



**5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007**

MODELAÇÃO NUMÉRICA DE UM RECIFE ARTIFICIAL PARA A PRÁTICA DE SURF: COMPARAÇÃO DE RESULTADOS OBTIDOS POR TRÊS MODELOS MATEMÁTICOS

Mechteld ten Voorde, IMAR/UC/LNEC, mvoorde@lneec.pt

Eric Didier, FCT-UNL, deric@fct.unl.pt

Maria Graça Neves, LNEC, gneves@lneec.pt

António Anselmo, FCT-UNL, aldeia@hotmail.com

João Aveiro, FCT-UNL, ave3iro@netcabo.pt

Luís Gil, FCT-UNL, lmg@fct.unl.pt

José Antunes do Carmo, IMAR/UC, jsacarmo@dec.uc.pt

RESUMO

Até ao momento foram realizados diversos estudos de investigação relacionados com a melhoria das condições de surf das ondas induzidas por um Recife Artificial. No que se refere à protecção costeira, apenas se conhecem estudos para localizações específicas de determinados Recifes Artificiais.

Com o objectivo de estabelecer directivas de projecto que interrelacionem parâmetros físicos relativos à dinâmica e características locais com as características geométricas de um recife, foram realizados testes numéricos para a geometria esquemática de um recife em forma de triângulo, para diferentes condições de agitação utilizando três modelos distintos: um baseado em equações de tipo Boussinesq (COULWAVE) e dois baseados em equações de tipo RANS, *Reynolds averaged Navier-Stokes* (COBRAS-UC e FLUENT). Verifica-se que, em perfil, os modelos deveriam ser usados de forma acoplada e em planta, os resultados reforçam a credibilidade dos resultados dos modelos COULWAVE e FLUENT.

Palavras-chave: Recifes artificiais, obras de protecção, ondas para surf, modelação numérica

1 INTRODUÇÃO

Verifica-se que a erosão costeira assume aspectos preocupantes na generalidade do litoral português, em mais de 30% da sua extensão (Figura1) (Dias, 2003).

Todavia, importa não esquecer que a erosão costeira é um fenómeno natural que sempre existiu e tem ajudado ao longo dos tempos a modelar a orla costeira portuguesa, juntamente com outros fenómenos associados ao mar. A erosão costeira resulta da combinação de diversos factores, naturais e antrópicos, que actuam a diferentes escalas.

Os principais factores naturais responsáveis pela erosão costeira e consequente recuo da linha de costa são: os efeitos das alterações climáticas, conduzindo a situações de tempestades sucessivamente mais frequentes e devastadoras, e o efeito da expansão térmica, que conduz a um aumento global da temperatura e, em consequência, a um aumento da subida do nível médio das águas do mar, agravado ainda com os efeitos adicionais do degelo das calotes esféricas e de alterações nos padrões globais da circulação oceânica. Estes factores assumem ainda maior destaque quando associados a um mar tão energético como o da costa ocidental portuguesa.

O precário equilíbrio dinâmico das zonas costeiras é ainda fragilizado pelo acelerado aumento populacional, sendo fácil constatar que todo o litoral português tem vindo a ser intensivamente ocupado.

Torna-se evidente que a maior parte dos problemas existentes na zona costeira estão, de alguma forma, directa ou indirectamente ligados à progressiva ocupação urbana desta zona, tendo como consequência uma forte degradação de muitas das estruturas naturais existentes.

Simultaneamente, verifica-se que diversas actividades e intervenções de origem antrópica (como a construção de barragens, a explorações de inertes fluviais, as acções de dragagem portuárias, etc.) têm vindo a perturbar fortemente o sistema, nomeadamente através de uma significativa redução do abastecimento sedimentar. Concomitantemente, estas acções ameaçam a capacidade que as zonas costeiras tiveram outrora de se adaptarem aos efeitos gerado

s pelas alterações climáticas, nomeadamente a subida do nível médio das águas do mar e o aumento da frequência e intensidade dos eventos de tempestades, que conduzirão inevitavelmente a uma acentuada erosão costeira e ao consequente recuo da linha de costa.

Outro factor a considerar, igualmente preocupante, são as construções de engenharia pesada, nomeadamente as que são implantadas para defender localmente o litoral. Ora, a zona costeira portuguesa encontra-se hoje em dia num processo de forte artificialização, sendo as estruturas fixas (esporões, paredões, quebra-mares, etc.) constantes ao longo do litoral. Esta tentativa de travar as investidas do mar face à costa com o objectivo de proteger bens humanos, e de tornar estático aquilo que, por natureza, é profundamente dinâmico, com a consequente perda de potencialidades intrínsecas às zonas costeiras, deve ser condenada à partida (Dias, 2003). Pelo contrário, devem procurar-se soluções alternativas que tenham mais em conta todo o equilíbrio ambiental destas zonas, tão importantes do nosso território.



Figura 1 - Erosão costeira - recuo médio anual da linha de costa, em Portugal (Dias,2003).



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

O litoral da região centro de Portugal é exemplo de um troço considerado crítico, sendo ameaçado por problemas extremamente graves de erosão costeira, que põem em risco bens naturais e humanos. É inquestionável a riqueza desta região em termos de recursos; no entanto, as fortes pressões a que têm sido submetidos, em grande parte devido ao aumento da concentração e actividades da população, têm vindo a revelar a sua elevada vulnerabilidade.

É neste contexto que surgem os recifes artificiais multifuncionais como alternativas viáveis que têm vindo a ganhar cada vez mais adeptos. São conhecidos alguns exemplos de sucesso, mas não existem ainda hoje estudos sistemáticos e suficientemente profundos que permitam generalizar este tipo de estruturas ao longo da costa portuguesa com o duplo objectivo de a proteger e melhorar as características balneares de muitas das suas zonas.

Os estudos que se apresentam neste artigo pretendem servir de base à implantação de um recife artificial a Sul da Leirosa, ao longo do trecho particularmente sensível que se mostra na figura 2.



Figura 2 - Vista aérea de um troço costeiro particularmente fragilizado, com a Leirosa ao fundo (Janeiro de 2006).

Em primeira aproximação, a geometria do recife é baseada na configuração apresentada em Ten Voorde et al., 2006, embora simplificada.

Para estudar as características hidrodinâmicas do escoamento junto ao recife, quer em perfil quer em planta, foram utilizados três modelos numéricos. O estudo em perfil foi realizado com recurso ao modelo COULWAVE (Lynett e Liu, 2002), baseado nas equações de Boussinesq, e a dois modelos baseados nas equações de Reynolds: o modelo comercial FLUENT (2005) e o modelo COBRAS-UC (Lara et al., 2006). O estudo em planta (domínio 2DH) foi realizado com recurso ao modelo FLUENT e COULWAVE.

No ponto 2 descrevem-se sumariamente as características dos modelos numéricos utilizados. Nos pontos 3 e 4 apresentam-se e discutem-se os resultados das simulações efectuadas em perfil e em planta, respectivamente, e no ponto 5 apresentam-se as principais conclusões do estudo efectuado.

2 MODELOS NUMÉRICOS

2.1 Modelo Coulwave

Os modelos clássicos do tipo Boussinesq, de que é exemplo o modelo de Peregrine (1967), usam aproximações polinomiais quadráticas para a distribuição vertical da velocidade, o que limita as suas aplicações, nomeadamente porque: i) não descrevem com suficiente rigor os efeitos dispersivos em condições de águas intermédias, e ii) apenas propagam correctamente



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

ondas de baixa amplitude relativa. Estas limitações são consistentes com a hipótese fundamental das equações de Boussinesq, a qual considera que os efeitos dispersivos são da mesma ordem de grandeza dos efeitos não-lineares, ou seja, que $O(\varepsilon) = O(\sigma^2)$, com $\varepsilon = a/h$ e $\sigma = h/l \ll 1$ (hipótese fundamental da água pouco profunda).

As propriedades dispersivas dos modelos convencionais de Boussinesq têm vindo a ser melhoradas, através da modificação dos termos dispersivos (Madsen e Sorensen, 1992) ou usando uma velocidade de referência a uma altura previamente especificada (Nwogu, 1993). Esta técnica permite obter um sistema de equações cuja relação de dispersão linear pode ser ajustada de modo a que as características dispersivas em águas intermédias resultem muito próximas das da teoria linear da onda. Liu (1994) e Wei et al. (1995) estenderam a aproximação de Nwogu para ondas fortemente não-lineares, desenvolvendo modelos que podem não só ser aplicados em condições de águas intermédias mas também simular a propagação de ondas com elevados efeitos de interação não-linear, isto é, $\varepsilon = O(1)$. Em geral, estes modelos resolvem equações com propriedades de dispersão linear bastante rigorosas até $kh \approx 3$ (Nwogu, 1993).

Recorrendo a um polinómio de quarta ordem, Gobbi et al. (2000) desenvolveram um modelo com excelentes propriedades dispersivas até à ordem $kh \approx 6$. O comportamento não-linear foi fielmente conseguido até $kh \approx 3$. Naturalmente que esta melhoria de precisão do modelo em relação às aproximações anteriores foi acompanhada de um significativo esforço computacional.

A aproximação polinomial de quarta ordem comporta resultados com derivadas espaciais de quinta ordem num sistema de equações muito complexo, requerendo um esquema numérico de resolução igualmente bastante complexo. Madsen e Schaffer (1998) e Agnon et al. (1999) desenvolveram um modelo de equações recorrendo a aproximações polinomiais de ordens ainda mais elevadas.

Todos estes desenvolvimentos têm por objectivo estender a aplicação de modelos de equações do tipo Boussinesq à propagação suficientemente rigorosa de ondas desde águas relativamente profundas até à zona de rebentação.

O modelo matemático resolvido pela estrutura computacional COULWAVE utiliza uma aproximação diferente para a obtenção de um sistema de equações de ordem superior. Em vez de recorrer a uma aproximação polinomial de ordem mais elevada para a distribuição vertical da velocidade, utiliza duas funções quadráticas com valores iguais numa interface que divide a coluna de água em duas camadas. Esta aproximação conduz a um sistema de equações sem as derivadas espaciais de ordem elevada resultantes do uso de funções polinomiais de ordem superior.

Neste programa computacional é adoptado um algoritmo de diferenças finitas para a resolução das equações, considerando uma ou duas camadas, sendo a estrutura numérica similar às apresentadas em Wei e Kirby (1995) e Wei et al. (1995). As diferenças entre o modelo aqui apresentado, para o sistema de uma única camada, e o apresentado em Wei et al. (1995) resultam da existência de termos adicionais, devidos à dependência temporal da profundidade, e do tratamento numérico de alguns termos dispersivos não-lineares.

As equações são resolvidas recorrendo a um esquema de previsão-correcção de ordem superior. No passo de previsão utiliza o modelo explícito de terceira ordem em tempo de Adams-Bashford e no passo de correcção recorre ao modelo implícito de quarta ordem em tempo de Adams-Moulton. O passo de correcção implícito utiliza um procedimento iterativo até satisfação de um critério de convergência previamente estabelecido.

O processo de rebentação da onda implementado no modelo COULWAVE é baseado num esquema descrito em Kennedy et al. (2000). Por se tratar de um modelo integrado na vertical, não é possível simular os efeitos tridimensionais que se desenvolvem fundamentalmente no plano vertical, em particular o processo de rebentação mergulhante. O esquema implementado considera termos adicionais de dissipação da energia de origem turbulenta, devida ao processo de rebentação, nas equações da quantidade de movimento, através de uma formulação paramétrica simples para a viscosidade turbulenta. Os termos adicionais de dissipação



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

envolvem primeiras e segundas derivadas da velocidade, da profundidade e da viscosidade turbulenta, sendo o mecanismo de dissipação fundamentalmente função de um parâmetro de controlo e de variações temporais da superfície livre. Apesar de conceptualmente simples e de fácil implementação, este esquema tem revelado uma razoável concordância entre resultados numéricos e experimentais para as diversas condições de agitação, tanto regular como irregular, em que o modelo tem sido aplicado.

2.2 Modelo FLUENT

O código CFD (Computational Fluid Dynamics) utilizado é o programa comercial FLUENT. O código FLUENT (versão 6.2.16), Fluent (2005), aplica uma técnica de volumes finitos para resolver a equação da continuidade e as equações de Navier-Stokes-Reynolds (RANS). As variáveis são definidas no centro de cada elemento. Dos vários algoritmos disponíveis para resolver o acoplamento entre a velocidade e a pressão, seleccionou-se o algoritmo SIMPLEX, Vandoormaal and Raithby (1984), mais adaptado para simulações não estacionárias.

Diferentes modelos de turbulência estão disponíveis neste programa e podem influenciar de maneira significativa os resultados. No entanto, como o objectivo da presente comunicação não é a análise dos modelos de turbulência na interacção onda-estrutura costeira, o modelo de turbulência $k-\epsilon$ na sua versão standard foi escolhido pois é classicamente o mais utilizado nas aplicações de engenharia.

Os sistemas de equações algébricos obtidos da discretização e linearização das equações são resolvidos com o método de Gauss-Siedel ponto-a-ponto, em conjunto com um método algébrico de malha múltipla.

Os termos difusivos das equações são discretizados pelo esquema de diferenças centrais de segunda ordem. Os termos convectivos nas faces dos volumes de controlo são interpolados pelo esquema QUICK de terceira ordem. A pressão nas faces dos volumes de controlo é obtida por um esquema de interpolação de quantidade de movimento proposto por Rhie e Chow (1983). Para a turbulência, os termos convectivos são interpolados pelo esquema UPWIND de segunda ordem.

A modelação da superfície livre é realizada usando o método VOF (Volume Of Fluid), desenvolvido inicialmente por Hirt and Nichols (1981). Este método consiste em capturar a posição da superfície livre a partir de um indicador, a fracção de volume (um escalar), que toma o valor de 0.0 no ar e 1.0 na água. A posição da superfície livre é assim definida arbitrariamente pelo valor 0.5. Os valores intermédios, entre 0.0 e 1.0, indicam a presença de uma mistura entre água e ar. A dificuldade deste método reside na conservação numa transição reduzida entre os dois fluidos. Assim, é utilizado o método HRIC, Peric and Ferziger (1997), especialmente desenvolvida para este tipo de problema e disponível no FLUENT.

2.3 Modelo COBRAS-UC

O modelo COBRAS-UC é baseado no modelo RIPLLE, originalmente desenvolvido pela NASA, e modificado na Universidade de Cornell, dando origem ao modelo COBRAS (COrnell BReaking waves And Structures), especificamente para tratar dos fenómenos da rebentação e ter em conta as estruturas porosas (Lara et al., 2006). Finalmente o modelo foi melhorado na Universidade de Cantábria no que respeita à optimização de cálculo e à melhoria dos sistemas de entrada e saída do modelo, dando origem ao modelo COBRAS-UC.

COBRAS-UC é um modelo numérico unidimensional em planta, que resolve as equações completas de Reynolds na vertical (RANS), ao que se incorporou um modelo não linear de turbulência, $k-\epsilon$.

Para o escoamento em meios porosos inclui-se um modelo de dissipação de energia não linear, que corresponde a uma variação das equações RANS e que se obtém a partir de uma integração num volume de controle no meio poroso, considerando-se assim o meio poroso como um meio contínuo. Implementou-se ainda um modelo $k-\epsilon$ no interior do meio poroso.

O modelo incorpora um método de seguimento da superfície livre do tipo "Volume of Fluid" (VOF). Desta forma, a superfície livre pode comportar-se de maneira arbitrária, o que permite



que existam zonas desconexas, formação de gotas, etc. Os métodos utilizados para resolver as equações são interactivos de diferenças finitas, melhorando assim a precisão dos resultados.

Para a execução de uma simulação numérica, é gerada uma malha formada por elementos rectangulares, cuja dimensão pode variar de forma não linear, podendo formar uma malha fina na zona de interesse do estudo e uma malha grosseira onde não seja necessário um cálculo tão preciso.

Os obstáculos e zonas de diferentes porosidades são definidos através de funções contínuas. Para o cálculo do escoamento no meio poroso é necessário definir as propriedades do meio, tais como a porosidade e o tamanho dos elementos que o compõe e uma série de parâmetros adicionais que dependem do escoamento e que precisam de ser calibrados.

O modelo permite obter informação completa de pressão, vorticidade, viscosidade turbulenta, velocidades horizontais e verticais, posição da superfície livre, conservação de massa, volume galgado, etc. e foi já validado em diferentes casos de engenharia costeira com bons resultados na simulação de escoamentos em estruturas porosas, 0.

3. MODELAÇÃO DO PERFIL DO RECIFE

Para analisar a influência da agitação nas características da rebentação junto ao recife, em particular no tipo e posição onde ocorre a rebentação e na sua altura de onda, realizaram-se cálculos em canal numérico com os três modelos descritos anteriormente: COULWAVE (1DH), baseado nas equações de Bousinesq e dois modelos baseados na equação de Reynolds, o FLUENT (2D), modelo comercial, e o COBRAS-UC (2D). Os testes foram realizados para a geometria apresentada na Figura 3, que corresponde a uma secção transversal do recife apresentado na Figura 9. O declive de montante corresponde ao valor médio do declive que a onda sente quando se propaga sobre o declive do recife, tendo em conta a sua direcção de propagação.

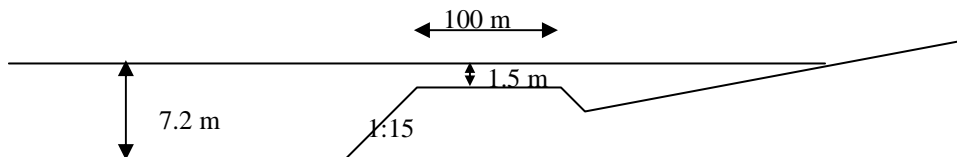


Figura 3 – Geometria do recife utilizado em testes com três modelos numéricos.

Analisaram-se as três condições de agitação descritas na Tabela 1 (Casos P1 a P3), onde s corresponde à submersão do recife (ver Figura 3), H à sua altura e T corresponde ao período da onda. Todos os casos foram analisados considerando a onda de projecto para um recife artificial para a prática de surf correspondente a condições muito frequentes na costa oeste de Portugal continental. É de notar que, embora a onda incidente fosse a mesma para os três modelos, a onda realmente gerada pelos modelos, H_o na Tabela 1, difere de modelo para modelo. Especialmente no caso do modelo COBRAS-UC, não foi possível atingir os valores pretendidos, já que neste modelo a geração é feita através de uma função fonte definida para águas pouco profundas e a geração dá-se em águas de profundidade intermédia.

Tabela 1 - Condições de agitação analisadas em condições de baixa-mar.

Caso	s (m)	H (m)	T (s)	H_o (m) COULWAVE	H_o (m) COBRAS-UC	H_o (m) FLUENT
P1	1.5	1.5	10	1.57	1.20	1.52
P2		2.0	10	2.10	1.80	1.99
P3		2.5	10	2.61	2.00	2.46

Os parâmetros analisados são: o ponto de rebentação, x_b , e a correspondente altura de onda, H_b e profundidade, h_b . Na Figura 4 apresentam-se, para os três modelos os resultados das



alturas, H , na zona próxima à de rebentação. Os resultados dos parâmetros de estudo estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados dos modelos COULWAVE, COBRAS-UC e FLUENT para os casos P1 a P3.

	hb (m)			Hb/hb			Hb/Ho		
	COULWAVE	COBRAS-UC	FLUENT	COULWAVE	COBRAS-UC	FLUENT	COULWAVE	COBRAS-UC	FLUENT
Caso P1	2.4	2.2	2.55	0.83	0.67	0.93	1.25	1.35	1.57
Caso P2	2.6	2.6	3.25	0.95	0.89	0.91	1.16	1.27	1.49
Caso P3	2.6	3.2	4.28	1.11	0.65	0.82	1.09	1.10	1.42

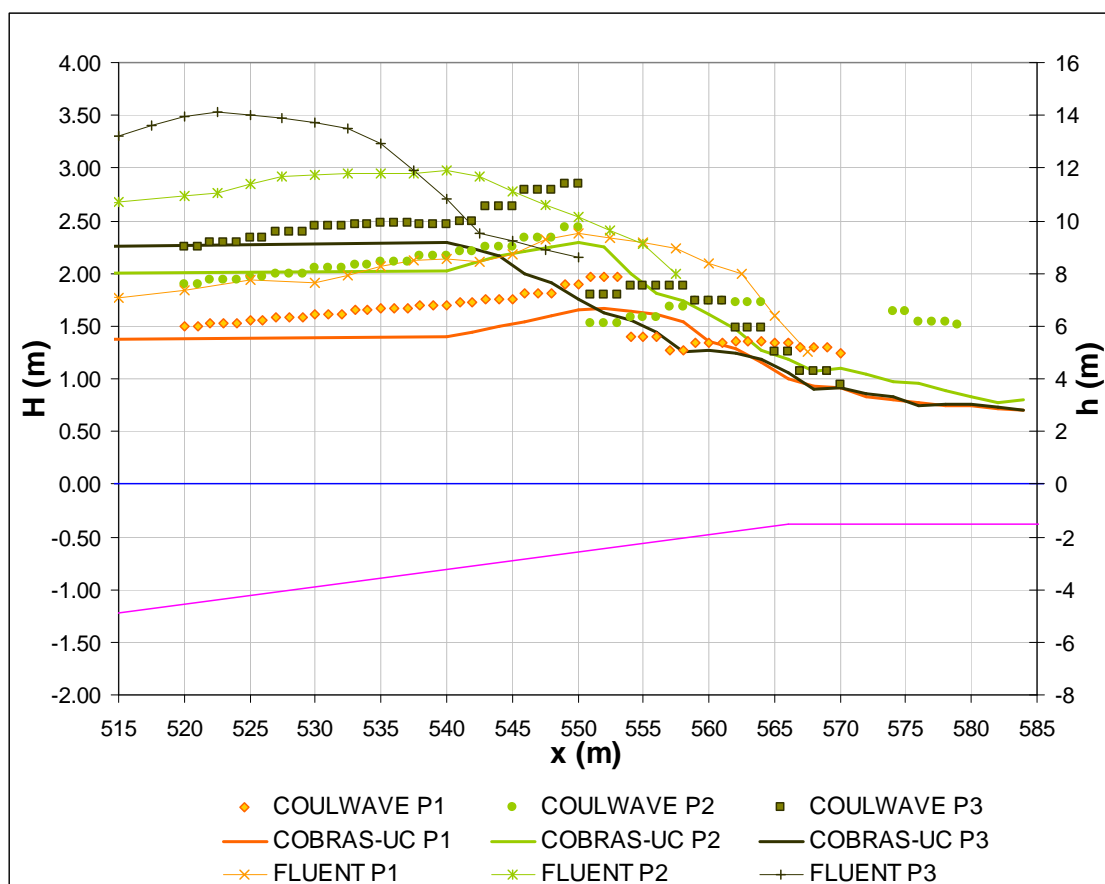


Figura 4 – Altura de onda na zona de rebentação calculada pelos modelos COULWAVE, COBRAS e FLUENT.

Dos resultados apresentados anteriormente, pode verificar-se que a posição da rebentação é diferente para cada modelo e conseqüentemente, a altura de onda de rebentação. No entanto, verifica-se que nos casos do FLUENT e do COULWAVE a altura de onda obtida na fronteira de entrada do modelo é semelhante à pretendida. No caso do modelo COBRAS-UC estas alturas são sempre menores, o que altera também as suas características na rebentação. No entanto é nítido que os resultados do modelo FLUENT são aqueles para os quais a

rebentação se dá mais precocemente e por isso, o que leva a valores de H_b/h_b menores. O modelo COULWAVE é aquele para o qual a dissipação devido à rebentação é mais abrupta, o que se deve ao modelo de rebentação que é utilizado neste modelo. No que se refere à relação H_b/H_o , os modelos COULWAVE e COBRAS-UC dão resultados muito semelhantes. No entanto, no caso do FLUENT, observa-se que os valores H_b/H_o são maiores para os três casos, e que são do mesmo ordem. Isto pode estar ligado ao facto da geração da onda ser feita demasiado perto do pé do recife, sem deixar um comprimento suficiente para a onda se desenvolver e adaptar-se ao fundo. Assim a onda com uma amplitude demasiada grande teria tendência a rebentar mais rapidamente. Futuras investigações devem permitir verificar esta hipótese.

Em relação ao factor H_b/h_b , o comportamento de cada modelo é distinto, sendo no COULWAVE crescente com H , no FLUENT decrescente e no COBRAS-UC não apresenta uma tendência marcada.

Uma aplicação mais correcta dos modelos consistiria em acoplar um modelo adaptado à propagação das ondas (como o modelo COULWAVE) na zona inicial do domínio e um modelo RANS (como os modelos COBRAS-UC e FLUENT), que permite modelar a rebentação mais correctamente, na zona próxima à estrutura. Este será o objectivo do trabalho futuro a desenvolver.

4. MODELAÇÃO DO RECIFE 3D/2DH

Para a análise em 3D/2DH, foram realizados testes com os modelos COULWAVE e FLUENT para as condições de agitação apresentadas na Tabela 3 e para a geometria de recife apresentada na Figura 5. Nos Casos PL1, PL2 e PL3 simulam-se condições de baixa-mar, correspondendo os Casos PL1 e PL3 a condições de ondas menos e mais energéticas da costa Portuguesa, respectivamente. O Caso PL2 é para baixa-mar e condição de projecto para a prática de surf. A tabela 2 resume estas condições.

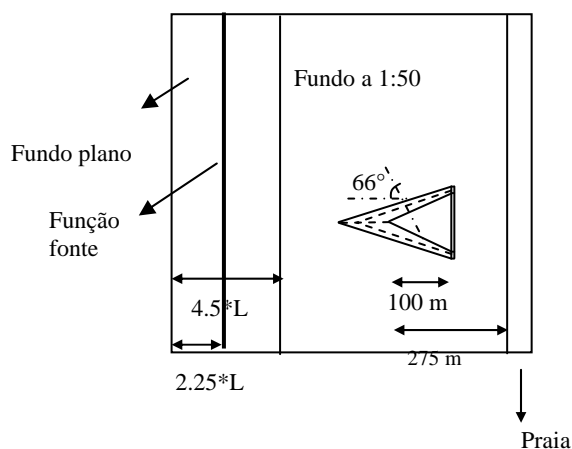


Figura 5 – Batimetria e geometria do recife para os Casos PL1 a PL3

Tabela 3 – Casos de estudo.

Caso	s (m)	H (m)	T (s)
PL1	1.5	1.0	6
PL2		2.0	9
PL3		4.0	15

O domínio simulado com o modelo COULWAVE apresenta uma área rectangular

variável, com as fronteiras totalmente absorventes ('sponge layers'), tendo-se considerado camadas de $1.25 L$ ao longo de todas as fronteiras, onde L é o comprimento de onda. Em todas as simulações, adoptou-se segundo y uma dimensão de 1000 m e segundo x uma dimensão variável em função do período da onda, entre 1148 m e 1880 m .

As condições de agitação simuladas correspondem a uma onda sinusoidal gerada por uma função fonte situada a uma distância $2.25 L$ da fronteira esquerda, onde L é o comprimento de onda (Figura 5). O número de pontos da malha variou de caso para caso, já que este é função do período, sendo menor quanto menor é o valor do período (Caso PL1 19, caso PL2 35, caso PL3 50).

Apresenta-se na Figura 6 os resultados do campo de correntes obtidos com o modelo COULWAVE para as três condições testadas, P1 a P3.

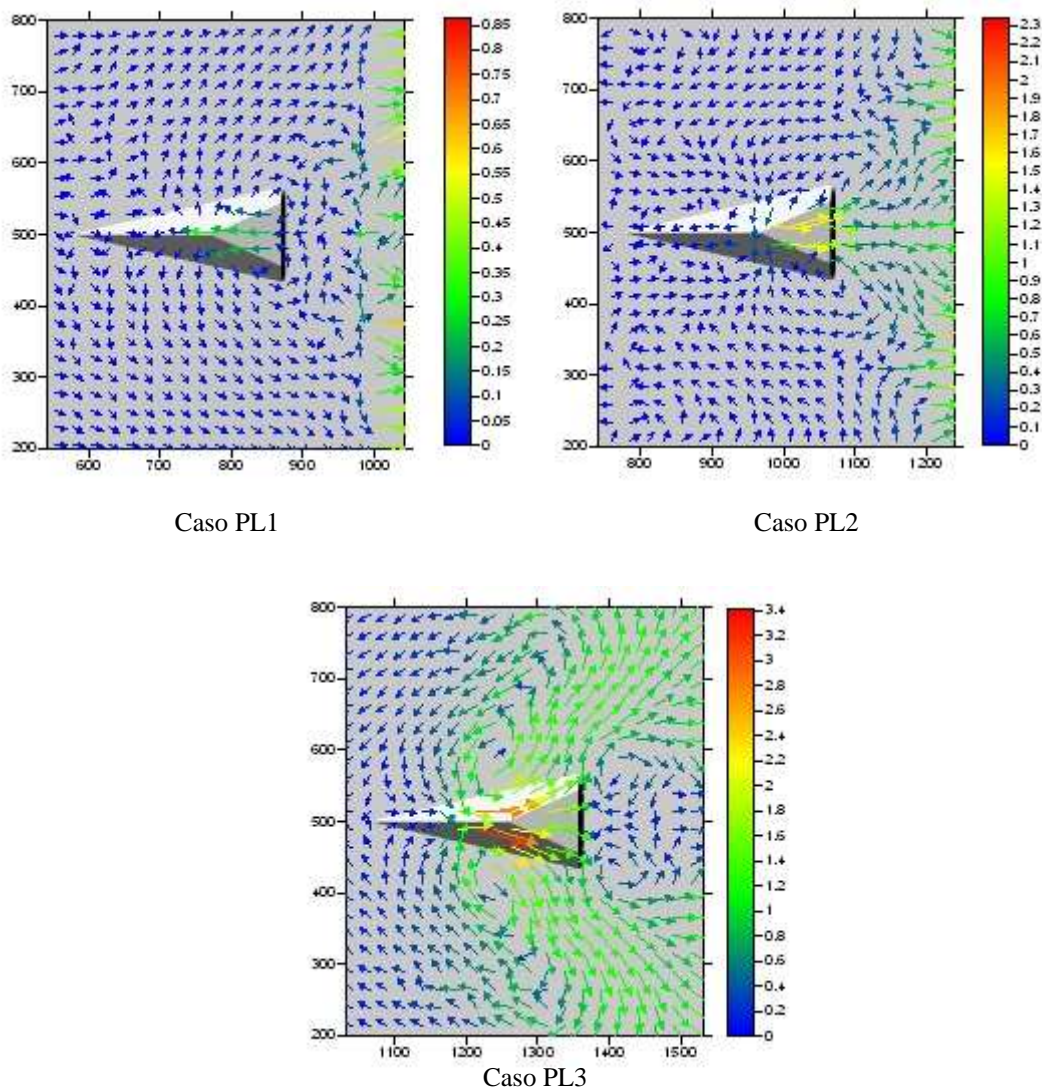


Figura 6 - Campos de velocidade obtidos com o modelo COULWAVE para $z=-0.531h$.

O campo de correntes que se apresenta no Figura 6 corresponde às velocidades medidas a uma profundidade de $0.531h$. Esta profundidade é tomada como a profundidade para a qual se tem uma velocidade representativa do escoamento por vários autores, tal como Nwogu (1993), e foi adoptada pelos autores do modelo COULWAVE. Para obter correctamente a corrente media, dever-se-ia alterar o código do modelo de forma a se poder integrar a velocidade na vertical e dividir este valor pela profundidade em cada ponto, o que será feito futuramente.

Observando a Figura 6, pode verificar-se que, no Caso PL1, as correntes se dirigem para o tardo da estrutura, indicando a possível ocorrência de sedimentação nessa zona. Nos Casos PL2 e PL3, verifica-se um comportamento diferente, com as correntes no tardo do recife a divergirem, embora no Caso PL3 elas se dirijam para a zona imediatamente a jusante da estrutura. Assim, nestes casos, as condições são favoráveis à ocorrência de erosão.

O caso PL2 foi escolhido para a realização duma simulação numérica usando o modelo FLUENT. Um único caso de configuração do recife foi simulado devido ao tempo de cálculo que implica o uso deste tipo de método numérico, da ordem de dias para o domínio em estudo. O domínio de cálculo utilizado para a simulação numérica é apresentado na Figura 7.

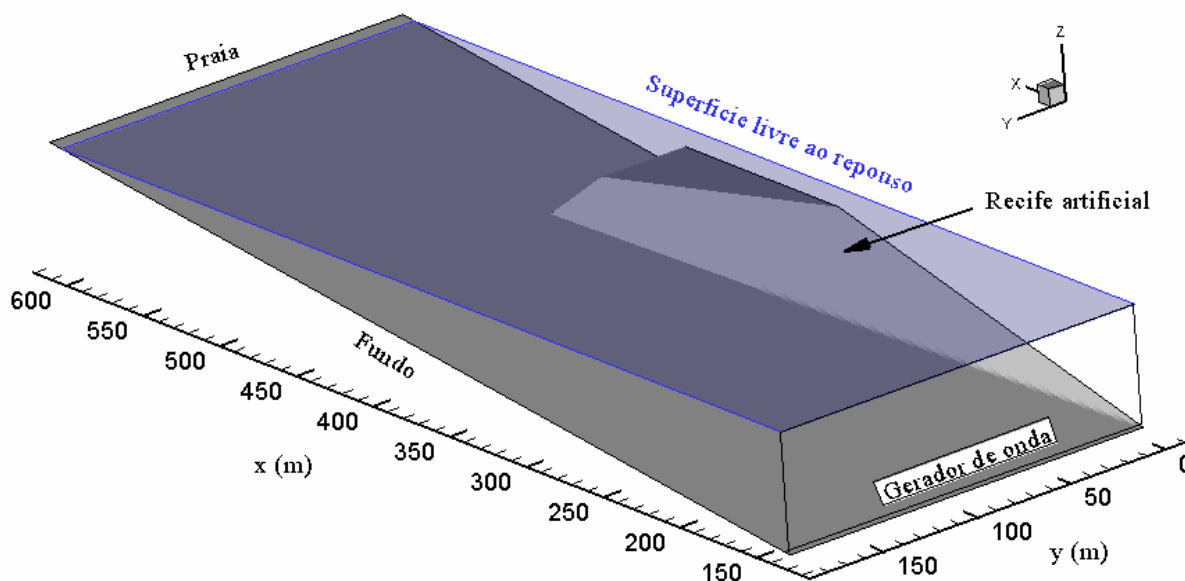


Figura 7. Domínio de cálculo do modelo FLUENT.

O escoamento é supostamente simétrico em relação ao plano de simetria do recife, o que permite reduzir significativamente o tempo de cálculo. O domínio de cálculo tem 480m de comprimento e 190m de largura. A geração da onda é efectuada na entrada do domínio de cálculo onde há uma profundidade de 9.4m, situada ao pé do declive do recife. O gerador de onda consiste impor um perfil de velocidade e a amplitude duma onda sinusoidal nesta fronteira. Após o recife encontra-se a praia.

Mesmo assim, devido ao potencial de cálculo disponível, a simulação numérica foi realizada com condições de passo de tempo e malha que não são as óptimas. Efectivamente, o passo de tempo é de 0.03s e a malha na zona de rebentação é de mais ou menos 0.4m na direcção da propagação. Da experiência já adquirida na propagação de ondas, o passo de tempo e a dimensão da malha deveriam ter valores em torno de 0.005s e 0.15-0.20m respectivamente. No entanto, a rebentação não deve alterar profundamente as eventuais correntes que se desenvolvem em torno do recife. Com as condições precedentes, e considerando que 15-20 iterações não lineares são necessárias para assegurar a convergência a cada passo de tempo, o tempo total de simulação foi de 15 dias para modelar 90s de escoamento.

É também de salientar que foi escolhido o modelo de turbulência k- ϵ na sua forma standard. Esta escolha foi ditado pela universalidade deste modelo nas aplicações de engenharia, mas não é necessariamente o modelo mais apropriado à modelação de escoamento com superfície livre e propagação de ondas. No entanto, foi verificado que este modelo de turbulência não altera a propagação das ondas, mas apenas o escoamento na zona de rebentação.



Apresentam-se na Tabela 4 as informações relativas às simulações feitas com os dois modelos numéricos, COULWAVE e FLUENT.

Tabela 4. Características dos modelos COULWAVE e FLUENT para o caso PL2.

	COULWAVE	FLUENT
Tempo real de simulação	800 s	90 s
Tempo de CPU necessário	26 hours	15 days
Passo de tempo	2.56 s	0.03 s
Dimensão típica da malha	3.11 m	0.4 m

Apresentam-se na Figura 8 os resultados do campo de velocidade média calculados com o modelo FLUENT a partir dos dados obtidos durante um período de onda, considerando a profundidade de 0.8m sob a superfície livre ao repouso.

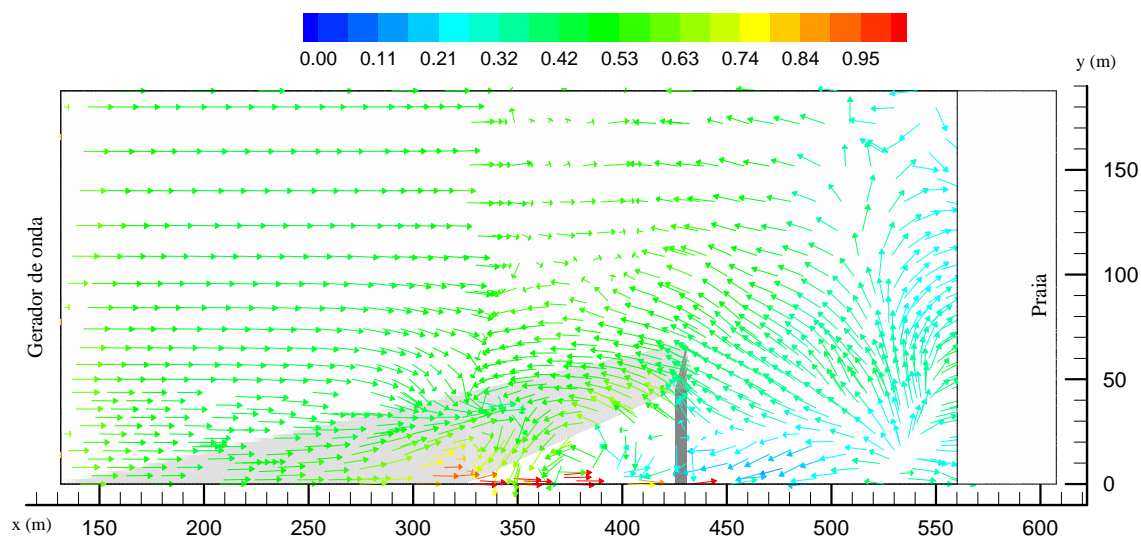


Figure 8. Campo de velocidades no plano $z = -0.8\text{m}$ (FLUENT).

No modelo COULWAVE, é apenas conhecida a intensidade da velocidade e as componentes da velocidade nas direcções x e y numa superfície situada a uma profundidade igual a $0.531h$, onde h é a profundidade, ou seja numa superfície que não está situada a uma profundidade constante. Assim, a única zona onde os resultados do COULWAVE e do FLUENT podem ser comparados é a parte horizontal do recife, onde as velocidades médias são estimadas à profundidade de 0.8m. Na Figure 9 apresentam-se os resultados do modelo COULWAVE para o campo de velocidades no caso PL2. Os resultados são apresentados com o mesmo espaçamento que os resultados do modelo FLUENT, de forma a permitir comparar visualmente os resultados das Figuras 8 e 9.

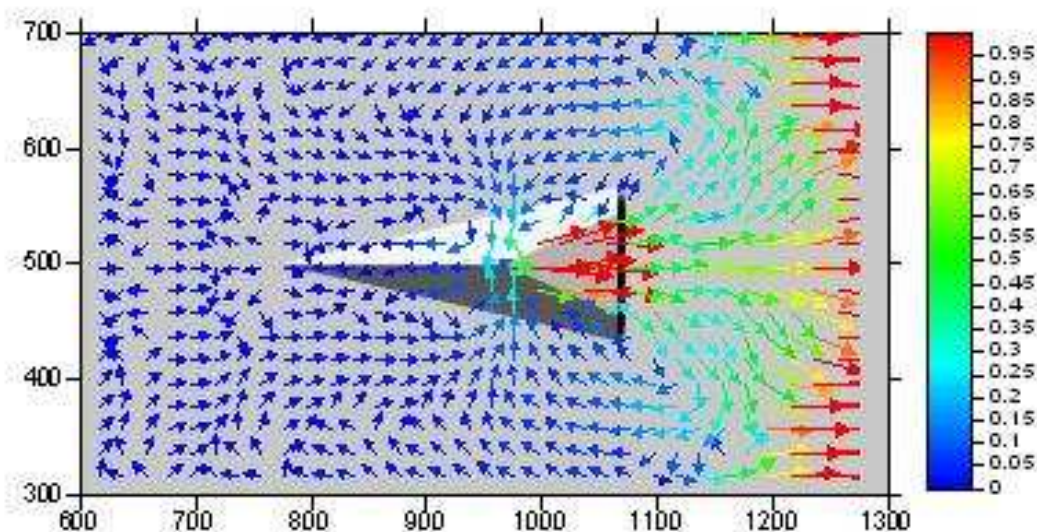


Figura 9. Campo de correntes para o caso PL2 calculado com o modelo COULWAVE

Apesar da profundidade onde os vectores velocidades são representados nas Figuras 8 e 9 não serem as mesmas, é possível comparar a intensidade e a direcção da velocidade na parte superior horizontal do recife e a direcção da velocidade no resto do domínio de cálculo. Comparando assim a direcção da velocidade, os resultados são muito similares na maior parte do domínio. Mais particularmente, o ponto onde os vectores da velocidade sobre o recife invertem a sua direcção podem ser identificados claramente nas duas figuras. Foi referido precedentemente que, para a simulação numérica no FLUENT, foi considerada o plano de simetria do recife como plano de simetria do problema. Assim, é provável que a diferença na intensidade da velocidade na parte superior horizontal do recife, particularmente na proximidade do plano de simetria, observada comparando os resultados dos dois modelos, seja induzida por esta condição de fronteira.

O modelo COULWAVE prevê velocidades com intensidade superior às calculadas usando o modelo FLUENT. Estas diferenças podem estar ligadas às características próprios de cada modelo: o modelo COULWAVE, por exemplo, utiliza uma integração da velocidade na vertical a uma profundidade criteriosamente escolhida, o que pode induzir a estimativas erradas da velocidade, particularmente nas zonas de rebentação das ondas. A malha utilizada na presente simulação com o modelo FLUENT é demasiada grosseira na zona de rebentação da onda, o que pode introduzir erros significativos no campo de velocidades locais sobre o recife. No que diz respeito ao campo de velocidades perto da praia, observa-se uma boa concordância entre os dois modelos, comparando as Figuras 8 e 9.

A Figura 10 apresenta a velocidade média no plano vertical para $y=1.0\text{m}$ (ver Figura 8). A vantagem dos códigos baseados nas equações de Navier-Stokes, como o FLUENT, é possibilitar o cálculo do campo de velocidades em todo o domínio, tão na água como no ar. Isto é importante, pois a velocidade instantânea e/ou média pode variar em intensidade e direcção com a profundidade, induzindo escoamentos locais. No código COULWAVE, as equações são integradas na vertical e o modelo permite apenas conhecer a intensidade da velocidade e a sua direcção na superfície e na profundidade representativa. Com a determinação das componentes da velocidade nas três direcções em todo o domínio, a erosão em frente e atrás do recife e a estabilidade da estrutura podem estar previstas mais rigorosamente. No entanto, a malha, neste caso, deve ser adaptada para assegurar a qualidade dos resultados numéricos.

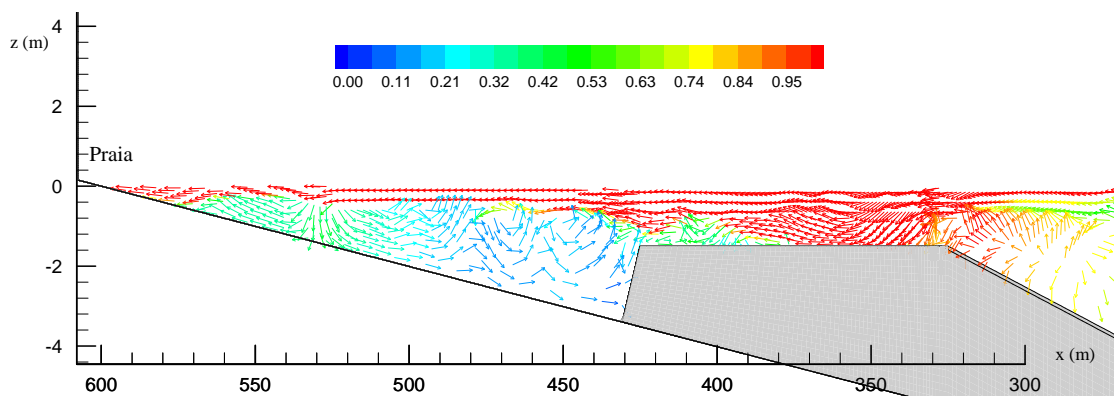


Figura 10. Velocidade no plano $y = 1.0\text{m}$ (deformação $\times 6$ na vertical), FLUENT.

5. CONCLUSÕES

Apresenta-se neste artigo o estudo das características hidrodinâmicas do escoamento junto a um recife multi-funcional, quer em perfil quer em 3D/2DH. Para tal foram utilizados três modelos numéricos.

O estudo em perfil (2D para o FLUENT e COBRAS-UC e 1DH para o COULWAVE), que teve como objectivo estudar as características da rebentação induzida pelo recife, foi realizado com recurso ao modelo COULWAVE (Lynett e Liu, 2002), baseado nas equações de Boussinesq, e a dois modelos baseados nas equações de Reynolds: o modelo comercial FLUENT (2005) e o modelo COBRAS-UC (Lara et al., 2006). Os modelos baseados nas equações RANS parecem ser os mais apropriados, já que permitem modelar intrinsecamente a rebentação. No entanto, uma aplicação mais correcta dos modelos consistiria em acoplar um modelo adaptado à propagação das ondas (como o modelo COULWAVE) na zona inicial do domínio e um modelo RANS (como os modelos COBRAS-UC e FLUENT), que permite modelar a rebentação mais correctamente, na zona próxima à estrutura. Este será o objectivo do trabalho futuro a desenvolver.

O estudo em 3D/2DH foi realizado com recurso ao modelo FLUENT e COULWAVE respectivamente, com o objectivo de estudar o campo de correntes induzido pelo recife e poder prever o comportamento do respectivo transporte de sedimentos. A investigação dos correntes em torno dum recife artificial multi-funcional foi realizada usando dois modelos numéricos: um modelo de tipo Boussinesq, COULWAVE, e um modelo RANS, FLUENT. COULWAVE apresenta-se como o modelo mais adaptado para este estudo pois o objectivo principal da análise do campo de velocidades é obter uma indicação do transporte de sedimentos. Particularmente, as vantagens deste modelo, quando comparado com o código FLUENT, residem principalmente no tempo de cálculo reduzido e na possibilidade de se usar uma malha mais grosseira do que é necessário num modelo RANS. No entanto, a concordância dos resultados do campo de velocidades médias entre os dois modelos, particularmente no que diz respeito à direcção da velocidade, reforça sem dúvida a credibilidade dos resultados do modelo COULWAVE, tal como do modelo FLUENT.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Investigação Interdisciplinar da Universidade de Coimbra, Portugal, o financiamento da Bolsa de Doutoramento da Eng. Mechteld ten Voorde.



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

BIBLIOGRAFIA

- AGNON, Y.; MADSEN, P. A.; AND SCHAFFER, H., 1999. A new approach to high order Boussinesq models. *J. Fluid Mech.* 399, 319-333.
- DIAS, J.M.A., 2003. Portugal e o Mar: Importância da Oceanografia para Portugal. E-book, in http://w3.ualg.pt/~jdias/JAD/e_b_PortMar.html.
- GOBBI, M. F.; KIRBY, J. T.; WEI, G., 2000. A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part II. Extension to $O(kh)^4$. *J. Fluid Mech.* 405, 182-210.
- GOMES, F.V.; PINTO, F.T. (2006). EUROSIAN Case Study, Vagueira – Mira (Portugal), Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos, FEUP, 18 páginas.
- HIRT, C.W. AND NICHOLS, B.D. (1981) "Volume of fluid VOF method for the dynamics of free boundaries", *J. Comp. Phys.*, Vol. 39, pp 201-225.
- KENNEDY, A.B., CHEN, Q., KIRBY, J.T. & DALRYMPLE, R.A., 2000. Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runup. Part I: 1D. *Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering*, 126(1), 39-47.
- LARA, J.L.; GARCIA, N. e I.J. LOSADA, "RANS modelling applied to random wave interaction with submerged porous structures", *Coastal Engineering*, Vol. 53, pp. 395-417(2006).
- LARSEN, J. e H. DANCY, Open boundaries in short wave simulations – a new approach". *Coastal Engineering*, 7, 285-297 (1983).
- LIU, P. L.-F., 1994. Model equations for wave propagation from deep to shallow water. In *Advances in Coastal Engineering* (ed. P. L.-F. Liu), vol. 1, pp.125-157. World Scientific.
- LOPES, A.M.; NUNES, M.; CARVALHO, T.; CARIDADE, P.; CARVALHO, J.C.; GRAÇA, T.P. (2003). O litoral da Região Centro de Portugal: Um caso preocupante de risco e de perda de território. Relatório CCDR-Centro, 49 páginas.
- LYNETT, P.; LIU, P. L.-F., 2002a. A Multi-Layer Approach to Water Wave Modeling. *Journal of Fluid Mechanics*.
- LYNETT, P.; LIU, P. L.-F., 2002b. Modeling Wave Generation, Evolution, and Interaction with Depth Integrated, Dispersive Wave Equations COULWAVE Code Manual, Cornell University Long and Intermediate Wave Modeling Package.
- MADSEN, P. A.; SORENSEN, O. R., 1992. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part II: A slowly varying bathymetry. *Coast. Engng.* 18, 183-204.
- MADSEN, P. A.; SCHAFFER, H. A., 1998. Higher order Boussinesq-type equations for surface gravity waves - Derivation and analysis. *Royal Society of London A* 356, 1-60.
- 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.
- PERIC, M. AND FERZIGER, J.H. (1997) "Computational Methods for Fluid Dynamics", Springer, Second edition.
- RHIE, C. M. AND CHOW, W. L. (1983) "Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation". *AIAA Journal*, Vol 21(11), pp 1525-1532.
- VANDOORMAAL, J. P. AND RAITHBY, G. D. (1984) "Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows". *Numer. Heat Transfer*, Vol 7, pp 147-163.
- WEI, G.; KIRBY, 1995. A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engng.* 120, 251-261.
- TEN VOORDE, M., ANTUNES DO CARMO, J.S., NEVES, M.G., 2006. Artificial surfing reefs: the preparation of physical tests and the theory behind, Coastlab06, Porto.



**5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007**

WEI, G.; KIRBY, J. T.; GRILLI, S. T.; SUBRAMANYA, R., 1995. A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part I. Highly nonlinear unsteady waves. J. Fluid Mech. 294, 71-92.