

Modelação física da propagação e rebentação de ondas num canal

Diogo R. C. B. NEVES

Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351.218443446, dneves@lnec.pt

Conceição J. E. M. FORTES

Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351.218443451, jfortes@lnec.pt

Luiz A. M. ENDRES

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

Takashi OKAMOTO

Eng. Civil, Universidade de Hiroshima, 1-5-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8529, Japão, tokamoto@hiroshima-u.ac.jp

RESUMO

Nesta comunicação, é descrito o vasto conjunto de ensaios em canal de ondas realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) cujo objectivo foi a análise da hidrodinâmica da rebentação de onda, para várias condições de agitação incidente. Nesse sentido, apresentam-se as condições experimentais, os equipamentos de medição, as condições de teste, as medições (elevação da superfície livre e velocidades) efectuadas, os dados obtidos e as observações efectuadas para a definição da zona de rebentação. Descrevem-se, também, as análises temporais, espectrais e estatísticas efectuadas com os dados recolhidos e as metodologias utilizadas para a determinação de parâmetros como a altura de onda relativa (H/d), a celeridade da onda, a distribuição bidimensional das componentes da velocidade das partículas segundo os planos xy , xz e yz , a direcção da onda e os valores de dispersão.

Palavras-chave – Rebentação de onda, Modelação física, Canal de ondas, Propagação de onda.

1 INTRODUÇÃO

A determinação da zona de rebentação de onda é um ponto importante para estudos de hidrodinâmica costeira e de transporte de sedimentos. Mais concretamente, a localização e extensão da rebentação são dois dos factores principais para esses estudos uma vez que determinam a localização e estabilidade das estruturas marítimas e o transporte de sedimentos associado.

O processo físico associado à rebentação da onda é bastante diferente do normal fluxo potencial do movimento regular de uma onda. De facto, a rebentação da onda por variação do fundo ocorre numa zona bastante próxima da costa e persiste até à dissipação quase completa de toda a sua energia na linha de costa. Existem vários estudos de análise do processo inicial de rebentação (Goda, 1970; Weggel, 1972; Tsai et al., 2004; Camenen e Larson, 2007) mas o processo após o início desta bem como a sua conclusão total, é ainda objecto de uma discussão alargada no meio científico (Svendsen et al., 1978; Tsai et al., 2004). Os índices tradicionais de rebentação da onda são direccionados normalmente para o local de início da rebentação, deixando a caracterização do que se passa no fim da rebentação para um segundo plano. Mas este aspecto é especialmente importante para os estudos base de projectos de estruturas marítimas e de dinâmica costeira, como referido.

Neste sentido, a modelação física da propagação e rebentação de ondas em fundos de profundidade variável pode contribuir para um melhor conhecimento e caracterização da zona de rebentação, especialmente do seu final. É com este objectivo que foi realizado um extenso conjunto de ensaios em canal de ondas para a análise da hidrodinâmica da rebentação da onda, para várias condições de agitação incidente.

Os ensaios foram realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), num canal de ondas de comprimento total de 32 m. O perfil de fundo do canal consistiu essencialmente de duas rampas seguidas com inclinação de 1:20 e 1:80. Foram realizados ensaios para as condições de agitação regular correspondentes à combinação de períodos de onda de 1.1, 1.5, 2.0 e 2.5 s e alturas de onda de 12, 14, 16 e 18 cm. Para cada condição de agitação incidente, foram recolhidos, ao longo do comprimento do canal, valores de elevações da superfície livre e da velocidade das partículas. Foram também medidos em locais seleccionados do canal, perfis de velocidade das partículas.

Este trabalho apresenta uma descrição detalhada das condições experimentais, dos métodos e procedimentos utilizados e das características das ondas testadas no canal de ondas. Além da descrição do trabalho efectuado (secção 2), são aqui apresentados exemplos dos dados relativos à elevação da superfície livre e velocidade das partículas bem como resultados da análise temporal, espectral e estatística efectuada com os dados recolhidos. No final da secção dos resultados é apresentada uma análise mais profunda dos dados na qual foram calculados alguns parâmetros como: (i) o local de início e final da rebentação das ondas; (ii) a altura de onda relativa (H/d); (iii) a celeridade das ondas; (iv) a distribuição bidimensional das componentes da velocidade das partículas segundo os planos xy , xz e yz ; (v) e a direcção da onda e os valores do ângulo de dispersão. São também apresentados os perfis das velocidades das ondas em locais seleccionados do canal (secção 3). No final (secção 4) são retiradas conclusões sobre os resultados obtidos nos testes experimentais.

O ponto de destaque neste trabalho consiste na análise direccional (com base nos valores de velocidade e elevações da superfície livre), que à partida não faria sentido num canal de ondas. No entanto, possivelmente devido à turbulência gerada no processo de rebentação da onda, verifica-se a existência de dispersão direccional da onda na sua propagação ao longo do canal. Desta forma, a análise direccional dos dados obtidos nestes ensaios podem constituir uma base de trabalho que permita uma quantificação dos efeitos da turbulência associados à rebentação da onda.

2 CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

Os testes experimentais foram realizados num canal de ondas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). O canal de ondas apresenta um comprimento total de 32.4 m desde o batedor até ao final do canal. Foi construído o fundo representativo de uma praia (Figura 1) com diferentes declives de fundo. O declive da primeira rampa da praia, com 10 m de comprimento, foi definido com um ângulo de 1:20 e a segunda rampa com um declive muito menos acentuado, de 1:80. Foi definida uma profundidade de 10 cm de coluna de água no topo da primeira rampa. A Figura 1 mostra o perfil longitudinal do canal ao longo de todo o seu comprimento.

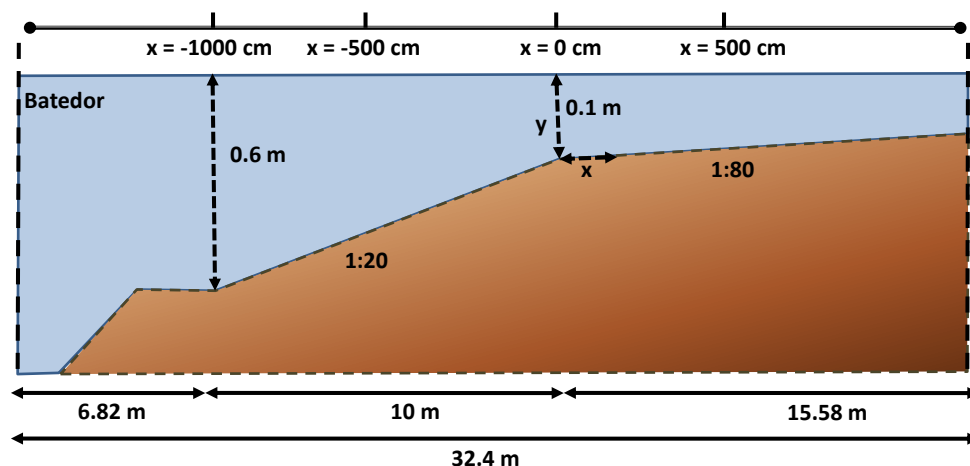


Figura 1 – Perfil do canal de ondas e posições segundo o eixo (x) longitudinal do canal.

A instalação experimental (Figura 2) consistiu essencialmente no canal de ondas e numa central de controlo. No canal, foram instalados os equipamentos de medição (sondas resistivas e um medidor acústico de velocidade), a placa da *National Instruments* que permite o envio do sinal para a geração de ondas no batedor de pistão e um computador CPU2 para a aquisição dos dados provenientes do medidor acústico de velocidade ADV.

Na central de controlo foi instalado o computador CPU1 para geração do sinal da onda incidente e para aquisição de dados das sondas resistivas, e os dispositivos intermédios como o “*Wave Probe Monitor*” e a placa de aquisição de dados da *National Instruments*.

A ligação entre o computador CPU1 e o batedor foi realizada através de uma placa de aquisição da “*National Instruments*” e, o software que permitiu a geração das ondas através do CPU1 foi o “*Signal Express*” (*National Instruments*).

Para a aquisição dos dados relativos às medições, o sinal dos sensores passou através do “*Wave Probe Monitor*” que converteu o sinal analógico em formato digital de forma a ser armazenado no computador CPU1. O computador CPU2 foi responsável apenas pela ligação e configuração do sensor ADV.

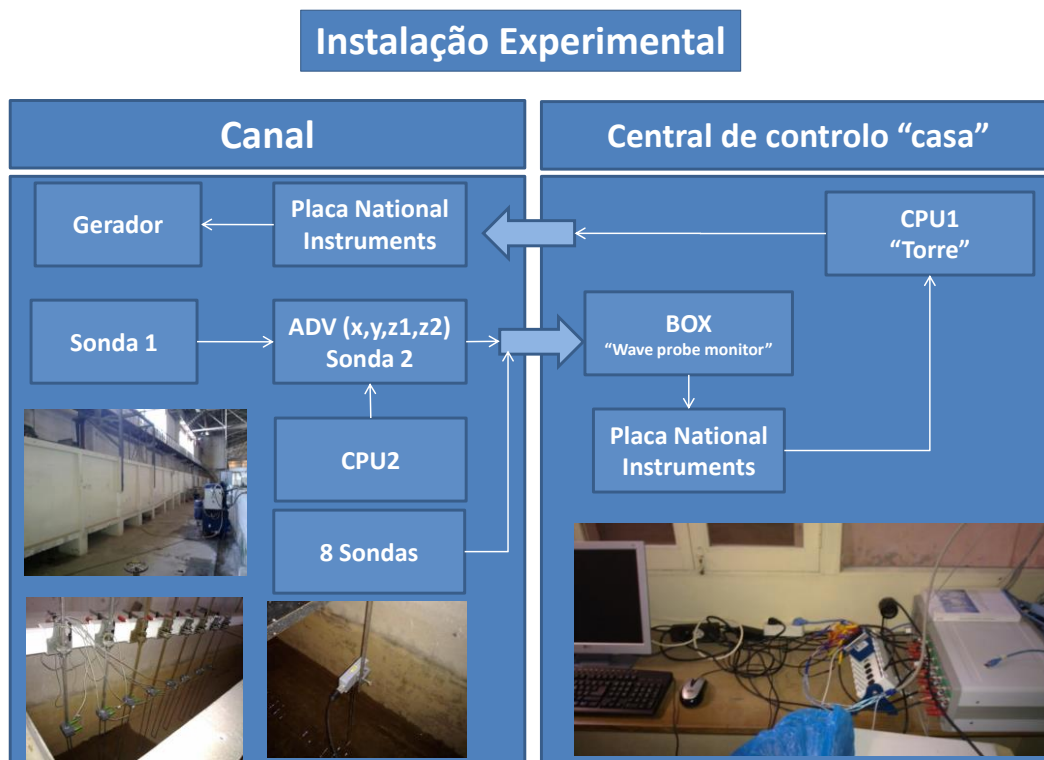


Figura 2 – Instalação experimental

2.1 CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS E DOS TESTES EXPERIMENTAIS

Um batedor do tipo pistão foi o responsável pela geração de ondas regulares resultantes da combinação de quatro períodos ($T = 1.1, 1.5, 2.0$ e 2.5 s) com quatro alturas de onda diferentes ($H = 12, 14, 16$ e 18 cm). No entanto, não foi possível gerar a onda com características de $T = 1.1$ s e $H = 18$ cm porque apresentava declividade muito acentuada e a rebentação ocorria junto ao batedor. No total, para cada posição ao longo do canal, foram geradas 15 ondas regulares.

O conjunto total de testes foi dividido em três fases, consoante o tipo de medição efectuado: (i) Na primeira fase, foram medidas elevações da superfície livre ao longo do canal através de uma estrutura móvel de 8 sondas resistivas; (ii) Na segunda fase foram efectuadas medições da velocidade ao longo do canal e a meio da coluna de água, utilizando um medidor acústico de velocidades por efeito de Doppler (*Acoustic Doppler Velocimeter*, ADV); (iii) Na terceira fase foram efectuadas medições de perfis de velocidades das partículas em posições seleccionadas ao longo do canal.

2.2 EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Na Fase I, as medições das elevações da superfície livre foram realizadas com 8 sondas resistivas agregadas a uma estrutura móvel que era facilmente deslocada ao longo do canal (Figura 3). Esta estrutura foi colocada de forma a obter medições ao longo de todo o canal desde o início da primeira rampa ($x = -1000$ cm) até um ponto posterior à zona de rebentação ($x = 560$ cm). Junto ao batedor de ondas foi colocada uma sonda resistiva ($x = -1080$ cm), de forma a calibrar a onda regular gerada pelo batedor. Cada sonda colocada na estrutura foi separada de 20 cm das sondas vizinhas. A frequência de aquisição das sondas foi de 25 Hz. Estas medições permitiram o cálculo da celeridade da onda, considerando a distância de 20 cm

entre cada sonda e o tempo percorrido pela crista da onda ao passar pelas mesmas sondas. É importante referir que algumas posições (apenas duas) tiveram que ser repetidas devido às limitações do canal, que contém várias barras de metal transversais que impossibilitam o movimento da estrutura móvel.

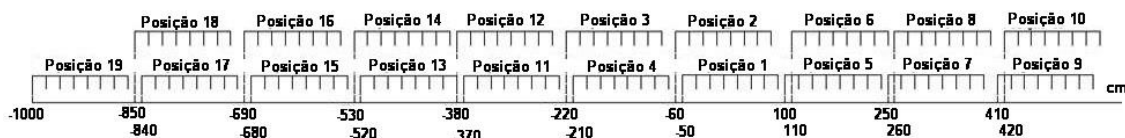


Figura 3 – Posições das sondas resistivas ao longo do canal ($x = 0$ cm é o ponto do topo da primeira rampa)

Na Fase II, a velocidade das partículas foi medida com recurso a um sensor ADV que é composto por uma sonda direccionada para o fundo do canal, capaz de adquirir dados da velocidade das partículas em suspensão na água nas 3 componentes ortogonais (medições em volume). Este ADV foi colocado em várias posições ao longo de todo o comprimento do canal. Foi colocada junto com o ADV uma sonda resistiva para a medição simultânea da elevação da superfície livre (Figura 4). A haste da sonda de medição do ADV foi colocada à meia profundidade do canal. A taxa de aquisição do ADV foi de 25 Hz. As medições efectuadas com o ADV, a par das medições de elevação da superfície livre (Fase II), foram recolhidas ao longo do canal, entre $x = -200$ cm e $x = 560$ cm, o espaçamento entre as medições foi de 10 cm, e entre $x = -1000$ cm e $x = -200$ cm com o espaçamento de 100 cm.

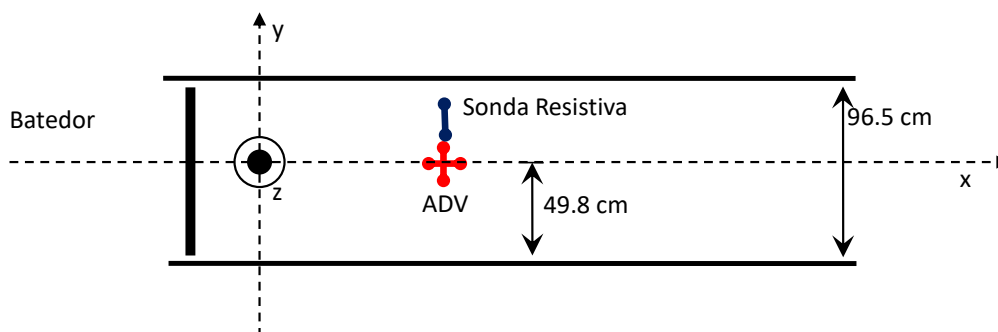


Figura 4 – Perfil do posicionamento da sonda ADV (no topo da rampa principal)

Na Fase III, foi utilizado o mesmo conjunto de ADV com a sonda resistiva, para a medição de perfis verticais da velocidade das partículas ao longo da coluna de água em locais seleccionados do canal (medições separadas de 5 cm na vertical). As medições dos perfis verticais foram em $x = -1000$; -500 ; -100 ; 0 ; 50 ; e 150 cm.

Em todas as fases foi efectuada a identificação da secção da rebentação da onda (desde o início até ao final da rebentação), realizada por observação visual. A zona definida pela crista da onda na qual começam a aparecer pequenas bolhas de ar relativas à rebentação da onda e posteriormente quando desaparecem as bolhas de ar é considerada, respectivamente, o início e o fim da zona de rebentação. Considerando a natureza intrínseca deste tipo de observações, foi feita uma média de 50 amostras de início e final da rebentação.

Cada teste experimental (onda gerada) teve a duração total de 490 s. Na Figura 5 é sumariado o procedimento experimental efectuado.

Testes Experimentais

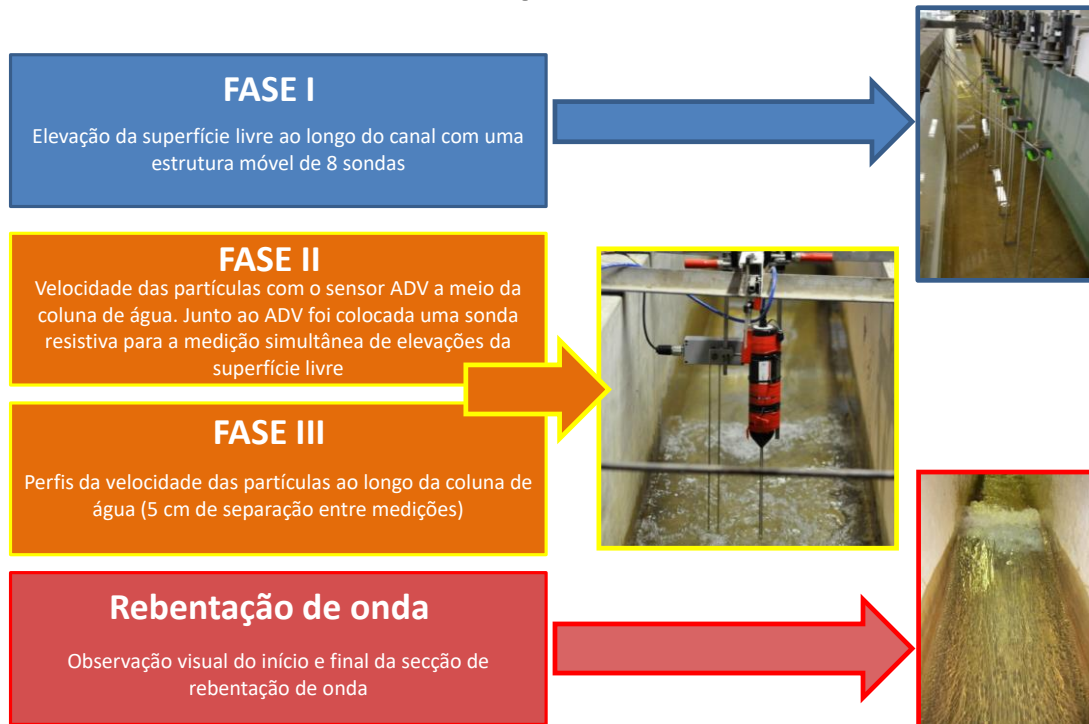


Figura 5 – Testes experimentais

3 RESULTADOS

Para cada uma das fases, procedeu-se ao seguinte tratamento de resultados com base nos dados obtidos:

Fase I - Análise temporal, espectral e estatística dos valores de elevações da superfície livre obtidos ao longo do canal. Calcularam-se também os valores da celeridade da onda e da altura de onda relativa (H/d).

Fase II - Análise temporal, espectral e estatística dos valores de velocidade obtidos a meio da coluna de água ao longo do canal de ondas. Efectuou-se também o cálculo da distribuição bidimensional das componentes das velocidades nos planos (xy), (xz) e (yz) assim como o cálculo da direcção média e do ângulo de dispersão das ondas, com os valores das velocidades e das medições simultâneas de elevação da superfície livre.

Fase III – Análise temporal dos perfis de velocidade obtidos em locais seleccionados no canal.

Procedeu-se em todas as fases à observação visual do início e fim da zona de rebentação.

Nas próximas secções, para além dos valores obtidos em cada ensaio para o início e fim da rebentação, apresentam-se para cada fase dos ensaios, alguns exemplos dos dados obtidos e do tratamento de resultados efectuados. Na maioria dos exemplos, estes referem-se ao caso de teste de uma onda incidente de $T= 1.5$ s e $H= 18$ cm.

3.1 ZONA DE REBENTAÇÃO DA ONDA

Para cada condição de onda incidente foi definida a zona de rebentação por observação visual. Foram obtidas 50 medições do início e do fim da zona de rebentação, Tabela 1 e Tabela 2.

Como foi referido na secção 2.2, o início da rebentação da onda foi definido como o ponto em que devido à declividade da onda algumas bolhas de ar começam a aparecer no topo da crista da onda. A zona de fim da rebentação foi definida como o local em que as bolhas de ar devidas à turbulência da rebentação da onda desaparecem.

A Tabela 1 apresenta os valores da localização do início da rebentação para as 15 condições de onda testadas (foi realizada uma média das observações visuais).

Tabela 1 – Localização do início da zona de rebentação de onda

| T (s) H (cm) | 1.1 | 1.5 | 2.0 | 2.5 |
|-----------------|------|------|------|------|
| 12 | -267 | -212 | -203 | -220 |
| 14 | -332 | -276 | -289 | -270 |
| 16 | -427 | -340 | -361 | -295 |
| 18 | | -395 | -410 | -367 |

A Tabela 2 mostra os valores para a localização do fim da zona de rebentação para as 15 condições de onda incidentes.

Tabela 2 – Localização do final da zona de rebentação de onda

| T (s) H (cm) | 1.1 | 1.5 | 2.0 | 2.5 |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| 12 | 205 | 265 | 330 | 445 |
| 14 | 200 | 245 | 330 | 445 |
| 16 | 200 | 245 | 305 | 428 |
| 18 | | 245 | 293 | 415 |

3.2 FASE I DOS ENSAIOS

Nesta secção são apresentados os resultados e metodologias para os testes cujo objectivo foi efectuar:

- I. A análise temporal, estatística e espectral das séries temporais da elevação da superfície livre para cada condição de onda incidente;
- II. O cálculo da altura de onda relativa e da celeridade da onda.

3.2.1 ELEVÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE

Foram obtidas séries temporais de elevação da superfície livre para cada condição de onda incidente. A Figura 6 indica os resultados da sonda resistiva, colocada nas posições $x = -1080$ cm (Figura 6a) e $x = -500$ cm (Figura 6b), antes e no meio da rampa de declive 1:20, respectivamente para uma onda regular de período de 1.5 s e 18 cm de altura de onda durante o intervalo de tempo entre 150 s e 180 s.

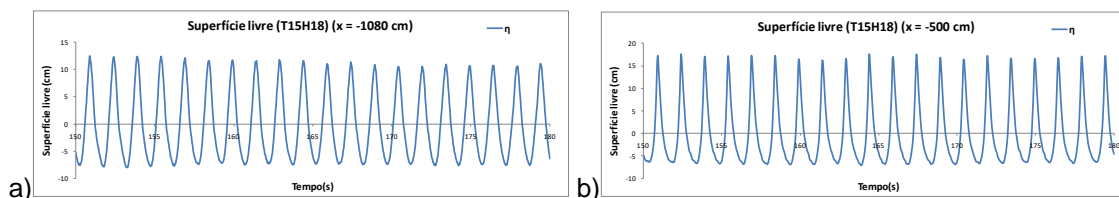


Figura 6 – Elevação da superfície livre (cm) para uma onda incidente de $T = 1.5$ s e $H = 18$ cm, entre os 150 s e 180 s do registo na posição (a) $x = -1080$ cm e (b) $x = -500$ cm

Como se pode observar, à medida que a onda se propaga para zonas de menor profundidades acontece a transformação na forma da onda. A deformada da superfície livre apresenta características cada vez mais não-lineares. Verifica-se também o aparecimento de harmónicas à medida que a onda se propaga para zonas de menor profundidade.

3.2.2 ANÁLISE TEMPORAL, ESTATÍSTICA E ESPECTRAL

Com base nos registos das elevações da superfície livre ao longo do canal, foi realizado:

- O cálculo de: (i) H_M (altura de onda máxima); (ii) H_S (altura de onda significativa); (iii) H_{med} (média da altura de onda); (iv) T_S (período de onda significativo); T_{med} (período de onda médio), com base no método do zero ascendente;
- A análise estatística dos valores de elevações da superfície livre, nomeadamente: (i) a média; (ii) desvio padrão; (iii) a assimetria; (iv) e a curtose;
- A análise espectral dos valores da elevação da superfície livre, permitindo assim a análise dos fenómenos não-lineares provenientes da geração de harmónicas devidas ao fundo do canal e à rebentação da onda. A variância da densidade espectral foi calculada de forma a definir uma distribuição da energia no espectro de frequência;

A Figura 7 mostra, a título de exemplo, para uma onda incidente de $T = 1.5$ s e $H = 18$ cm, as alturas de onda significativas e os períodos médios ao longo da posição x do canal.

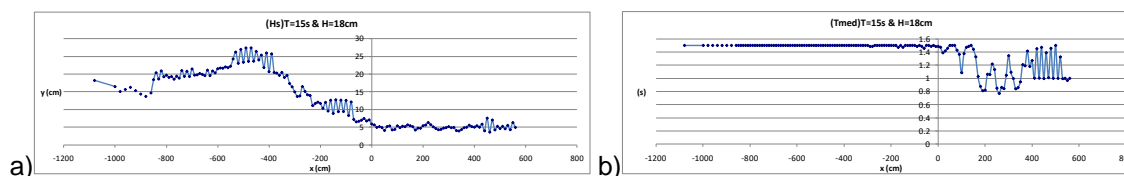


Figura 7 – (a) Altura de onda significativa e (b) períodos médios para uma onda incidente de 1.5 s e $H = 18$ cm

Relativamente às alturas de onda significativas H_s (Figura 7a) verifica-se um aumento significativo da altura de onda devido ao efeito de empolamento da onda antes da rebentação da mesma. Subsequentemente, a rebentação das ondas produz uma redução significativa da altura da onda seguida de uma secção após $x = 100$ cm em que a altura da onda se mantém

constante até ao fim do canal. É interessante observar a variação dos valores da altura da onda na secção entre $x = -400$ cm e $x = 0$ cm que podem ser explicados pelo colapso da onda.

Os testes experimentais mostram que o período das ondas (Figura 7b) permanece relativamente constante até à zona após o topo da rampa ($x = 0$ cm) em plena zona de turbulência da rebentação de onda. De notar, que após a posição $x = 150$ cm ocorre um decréscimo considerável do período médio que é seguido de um ligeiro aumento por volta da posição $x = 400$ cm. Na última secção do canal observam-se grandes variações do período que poderão ser causadas pela geração de harmónicas de ordem superior cuja interação ocorre após a rebentação da onda (ver Figura 10).

A análise estatística dos registos das elevações da superfície livre (Tabela 3) foi realizada através do cálculo da média (Eq. 1), desvio padrão (Eq. 2), assimetria (Eq. 3) e curtose (Eq. 4):

Tabela 3 – Parâmetros estatísticos

| (1) | (2) | (3) | (4) |
|---|---|---|---|
| $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x(i)}{N}$ | $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x(i) - \bar{x})^2}{N}}$ | $a = \frac{\sum_{i=1}^N (x(i) - \bar{x})^3}{N\sigma^3}$ | $\mu_4 = \frac{\sum_{i=1}^N (x(i) - \bar{x})^4}{N\sigma^4}$ |

Na Figura 8 e na Figura 9 pode-se observar a evolução dos parâmetros acima referidos ao longo do canal para uma onda incidente de $T = 1.5$ s e $H = 18$ cm.

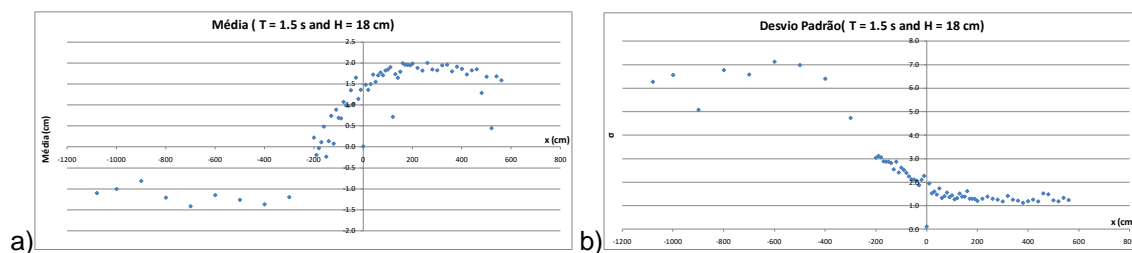


Figura 8 – (a) a média e (b) o desvio padrão da elevação da superfície livre para uma onda incidente de $T = 1.5$ s e $H = 18$ cm

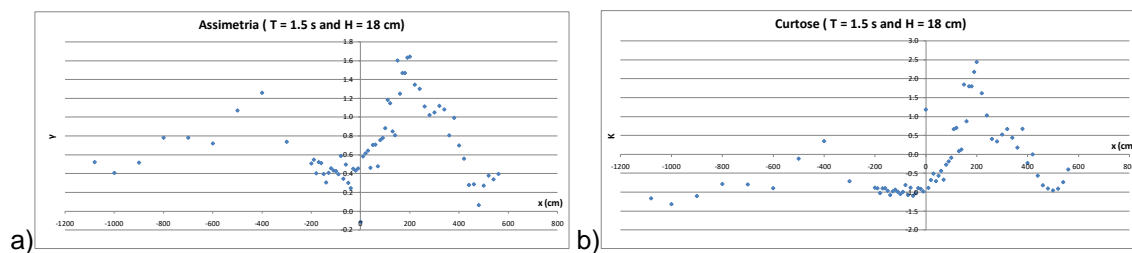


Figura 9 – (a) Assimetria e (b) Curtose da elevação da superfície livre para uma onda incidente de $T = 1.5$ s e $H = 18$ cm

A Figura 8a, referente aos valores médios da elevação da superfície livre em relação ao nível médio da água no canal (“*Mean Water Level*” (MWL)), mostra um perfil típico no qual se nota um claro abaixamento do nível médio “*Set-down*” seguido, após a rebentação da onda, por um aumento do nível médio “*Set-up*” (Dean e Walton, 2009). Com efeito, antes da onda começar a rebentar (ver Tabela 1, $x = 395$ cm), entre as posições $x = -1000$ e -400 cm, observa-se um ligeiro abaixamento do nível médio “*Set-Down*”. Imediatamente após a rebentação da onda e durante o processo de rebentação, a média da elevação da superfície

livre começa a aumentar até ao final da zona de rebentação (ver Tabela 2, $x = 245$ cm) (zona de turbulência). Passando a zona de rebentação, o nível médio (MWL) começa a estabilizar entre as posições $x = 200$ e 400 cm para seguidamente apresentar um ligeiro abaixamento.

O desvio padrão (Figura 8b), é bastante representativo do comportamento das alturas de onda, reproduzindo em termos básicos o mesmo tipo de tendências (Figura 7a), mantendo-se constante até à posição $x = -600$ cm onde é observado um aumento ligeiro (empolamento da onda) é devido ao decrescimento da profundidade. Logo após, durante a secção de rebentação de onda, em $x = -400$ cm, o desvio padrão começa a diminuir até $x = 200$ cm, local em que se dá o fim da rebentação da onda.

A assimetria e a curtose, representadas na Figura 9, comportam-se de forma similar. Ambas apresentam ao início valores bastante baixos, começando seguidamente a aumentar até ao ponto de rebentação da onda. Durante a zona de rebentação estes dois parâmetros estatísticos decrescem significativamente até ao final da rampa ($x = 0$ cm) onde aumentam abruptamente devido, muito provavelmente, à criação de ondas com diferentes características da frequência principal (ver Figura 10) devidas à interação entre harmónicas geradas pelo fundo do canal e pela rebentação da onda. Passando a zona de rebentação de onda, aproximadamente em $x = 400$ cm, os valores da assimetria e da curtose voltam à gama inicial, muito provavelmente devido ao fim da turbulência gerada durante o processo de rebentação da onda. As variações da assimetria são um indicador dos efeitos não-lineares devidos à turbulência gerada durante a rebentação da onda.

Note-se que as medições da superfície livre após na zona de rebentação da onda são sempre muito difíceis e menos precisas porque existe no local uma forte turbulência com bastante emulsão de ar na água. Assim, esta secção apresenta uma dispersão considerável nos valores experimentais.

A Figura 10 mostra os espectros de frequência calculados para uma onda incidente de $T = 1.5$ s e $H = 18$ cm nas posições $x = -1000$, -400 ; 0 e 400 cm. Ao longo da propagação da onda, é visível o aparecimento de componentes harmónicas associadas ao aumento de energia com o aumento da distância x ao bater.

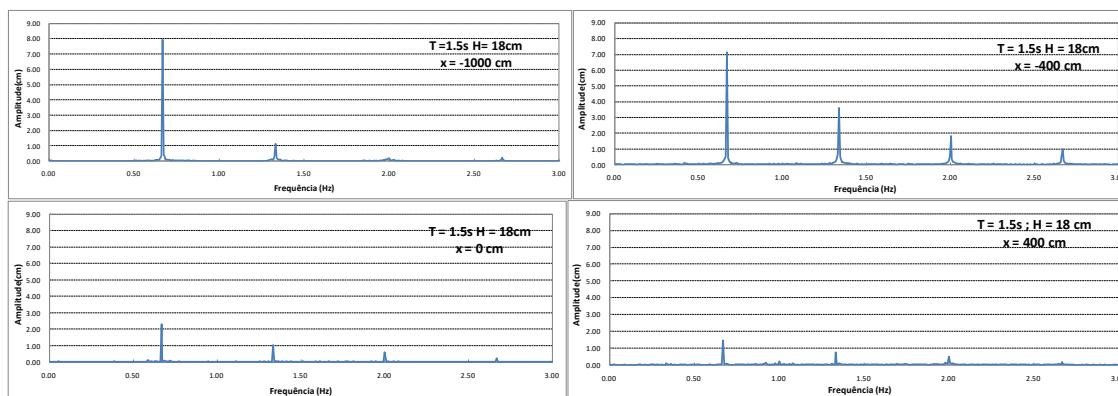


Figura 10 – Espectro de frequência nas localizações $x = -1000$, -400 , 0 e 400 cm, para uma onda incidente de $T = 1.5$ s e $H = 18$ cm

Os resultados da análise espectral mostram que existe um número crescente de harmónicas à medida que a onda é propagada no canal. Observa-se também, uma redução drástica na amplitude da frequência principal do espectro. Comparativamente, é possível observar que depois da rebentação da onda, a amplitude da frequência principal reduz-se ao ponto de ficar bastante próxima das harmónicas geradas ao longo da propagação da onda.

3.2.3 ALTURA DE ONDA RELATIVA

A altura de onda relativa (Figura 11) é usada regularmente como índice para a secção característica da rebentação de onda em águas pouco profundas. Dally et al. (1985) consideram que a altura de onda relativa actua como condição para a estabilidade de uma onda.

Contrariamente ao começo da rebentação de onda, não existe um valor padrão de uso comum para a altura de onda relativa indicativo do final da zona de rebentação. Dally et al. (1985) referem alguns valores no sentido de conseguir uma curva que melhor se adapte aos resultados experimentais para diferentes declives de fundo. Mais especificamente, Dally et al. (1985), afirma que para o final da zona de rebentação são esperados valores de altura de onda relativa próximos de $H/d = 0.35 \sim 0.47$ no caso de um fundo de perfil horizontal.

A Figura 11 mostra, para cada uma das 15 condições de onda incidente que foram experimentadas, a evolução da altura de onda relativa desde o início até ao final da zona de rebentação. O eixo longitudinal do canal (x) foi normalizado segundo a secção de rebentação da onda, assim na Figura 11, $x = 0$ indica o princípio da rebentação da onda e $x = 1$ indica o final da zona de rebentação de onda (ver 3.1)

Através da Figura 11, observa-se que a altura de onda relativa para a zona anterior à rebentação apresenta uma curva mais inclinada, crescendo rapidamente, ao passo que após a rebentação o declive apresenta uma curva mais suave. Nesta altura, o decrescimento de H/d tem duas fases: entre $x = 0$ e 0.6 , H/d decresce até $H/d = 0.5$, após o que este valor permanece praticamente constante até $x = 1$. A taxa média de H/d no fim da secção de rebentação de onda está entre 0.40 e 0.60 . Este valor é relativamente elevado quando comparado com testes efectuados em fundo horizontal (Dally et al., 1985). Contudo o resultado não diverge muito do esperado.

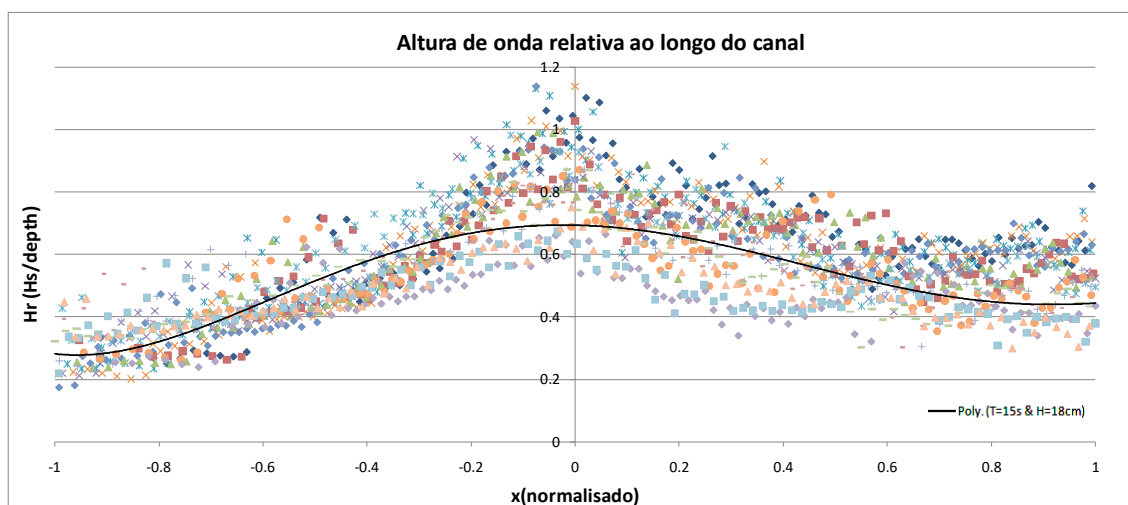


Figura 11 – Evolução da altura de onda relativa ($x = 0$ é o início e $x = 1$ o final da rebentação) utilizando uma escala normalizada para todas as condições de onda incidentes. A curva “Poly. (T=15s & H=18 cm)” representa a curva de ajuste dos valores da condição de onda incidente de $T = 1.5$ s e $H = 18$ cm.

3.2.4 CELERIDADE DA ONDA

Para o cálculo da celeridade é necessário estimar o tempo que a onda leva a passar por duas sondas consecutivas. Este tempo foi calculado como o tempo correspondente ao maior valor de correlação cruzada entre dois registos de cada par de sondas, este método foi aplicado em Okamoto et al. (2010). Optou-se por utilizar o registo completo das sondas resistivas em vez de sub-intervalos de cada registo.

Na Figura 12, são apresentados resultados de celeridade da onda ao longo do canal para as condições de onda incidente de $H = 18$ cm e períodos de $T = 1.5, 2.0$ e 2.5 s.

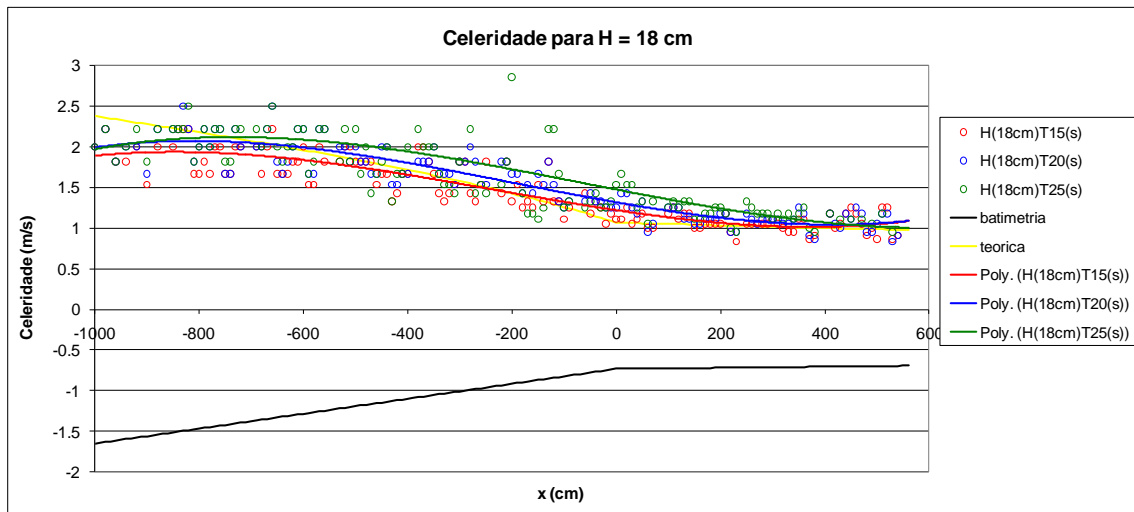


Figura 12 – Celeridade da onda ao longo do canal para uma altura de onda de $H = 18$ cm e períodos de $T = 1.5, 2.0$ e 2.5 s. A legenda “Teórica” é a curva representativa dos valores de $\sqrt{g h}$ e as curvas de ajuste “Poly. (H(18cm)T15(s))”, “Poly (H(18cm)T20(s))” e “Poly (H(18cm)T25(s))” correspondem às ondas “H(18cm)T15(s)”, “H(18cm)T20(s)” e “H(18cm)T25(s)”.

Os resultados da celeridade da onda para os três períodos mostram: (i) na seção inicial, começo da rampa 1:20, existe um aumento da celeridade; (ii) na seção seguinte nota-se um claro decréscimo da celeridade de acordo com a redução da profundidade do canal, começando a sentir-se primeiro nos períodos de onda menores. Este comportamento dos valores da celeridade está de acordo com a ocorrência antecipada de rebentação da onda para os períodos menores (ver 3.1); (iii) Na seção final do canal, a redução drástica no declive da rampa e o final da zona de rebentação de onda motiva o alisamento da curva de celeridade mostrando uma tendência para as curvas se juntarem numa só, independente dos diferentes períodos de onda (Svendsen et al., 2003 e Okamoto et al., 2010).

A Figura 13 tem como base os resultados da figura anterior e mostra a razão entre os valores de celeridade obtidos por via experimental e os obtidos pela formulação teórica.

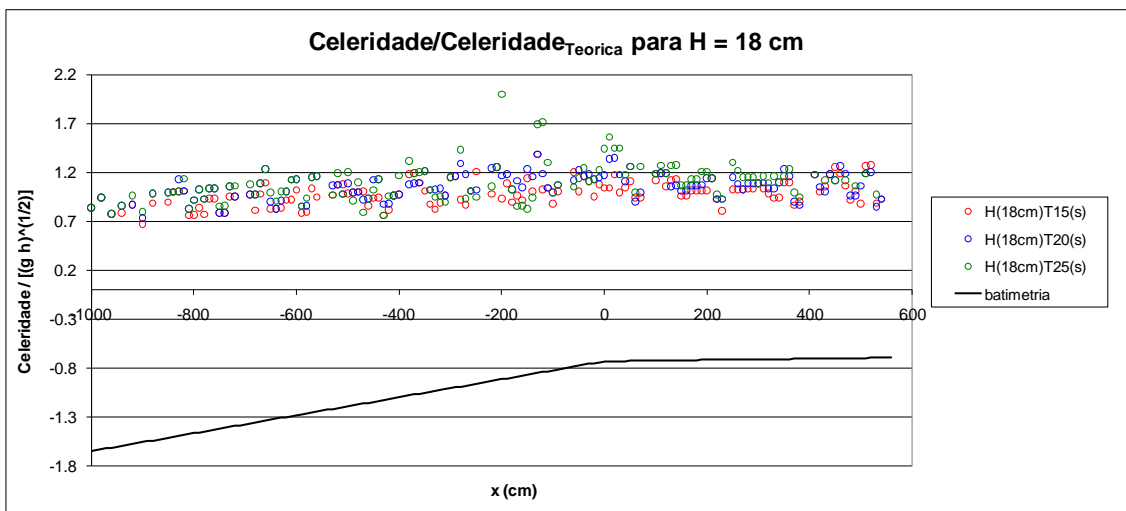


Figura 13 – Razão entre os valores obtidos experimentalmente e os obtidos através da formulação teórica para os períodos de onda de 1.5, 2.0 e 2.5 s.

Como se mostra nas figuras acima (Figura 12 e Figura 13) a onda H(18cm)T25(s) apresenta valores ligeiramente diferentes das outras duas ondas porque a sua zona de início de rebentação ocorre a uma distância de 50 cm das outras duas ondas (1.5 e 2.0 s) (ver Tabela 1).

3.3 FASE II DOS ENSAIOS

Nesta secção são apresentados os resultados e metodologias para os testes cujo objectivo foi:

- I. Efectuar a análise temporal e estatística das séries temporais da velocidade das partículas abaixo da superfície livre e a meio da coluna de água ao longo do eixo longitudinal (x) do canal (V_x) para cada condição de onda incidente;
- II. Caracterizar a forma das distribuições bidimensionais das componentes da velocidade nos três planos ortogonais. Foram realizadas análises da distribuição das várias componentes da velocidade das partículas ao longo do eixo x do canal;
- III. Avaliar a direcção média da onda e a dispersão direcciona (ou espalhamento) ao longo do eixo longitudinal x do canal.

3.3.1 ANÁLISE TEMPORAL E ESTATÍSTICA DAS VELOCIDADES

A média da velocidade das partículas para cada registo foi obtida através da média de todos os valores do registo temporal de velocidades. As médias dos valores máximos e mínimos das velocidades foram calculadas através da identificação de cada onda, utilizando o método do zero-descendente, e cada intersecção no zero era considerada efectiva se existissem pelo menos dois pontos antes e depois da linha de zero de referência.

Após a análise dos dados do ADV, foi realizada uma análise estatística que consistiu na determinação dos parâmetros estatísticos do desvio padrão, da assimetria e da curtose da componente de velocidade x (V_x) do canal (os valores positivos de V_x direccionados no sentido do batedor de ondas).

Da Figura 14 à Figura 16 apresentam-se os resultados para uma condição de onda incidente de $T = 1.5$ s e $H = 18$ cm: (i) a série temporal de V_x ($x = -900$ cm); (ii) a média, o

desvio padrão, a assimetria e a curtose da velocidade V_x ao longo do canal (desde a posição $x = -1000$ cm até á posição $x = 560$ cm).

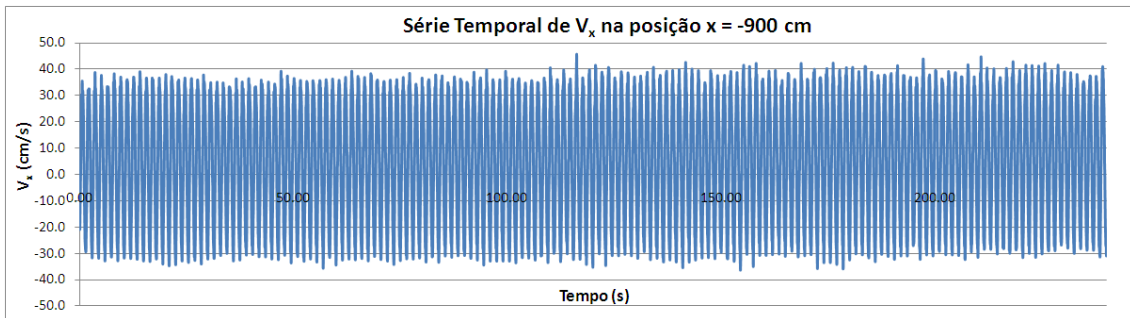


Figura 14 – Velocidade (V_x) na posição $x = -900$ cm, para uma altura de onda de $H = 18$ cm e período de $T = 1.5$ s

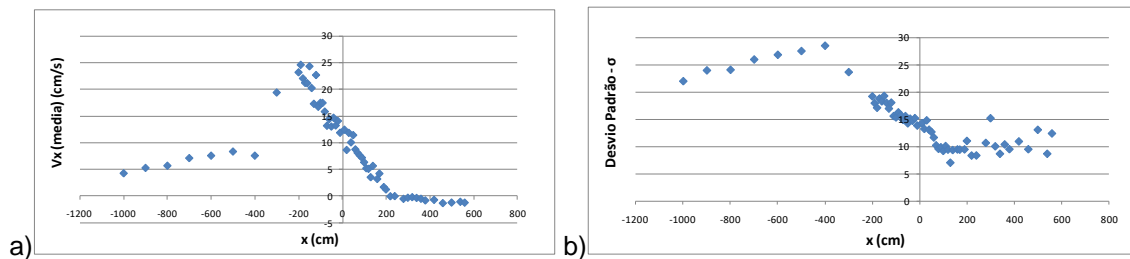


Figura 15 – (a) Média e (b) Desvio padrão da velocidade (V_x) ao longo do canal, para uma altura de onda de $H = 18$ cm e período de $T = 1.5$ s

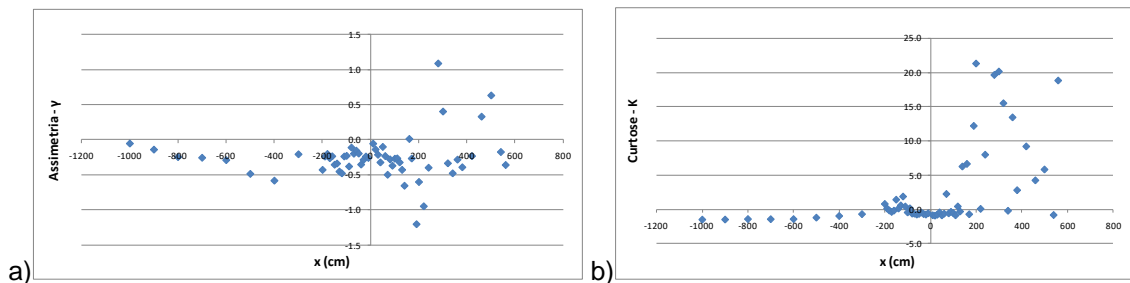


Figura 16 – (a) Assimetria e (b) Curtose da velocidade (V_x) ao longo do canal, para uma altura de onda de $H = 18$ cm e período de $T = 1.5$ s

Com base na Figura 15a, verifica-se que a seguir ao ponto de rebentação da onda ($x = -400$ cm), os valores da velocidade V_x aumentam de forma abrupta até ao colapso total da onda (perto de $x = -150$ cm) obrigando a partir daí a um decréscimo dos valores. Estes começam a estabilizar no final da zona de rebentação.

O gráfico do desvio padrão tem resultados similares à média dos valores da velocidade: nota-se um aumento até ao ponto de inicio da rebentação da onda seguido de um decréscimo acentuado até ao fim da zona de rebentação de onda, a partir do qual é mais ou menos constante. Nesta zona final, acontecem algumas oscilações que traduzem a geração de harmónicas, resultado do declive de fundo e do efeito de rebentação da onda (Okamoto et al., 2010).

A assimetria e a curtose (Figura 16) mostram uma tendência geral que indica grandes diferenças no final da zona de rebentação ($x = 100$ cm), muito possivelmente devidas ao aparecimento de novas ondas geradas pela interação da onda com o fundo e com o efeito de rebentação da onda.

3.3.1.1 DISTRIBUIÇÃO BIDIMENSIONAL DAS TRÊS COMPONENTES ORTOGONAIS DA VELOCIDADE

Nesta secção é apresentada a análise bidimensional da distribuição das componentes da velocidade segundo os planos x-y, x-z e y-z. Foram avaliados os parâmetros que traduzem o comprimento das três componentes da velocidade (E_x , E_y , E_z - ver Figura 17). Sendo E_x , E_y e E_z definidos como sendo a diferença entre as médias das velocidades positivas e negativas para cada componente (x, y, z) medida pelo sensor ADV.

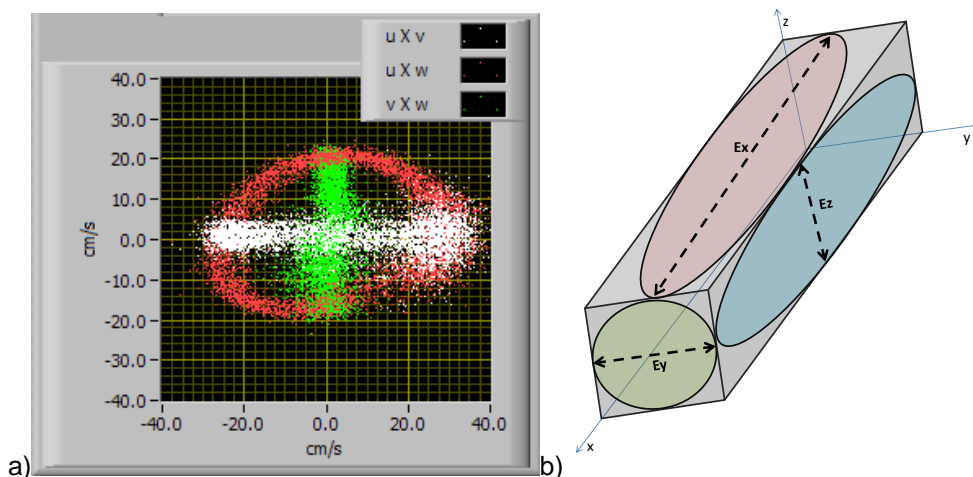


Figura 17 – Distribuição bidimensional típica das componentes da velocidade (a) nuvem de dados e (b) esquema representativo da direcção e forma dos parâmetros

A Figura 18 apresenta as razões E_z/E_x , E_y/E_x and E_y/E_z para uma onda incidente de $T = 1.5$ s e $H = 18$ cm.

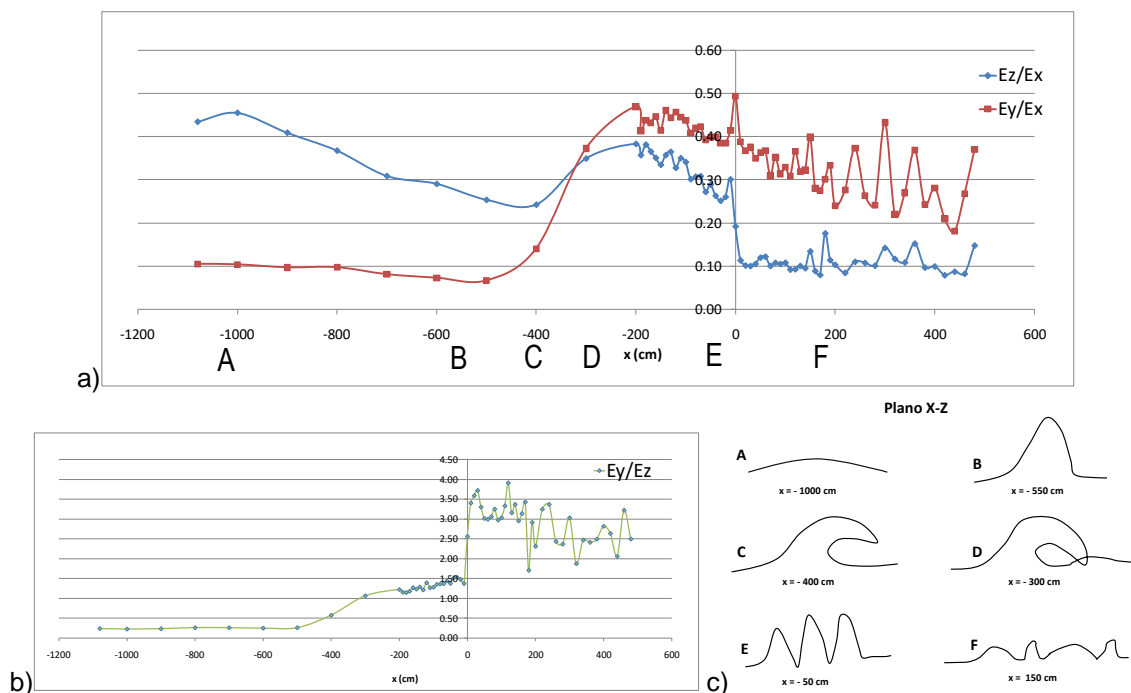


Figura 18 – Razões (a) E_z/E_x e E_y/E_x , e (b) E_y/E_z ao longo do eixo x do canal, para uma altura de onda de $H = 18$ cm e período de $T = 1.5$ s e (c) de forma da onda no plano X-Z ao longo do eixo x do canal (A-F)

A Tabela 4 apresenta algumas interpretações dos resultados das figuras anteriores.

Tabela 4 – Interpretação dos resultados para as razões E_z/E_x , E_y/E_x e E_y/E_z

| Razão | Resultados | Forma gráfica da nuvem de pontos | Vista do canal |
|-----------|-------------------|--|----------------|
| E_z/E_x | > 1 | Alongada verticalmente | Lado |
| | $= 1$ | Circular | |
| | $0 < E_z/E_x < 1$ | Alongada longitudinalmente | |
| E_y/E_x | $= 0$ | Em linha (condição ideal para o canal) | Frente |
| | > 0 | Componentes transversais $\neq 0$ | |
| E_y/E_z | $= 0$ | Em linha (condição ideal para o canal) | Topo |
| | > 0 | Componentes transversais $\neq 0$ | |

Na Figura 18, apresentada anteriormente, pode-se verificar que no começo da rampa 1:20 e até $x \leq -500$ cm (próximo do local de rebentação da onda), as razões das distribuições apresentam os valores $E_y/E_x < 0.1$ e $E_y/E_z < 0.4$, que estão longe do ideal $E_y/E_x = E_y/E_z = 0$ (componente transversal nula) e não apresentam grandes oscilações. Logo após esta localização nota-se um aumento significativo destas razões, que no caso da E_y/E_x acontece até $x = -200$ cm, a partir do qual os valores decrescem, enquanto que no caso da E_y/E_z , acontece até $x = 0$ cm. A partir daí, verifica-se o decrescimento dos valores destas razões embora na zona final da rebentação (F) aconteçam algumas oscilações.

A posição $x = -400$ cm representa o começo da zona de rebentação da onda. A partir da qual, ocorre para E_z/E_x , um crescimento dos valores, até $x = -200$ cm. Para $x > -200$ cm, os valores decrescem, obrigando a um alongamento da forma da onda na direcção longitudinal do canal.

É interessante observar que os efeitos da rebentação da onda afectam de forma diferente as três razões (E_z/E_x , E_y/E_x e E_y/E_z). Seguindo a razão E_z/E_x observa-se que a resposta à rebentação da onda é sentida 100 cm após o verificado por E_y/E_x e E_y/E_z , como verificado na resposta das curvas dos gráficos, em que a E_z/E_x começa a crescer só depois de $x = -400$ cm enquanto que nas razões E_y/E_x e E_y/E_z a curva começa a crescer um pouco antes ($x \approx -500$ cm).

Em resumo, a transformação da componente E_x nas componentes E_y e E_z é constatada. Este comportamento deve-se sobretudo ao efeito de dispersão da onda ao rebentar “*rolling effect*”. A componente E_y é devida ao efeito da turbulência na rebentação da onda que produz um efeito de dispersão transversal, que começa perto de $x = -500$ cm.

3.3.1.2 DIRECÇÃO MÉDIA DA ONDA E DISPERSÃO

Aproveitando as medições simultâneas de velocidade das partículas e da elevação da superfície livre ao longo do eixo x do canal, foi obtida a direcção média da onda.

Segundo Trageser e Elwany (1990), para obter o espectro direccional podem ser usadas diferentes técnicas de medição e análises de dados. O grau de detalhe desejado para a descrição direccional da onda pode variar desde um conjunto de características de onda até uma descrição bastante condensada para poucos parâmetros, como por exemplo a direcção de onda predominante. Para vários casos relativos à direccionalidade das ondas, a direcção média $\theta(f)$ e a dispersão (espalhamento) $s(f)$, dependendo da frequência (f), são informação suficiente para os objectivos propostos.

Longuet-Higgins (Dean & Dalrymple, 1993) desenvolveu um método para obter o espectro direccional da onda. Este método considera que, através das séries de elevação da superfície livre e de registos simultâneos de velocidades no plano de distribuição horizontal, o espectro direccional pode ser expresso pelas séries de Fourier.

Trageser e Elwany (1990) mostram que as séries de Fourier, que representam a função de dispersão direccional, $D(\theta)$, podem ser expressas por:

$$D(\theta) = \frac{1}{2}\pi + \sum_n [A_n \cos(n\theta) + B_n \sin(n\theta)] / \pi \quad (1)$$

Trabalhando, por exemplo, com as elevações da superfície livre (η) e as velocidades (u , v), os quatro coeficientes de Fourier A_1 , B_1 , A_2 e B_2 podem ser estimados através das expressões:

$$A_1 = \frac{C_{\eta v}}{[C_{\eta\eta}(C_{uu} + C_{vv})]^{1/2}}, \quad (2)$$

$$B_1 = \frac{C_{\eta u}}{[C_{\eta\eta}(C_{uu} + C_{vv})]^{1/2}}, \quad (3)$$

$$A_2 = \frac{C_{vv} - C_{uu}}{C_{vv} + C_{uu}}, \quad (4)$$

$$B_2 = \frac{C_{vu}}{C_{vv} - C_{uu}}, \quad (5)$$

em que C representa a parte real do espectro (co-espectro), η a elevação, u é a velocidade V_x do canal (eixo longitudinal x do canal) e v é a velocidade na direcção transversal ao canal V_y .

A direcção média da onda $\theta(f)$ e a dispersão direccional (espalhamento "spread") $s(f)$ pode ser calculada através de:

$$\theta(f) = \arctan\left(\frac{A_1}{B_1}\right), \quad (6)$$

$$s(f) = [2(1-r)]^{1/2}, \quad r^2 = A_1^2 + B_1^2, \quad (7)$$

Segundo os autores do método, a estimativa da direcção média da onda $\theta(f)$ é precisa e fiável. Contudo, a estimativa da dispersão direccional pode-se tornar grosseira se houver um numero limitado de coeficientes.

Os valores positivos de V_x estão referenciados no sentido do batedor do canal.

Para identificar regiões com potencial perda de qualidade na análise direccional é necessário verificar os registos de forma minuciosa. Na Figura 19 estão representados trechos das medições de uma onda incidente de $H = 18$ cm e $T = 1.5$ s. Estas medições foram retiradas na posição (a) $x = -500$ cm e (b) $x = 100$ cm, em que V_x e V_y são as componentes da velocidade nos sentidos longitudinal e transversal, respectivamente.

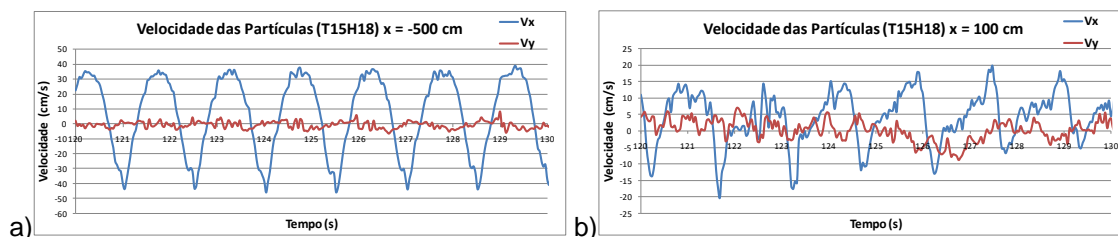


Figura 19 – As componentes V_x e V_y da velocidade em (a) $x = -500$ cm e (b) $x = 100$ cm para uma onda incidente de $T = 1.5$ s e $H = 18$ cm

À medida que o ADV e a sonda resistiva se aproximam da zona de rebentação da onda, em $x = -395$ cm, existe um aumento de amplitude nos registos da velocidade V_y na direcção transversal à do canal.

Na tabela 3 apresentam-se os valores de direcção média e ângulo de dispersão para uma onda incidente de $T = 1.5$ s e $H = 18$ cm. Apesar do ângulo da direcção principal se manter próximo do ângulo original de geração da onda (270°), é nítido o aumento do ângulo de dispersão direcciona na zona de rebentação da onda (Tabela 5).

Tabela 5 – Direcção média e ângulo de dispersão para uma onda incidente de $T_p = 1.5$ s e $H = 18$ cm

| Posição no canal (cm) | Direcção média ($^\circ$) | Dispersão ($^\circ$) |
|-----------------------|-----------------------------|------------------------|
| -1080 | 269.5 | 4.0 |
| -500 | 271.5 | 1.9 |
| -300 | 270.9 | 9.9 |
| -100 | 272.0 | 13.9 |
| 60 | 271.1 | 11.3 |
| 100 | 272.6 | 9.9 |
| 170 | 272.7 | 6.0 |
| 240 | 272.6 | 10.4 |
| 340 | 275.2 | 7.1 |
| 460 | 273.0 | 4.6 |
| 500 | 271.1 | 6.3 |
| 540 | 269.3 | 6.7 |

Os resultados que foram obtidos para o ângulo de dispersão e para a direcção principal estão explícitos na Figura 20 a seguir. As figuras mostram uma direcção da propagação da onda próxima de 270° (segundo o eixo longitudinal x do canal) desde a geração da onda até ao final do canal. É visível uma oscilação do ângulo de dispersão durante a zona de rebentação de onda.

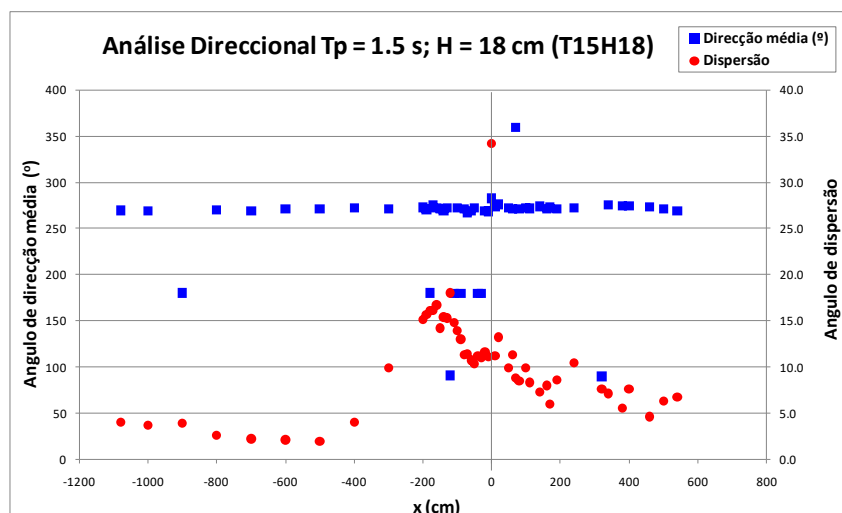


Figura 20 – Direcção média ($^{\circ}$) e ângulo de dispersão para uma onda incidente de $T_p = 1.5$ s e $H = 18$ cm

Como mostra a figura anterior existe uma variação considerável nos valores do ângulo de dispersão, em grande parte devida à turbulência gerada no processo de rebentação de onda e também da variação do fundo do canal.

Usualmente este tipo de técnica de análise direccional é apenas usada quando existem múltiplas componentes com direcções diferentes de propagação da onda. Neste caso verifica-se que antes, durante e depois da rebentação da onda a direcção média mantém-se na direcção da onda gerada. Contudo, relativamente aos valores do ângulo de dispersão, eles reflectem claramente a zona de rebentação da onda entre $x = -395$ cm e $x = 200$ cm. De facto o ângulo de dispersão apresenta valores bastante reduzidos antes da rebentação da onda aumentando claramente após e durante a rebentação, especialmente um pouco antes de $x = 0$ cm, para seguidamente retornar a diminuir consideravelmente.

Contudo os valores do ângulo de dispersão após a rebentação são ligeiramente superiores aos observados antes da rebentação, isto pode também indicar que depois da zona de rebentação poderá existir uma transformação na frequência residual da onda em outras ondas de frequências diferentes que se propagam de forma independente. Esta variação da componente principal da onda que é propagada no canal é discutida com mais detalhe em Okamoto *et al.* (2010). Também na secção 3.3.1.1 pode-se observar que depois da rebentação da onda existem mais componentes de onda que divergem da frequência principal de propagação da onda.

3.4 FASE III DOS ENSAIOS

3.4.1 PERFIS VERTICAIS DA VELOCIDADE DAS PARTÍCULAS

Na terceira fase dos ensaios experimentais o objectivo foi o de recolher dados de velocidades das partículas, ao longo da coluna de água em pontos seleccionados do canal ($x = -1000$; -500 ; -150 ; -100 ; 0 ; 50 ; 150 cm). Estas medições foram separadas de 5 cm na vertical (eixo z do canal). O procedimento foi realizado de acordo com Okamoto *et al.* (2009).

Após o topo da rampa ($x = 0$ cm), a profundidade da coluna de água (10 cm), não permitiu mais do que uma medição com o ADV. Por este motivo, não foi possível retirar perfis verticais até ao final da zona de rebentação da onda.

Para analisar os perfis verticais de velocidade foram calculados os valores máximos, mínimos e médios (Figura 21 e Figura 22).

Os valores negativos de velocidade mostram os mínimos e os positivos mostram as velocidades máximas, enquanto os valores médios são a média de todos os valores de cada registo. Importante notar que os valores positivos da velocidade das partículas estão na direcção oposta à da propagação da onda, ou seja, o eixo x positivo está dirigido no sentido do bateror

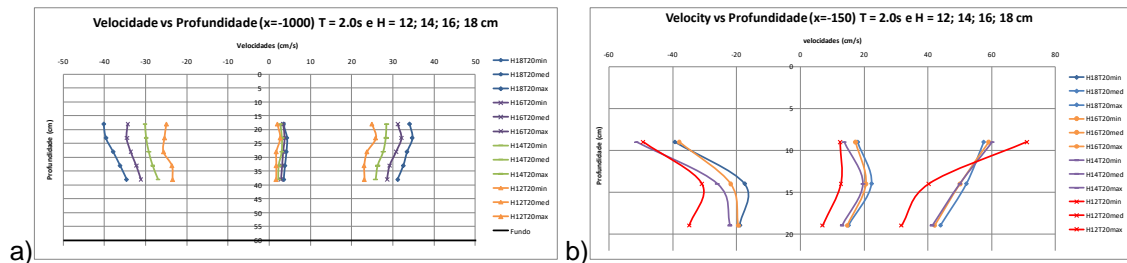


Figura 21 – Perfil vertical da velocidade em (a) $x = -1000$ cm e (b) $x = -150$ cm para uma onda incidente de $T = 2.0$ s e $H = 12, 14, 16$ e 18 cm

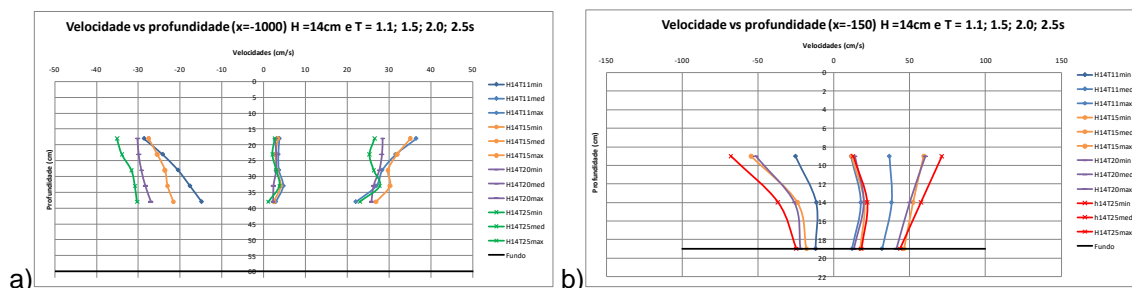


Figura 22 - Perfil vertical da velocidade em (a) $x = -1000$ cm e (b) $x = -150$ cm para uma onda incidente de $H = 14$ cm e $T = 1.1, 1.5, 2.0$ e 2.5 s

Como demonstram as figuras anteriores, para maiores alturas de ondas ocorrem maiores velocidades das partículas, Figura 22a, assim como, salvo raras excepções, para períodos de onda maiores ocorrem também maiores velocidades das partículas. Como se pode observar, em $x = -1000$ cm, na Figura 21a e Figura 22a, os valores não variam significativamente entre as zonas mais à superfície da água e as zonas mais profundas (variação de cerca de 5 cm/s). O mesmo não acontece para a posição $x = -150$ cm, Figura 21b e Figura 22b, onde o efeito de águas pouco profundas e a proximidade com o fundo produz uma diferença nas velocidades das partículas de cerca de 20 cm/s para os valores de máximos e mínimos. Relativamente às médias dos valores das velocidades, os valores não apresentam diferenças significativas ao longo da coluna de água.

4 CONCLUSÕES

Neste artigo, apresentaram-se os recentes testes realizados em modelo físico no canal de ondas do LNEC, para o estudo da hidrodinâmica da rebentação de ondas em zonas de praia de declive variável. O objectivo principal foi o de estudar com mais detalhe todo o processo relativo à rebentação da onda desde o início até ao seu final.

O estudo em modelo físico, foi realizado no canal de ondas regulares, através de uma batimetria de fundo do canal constituída por uma zona plana seguida de duas rampas de inclinação 1:20 e 1:80 respectivamente, formando um perfil característico de uma praia. Testaram-se períodos de onda de: 1.1, 1.5, 2.0, e 2.5 s e alturas de onda de 12, 14, 16, e 18 cm. Através das medições efectuadas com as sondas resistivas (de nível) e com a sonda ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) foi possível calcular a celeridade da onda, a altura de onda relativa, a distribuição bidimensional das componentes da velocidade das partículas segundo

os planos xy, xz e yz, e a direcção e dispersão das ondas. Realizaram-se perfis verticais das velocidades das partículas em locais seleccionados do canal e foi observado o local de início e final da zona de rebentação das ondas.

Relativamente aos resultados da altura de onda relativa podemos concluir que a taxa média de H/d no fim da secção de rebentação de onda está entre 0.40 e 0.50. Este valor é relativamente elevado quando comparado com testes efectuados em fundo horizontal (Dally et al., 1985), Contudo o resultado não diverge muito do esperado sendo até o comportamento de H/d bastante semelhante. Entre $x = 0$ e 0.6, H/d decresce assintoticamente até $H/d = 0.5$, este valor permanece depois constante até $x = 1$. Estes resultados são explicados pela equação de Dally et al. (1985).

Os resultados da celeridade da onda mostram que no começo da rampa 1:20, existe um aumento da celeridade seguido de um claro decrescimento da celeridade de acordo com a redução na profundidade do canal, começando a sentir-se primeiro nos períodos de onda menores. Este comportamento dos valores da celeridade está de acordo com a ocorrência antecipada de rebentação da onda para os períodos menores, tal como foi observado em 3.1. Na secção final do canal, a redução drástica no declive da rampa e o final da zona de rebentação da onda motiva o alisamento da curva de celeridade mostrando uma tendência para as curvas se juntarem numa só, independente dos diferentes períodos de onda.

Relativamente às distribuições bidimensionais das componentes da velocidade das partículas segundo os planos xy, xz e yz, é possível observar os efeitos da rebentação da onda nas três razões dos comprimentos das 3 componentes da velocidade (E_z/E_x , E_y/E_x e E_y/E_z). Para a razão E_z/E_x observa-se que a resposta à rebentação a onda é sentida 100 cm após as razões E_y/E_x e E_y/E_z (Figura 18). Junto a $x = -400$ cm a componente E_y é suficientemente grande para ser observada e a componente E_z atinge o mínimo nesse ponto em que a onda mergulha "*plunging point*" para, logo de seguida, crescer acentuadamente. De facto a curva de E_z/E_x começa a crescer apenas 100 cm depois das curvas das razões E_y/E_x e E_y/E_z .

A análise direccional realizada mostrou que o ângulo de dispersão apresenta valores bastante reduzidos antes da rebentação da onda aumentando claramente após e durante a rebentação, especialmente um pouco antes do topo da rampa de 1:20, para seguidamente retornar a diminuir consideravelmente. Claramente, este trabalho demonstra de forma breve, que os valores do ângulo de dispersão provenientes da análise direccional estão directamente relacionados com os efeitos turbulentos devidos à rebentação das ondas e funcionam como um indicador da turbulência para o caso apresentado dos ensaios em modelo físico 2D no canal de ondas.

Os resultados aqui apresentados estão bastante dependentes da precisão das medições das elevações da superfície livre e das velocidades. Naturalmente, problemas relacionados com o posicionamento das sondas e com o aparecimento de bolhas de ar na coluna de água foram passíveis de afectar negativamente os resultados apresentados. Este tipo de problemas ocorre sobretudo nas zonas menos profundas e nos locais de rebentação da onda, em que as sondas resistivas e a sonda ADV por momentos estarão afectadas por bolhas de ar e períodos de ausência de contacto com a água. Contudo a amostra dos resultados indica que os dados medidos apresentam qualidade suficiente para retirar conclusões para o estudo proposto.

Este tipo de estudo é indispensável para melhor compreender os fenómenos relativos à rebentação das ondas em praias e zonas costeiras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento concedido através do projecto PTDC/ECM/67411/2006 e à CAPES / FCT (cooperação Brasil / Portugal) através do projecto "Construindo uma Base para Pesquisa e Conhecimento em Engenharia Costeira".

BIBLIOGRAFIA

- Camenen, B., M. Larson (2007). Predictive Formulas for Breaker Depth Index and Breaker Type. *Journal of Coastal Research*: Volume 23, Issue 4: pp. 1028 – 1041
- Dally, W. R., R. G. Dean, R. A. Dalrymple (1985). Wave height variation across beaches of arbitrary profile, *J. of Geophys. Res.*, Vol. 90, No. C6, Nov. 20, 11,917-11,927.
- Dean, R. G., R. A. Dalrymple (1993). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. World Scientific, Singapore.
- Dean, R. G., T. L. Walton (2009). Handbook of coastal and ocean engineering, *World Scientific*, Chapter 1.
- Goda, Y. (1970). A Synthesis of Breaking Indices, *Transactions of JSCE*, Vol.2, Part 2, 39-49 (em Japonês).
- Okamoto, T., C. J. Fortes, D.R. Basco (2010). Bore propagation speed at the termination of wave breaking, *Coastal Engineering*.
- Okamoto, T., C. J. Fortes, M. G. Neves (2009). Evaluation of nonlinear numerical model performance on the wave propagation over a bar-trough profile beach. *Journal of Coastal Research*, 56.
- Svendsen, I.A., P.A. Madsen, J.B. Hansen (1978). Wave characteristics in the surf zone", *Proc. of 16th ICCE*, ASCE, 520-539
- Svendsen, I.A., W. Qin, B.A. Ebersole (2003). Modelling waves and currents at the LSTF and other laboratory facilities. *Coastal Engineering*, 50, 19-45
- Trageser, J.H., H. Elwany (1990). The S4DW, an integrated solution to directional wave measurements. *Proc. IEEE Working Conf. on Current Measurement*, pp. 1-14
- Tsaia C.P., H. B. Chenb, H. H. Hwungc, M. J. Huang (2004). Examination of empirical formulas for wave shoaling and breaking on steep slopes. *Ocean Engineering*, Volume 32, Issues 3-4, Pages 469-483.
- Weggel, J. R. (1972). Maximum Breaker Height. *Journal of Waterways, Harbors, and Coastal Engineering Division*, ASCE, vol. 98,529-54.