

Empolamento, rebentação e dissipação das ondas junto à costa

D.P. Santos (1), T. Abreu (2), P. A. Silva (1) e F. Sancho (3)

- (1) Universidade de Aveiro & CESAM, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro. dani.santos@ua.pt; psilva@ua.pt.
 (2) Instituto Politécnico de Viseu & CESAM, ESTGV Campus de Repeses, 3504-510 Viseu, tabreu@estv.ipv.pt.
 (3) Laboratório Nacional de Engenharia Civil - DHA, Av. do Brasil, 101. 1700-066 Lisboa, fsancho@lnec.pt.

Resumo: A propagação das ondas junto à costa envolve processos como, por exemplo, o empolamento, rebentação e dissipação das ondas. A partir da teoria linear, podem-se estabelecer equações que descrevem o empolamento da onda através das características da onda ao largo (altura e período). Recentemente foram propostas expressões que têm em consideração a amplitude finita da onda. Adicionalmente, o processo de rebentação da onda ocorre quando esta se torna instável, o que depende da profundidade e do declive de fundo, e contribui de forma significativa para a dissipação da energia da onda. Este trabalho pretende testar a validade de algumas equações encontradas na literatura para o coeficiente de empolamento, rebentação e a dissipação da onda mediante a comparação com um conjunto de dados experimentais obtidos num canal de ondas.

Palavras chave: Ondulação, rebentação, dissipação

1. INTRODUÇÃO

A propagação das ondas junto à costa envolve processos como o empolamento, rebentação e dissipação das ondas. Com o objetivo de desenvolver um modelo de propagação de ondas para o estudo da evolução da morfologia da praia são estudadas diferentes aproximações para descrever os processos acima referidos.

Com base na conservação do fluxo de energia das ondas e na teoria linear podem estabelecer-se equações que descrevem o empolamento da onda a partir das características da onda ao largo (altura, período e direção). Nielsen (2009) generalizou as equações anteriores e propôs expressões tendo em consideração a amplitude finita da onda.

Adicionalmente, à medida que a profundidade diminui e a declividade da onda aumenta, as ondas tornam-se instáveis e rebentam, havendo dissipação da energia. O início do processo e tipo de rebentação da onda são geralmente determinados em função da profundidade local e do declive de fundo. As equações com base na conservação do fluxo de energia conduzem a um aumento não realista da amplitude da onda pelo que devem considerar o processo de dissipação. Para descrever a dissipação da onda na zona de surf são encontradas na literatura diferentes formulações (p.ex., Baldock *et al.*, 1998). No presente trabalho é testada a validade de expressões para o coeficiente de empolamento, rebentação e dissipação da onda mediante a comparação com resultados experimentais. O conjunto de dados experimentais considerado foi obtido por Sancho *et al.* (2001) no canal de ondas da

Universidade Politécnica da Catalunha (UPC) com um perfil de praia com barra construído sobre um fundo rígido.

2. METODOLOGIA

A partir do princípio de conservação do fluxo de energia das ondas e assumindo contornos batimétricos paralelos entre si e à costa, pode-se determinar expressões analíticas simples que permitem estimar a altura da onda num dado ponto junto à costa a partir do conhecimento da altura da onda ao largo. No presente caso, em que as ondas se propagam num canal, intervêm nessas equações apenas o coeficiente de empolamento, K_s :

$$\frac{H}{H_0} = K_s = \sqrt{\frac{c_{g0}}{c_g}} \quad (1)$$

em que H é a altura da onda, c_g a velocidade de grupo e o índice 0 representa os valores de H e de

c_g ao largo. Os valores da velocidade de grupo ao longo do canal foram determinados pela teoria linear de ondas a partir dos valores do período da onda (T)

e do seu comprimento de onda ao largo, λ_0 .

Nielsen (2009), estabeleceu a seguinte equação que representa uma boa aproximação ao coeficiente de empolamento determinado pela teoria linear das ondas:

$$\frac{H}{H_0} = K_s = \frac{1}{\sqrt{4k_0 h}} \left(1 + \frac{1}{4} k_0 h + \frac{13}{228} (k_0 h)^2 \right) \quad (2)$$

onde k_0 é o número de onda ao largo e h a profundidade.

A equação (2) apresenta um erro de 1% em relação à equação (1) desde que se verifique a condição

$$k_0 h < 1.34.$$

Nielsen (2009) propôs uma outra equação onde se adiciona um fator de correção empírico que tem em consideração os efeitos resultantes da altura da onda finita:

$$\frac{H}{H_0} - K_s - \frac{1}{\sqrt[4]{4k_0 h}} \left(1 + \frac{1}{4} k_0 h + \frac{13}{228} (k_0 h)^2 \right) \left(1 + \frac{3}{8} \left(\frac{H}{\lambda_0} \right)^{1.5} (k_0 h)^{-2} \right) \quad (3)$$

Para cada condição foi calculado o empolamento com estas três equações. Note-se que durante o cálculo do empolamento foi considerada a equação

(1) quando verificada a condição $k_0 h < 1.34$;

quando $k_0 h \geq 1.34$ o cálculo foi feito pela equação (1). Note-se que no cálculo das equações (2) e (3), os valores de entrada são relativos à aproximação de ondas em águas profundas, pelo que teve de ser calculada a altura da onda em águas profundas, $H_{rms,0}$ (ver **Error! Reference source not found.**).

Para determinar o local de rebentação da onda utilizou-se a seguinte equação que traduz a altura de rebentação estabelecida por Battjes and Janssen (1978)

$$H_b = \frac{0.88}{k} \tanh \left(\frac{\gamma}{0.88} kh \right) \quad (4)$$

onde γ é um parâmetro de calibração da altura de rebentação e k o número de onda. De acordo com Ruessink *et al.* (2003) este parâmetro segue a seguinte expressão

$$\gamma = 0.76kh + 0.29 \quad (5)$$

Assim, após o cálculo do empolamento, determinou-se o local de rebentação através da intersecção de

H_b determinado por (4) com a altura da onda calculada pela equação (3). Os valores obtidos por este procedimento foram comparados com os observados no ensaio.

Para calcular a dissipação da onda (D) após a rebentação foram usados dois métodos, ambos propostos por Baldock *et al.* (1998). No primeiro, os valores de D foram estimados a partir da resolução numérica da seguinte equação com diferenças finitas:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2 c_g \cos \bar{\theta} \right) = -D \quad (6)$$

em que x é a posição ao longo do perfil de fundo, ρ é a densidade da água, g é a aceleração da gravidade

(θ) representa o ângulo de incidência da onda que neste caso é nulo.

O segundo calcula a dissipação utilizando a altura de rebentação (equação (4)) e a altura da onda (Baldock *et al.*, 1998):

$$D = \frac{\alpha}{4} \frac{1}{T} \rho g e \left[- \left(\frac{H_b}{H_{rms}} \right)^2 \right] (H_b^2 + H_{rms}^2) \quad (8)$$

Esta expressão contém um parâmetro α que é da ordem de 1. Os valores determinados pela equação (7) são posteriormente comparados com os obtidos através das medições de H_{rms} pela equação (6) de forma a verificar a validade daquela formulação para o presente conjunto de dados.

O conjunto de dados experimental concerne ondas regulares (condição A, B e C) e irregulares (condição D). As experiências contemplaram medições da elevação da superfície livre e da velocidade do escoamento. Através da análise de imagens de vídeo foram também estimados o tipo e o local de rebentação das ondas. A Tabela 1 resume as características das ondas ao largo. Na Tabela, H_{rms} representa o valor médio quadrático da altura das ondas medida junto ao batedor no canal de ondas, $H_{rms,0}$ a altura equivalente mas em águas profundas que é determinada a partir da teoria linear e T representa o período das ondas.

Tabela I – Características das ondas consideradas nos ensaios experimentais.

Condição	Período, T (s)	Altura da onda, H_{rms} (m)	Altura da onda em águas profundas, $H_{rms,0}$ (m)
A	2.48	0.218	0.235
B	3.48	0.224	0.236
C	3.48	0.411	0.432
D	2.17	0.208	0.223

3. RESULTADOS

3.1. Empolamento

As estimativas da altura da onda para a zona de empolamento apresentam-se nas Figuras 1 e 2 para as condições C e D, concernentes a ondas regulares e irregulares, respetivamente.

A estimativa do empolamento até à zona de rebentação foi quantificada por um parâmetro de aptidão, Skill (S) – equação **Error! Reference source not found.**, que consiste na quantificação do erro através da razão entre o desvio padrão da média entre os valores calculados com os valores experimentais, H_{rms} :

$$S = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (\xi_{calc,k} - \xi_{obs,k})^2}{\sum_{k=1}^N (\xi_{obs,k})^2}} \quad (7)$$

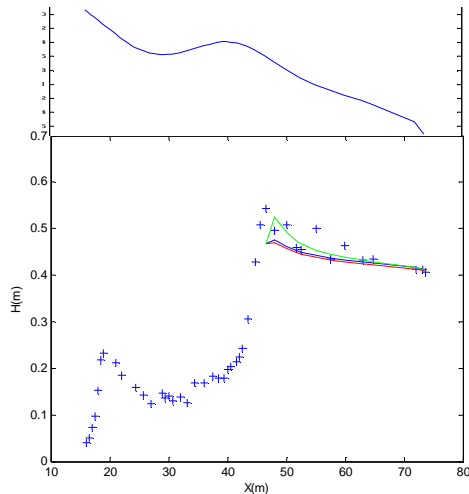


Figura 1 – Perfil de fundo. Condição C – estimativa do empolamento. Linha azul – equação (1); linha vermelha – equação (2); linha verde – equação (3). Símbolo – H_{rms} .

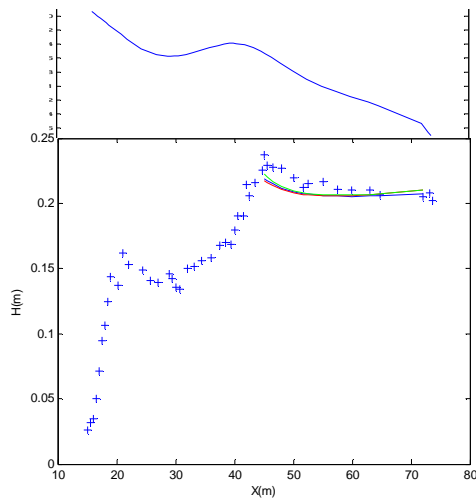


Figura 2 – Perfil de fundo. Condição D – estimativa do empolamento. Linha azul – equação (1); linha vermelha – equação (2); linha verde – equação (3). Símbolo – H_{rms} .

Quando $S=1$, há concordância entre os dados calculados e os experimentais. Se $S=0$, o erro é tão grande como a raiz quadrada média dos valores obtidos. O valor da aptidão foi calculado para cada condição e para as três equações, listando-se os resultados na

Tabela II. Nota-se que a equação (3) conduziu aos melhores resultados no caso de ondas regulares (condições A, B e C). No caso de ondas irregulares, a equação (1) é a que apresenta o melhor acordo. Repare-se que se não inclui o termo corretivo da equação (3) sugerido por Nielsen (2009), a equação (2) conduz a resultados piores comparativamente aos da equação (1).

Tabela II – Valor da aptidão S para cada condição e equação

	A	B	C	D
Eq. (1)	0.87	0.87	0.89	0.89
Eq. (2)	0.93	0.91	0.93	0.95
Eq. (3)	0.95	0.95	0.94	0.96

3.2. Rebentação

A determinação do local de rebentação foi feita pela intersecção da altura da onda com a altura de rebentação estimada a partir da equação (4). A Figura 3 representa os valores de H e de H_b para a condição C. No ponto do gráfico onde se verifica a condição $H_b < H$, assume-se que ocorre a rebentação da onda.

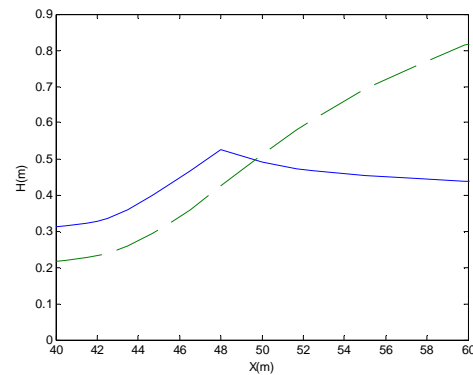


Figura 3 – Condição C – local de rebentação, intersecção entre a altura da onda, H (traço contínuo) e a altura de rebentação, H_b (traço tracejado).

Segundo as observações das imagens do vídeo sobre o local de rebentação das ondas, estas rebentam em $x=40.5m$; $x=42m$; $x=46.5m$; $x=45m$, para as condições A, B, C e D, respetivamente. O ponto do gráfico onde se verifica a condição $H_b < H$, ocorre para $x=41.5m$; $x=43.5m$; $x=48m$ nas condições A, B e C, respetivamente, diferindo em relação aos observados cerca de 1 a 1,5m. Para a condição D, não foi possível determinar o local de rebentação, pois as duas curvas não se intersectaram.

3.3. Dissipação

As Figuras 4 e 5 representam as distribuições espaciais do fluxo de energia da onda e da dissipação após o ponto de rebentação observado pelas imagens de vídeo para as condições C e D.

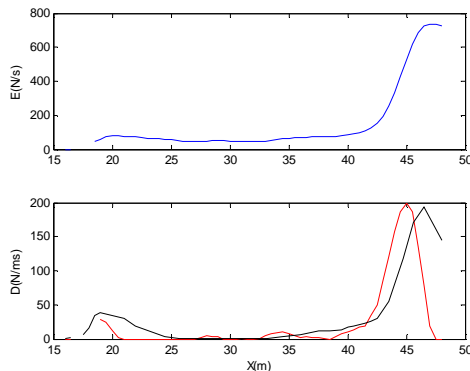


Figura 6 – Condição C – Fluxo de energia da onda. Dissipação. Linha vermelha – equação (6); linha preta – equação (8).

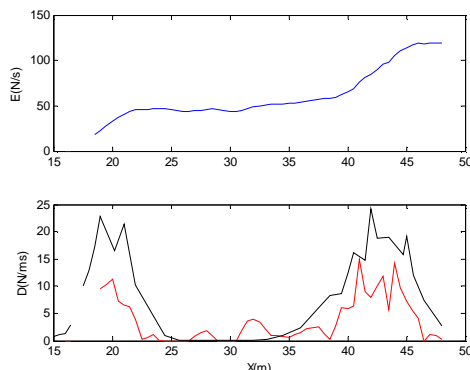


Figura 5 – Condição D – Fluxo de energia da onda. Dissipação. Linha vermelha – equação (6); linha preta – equação (8).

O fluxo de energia, calculado pela equação (6) foi filtrado, de modo a alisar pequenas oscilações, com uma média corrida de 5 pontos. No gráfico da dissipação estão representadas as diferenças do fluxo de energia representado no gráfico acima, e a dissipação calculada pela equação (7). Observa-se um ajuste razoável entre as equações (6) e (7) no que respeita à variação espacial da dissipação de energia e à sua magnitude. Assinala-se contudo que na condição D, a equação (7) sobrestima os valores da dissipação por um fator de 2. Um melhor ajuste poderia ser obtido pela consideração de um valor do parâmetro α diferente da unidade.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho é testada a validade de um conjunto de expressões concernentes ao coeficiente de empolamento, rebentação e dissipação da onda. Os resultados foram validados com um conjunto de dados provenientes de um trabalho experimental efetuado no canal de ondas da Universidade Politécnica da Catalunha para um perfil de praia do tipo barra-fossa.

A acuidade das estimativas do coeficiente de empolamento foi quantificada através de um parâmetro de aptidão (*Skill*) que permitiu avaliar a performance de três formulações. O conjunto de resultados sugere que da equação (3) resulta a melhor concordância entre os resultados experimentais e calculados, pois é a equação que, na generalidade, toma valores da aptidão mais elevados (excetua-se a condição D).

Relativamente ao local de rebentação, comparando as observações das imagens do vídeo com as verificadas no campo, não se verificou uma razão aparente para a divergência. Salvo o erro de medição, o erro foi possívelmente devido a uma diferença de fase.

De acordo com os gráficos obtidos para a dissipação de energia há concordância entre o fluxo de energia da onda e a dissipação calculada pelas equações (6) e (7). A relação entre as equações (6) e (7) é muito semelhante quer para ondas regulares quer para ondas irregulares. Assim, a equação (7) sobrestima os valores da dissipação por um fator de 2. Um melhor ajuste poderia ser obtido pela consideração de um valor do parâmetro α diferente da unidade.

Agradecimentos

Este trabalho foi elaborado no âmbito do projeto PTDC/CTE-GIX/111230/2009 (EROS) financiado pela Fundação para Ciência e a Tecnologia (FCT).

REFERÊNCIAS

- Baldock, T.E., Holmes, P., Bunker, S., Van Weert, P. (1998). Cross-shore hydrodynamics within an unsaturated surf zone. *Coastal Engineering*, 34, 173-196.
- Battjes, J.A., Janssen, J.P F.M. (1978). Energy loss and set-up due to breaking random waves. *Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engng.*, ASCE, Hamburg, 1, 466-480.
- Nielsen, P. (2009). *Coastal and Estuarine Processes*. Advanced Series on Ocean Engineering, 29. World Scientific, 360 pp..
- Ruessink, B.G., Walstra D.J.R., Southgate, H.N. (2003). Calibration and verification of a

parametric wave model on barred beaches.
Coastal Engineering, 3, 139-149.

Sancho, F.E, Mendes, P.A., Carmo, J.A, Neves, M.G., Tomasicchio, G.R., Archetti, R., Damiani, L., Mossa, M., Rinaldi, A., Gironella, X. Sanchez-Arcilla, A. (2001). Wave hydrodynamics over a barred beach. *Proc. 4th Int. Symp. on Ocean Wave Measurement and Analysis - Waves 2001*, S. Francisco, ASCE, 1170-1179.