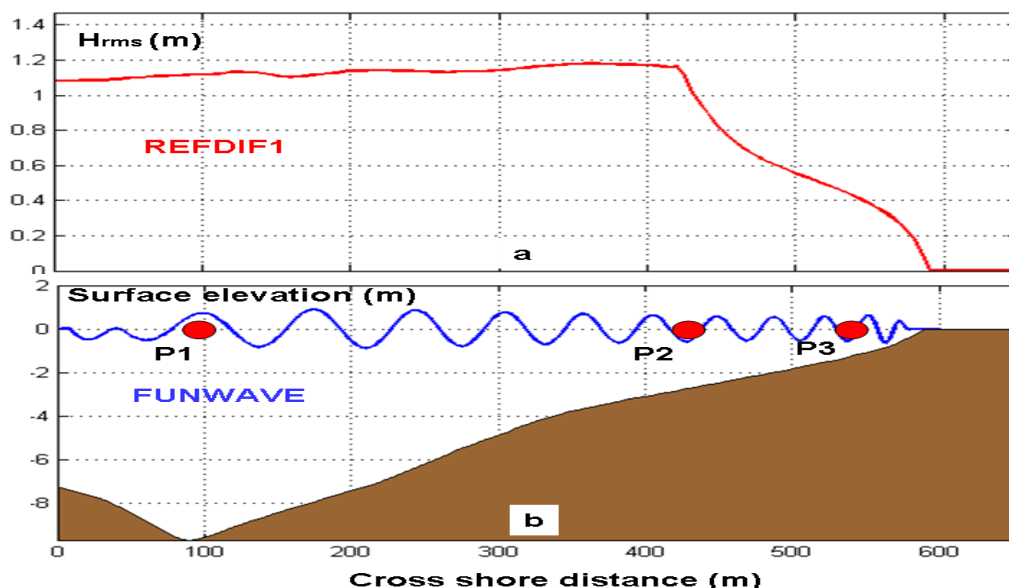


Figura 3 – Resultados dos modelos REFDF1 (a) e FUNWAVE (b) para o CS1, nos pontos P1, P2 e P3

Os valores dos parâmetros de ondas fornecidos pelos dois modelos de onda para os nove pontos seleccionados e para todos os três casos de estudos considerados estão apresentados na Tabela 2. Os parâmetros de entrada correspondentes a cada domínio computacional e, por outro lado a cada estudo de caso também estão especificadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados obtidos para os 9 pontos escolhidos, dos 3 casos de estudo (CS1, CS2 e CS3)

Área	A1			A2			A3		
Pontos de Referência	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
a) CS1 / Profundidade (m)	9.6	2.6	0.9	5.7	1.8	0.7	8.8	2.1	0.6
Dados de Entrada dos Modelos	$H_{rms}=1.09m, T_p=9s,$ $Dir=-31.6^\circ, Tl=1.2m$			$H_{rms}=1.16m, T_p=9s,$ $Dir=-28.2^\circ, Tl=1.2m$			$H_{rms}=1.12m, T_p=9s,$ $Dir=-29.0^\circ, Tl=1.2m$		
REFDF1 - Dados de saída ($H_{rmsmax}=1.66m$)									
$H_{rms} (m)$	1.08	0.81	0.38	1.14	0.63	0.31	1.08	0.94	0.28
$Dir (^\circ)$	-29.2	-14.7	-10.7	-23.8	-11.3	-5.6	-27.9	-17.3	-9.5
FUNWAVE - Dados de saída ($H_{max}=2.75m$)									
$H_{rms} (m)$	1.02	0.83	0.95	1.31	1.02	1.24	1.00	1.28	1.36
$H_{med} (m)$	0.92	0.75	0.85	1.17	0.92	1.11	0.90	1.15	1.22
$H_{max} (m)$	1.47	1.19	1.34	1.87	1.47	2.01	1.44	1.86	2.10
b) CS2 / Profundidade (m)	10.0	3.0	1.3	6.1	2.2	1.1	9.2	2.5	1.0
Dados de entrada do Modelo	$H_{rms}=1.12m, T_p=8.6s,$ $Dir=-27.4^\circ, Tl=1.6m$			$H_{rms}=1.18m, T_p=8.6s,$ $Dir=-24.8^\circ, Tl=1.6m$			$H_{rms}=1.15m, T_p=8.6s,$ $Dir=-25.3^\circ, Tl=1.6m$		
REFDF1 - Dados de saída ($H_{rmsmax}=1.64m$)									

H_{rms} (m)	1.10	1.29	0.47	1.14	0.84	0.4	1.16	1.06	0.39
Dir (°)	-25.3	-16.4	-10.1	-22.1	-10.2	-7.1	-25.1	-16.6	-12.4
FUNWAVE - Dados de saída ($H_{max}=2.93m$)									
H_{rms} (m)	1.10	1.18	1.09	1.38	1.04	1.17	1.13	1.36	1.49
H_{med} (m)	0.99	1.07	0.98	1.24	0.94	1.05	1.02	1.22	1.33
H_{max} (m)	1.58	1.70	1.56	1.99	1.53	1.76	1.65	1.97	2.32
c) CS3/ depth (m)	11.0	4.0	2.3	7.1	3.2	2.1	10.2	3.5	2.0
Dados de entrada do Modelo	$H_{rms}=0.98m, T_p=9.8s,$ $Dir=-31.5^\circ, Tl=2.6m$			$H_{rms}=1.03m, T_p=9.8s,$ $Dir=-28.7^\circ, Tl=2.6m$			$H_{rms}=1.01m, T_p=9.8s,$ $Dir=-29.2^\circ, Tl=2.6m$		
REFDIF1 - Dados de saída ($H_{rmsmax}=1.58m$)									
Hrms (m)	1.02	1.09	0.91	1.03	1.08	0.98	1.03	1.11	0.81
Dir (°)	-29.0	-20.6	-15.5	-24.3	-15.0	-12.8	-29.1	-20.4	-16.7
FUNWAVE - Dados de saída ($H_{max}=2.45m$)									
Hrms (m)	0.91	1.06	0.88	1.23	0.90	1.07	0.96	1.24	1.17
H_{med} (m)	0.81	0.95	0.79	1.11	0.81	0.97	0.86	1.12	1.06
H_{max} (m)	1.48	1.60	1.27	1.77	1.30	1.57	1.37	1.77	1.72

A comparação entre o H_{rms} dado pelos dois modelos está indicada na Figura 4. Além do H_{rms} , que é uma saída directa no caso das simulações com REFDIF1, foi calculada com recurso à fórmula apresentada na equação (12) para o FUNWAVE (referenciado como FUNWAVE1, implementado com coeficiente de rebentação padrão). Para o FUNWAVE foram também estimados outros parâmetros estatísticos sobre a distribuição altura de onda. Estes são: valor máximo, valor médio, desvio-padrão, curtose e assimetria (skewness).

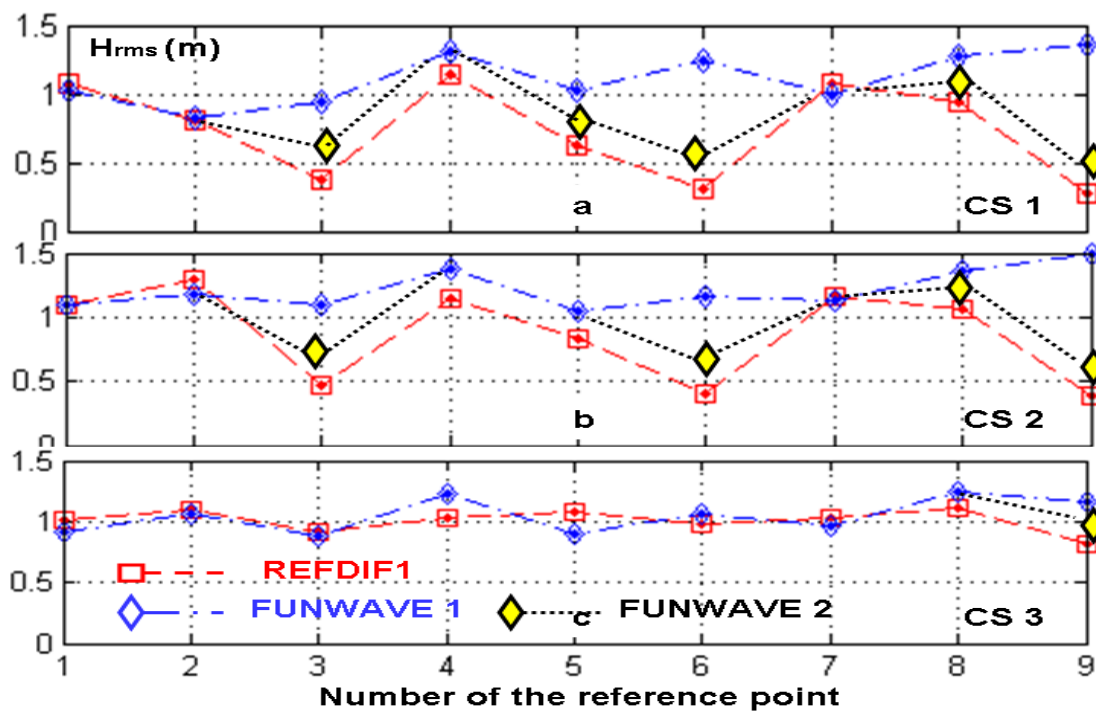


Figura 4 Comparação dos resultados entre os modelos REFDIF e FUNWAVE para os 3 casos de estudo.

As definições para os parâmetros estatísticos avaliados na Tabela 2 são dadas abaixo. Em teoria da probabilidade e estatística, curtose é uma medida de dispersão que caracteriza o pico ou "achatamento" da curva da função de distribuição de probabilidade. É normalmente definida como:

$$Kurt = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3 \quad (13)$$

onde μ_4/σ^4 é o quarto momento central o “-3” é normalmente explicado com uma correcção a fazer a curtose da distribuição normal igual a zero.

O desvio padrão é a medida mais comum da dispersão estatística e é definido como:

$$\sigma = \sqrt{E[(X - \mu)^2]} \quad (14)$$

onde $\mu=E[X]$ é a média do valor.

A assimetria (skewness) é uma medida da assimetria de uma determinada distribuição de frequência. O valor de assimetria pode ser positivo ou negativo, ou mesmo indefinida. Qualitativamente, a assimetria negativa indica que a cauda no lado esquerdo da função densidade de probabilidade é maior que o lado direito e a maior parte dos valores (incluindo a mediana) estão à direita da média. A assimetria positiva indica uma tendência inversa. É definida por:

$$\gamma_1 = \frac{\mu_3}{\sigma^3} \quad (15)$$

Para o caso de Leixões foi escolhida uma área junto ao porto onde foram feitas simulações com o modelo FUNWAVE, já calibrado. O domínio computacional está ilustrado na Figura 5, onde pode ser também observado o padrão de ondulação mais relevante, associado ao ambiente costeiro, considerado os efeitos da difracção na área do porto.



Figura 5 – Domínio computacional do Porto de Leixões.

Foram considerados 2 casos de estudo, CS4 com condições de ondulação correspondentes ao dia 16/12/1993, 06h, cujas condições de fronteira consideradas são: $H_s=5.1m$, $T_p=12s$, $Dir=318^\circ$, $DSPR=21^\circ$ e um CS5 com condições de ondulação correspondentes ao dia 14/01/1994, 15h, cujas condições de fronteira consideradas são: $H_s=4.2m$, $T_p=11s$, $Dir=296^\circ$, $DSPR=22^\circ$. Os resultados podem ser observados nas figuras 6 e 7 respectivamente.

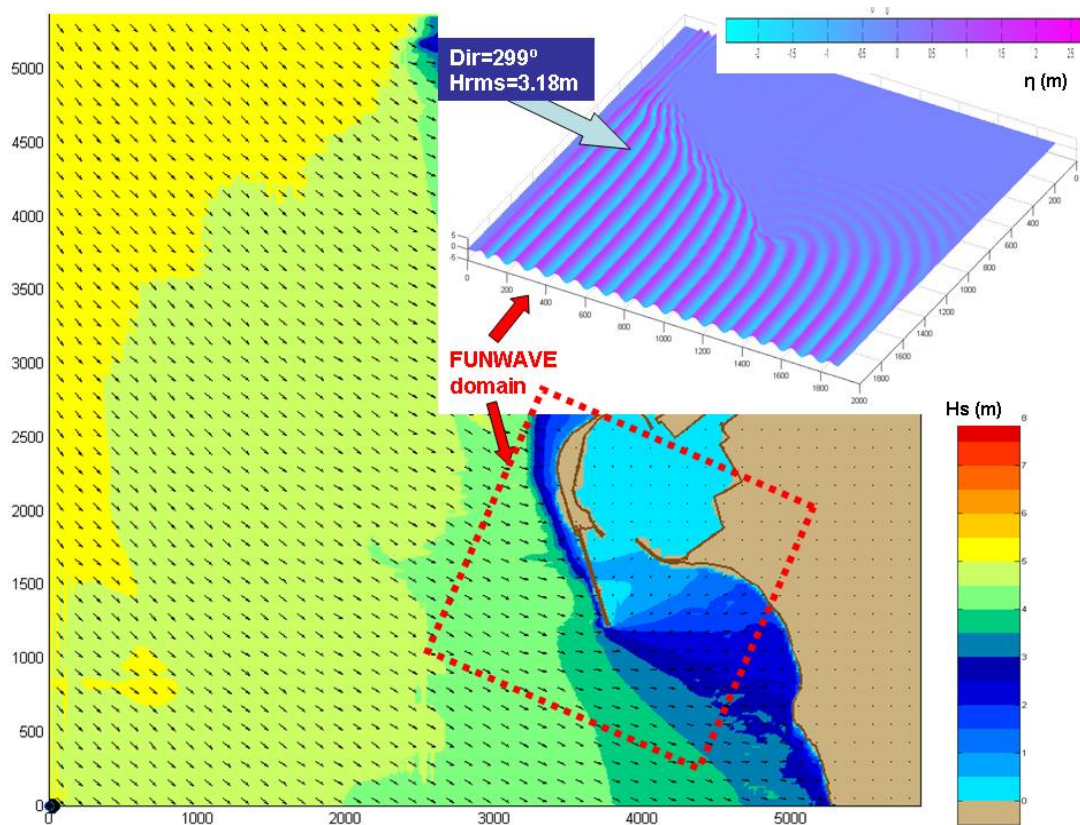


Figura 6- CS4- Comparação com os modelos SWAN e FUNWAVE ($H_s=5.1\text{m}$, $T_p=12\text{s}$, $\text{Dir}=318^\circ$, $\text{DSPR}=21^\circ$)

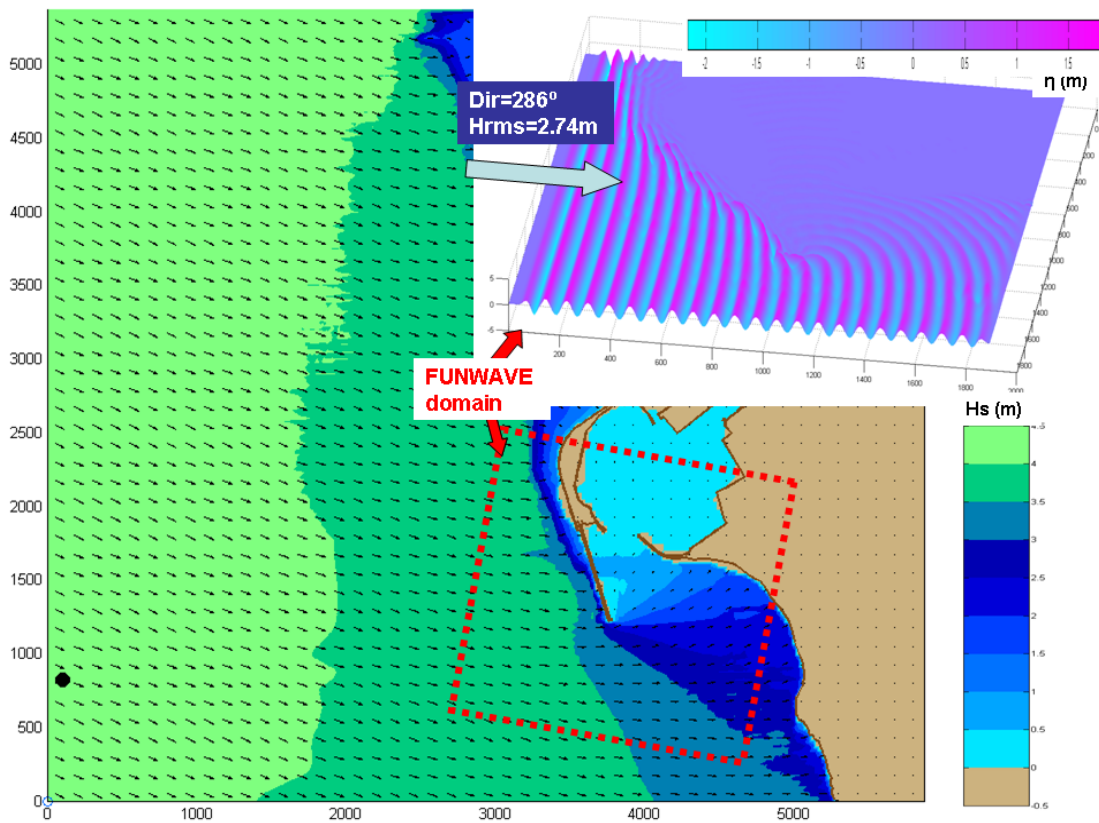


Figura 7 - CS4-Comparação com os modelos SWAN e FUNWAVE ($H_s=4.2\text{m}$, $T_p=11\text{s}$, $\text{Dir}=296^\circ$, $\text{DSPR}=22^\circ$)

Análise dos Resultados

Os resultados ilustrados na Figura 4 (REFDIF1 em comparação com FUNWAVE 1) revelam boa coerência entre os dois modelos, em termos de H_{rms} fora da zona de rebentação, no entanto verificam-se diferenças consideráveis dentro desta área. As razões para estas diferenças estão relacionadas com os mecanismos de rebentação que são consideravelmente diferentes entre os dois modelos. Além disso, no caso das simulações realizadas com REFDIF1 o efeito das correntes induzidas sobre as ondas que as geraram também é contabilizado, enquanto nas simulações realizadas com o modelo FUNWAVE este efeito é ignorado.

No entanto, a principal razão para tais diferenças dentro da zona de rebentação está relacionado ao facto de que, enquanto no FUNWAVE a parametrização para a rebentação das ondas é tida em consideração, nas simulações com o REFDIF1 a rebentação de ondas foi definida de acordo com os dados de observados.

Tendo conhecimento das condições de rebentação na área, os parâmetros de rebentação foram adaptados ao modelo REFDIF1. Assim, o parâmetro k , que representa a altura de onda à relação da profundidade da água (H/h) no início da rebentação, é igual a 0,5 (sendo que 0,73 é o valor padrão) e o parâmetro γ , que representa o limite inferior da relação H/h (abaixo deste limite a rebentação da onda pára), foi definido como 0,3 (sendo que 0,4 é o valor padrão).

Nos modelos de Boussinesq, a rebentação das ondas é modelada considerando uma variedade de técnicas. O modelo FUNWAVE usa uma formulação de rebentação semelhante à de Zelt (1991) através da inclusão de termos de viscosidade turbulenta, mas com capacidade para fornecer uma descrição mais realista do início e fim da rebentação quebra onda.

No que respeita ao FUNWAVE, os parâmetros ajustáveis são o $cbrk$, que é um coeficiente de comprimento de mistura, e tem um valor empírico de 1,2 e $cbkv$, que é um coeficiente de rebentação da onda, e tem um valor recomendado de 0,35. Mantendo a mesma relação usada no REFDIF1, o parâmetro $cbkv$ foi definido para o valor de 0,22. Depois de vários testes este valor foi alterado para 1,8 visto ser o mais apropriado para o parâmetro $cbrk$.

Os resultados estão indicados na Figura 4 e são referenciados como FUNWAVE 2. Nesta figura apenas estão representados os resultados cujas alterações face aos resultados do FUNWAVE anteriores são relevantes. Como demonstram os resultados na zona de rebentação, em termos de H_{rms} , estão muito mais próximas do que os previstos pelo REFDIF1.

Outro aspecto está relacionado com os resultados estatísticos apresentados na Tabela 2, os quais mostram, que a configuração batimétrica induz diversas modificações no campo de onda, tal como o aumento dos parâmetros estatísticos estimados (desvio-padrão, curtose, e assimetria). As alturas de onda máximas previstas pelo FUNWAVE, em cada caso de estudo também foram avaliadas e o máximo global (com o valor de 2.93m) ocorreu no terceiro domínio computacional (A3), no segundo estudo de caso (CS2). Por outro lado, o REFDIF1 obteve o máximo de H_{rms} para CS1 e A2.

Os resultados apresentados nas Figuras 6 e 7 revelam uma boa concordância entre os modelos SWAN e FUNWAVE. Nestas figuras é ainda evidenciado o padrão de ondulação associado ao ambiente costeiro e ao efeito local de difracção.

Conclusões

O trabalho desenvolvido apresenta os resultados da implementação do modelo FUNWAVE na zona costeira central do continente Português (a sul da zona costeira da cidade da Figueira da Foz). O modelo é baseado nas equações de Boussinesq estendidas de modo a ser válido também em águas profundas e intermédias.

A principal vantagem trazida pela aplicação deste tipo de modelos, quando comparados com modelos baseados no conceito de espectro, é o facto de fornecerem campos de onda coerentes, bem como permitem compreender melhor alguns dos processos costeiros, como empolamento da onda ou os processos combinados de refração-difracção. Algumas características estatísticas do campo de ondas bem como informações sobre a altura máxima das ondas também podem ser obtidas de uma forma mais confiável do que quando se utiliza a distribuição Rayleigh padrão.

Foi usada uma experiência de campo como referência para este estudo. Esta foi realizada na área da Figueira da Foz, no período de Outubro de 2003, a fim de validar os resultados de um sistema costeiro com base nos modelos REFDIF1 e SHORECIRC. Neste contexto, as simulações com o modelo FUNWAVE foram realizadas para o mesmo período em paralelo com o REFDIF1 sendo os resultados dos dois modelos comparados entre si bem como com os dados observados na área. Em termos de H_{rms} , verifica-se uma boa concordância entre os resultados fornecidos pelos dois modelos e a realidade verificada na área, fora da zona de rebentação.

No que respeita à zona de rebentação, os resultados tornam claro o facto de que, quando é usada parametrizações padrão, ambos os modelos não estimam adequadamente os processos associados à rebentação, no entanto ao se aplicarem significativas alterações dos coeficientes que controlam este processo os resultados revelam boa coerência para a costa portuguesa.

Da mesma forma, a partir das figuras 6 e 7, verifica-se uma boa concordância entre aos modelos SWAN e FUNWAVE. Este trabalho ainda está em curso, no entanto o modelo FUNWAVE parece ser um modelo muito promissor para estimar a transformação das ondas na costa portuguesa, nomeadamente junto a áreas portuárias.

Reconhecimento

O presente trabalho foi feito no âmbito do projecto NEARPORT (Desenvolvimento de um sistema operacional de previsão em tempo real da agitação marítima para os portos portugueses) que é financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (PTDC/ECM/64373/2006).

Referências

- Berkhoff, J.C.W., 1972. Computation of combined refraction–diffraction. Proceedings of the 13th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp. 471–490.
- Booij, N., 1981. *Gravity waves on water with non uniform depth and currents*, PhD thesis, Technical University of Delft, The Netherlands, 131 pp.
- Chen, Q., Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., Kennedy, B.A., Chawla, A., 2000. Boussinesq modelling of wave transformation, breaking, and runup. II: 2D. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE 126 (1), 57–62.
- Dalrymple, R.A., Kirby, J.T. and Hwang, P.A., 1984. Wave diffraction due to areas of energy dissipation, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, 110, 67-79.
- Holthuijsen, L.H., Herman, A. and Booij, N., 2003. Phase-decoupled refraction and diffraction for spectral wave models, Coastal Engineering, 49, 291-305.
- Kennedy, B.A., Chen, Q., Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., 2000. Boussinesq modelling of wave transformation, breaking and runup. I: 1D. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE 119 (6), 618–638.
- Nwogu; O. 1993 Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engng. 119(6), 618-638.
- Peregrine, D.H., 1967. Long waves on a beach. J. Fluid Mech. 27, 815–827.
- Rusu, E. and Guedes Soares, C., 2010: Validation of Two Wave and Nearshore Current Models, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, Vol 136, 2010, pp 27-45.
- Silva, R., Jorge da Silva, A., Rusu, E., Oliveira, F., Lorangeiro, S., Taborda R., 2004: Evaluation of the Longshore Current for a Sector of the Portuguese West Coast: Application of Different Methodologies, *Coastal Engineering 2004*, World Scientific Pub Co Inc 2005, Vol. II, pp. 1455-1467.
- Svendsen I.A., Haas, K. and Zhao, Q., 2002. *Quasi-3D Nearshore Circulation Model SHORECIRC*, version 2.0, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware, Newark, DE 19716 U.S.A.
- Wei, G., Kirby, J.T., Grilli, S.T., Subramanya, R., 1995. A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. I: highly nonlinear, unsteady waves. Journal of Fluid Mechanics 294, 71–72.
- Zelt J.A., 1991. The run-up of nonbreaking and breaking solitary waves, Coast. Engrg. 15, 205-246.