

Implementação de um critério RTFN no modelo Coulwave para a simulação da rebentação

Theo Moura¹, Conceição J. Fortes¹ Takashi Okamoto¹

(1) Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC
Av. do Brasil, 101, 1700 066 Lisboa, Tel. +351 21 844 3912, Fax. 351 21 844 3019
E mail: tmoura@Inec.pt, jfortes@Inec.pt, tokamoto@Inec.pt

Resumo: Nesta comunicação, descreve-se a implementação no modelo de Boussinesq COULWAVE de um novo modelo de rebentação baseado no conceito RTFN. É efectuada a validação do modelo no caso de propagação de ondas sobre uma rampa de inclinação 1:34.26, para o qual existem resultados experimentais. Este trabalho constitui uma das tarefas do projecto BRISA (Interacção entre a rebentação das ondas e o transporte de areias) que prevê o desenvolvimento de modelos de rebentação mais adequados à descrição da hidrodinâmica da rebentação.

Palavras-chave: Rebentação, Modelação numérica, Campanhas de campo, COULWAVE

1. INTRODUÇÃO

A determinação da rebentação é essencial em estudos de hidrodinâmica costeira e de transporte de sedimentos. Nesse sentido, o projecto BRISA (Interacção entre a rebentação das ondas e o transporte de areias) tem por objectivo contribuir para a compreensão e modelação numérica dos fenómenos de rebentação das ondas e do transporte de sedimentos em zonas costeiras, envolvendo a realização de ensaios experimentais, a modelação numérica e a realização de campanhas de recolha de dados de campo. Neste âmbito, uma das tarefas do projecto é o desenvolvimento de um modelo de rebentação mais adequado à descrição do fenómeno de rebentação e a sua implementação num modelo de propagação de ondas.

Para o modelo de ondas, foi escolhido o modelo numérico COULWAVE (Lynett e Liu, 2004), bastante utilizado em estudos de propagação, que é um modelo de diferenças finitas para a propagação de ondas fortemente não-lineares e dispersivas, em zonas de profundidade variável. Este modelo baseia-se nas equações do modelo, do tipo de Boussinesq, são deduzidas a partir da integração em profundidade das equações de continuidade e movimento, utilizando o conceito de camadas múltiplas (*multi-layer*).

Uma vez que a rebentação tem um comportamento físico diferente do movimento potencial de um fluido, é necessário um tratamento especial para reproduzir a rebentação neste tipo de modelos. Assim, a rebentação é tratada através da inclusão de termos de viscosidade turbulenta nas equações de conservação da quantidade de movimento, Kennedy et al. (2000). O modelo resultante depende de um conjunto de parâmetros relacionados com o início, fim e duração da rebentação. Estes parâmetros têm de ser calibrados para cada caso de estudo e condição de agitação, constituindo por isso uma

limitação do modelo numérico.

No sentido de resolver este problema, recorreu-se a um critério de rebentação desenvolvido por Utku e Basco (2002) baseado no cálculo do número de Froude associado à cava da onda (*Relative Trough Froude Number, RTFN*) que se relaciona com o conceito do ressalto hidráulico móvel. Este critério é função da celeridade da onda na crista e na cava bem como da velocidade da onda na cava., pelo que não depende de coeficientes empíricos que tem de ser calibrados caso a caso, para a simulação da rebentação.

Nesta comunicação, descreve-se a metodologia utilizada para implementar o critério RTFN no modelo COULWAVE de modo a melhorar o seu desempenho na simulação de rebentação. Para validar o modelo assim modificado, este é aplicado a três casos simples de propagação de ondas sobre uma rampa de inclinação 1:34.26, para o qual existem resultados experimentais de Hansen e Svendsen (1979). Efectua-se uma análise comparativa dos resultados numéricos e experimentais dos valores de altura de onda ao longo do canal. Efectua-se também a comparação entre o original implementado no COULWAVE e o novo modelo baseado no critério de RTFN.

2. O MODELO COULWAVE

2.1 Breve descrição

O modelo COULWAVE (Lynett e Liu, 2004) é um modelo de diferenças finitas para a propagação de ondas fortemente não-lineares (a razão entre a amplitude da onda e a profundidade pode ser da ordem até 1) e dispersivas, em zonas de profundidade variável. O modelo permite simular a maioria dos fenómenos intervenientes na transformação da onda em fundos de profundidade variável e na presença de correntes, empolamento (linear e não linear), difracção, refracção pelo fundo e devida às correntes. dispersão de frequência e de

amplitude, espriamento (*run-up*) e dissipação de energia por rebentação da onda.

As equações do modelo, do tipo de Boussinesq, são deduzidas a partir da integração em profundidade das equações de continuidade e movimento, utilizando o conceito de camadas múltiplas (*multi-layer*). Em cada camada admite-se um dado perfil de velocidades. Com estes perfis de velocidade que coincidem na fronteira entre camadas, é deduzida um conjunto de equações que permite estender a aplicabilidade do modelo a águas muito profundas e apresentar características lineares até $kh \sim 8$ e um comportamento não-linear de 2ª ordem até $kh \sim 6$.

Lynett e Liu (2004) introduziram termos adicionais nas equações de modo a ter em conta o atrito de fundo, a rebentação de ondas, o espriamento, a geração de ondas no interior do domínio. Além disso, incluíram termos de profundidade dependentes do tempo para ter em conta a variações do perfil de fundo no tempo devido à ocorrência de um deslizamento ou de um sismo.

A resolução das equações referidas é semelhante à formulação apresentada por Wei e Kirby (1995) utilizando um esquema predictor-corrector de Adams-Bashforth. O esquema de diferenças finitas consiste num esquema explícito de Adams-Bashforth de 3ª ordem no tempo para o passo predictor e implícito de 4ª ordem no tempo para o passo corrector. Para as derivadas espaciais são utilizadas diferenças finitas centrais com uma precisão de 4ª ordem. As derivadas espaciais e temporais de ordem superior são efectuadas com uma precisão de 2ª ordem. O modelo é formalmente preciso até Δt^4 em tempo e Δx^4 em espaço. A diferença relativamente a Wei e Kirby (1995) refere-se a alguns termos não-lineares dispersivos e à existência de termos adicionais, devidos à dependência temporal da profundidade.

Para as fronteiras exteriores, dois tipos de condições são aplicadas: reflexão total e radiação. No primeiro caso utiliza-se a metodologia de Wei e Kirby (1995) enquanto que para a radiação ou condição de fronteira aberta, um esquema de fronteira absorvente (*sponge layers*).

É de salientar que o modelo como admite aproximações para a distribuição vertical da velocidade em cada uma das camadas em que é dividida a coluna de água, variações significativas do fundo podem não ser correctamente simuladas pelo modelo.

Os dados de entrada do modelo COULWAVE encontram-se explicados em Lynett e Liu (2004) e alguns dos resultados fornecidos pelo modelo constam das séries temporais e espaciais da elevação da superfície livre e velocidades horizontais nos pontos do domínio definidos pelo utilizador.

2.1 Modelo original de rebentação no COULWAVE

A implementação da rebentação da onda no modelo

COULWAVE é baseada em Kennedy et al. (2000) e é tratada através da inclusão de termos de viscosidade turbulenta nas equações de conservação da quantidade de movimento, sendo R_{bx} e R_{by} as componentes em x e y do termo R_b , adicionado à equação de momentum:

$$R_{bx} = \frac{1}{h+\zeta} \left[\mathcal{G}((h+\zeta)u_1)_x + \frac{1}{2} \left(\mathcal{G}((h+\zeta)u_1)_y + ((h+\zeta)v_1)_x \right) \right] \quad (1)$$

$$R_{by} = \frac{1}{h+\zeta} \left[\frac{1}{2} \left(\mathcal{G}((h+\zeta)v_1)_x + ((h+\zeta)u_1)_y \right) + \mathcal{G}((h+\zeta)v_1)_y \right] \quad (2)$$

em que ζ é a elevação da superfície livre, h é a profundidade, u_1 e v_1 são as componentes do vector de velocidade horizontal à profundidade definida em cada camada, os índices x e y representam derivadas espaciais e \mathcal{G} é o coeficiente de viscosidade turbulenta, localizado na face frontal da onda. Este coeficiente é definido por:

$$\mathcal{G} = B(h+\zeta)\zeta_t \quad (3)$$

A quantidade B que controla a ocorrência de dissipação de energia e garante uma suave transição entre a rebentação e a zona de não rebentação, é dada por:

$$B = \begin{cases} \delta & \zeta_t \geq 2\zeta_t^b \\ \delta(\zeta_t/\zeta_t^b - 1), & \zeta_t^b \leq \zeta_t \leq 2\zeta_t^b \\ 0, & \zeta_t \leq \zeta_t^b \end{cases} \quad (4)$$

onde δ é um factor amplificador e o parâmetro ζ_t^b

determina o início e fim da rebentação da onda. ζ_t^b

é determinado do seguinte modo:

$$\zeta_t^b = \begin{cases} \zeta_t^{(F)} & t - t_0 \geq T^b \\ \zeta_t^{(I)} + \frac{t - t_0}{T^b} (\zeta_t^{(F)} - \zeta_t^{(I)}), & 0 \leq t - t_0 \leq T^b \end{cases} \quad (5)$$

em que $\zeta_t^{(I)}$ define o início da rebentação, i.e., é o patamar inicial da elevação da superfície livre que tem de ser excedido para a rebentação acontecer, $\zeta_t^{(F)}$ define o fim de rebentação, i.e., é o mínimo

valor da elevação da superfície livre para a rebentação continuar, t é o instante local, t_0 é o instante de tempo em que a rebentação da onda ocorre, $t-t_0$ é a idade do evento de rebentação e T^b é o tempo de transição, ou seja, o instante em que se considera que a rebentação cessa. O início e fim da rebentação da onda são determinados utilizando os parâmetros $\zeta_t^{(I)}$ e $\zeta_t^{(F)}$ e do tempo de transição T^b .

dados por $0.65\sqrt{gH}$ e $0.08\sqrt{gH}$. O valor de T^b é dado por $8\sqrt{h/g}$. O valor adoptado para δ é 6.5.

Estes parâmetros foram definidos com base em testes sobre fundos de inclinação suave. Noutras situações cujos perfis se afastem desta situação ideal, haverá que proceder ao ajuste do valor destes parâmetros, o que é uma das limitações deste modelo numérico.

2.3 O critério RTFN

A ideia fundamental do RTFN (*Relative Trough Froude Number*) é considerar a rebentação como um ressalto hidráulico móvel, Okamoto e Basco (2006). Trata-se de um critério de rebentação para o qual é necessário a determinação da celeridade da onda (na crista e cava) e a velocidade da onda na cava, de acordo com:

$$RTFN = Fr_t = \frac{C_{crista} - u_{cava}}{C_{cava}} \quad (6)$$

onde u é a velocidade das partículas e subscrito denota o sitio onde é determinada essa velocidade (cava ou da crista). Esta equação não é suficiente para obter uma expressão analítica do RTFN, pelo que se tem de recorrer a uma teoria de onda.

Basco e Okamoto (2002) derivaram uma expressão para o RTFN usando a teoria da onda (linear, de onda de Stokes de 2ª ordem e de onda solitária) e definiram o valor crítico no início da rebentação. Utku e Basco (2002) efectuaram um conjunto de ensaios experimentais e confirmaram que a condição crítica do RTFN no início da rebentação é consistente para várias condições de onda incidente. Okamoto (2003) determinaram o valor crítico do RTFN no fim da rebentação com base numa análise teórica (teoria linear e da onda solitária) e de ensaios experimentais num fundo horizontal. Com o referido, para determinar a condição crítica na posição do fim da rebentação é necessário definir uma condição geométrica. Assim, a altura de onda no fim da rebentação deve ser próxima à condição de onda estável pelo que foi usado $H/d=0.35-0.4$. Como resultado, a condição crítica de RTFN no fim da rebentação vem $RTFN=1.18-1.20$.

Okamoto et al. (2006) também determinaram o comportamento do índice RTFN durante a rebentação das ondas num fundo horizontal e compararam este índice com outros índices semelhantes, como o da altura de onda relativa, H/d , o do ângulo livre de superfície e da velocidade vertical da superfície livre. Tal revelou que o RTFN se aproxima de modo mais suave da condição de fim do que os outros índices. Na verdade, os outros índices de rebentação baseados na geometria da onda tornam-se praticamente iguais ao valor final numa posição muito afastada do fim da rebentação.

Okamoto et al. (2008) estenderam esse trabalho num perfil de fundo tipo barra-fossa com medição da elevação da superfície livre e de velocidades após a ocorrência da rebentação e até ao seu final. Para além dos valores do RTFN no início, durante e fim da rebentação, efectuou-se também uma análise da influência do declive de fundo e características da onda nos valores de RTFN. Verificou-se que o RTFN é muito próximo do valor teórico no fim da rebentação, embora esse valor cresça à medida que o declive é maior.

2.3 Implementação no modelo COULWAVE

A implementação no modelo unidimensional COULWAVE seguiu o procedimento efectuado por

Okamoto (2003), para ondas regulares. As fases foram:

1. Determinação da localização da cava e da crista, com recurso a uma janela de comprimento fixo que se movimenta ao longo do domínio computacional;
2. Cálculo das características da onda (velocidade da partícula, celeridade da onda na cava e na crista), com base nas variáveis do modelo;
3. Cálculo do valor de RTFN através da Eq. 6;
4. Comparação do valor de RTFN com a condição crítica definida *a priori*. Caso o RTFN exceda a condição de viscosidade, o termo de viscosidade turbulenta devido à rebentação é adicionado à equação de Boussinesq.

Note-se que neste trabalho, a teoria RTFN funciona apenas como um critério de rebentação. Não inclui nenhuma teoria para a dissipação de energia da onda durante a rebentação. Em resumo, o RTFN permite determinar se a onda vai, está ou parou de rebentar mas não calcula as alterações da forma da mesma. Sendo assim, o termo de viscosidade turbulenta já implementado no modelo COULWAVE é adicionado a todos os nós desde a crista até à cava.

3. APLICAÇÃO DO MODELO

O modelo COULWAVE, com o novo critério de rebentação, foi aplicado a três casos simples de propagação de ondas regulares sobre um perfil de praia de inclinação constante, para o qual existem resultados experimentais levados a cabo por Hansen e Svendsen (1979). Os casos de teste escolhidos foram nº 041041, nº 041041, nº 051041 e nº 061041, onde as características iniciais das ondas estão na tabela 1.

Testes	Altura da onda (m)	Período (s)
041041	0.036	2.0
051041	0.067	1.67
061041	0.036	2.5

Tabela 1 – Característica dos experimentos.

Para estes casos, o domínio computacional usado pelo modelo COULWAVE é unidimensional de comprimento 44.66 m, sendo 20 m de profundidade constante ao que se segue uma rampa de inclinação 1:34.26. O teste nº 041041 é utilizado para validar o método tradicional de rebentação do COULWAVE. Com o objectivo de obter uma comparação, não apenas com os resultados dos ensaios em modelo físico, mas também com os resultados obtidos da simulação de validação do modelo COULWAVE, foram mantidas as mesmas características propostas naquele teste.

O modelo gera uma malha de diferenças finitas com base num número mínimo de pontos por comprimento de onda dado pelo utilizador, que neste caso, foi de 200. O número de Courant admitido foi igual a 0.4. A função fonte (geração de ondas) foi colocada na posição $x=10$ m. Consideraram-se duas fronteiras de absorção nos

extremos do domínio, com 1.25 vezes o comprimento de onda. Em todas as simulações considerou-se apenas uma camada, as equações totalmente não-lineares e atrito de fundo (coeficiente de atrito= 5.0×10^{-3}). Nos restantes parâmetros do modelo, consideraram-se os valores sugeridos pelo manual (Lynett e Liu, 2004).

Na Figura 1 apresentam-se os resultados numéricos e experimentais obtidos para a altura de onda significativa sobre a rampa, com o modelo de rebentação original e com o modelo RTFN, para o teste n. 041041.

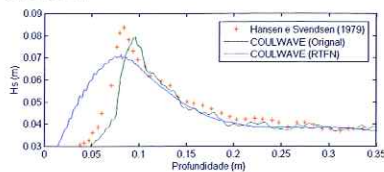


Figura 1 – Valores numéricos e experimentais da altura de onda significativa para o teste n. 041041.

Para os três testes, os resultados numéricos foram similares, sendo possível identificar o empolamento da onda devido à diminuição da profundidade e a posterior rebentação da onda em baixas profundidades. Após dar-se início à rebentação, a altura da onda diminui devido à dissipação de energia resultante do fenómeno turbulento da rebentação. Em geral, os resultados numéricos obtidos com o novo critério de rebentação acompanham bem os resultados experimentais até ao início da rebentação. De notar que a profundidade onde ocorre a rebentação da onda no modelo RTFN, é mais próxima à obtida nos resultados experimentais do que a que acontecia com os resultados do modelo originais de rebentação. No entanto existem algumas diferenças após a rebentação. Uma delas é a amplitude da onda no momento da rebentação, para o caso do modelo RTFN: a altura da onda no ponto de rebentação é menor quando comparada tanto com os dados experimentais como com os simulados através do modelo de rebentação original. Tal pode estar associado ao termo da viscosidade turbulenta (que representa a dissipação de energia pela rebentação da onda) e, mais concretamente, ao parâmetro B (equações 3 e 4) responsável pela transição entre a região sem e com rebentação. No estudo aqui apresentado, o parâmetro B não foi considerado no modelo RTFN e esse pode ser um motivo para ocorrer uma dissipação muito forte de energia logo ao início da arrebatção. Outra diferença está no decaimento da altura da onda após o início da rebentação. Pode-se observar que o decaimento ocorre de forma mais lenta para o caso do modelo RTFN. Esse padrão pode estar relacionado com o facto da ausência do parâmetro B , mas também pela forma como são definidos os pontos da malha computacional onde serão aplicados o termo da viscosidade turbulenta.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, descreveu-se a implementação no modelo COULWAVE de um modelo de rebentação baseado no conceito RTFN. Efectuou-se a validação do modelo com três casos de teste simples de propagação de onda sobre uma rampa de inclinação 1:34.26, para a qual existem resultados experimentais de Hansen e Svendsen (1979).

A comparação de resultados numéricos e medições mostrou que o novo modelo de rebentação tem potencialidades mas a sua afinização requer ainda estudos complementares.

Agradecimentos

Os autores agradecem o financiamento da FCT através de projecto PTDC/ECM/67411/2006.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Basco, D. R., Okamoto, T. (2002). New Wave Breaking Trigger Criteria for Phase-Resolving Numerical Models. Proceedings of 28th ICCE (Wales) ASCE, pp. 319-331.
- Hansen, J.B., Svendsen, I.A. (1979). Regular waves in shoaling water: experimental data, Technical Report, ISVA, Series paper 21.
- Kennedy, A.B., Q. Chen, J.T. Kirby, and 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.
- Lynett, 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.
- 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., Basco, D.R., Fortes, C.J.E.M. (2006). The Relative Trough Froude Number for Termination of Wave Breaking. Proc. of 30th ICCE (San Diego), ASCE, 180-192.
- Okamoto, T., Basco, D.R., Fortes, C.J.E.M. (2008). Wave breaking Termination on Bar-trough shaped beaches. ISOPE 2008.
- Utku, M., Basco, D.R. (2002). A New Criteria for Wave Breaking Based on the Relative Trough Froude Number. Proc. of 28th ICCE, (Wales), ASCE, New York, 258-268.
- Wei, G., Kirby, J.T. (1995). Time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations. J. Waterways, Ports, Coastal and Ocean Eng., ASCE, pp. 251-261.