

# Análise de imagem para estudo do emulsionamento de ar na rebentação de onda

Diogo R. C. B. Neves

*Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351.218443904,  
dneves@lnec.pt*

*CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa, +351. 218443904,  
dneves@lnec.pt*

António Alberto Pires Silva

*CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa, +351. 218418238,  
antonio.pires.silva@tecnico.ulisboa.pt*

Conceição Juana Espinosa Morais Fortes

*Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351.218443445, jfortes@lnec.pt*

Jorge Matos

*CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa, +351. 218418238,  
jorge.matos@tecnico.ulisboa.pt*

## RESUMO

Apresenta-se nesta comunicação uma técnica baseada em análise de imagem para a medição e caracterização da concentração de ar produzida no processo de rebentação de onda. Para este efeito, realizaram-se filmagens dos ensaios num canal de ondas no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), que reproduzem dois tipos de rebentação de onda, progressiva e mergulhante. A validação da técnica de análise de imagem é feita por dois métodos, o primeiro com recurso à injeção de bolhas de ar através de uma bomba de ar e o segundo com a medição pontual da concentração de ar com uma sonda de deteção de bolhas de ar. Os resultados, relativos aos dois tipos de rebentação de onda, mostram as concentrações de ar e a distribuição da pluma de bolhas de ar. As medições realizadas permitem quantificar e caracterizar o ar emulsionado no processo de rebentação de onda.

**Palavras-chave** – Análise de imagem, canal de ondas, modelação física, rebentação de onda, emulsionamento de ar.

## 1 INTRODUÇÃO

O fenómeno de rebentação de onda adquire uma relevância acrescida na dinâmica costeira por se constituir como o mais importante mecanismo de dissipação de energia das ondas marítimas junto à costa. O ar que é introduzido no processo de rebentação de onda sob a forma de bolhas de ar contribui para o efeito de atenuação das ondas (Chanson et al., 2002) (Hoque e Aoki, 2008).

Estudos recentes indicam que o emulsionamento de ar no processo de rebentação de onda não só contribui largamente para a dissipação de energia mas também para a transferência de energia de ondas curtas para ondas de longo período, modificando características das ondas e contribuindo para o transporte de sedimentos (Chanson et al., 2002).

O emulsionamento de ar no fenómeno de rebentação de onda ocorre quando a tensão tangencial turbulenta, responsável pela deformação da superfície livre, é maior do que a tensão superficial da água, e quando as forças turbulentas sobre o ar aprisionado são superiores às forças gravíticas, levando o ar a penetrar na interface ar-água e a ser arrastado para o interior do escoamento. Logo após a rebentação de onda, a pluma de bolhas de ar propaga-se dentro da coluna de água com uma determinada velocidade e direcção, elevando o nível de complexidade do fenómeno. A passagem do ar pela superfície livre provoca, durante um curto espaço de tempo, diferenças de compressibilidade na água. Após o processo de entrada de ar na coluna de água, as bolhas de água começam gradualmente a ascender à superfície enquanto se movimentam na direcção horizontal com velocidades inferiores à celeridade da onda.

Alguns autores desenvolveram modelos teóricos que afirmam que o ar que penetra na coluna líquida produz um aumento de energia potencial que é progressivamente dissipada durante o processo de ascensão do ar. Este processo complexo é acompanhado pelo trabalho termodinâmico efectuado pelas bolhas de ar (Hoque e Aoki, 2008).

Em vários trabalhos estabelecem também uma relação direta entre a quantidade de ar introduzida na coluna de água e a intensidade turbulenta, afirmando que a energia dissipada está relacionada com o fluxo turbulento ar-água (Neves et al., 2017) (Horikawa & Kuo, 1966) (Cox & Shin, 2003) (Mori & Kakuno, 2008).

Experimentalmente, diversos autores fizeram a quantificação detalhada do ar usando diversas técnicas de medição, como por exemplo, Chanson e Jaw-Fang (1997) que utilizaram técnicas de vídeo e Hoque e Aoki (2008) que utilizaram sondas de deteção de bolhas de ar. Em ambos os casos, foi estimada a energia dissipada devido ao ar introduzido na água.

Mais recentemente, Lim et al. (2015) fez medições de concentração de ar para ensaios de rebentação de onda em águas profundas utilizando técnicas de PIV (*Particle Image Velocimetry*) e BIV (*Bubble Image Velocimetry*), afirmando que a mistura ar-água introduz uma variação de densidade não desprezável para o cálculo das quantidades turbulentas.

Apesar dos trabalhos desenvolvidos neste tema, ainda não se conhecem, com precisão, as características e quantidades das bolhas de ar na zona de rebentação de onda. O fenómeno a estudar introduz dificuldades experimentais inerentes que limitam o detalhe das medições e que afetam o natural conhecimento do processo. O efeito das bolhas de ar na propagação e rebentação das ondas ainda não é claro para a comunidade científica.

Neste trabalho desenvolveu-se uma técnica de análise de imagem para a deteção e quantificação do ar introduzido durante a rebentação de onda. Através desta técnica é possível estimar a concentração de ar em cada secção da zona de rebentação de onda e estabelecer um paralelo com a elevação da superfície livre e o campo de velocidades.

A técnica aqui apresentada envolveu a captura de vídeo de alta definição com uma frequência de aquisição de 25 fps (*frames* por segundo) e uma velocidade de captura de 1/2000 s. Foi utilizado um canal de ondas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil com comprimento de 32.4 m para gerar dois tipos de rebentação de onda, mergulhante e progressiva. Desta forma, estabeleceu-se uma comparação entre os dois tipos de rebentação

com vista ao aprofundamento do conhecimento relativo à presença do ar na rebentação de onda.

Este trabalho explica também como foram realizadas as duas validações relativas à análise de imagem. A primeira incide na detecção de bolhas de ar injectadas através de uma bomba de ar, e a segunda validação faz uso de uma sonda de detecção de bolhas de ar, que permite detetar as bolhas de ar num determinado ponto durante a rebentação de onda.

A próxima secção apresenta a metodologia para processamento de imagem adotada para a detecção de bolhas de ar. Posteriormente, são mostradas as condições experimentais para a análise de imagem e as características para a geração dos dois tipos de rebentação de onda. Indica-se o procedimento efetuado para as duas validações e os resultados das concentrações de ar nas diversas secções de rebentação de onda. Por fim, são apresentadas as conclusões do trabalho.

## 2 METODOLOGIA DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM

A metodologia de processamento de imagem foi criada com vista a obter concentrações volumétricas de ar e características de bolhas de ar na zona de rebentação. Todo o processo foi definido para determinadas condições óptimas de luz e posicionamento das câmaras para a captura de imagem.

### 2.1 POSICIONAMENTO DAS CÂMARAS

A metodologia adotada no presente estudo exige que se utilizem duas câmaras para captura de imagem (Figura 1): i) uma situada lateralmente ao canal para se visualizar em perfil o fenómeno de rebentação de onda (Canon XF100 full HD), com a lente à mesma cota que o nível da água em repouso e direccionada na perpendicular ao eixo longitudinal do canal, a uma distância de 0.5 m da parede lateral de vidro (Figura 2). A distância da câmara lateral ao vidro foi definida no sentido de se ter numa distância admissível para a resolução da imagem e para se obter uma largura do campo de visão de 0.6 m, permitindo captar a altura da superfície livre na rebentação. Com base nesta largura de campo de visão foi estabelecida uma secção central de 0.2 m para executar a análise de imagem, de forma a evitar os efeitos de paralaxe; ii) uma segunda câmara submersa (GoPro Hero2), direccionada de frente para a rebentação (Figura 3) a uma profundidade média entre o fundo do canal e a superfície da água. Ambas as câmaras devem ter uma referenciação da imagem antes da aquisição.



Figura 1 – Câmara lateral ao canal (à esquerda) e câmara frontal para a onda para cobrir a secção transversal do canal (à direita).

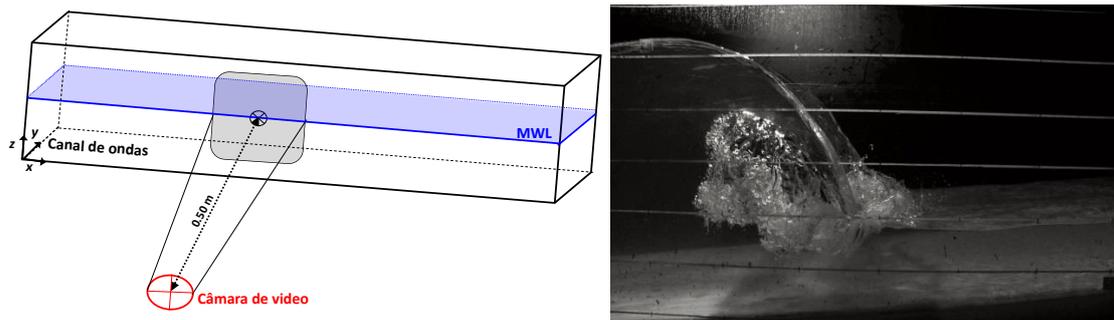


Figura 2 – Captura de imagem na zona lateral do canal: à esquerda - posicionamento da câmara; à direita - imagem exemplificativa.

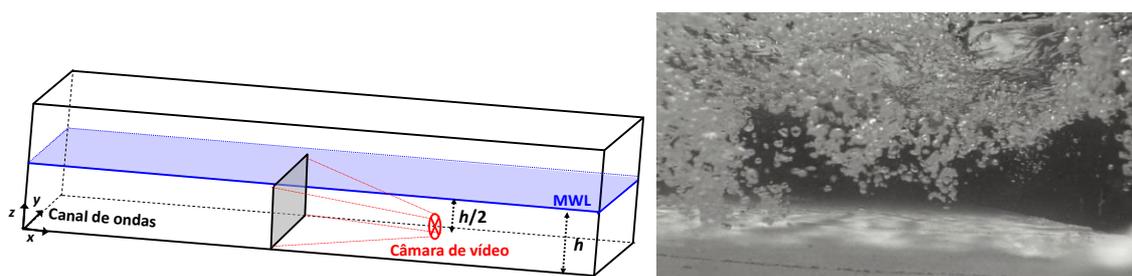


Figura 3 – Captura de imagem dentro do canal frontal para a onda: à esquerda - posicionamento da câmara; à direita - imagem exemplificativa.

## 2.2 CONDIÇÕES DE LUZ

As condições de luz foram optimizadas para se obterem imagens diretamente da câmara de filmar com níveis de contraste e luminosidade ideais para a identificação das bolhas de ar. Para tal, a parede lateral do canal na qual irá incidir a filmagem da câmara lateral foi pintada de preto para eliminar o ruído visual de fundo. O fundo do canal foi pintado com tinta branca brilhante de forma a provocar reflexão de luz e assim aumentar a intensidade de luz na coluna de água.

O foco de luz ficou localizado no topo do canal, a 0.2 m do eixo vertical centrado no centro da zona de filmagem e direcionado para o centro da zona de filmagem (Figura 4).

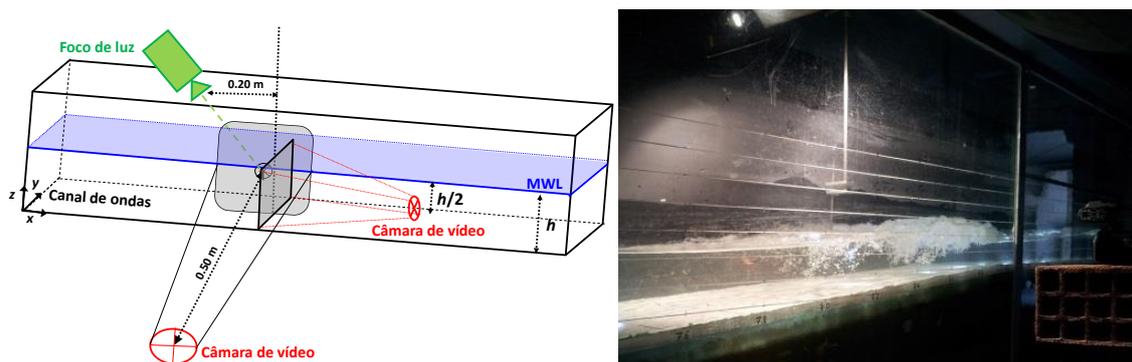


Figura 4 – Posicionamento do foco de luz

## 2.3 CÓDIGO DE ANÁLISE DE IMAGEM

Neste trabalho foi criado um código de análise de imagem em Labview® com o objetivo de detetar automaticamente as bolhas de ar durante a rebentação de onda. A metodologia de processamento de imagem é constituída por um conjunto de passos que vão desde a imagem capturada pela câmara de vídeo até à imagem final que apenas tem informação relativa às bolhas de ar. O código permite ao utilizador o processamento de apenas uma imagem ou de

várias imagens utilizando os mesmos parâmetros. No final do processamento o código permite obter informação sobre o número de bolhas, a dimensão de cada bolha, a localização das bolhas e a área total ocupada pelo ar.

Após a passagem do vídeo para o conjunto de imagens que compõem o vídeo (fotogramas - *frames*) aplica-se o código de análise de imagem para a deteção de bolhas de ar que consiste em dez passos:

- 1) passagem de uma imagem de 32 bit para 8 bit atribuindo uma intensidade de 1 a 255 dentro de uma escala de cinzas;
- 2) calibração da imagem aplicando coordenadas reais à imagem através da referência realizada durante a captura de vídeo;
- 3) aplicação de uma função exponencial de contraste que transforma cada pixel da imagem diminuindo o brilho e aumentando o contraste nas zonas mais iluminadas;
- 4) utilização de um filtro FFT (*Fast Fourier Transform*) para remover as baixas frequências de luz no sentido de reduzir padrões de intensidade de luz e enfatizar os detalhes da imagem;
- 5) modificação morfológica dos objetos através de uma função que deteta automaticamente os objetos brilhantes e preenche as zonas de vazios existentes no seu interior. Neste passo é aplicada uma função *kernel* na qual se aplica um coeficiente que indica o raio máximo de influência da função morfológica em torno de um objeto;
- 6) execução de uma transformação binária (0 ou 1) de acordo com a gama de intensidades de cinzas que foi escolhida para permanecer na imagem;
- 7) aplicação de uma função morfológica que dilata os objectos, aumentando num determinado raio as suas dimensões, aproximando-os das suas dimensões reais.
- 8) remoção dos objetos com um fator de alongamento superior a um determinado limite;
- 9) definição da secção de interesse da imagem ou do conjunto de imagens a estudar;
- 10) análise da área ocupada pelos objetos da imagem, criando um conjunto de ficheiros ASCII com a informação referente às bolhas de ar.

A Figura 5 mostra, com uma imagem exemplificativa, o processamento passo a passo a partir do 2º passo da análise efetuada.

Como se observa na Figura 5, após o processamento das imagens (passo nº 9) existem ainda alguns objetos a serem identificados na imagem. Observando com detalhe vê-se que esses objetos correspondem a gotas de água que estão localizadas junto ao vidro devido aos respingos da rebentação. Este tipo de dados pode ser facilmente retirado dos dados na fase de pós-processamento porque estes objetos estão em permanência nos mesmos locais da imagem durante algum tempo. Assim, para eliminar este ruído, poder-se-á aplicar um filtro que retire todos os objetos que estejam por algum tempo no mesmo local da imagem.

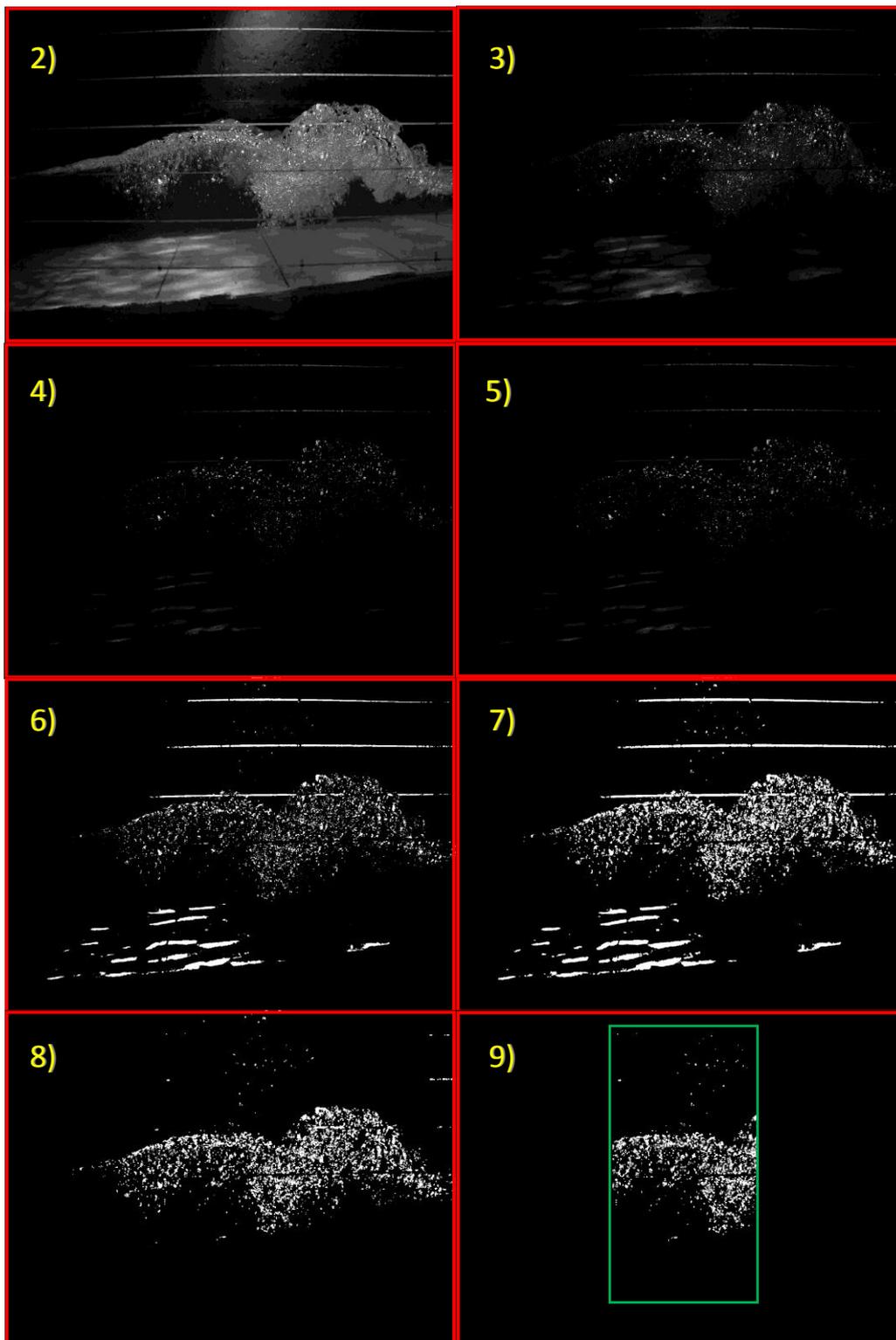


Figura 5 – Processamento de imagem a partir da 2ª operação.

## 2.4 PÓS- PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

Na fase de pós-processamento é necessário combinar os resultados da análise das duas imagens capturadas pela câmara lateral e pela câmara frontal, submersa.

O objetivo do uso das duas câmaras é a eliminação, ou redução, do erro associado à profundidade visual das imagens. É um facto que quando se observam as bolhas num determinado plano se desconhece a posição das bolhas no eixo perpendicular ao plano de

visão. Para fazer face a esse problema, foi desenvolvida uma metodologia que permite corrigir em parte o erro associado.

Primeiramente foi realizado um teste de sensibilidade ao código de análise de imagem onde, com a utilização de uma bomba de ar, foram injetadas bolhas de ar no fundo do canal ao longo da perpendicular ao plano de visão das duas câmaras, plano xy para a câmara lateral e plano yz para a câmara frontal submersa. O ar injetado pela bomba no fundo do canal foi medido com um cilindro volumétrico e comparado com os resultados da análise de imagem.

Na análise de sensibilidade do processamento das imagens relativamente à profundidade visual à qual eram detetadas as bolhas de ar, verificou-se que (Figura 6):

- com a câmara lateral, a análise de imagem apenas detetou bolhas de ar até cerca de 0.25 m em relação às quantidades de ar medidas no eixo perpendicular ao plano de visão;
- com a câmara frontal submersa, as bolhas foram detetadas até cerca de 0.30 m de distância do plano de visão.

Com efeito, para valores superiores das distâncias atrás referidas, a diferença média relativa dos volumes de ar estimados por ambas as técnicas é bastante elevada, indicando que as bolhas de ar não são praticamente detetáveis.

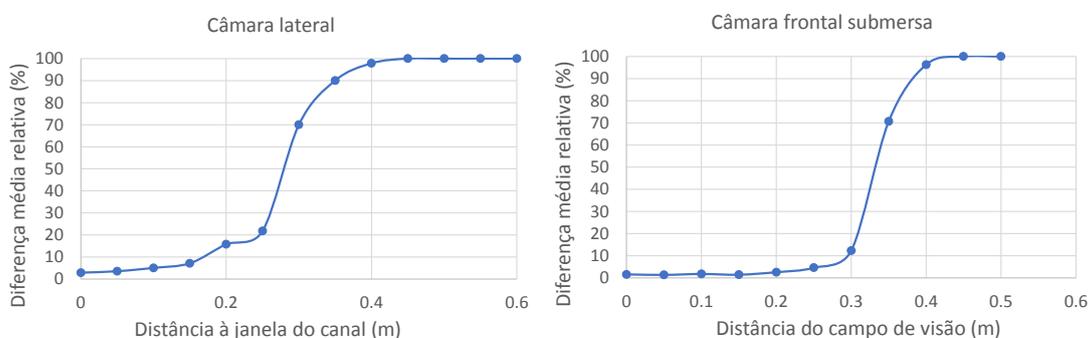


Figura 6 – Diferença média relativa entre as medições dos volumes de ar com o cilindro volumétrico e por meio de análise de imagem ao longo do eixo perpendicular ao campo de visão para as duas câmaras.

Com os resultados da análise de imagem da câmara submersa, na posição frontal às ondas, obtiveram-se resultados do número e dimensões das bolhas de ar ao longo da secção transversal do canal. Desta forma, foi possível estimar a concentração de ar numa dada secção do canal, ao longo de toda a sua largura.

### 3 CASO DE ESTUDO

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, num canal de ondas de 32.4 m de comprimento, onde foram geradas dois tipos de ondas regulares para criar duas rebentações de onda induzidas pelo fundo com características de rebentação progressiva e mergulhante. Foram medidas elevações da superfície livre, velocidades, e foram capturadas imagens para quantificar o ar emulsionado em cada rebentação. No presente artigo apresentam-se apenas os valores correspondentes às concentrações de ar.

#### 3.1 CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

O canal de ondas utilizado apresenta um batedor tipo pistão para a geração das ondas. O fundo é composto por um trecho inicial de 4.8 m para a geração de onda, a que se segue um trecho inicialmente horizontal, com 1.3 m de comprimento, e posteriormente inclinado, com 3.5 m de extensão e 0.4 m de altura. Em seguida apresenta um trecho horizontal de 11.2 m que é a referência do eixo vertical ( $z = 0$  m). Posteriormente tem início a rampa de declive 1:18 e comprimento de 9.0 m para a geração da rebentação de onda. Depois da rampa de rebentação

de onda existe um trecho de declive muito suave (1:136), com 9.53 m de comprimento que contém uma faixa de enrocamento no final do canal e tapetes para eliminar qualquer reflexão residual do fundo do canal. A profundidade da água é de 0.6 m na secção horizontal do canal, e 0.1 m no topo da rampa (Figura 7). A largura do canal na zona de rebentação de onda é de 0.6 m.

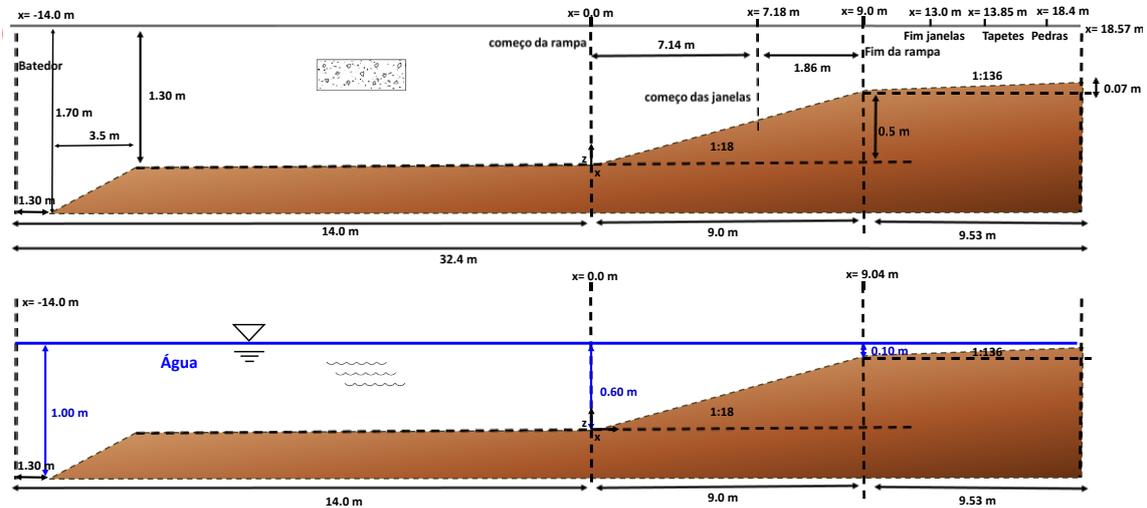


Figura 7 – Canal de ondas.

Foram gerados dois tipos de ondas regulares no sentido de produzir dois tipos de rebentação de onda, progressiva e mergulhante (Figura 8). As ondas regulares geradas que produziram uma rebentação progressiva têm um período  $T$  de 1.25 s e uma altura de onda  $H$  de 0.113 m, enquanto que para a rebentação mergulhante foi definido um período  $T$  de 4.5 s e altura  $H$  de 0.1 m. Estas corresponderam a números de Iribarren na rebentação de 0.239 (rebentação progressiva) e 0.859 (rebentação mergulhante). O número de Iribarren na rebentação indica as características da rebentação de acordo com Batjes (1974); se o valor for inferior a 0.4 a rebentação será progressiva, e se for superior a 0.4, estamos perante uma rebentação mergulhante. O número de Iribarren ( $\xi_b$ ) é dado por:

$$\xi_b = \frac{tg \theta}{\sqrt{H_b/L_o}} \quad (1)$$

onde  $tg \theta$  representa o declive do fundo,  $H_b$  a altura de onda na rebentação, e  $L_o$  o comprimento de onda em águas profundas.

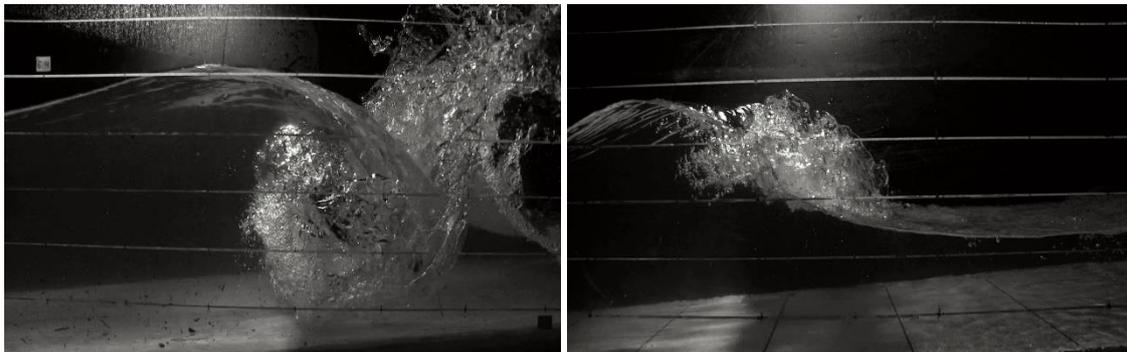


Figura 8 – Rebentação de onda mergulhante (esquerda) e progressiva (direita).

Para a onda de rebentação progressiva foi medida a elevação da superfície livre com sondas resistivas ao longo de todo o canal, para o trecho de rebentação. O intervalo espacial de medições ao longo do eixo longitudinal de canal foi de 0.1 m.

Foram também medidos perfis de velocidade com um ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) nas três componentes da velocidade ( $u$ ,  $v$  e  $w$ ) para o caso da onda de rebentação progressiva. Na secção de rebentação, o intervalo espacial entre cada medição ao longo do eixo longitudinal do canal foi de 0.2 m.

A câmara de filmar para captura de imagem na zona lateral do canal foi uma Canon XF100 full HD com uma frequência de aquisição de fotografias de 25 *fps* e uma velocidade de captura de 1/2000 s (Figura 1). O campo de visão em cada captura de vídeo cobriu 0.6 m da secção longitudinal do canal; contudo, apenas 0.2 m no centro do campo de visão foram utilizados no processamento de imagem para reduzir o erro relativo ao ângulo de paralaxe das imagens. Para cobrir toda a zona de rebentação foram capturados 7 campos de visão para o caso de rebentação progressiva (desde  $x = 8.2$  m até  $x = 9.8$  m) e 8 campos de visão para o caso de rebentação mergulhante (desde  $x = 8.2$  m até  $x = 10.0$  m) (Figura 9). Existe um vazio entre  $x = 9.0$  m e  $x = 9.2$  m devido à junção de duas janelas que apresenta uma viga na posição  $x = 9.1$  m.

A câmara de filmar submersa, que cobriu a secção transversal do canal, foi uma GoPro Hero2 com uma frequência de aquisição de fotografias de 30 *fps* e uma velocidade de captura de 1/2000 s (Figura 1). A câmara GoPro precisa de uma distância de 0.2 m para cobrir toda a largura do canal, por isso foi colocada em cada posição a 0.3 m jusante do centro do campo de visão da câmara de vídeo lateral ao canal para capturar a mesma secção. Assim, para câmara dentro de água foram adotadas também 7 posições para a rebentação progressiva e 8 posições para a rebentação mergulhante (Figura 9).

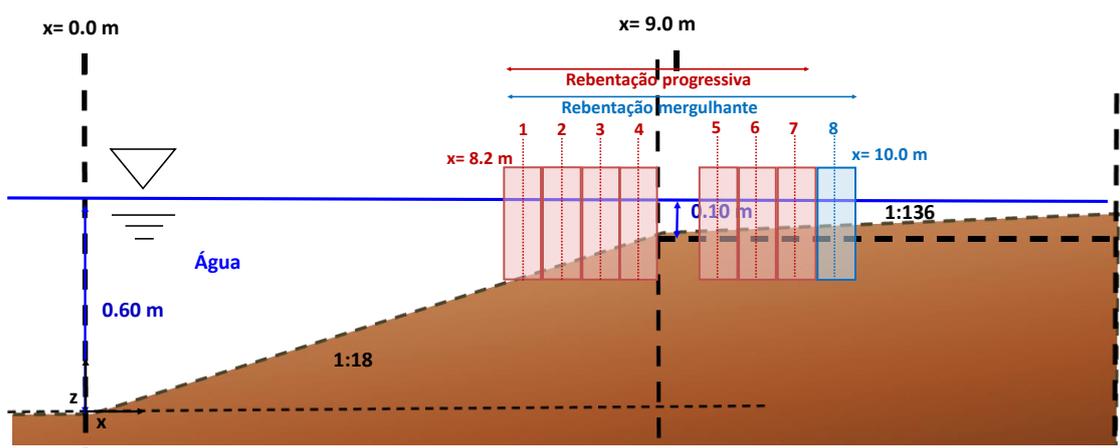


Figura 9 – Posições relativas ao campo de visão das câmaras de vídeo para a captura de imagem.

Em cada ensaio foram geradas 150 ondas regulares com as mesmas características, de forma a ser possível extrair médias das quantidades medidas com elevado grau de confiança.

## 4 VALIDAÇÃO E RESULTADOS

Para validar a metodologia de análise de imagem foram adotados dois procedimentos distintos. A primeira validação foi feita com recurso a uma bomba de ar, no qual era possível saber com precisão as quantidades de ar injetadas e transportadas pelas bolhas de ar. A segunda validação foi feita com recurso a uma sonda de condutividade que é bastante utilizada e validada para a medição e concentrações de ar em fluxos gravíticos tais como em estudos relativos a descarregadores de barragens. Os resultados das validações serão apresentados no final de cada secção.

### 4.1 VALIDAÇÃO COM BOMBA DE AR

Para executar esta validação, as câmaras para a captura de imagem foram instaladas nas mesmas condições da instalação experimental (secções 2 e 3).

O material que é necessário adicionar para executar esta validação inclui uma bomba de ar. Neste caso foi utilizada uma bomba de 15 W e uma capacidade máxima de 1200 l/h. Inclui também tubagem flexível para o transporte do ar, uma régua de medição de volume (cilindro volumétrico), e uma válvula para controlar o caudal de ar debitado pela bomba de ar.

A metodologia para esta validação pode ser resumida em quatro passos fundamentais:

- (i) proceder à colocação do conjunto bomba + tubagem + válvula de controlo de forma a debitar um caudal desejado para a injeção uniforme de bolhas de ar para obter uma taxa fixa no tempo de caudal de ar junto ao vidro do canal;
- (ii) colocar o cilindro volumétrico, preenchido com água, de forma a capturar todas as bolhas de ar debitadas pela bomba e registar através de vídeo a evolução da coluna de ar ao longo do tempo (Figura 10);
- (iii) retirar o cilindro volumétrico e filmar para a aquisição de imagens para efetuar a análise com o código de processamento de imagem (Figura 10);
- (iv) processar as imagens e comparar o volume da análise de imagem com a taxa de débito da bomba registada através das medições com o cilindro volumétrico.

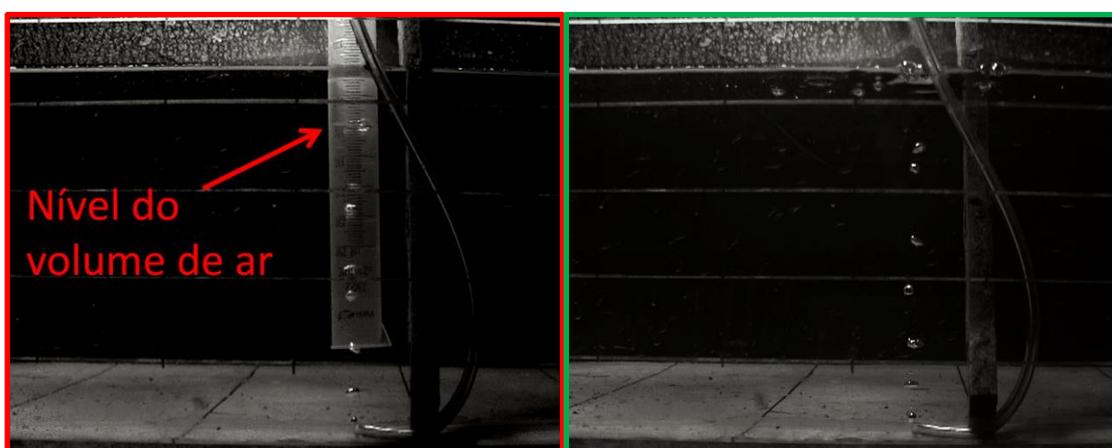


Figura 10 – Injeção de bolhas de ar. Medição de volume de ar com cilindro volumétrico (à esquerda); captura de imagem para processamento de imagem (à direita).

Após medição do volume de ar com o cilindro volumétrico e com o processamento de imagem efetuado ao longo de 50 s de injeção de bolhas de ar (excluindo um período inicial de estabilização de 5 s), obtiveram-se diferenças relativas inferiores a 5%, e em média cerca de 3 % (Figura 11).

Desta forma, considera-se que o erro associado ao processamento de imagem para a captura de bolhas de ar é suficientemente pequeno para efetuar a análise de imagem para a quantificação e caracterização de bolhas de ar.

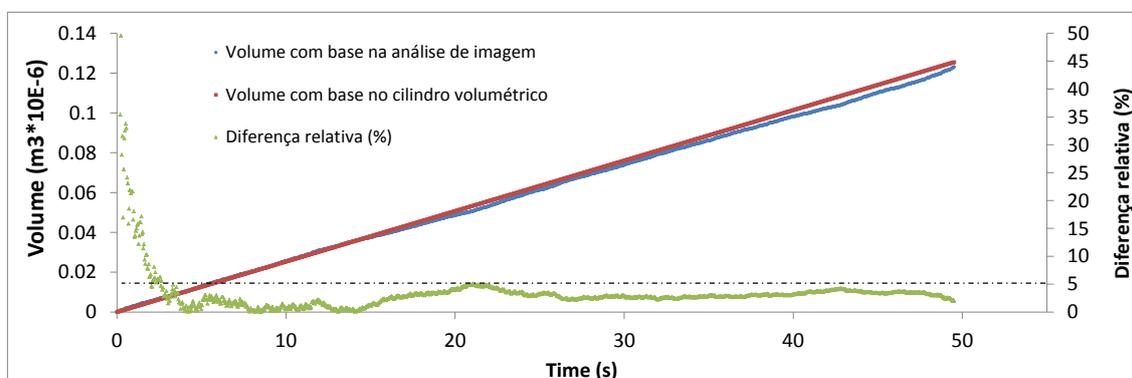


Figura 11 – Comparação do volume de ar medido com o cilindro volumétrico com os resultados provenientes da análise de imagem.

## 4.2 VALIDAÇÃO COM A SONDA DE DETEÇÃO DE BOLHAS DE AR

Optou-se por efetuar uma segunda validação do código de processamento de imagem, com recurso a uma sonda de deteção de bolhas de ar, utilizada em estudos anteriores, nomeadamente Matos (1999), Meireles (2004), Reis (2015) e Gomes (2017).

A sonda de deteção de bolhas de ar, de condutividade, funciona conjuntamente com um aparelho eletrónico para deteção de bolhas de ar (Figura 12) e com o *software* WinDaQ® apropriado para a análise e aquisição dos dados.

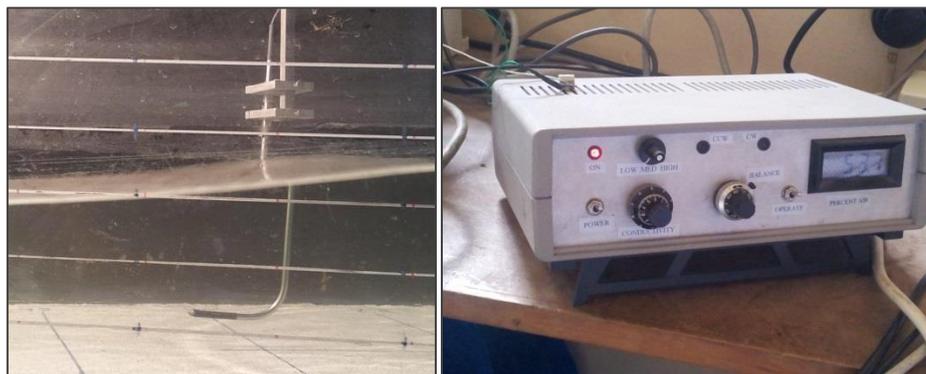


Figura 12 – Sonda (à esquerda) e aparelho eletrónico para a deteção das bolhas de ar (à direita).

O princípio de funcionamento da sonda baseia-se na diferença entre as resistências elétricas do ar e da água. Quando a sonda, constituída por dois condutores submetidos a uma tensão elétrica com uma resistência limitadora, é inserida no escoamento de emulsão ar-água, a resistência entre os condutores aumenta durante a passagem da bolha de ar pela extremidade da sonda, o que conduz ao aumento de tensão entre os elétrodos. Como a sonda é constituída por dois elétrodos detetores, a interrupção da corrente é feita no instante em que a bolha de ar atravessa a extremidade de qualquer elétrodo (ou de ambos, simultaneamente). Desta forma, a concentração de ar é definida como a percentagem do tempo em que a extremidade de cada elétrodo (ou de ambos, simultaneamente) está em contacto com o ar, relativamente ao tempo total de medição.

A sonda é constituída por dois elétrodos de platina, com 0.2 mm diâmetro, o que não permitirá detetar bolhas de ar de muito pequeno diâmetro, que não sejam perfuradas pelos elétrodos. A frequência de aquisição adotada foi de 5000 Hz, garantindo-se deste modo que a sonda permite detetar as bolhas de ar de pequena dimensão, compatíveis com a perfuração.

A Figura 13 ilustra um sinal obtido com a sonda de deteção de bolhas de ar. O gráfico de cima representa a série temporal de tensão adquirida pela sonda entre 70 e 130 s, onde se nota a presença de vários picos relativos à passagem de bolhas de ar pela extremidade da sonda. No gráfico em baixo observa-se a deteção de duas bolhas de ar.

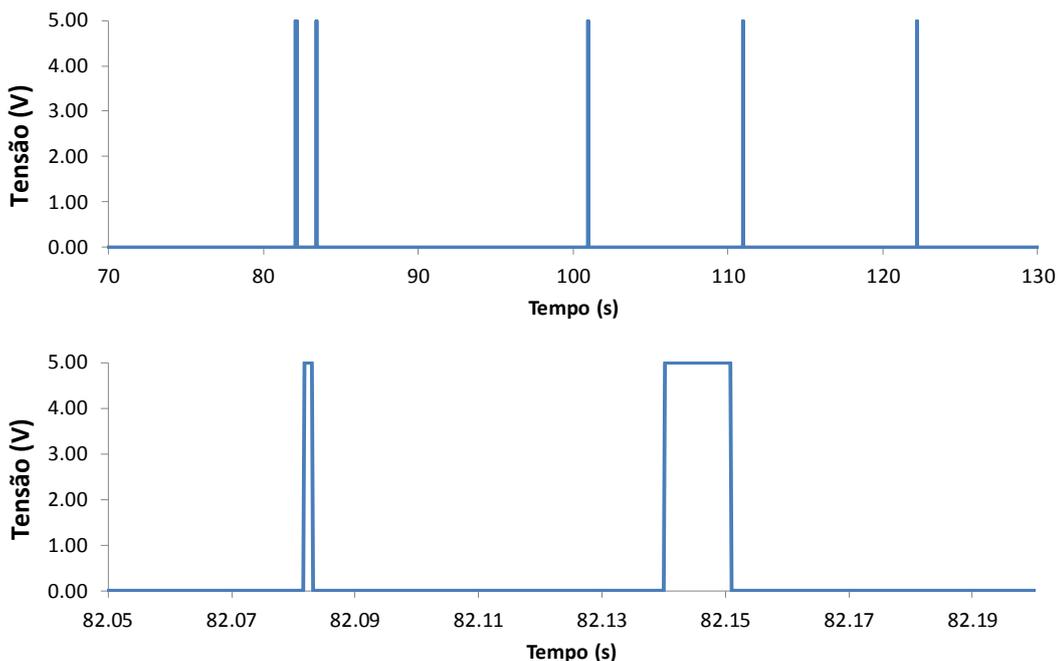


Figura 13 – Sinal exemplificativo da sonda de detecção de bolha de ar.

A Figura 14 indica as posições adotadas para as medições com a sonda de detecção de bolha de ar. As posições foram definidas em concordância com a captura de imagem para que se estabeleçam comparações.

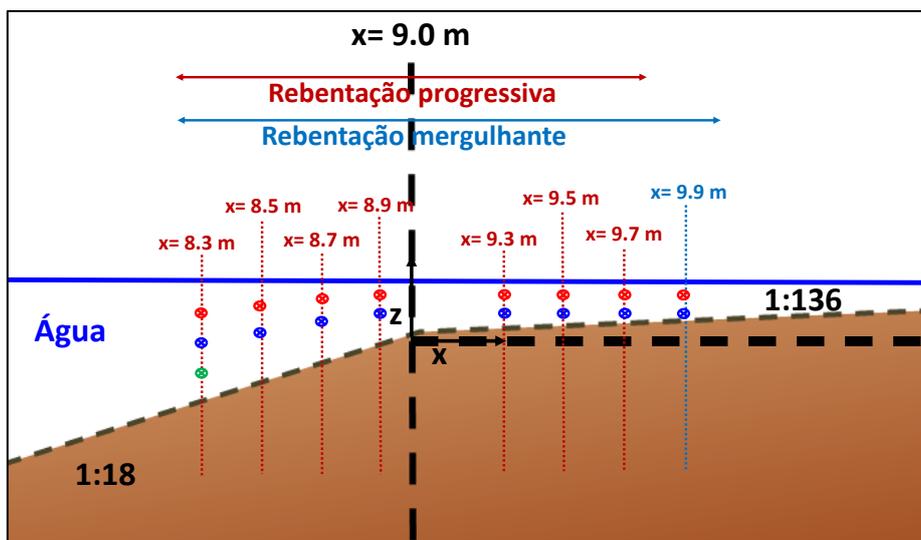


Figura 14 – Posições para aquisição com a sonda de detecção de bolha de ar.

A sonda de ar foi colocada nas posições indicadas acima, a 0.1 m de distância da parede de vidro. Desta forma, a análise de vídeo é capaz de detetar as bolhas de ar que atravessam a sonda de detecção de bolha de ar.

A aquisição de vídeo com as duas câmaras para a captura das imagens foi feita com a sonda de ar a adquirir em simultâneo de forma a ter no mesmo ensaio a aquisição com a sonda de detecção de bolha de ar e as imagens para a análise de vídeo. Para representar os dados retirados da sonda de detecção de bolha de ar, a análise das imagens provenientes do vídeo foi feita sobre o valor do píxel contíguo ao píxel representativo da ponta da sonda de detecção de bolhas de ar, como indica a Figura 15.

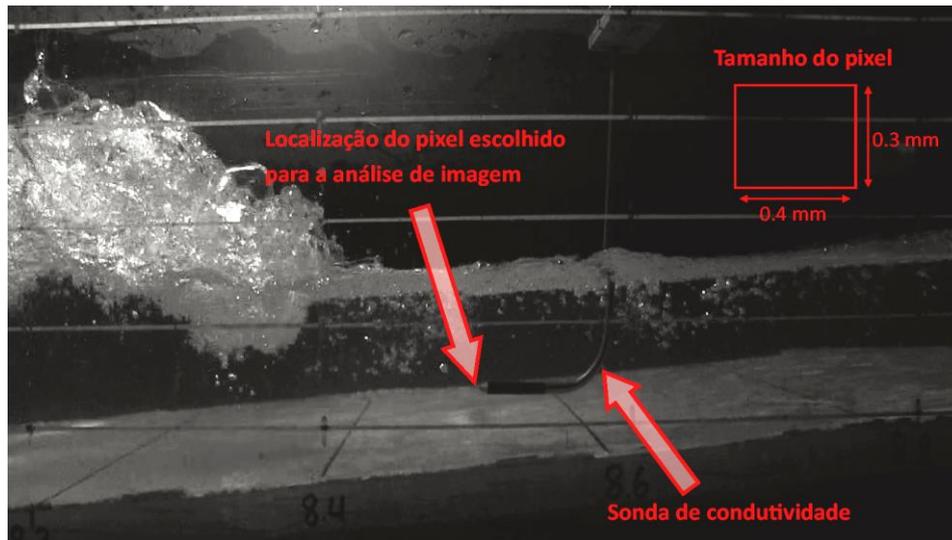


Figura 15 – Localização e dimensões reais do píxel contíguo à ponta da sonda de detecção de bolhas de ar para a análise de imagem.

Após a aquisição com a sonda de detecção de bolhas de ar e após a análise de percentagem do número de bolhas médio em cada onda, ou seja a concentração do ar média por onda, deve-se ainda corrigir a concentração obtida aplicando a curva de pseudo-calibração da sonda proposta por Meireles (2004) (Equação 2) em que  $C$  representa concentração:

$$C_{calibrador} = 0.1086C_{sonda}^3 + 0.9056C_{sonda}^{1/2} \quad (2)$$

Como o objetivo foi o de obter um valor pontual da concentração de ar em  $xyz$ , a aquisição de imagem com a câmara que capta a secção transversal do canal no interior da coluna de água tem, neste caso, o objetivo de calcular o número médio de bolhas  $N_b$  na cota do pixel estudado até uma distância de 0.25 m da janela do canal, para posteriormente dividir concentração obtida no pixel da imagem capturada pela câmara lateral  $C_{lateral}$  pelo número médio de bolhas  $N_b$  à cota do pixel no eixo transversal do canal (Equação 3).

$$C_{análise\ de\ imagem\ no\ ponto} = \frac{C_{lateral}}{N_b} \quad (3)$$

Na Figura 16 apresenta-se um esquema que traduz a metodologia de cálculo da concentração de ar num ponto do espaço tridimensional com os resultados provenientes da análise de imagem.

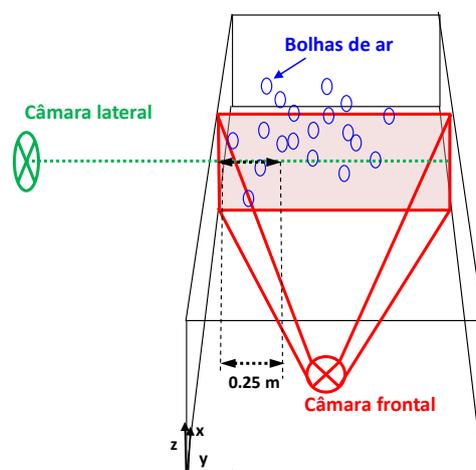


Figura 16 – Esquema indicativo da análise realizada de combinação de imagens das duas câmaras para análise da concentração pontual de ar.

Como este trabalho incide sobre a quantificação do ar que penetra no processo de rebentação de onda, optou-se por calcular a concentração de ar durante um período de onda. Desta forma, os resultados da concentração incidem sobre um período de onda, quer para a análise de dados provenientes da sonda de deteção de bolhas de ar, quer por aplicação da metodologia de análise de imagem.

Os resultados referentes às concentrações de ar em cada ponto de medição e a sua análise são apresentados nas Figuras 17 e 18, respetivamente para uma onda de rebentação progressiva e de rebentação mergulhante. Na Figura 17, mostra-se o gráfico que indica, para 150 ondas de cada ensaio, a média das concentrações de ar por onda para uma onda de rebentação progressiva. Como se observa naquela figura, as concentrações de ar são muito pequenas, e as diferenças entre os valores obtidos são significativas. A conclusão é expetável, uma vez que a utilização da sonda não se afigura adequada para valores de concentração de ar desta ordem de grandeza, ou seja, inferiores a cerca de 1-2%.

No caso de uma rebentação mergulhante (Figura 18), a concentração de ar é bastante mais elevada ao longo do trecho de rebentação, atingindo um máximo de cerca de 25 %. Nesta situação, os valores estimados a partir da análise de imagem são muito próximos dos obtidos com a sonda de deteção de bolhas de ar. A diferença relativa entre os resultados obtidos pelas técnicas de medição é, em média, cerca de 13%, para valores de concentração de ar estimados pela sonda superiores a 1%, e cerca de 9%, para valores da concentração de ar superiores a 5%. Nas Figuras 17 e 18 observa-se que os valores mais elevados de concentração de ar se encontram sensivelmente a meio da zona de rebentação, o que será de esperar, uma vez que corresponde à zona imediatamente a jusante do local de rebentação da onda.

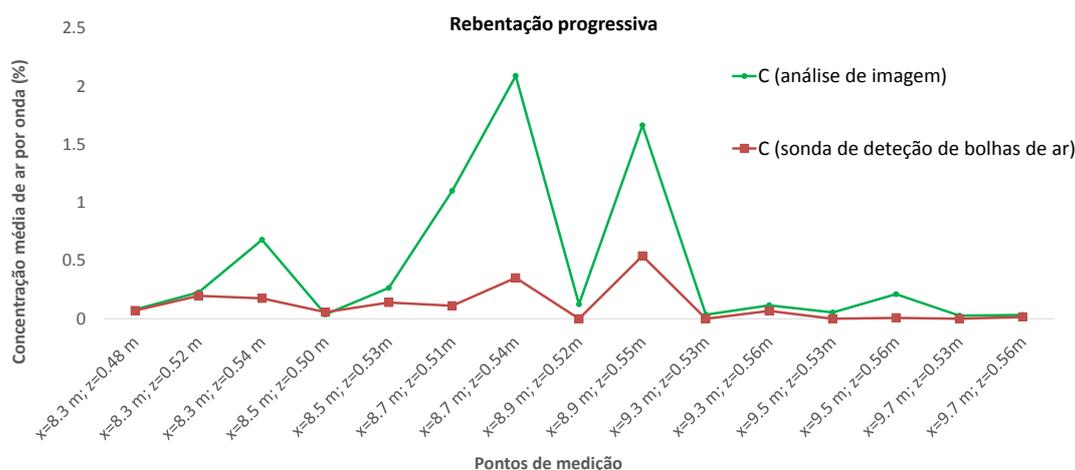


Figura 17 – Concentração média de ar por onda obtida com a sonda de deteção de bolhas de ar e mediante a análise de imagem para uma rebentação progressiva.

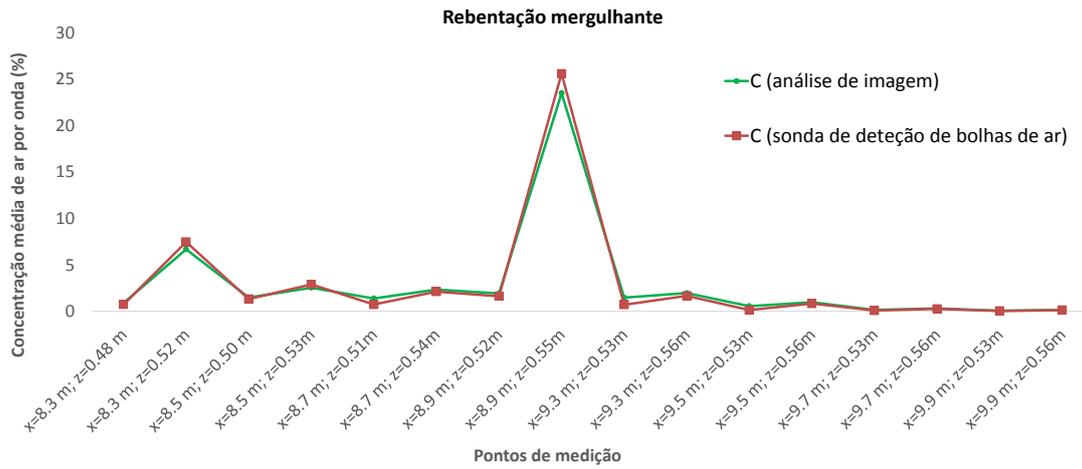


Figura 18 – Concentração média de ar por onda obtida com a sonda de detecção de bolhas de ar e mediante a análise de imagem para uma rebentação mergulhante.

Por forma a verificar a concordância estatística entre os dados da sonda de detecção de bolhas de ar e os resultados da análise de imagem, calculou-se o índice de concordância (*IC*) (Equação 4). Para o conjunto total de medições que abrange ambas as rebentações de onda, obteve-se um valor de *IC* igual a 0.9949, o que indica um nível elevado de concordância.

$$IC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2} \quad (4)$$

A Figura 19 mostra a distribuição espacial da concentração de ar para a rebentação progressiva mediante análise de imagem. Observam-se valores superiores de concentração de ar entre  $x = 8.5$  m e  $x = 9.0$  m, e valores praticamente nulos a jusante de  $x = 9.2$  m.

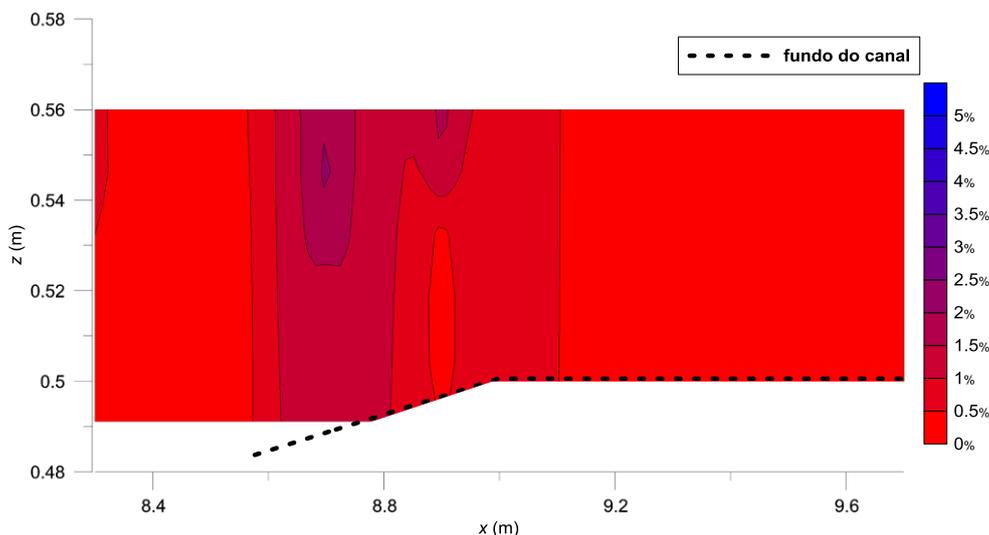


Figura 19 – Distribuição no plano *xz* do valor médio por onda da concentração de ar na rebentação progressiva.

A Figura 20 ilustra a distribuição espacial da concentração de ar para a rebentação mergulhante. Registam-se maiores concentrações de ar por onda, relativamente aos da onda progressiva. Em  $x = 8.3$  m, próximo da superfície livre, o colapso da onda dá origem a concentrações de ar superiores a 5%; contudo, é no topo da rampa que ocorre o máximo de concentração de ar. A jusante de  $x = 9.6$  m, as concentrações diminuem abruptamente até valores praticamente nulos.

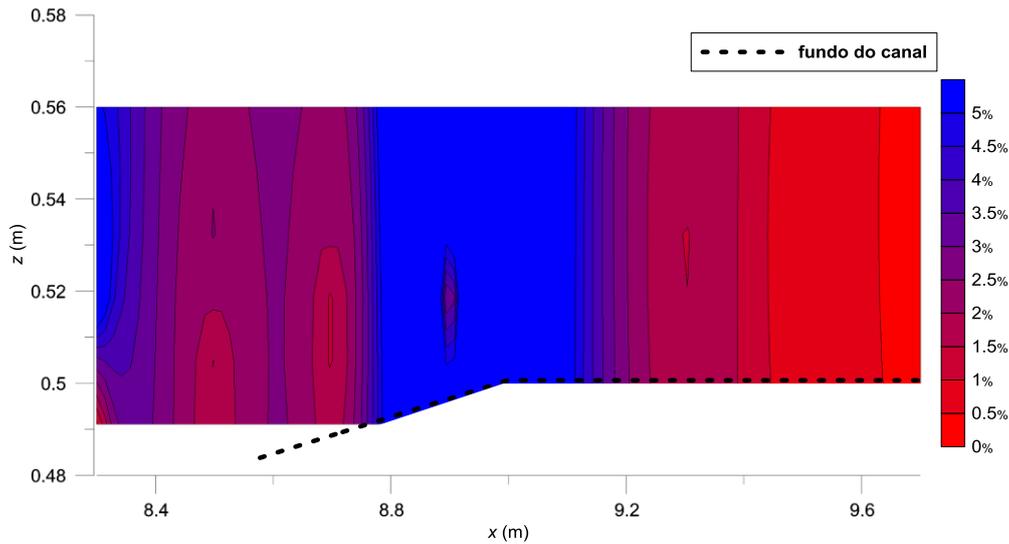


Figura 20 – Distribuição no plano xz do valor médio por onda da concentração de ar na rebentação mergulhante.

A Figura 21 indica a distribuição da percentagem de concentração de ar em cada quinto de período de onda para cada ponto de medição, para a rebentação progressiva. Observa-se que nas secções de maior concentração de ar, a presença do ar ocorre ao longo de todo o período da onda, enquanto nas secções mais a jusante e a montante da zona de rebentação de onda, a presença de ar ocorre apenas numa parte do período da onda.

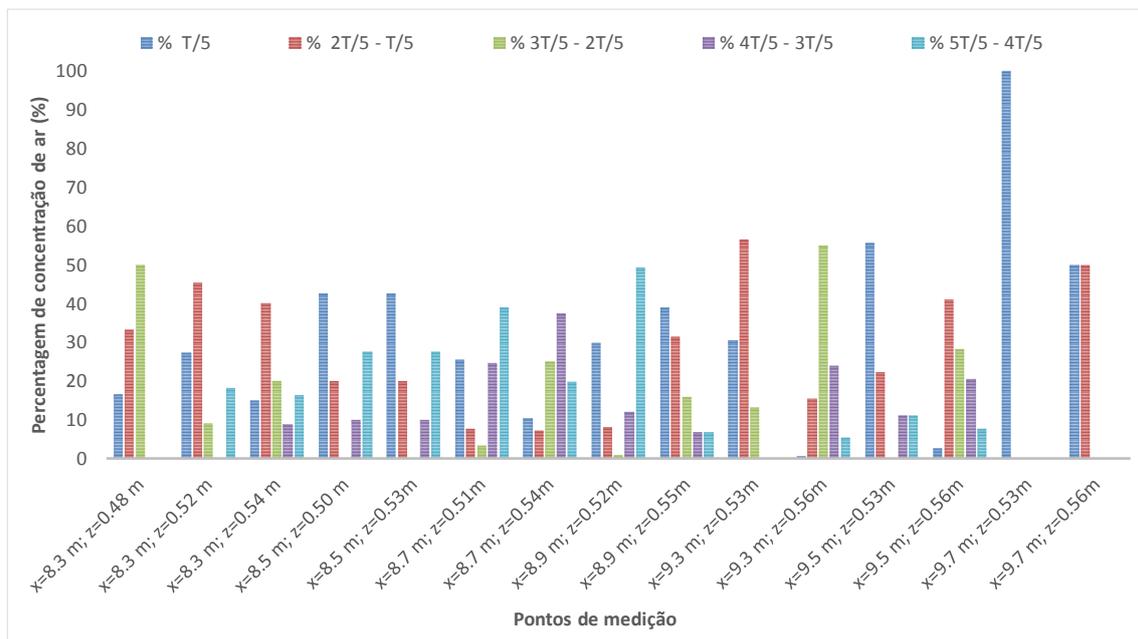


Figura 21 – Distribuição da percentagem de concentração de ar na rebentação progressiva em cada quinto de período de onda, para cada ponto de medição.

Na Figura 22, apresenta-se a distribuição da percentagem de concentração de ar em cada quinto de período de onda para cada ponto de medição, para a rebentação mergulhante. Verifica-se que a concentração de ar está muito mais concentrada numa parte do período da onda. A rebentação mergulhante é mais violenta e mais rápida. Esta rebentação é caracterizada pela penetração de grandes quantidades de ar num curto espaço de tempo, contrariamente à rebentação progressiva, onde a penetração das bolhas na água se vai

fazendo de forma gradual. Nas secções centrais de maior teor de ar emulsionado da rebentação mergulhante, verifica-se a presença de ar durante todo o período da onda.

Este tipo de análise de evolução da pluma de ar ao longo de um período de onda foi realizado também em (Blenkinsopp e Chaplin, 2011), que obteve similiarmente uma distribuição de ar ao longo de todo o período de onda na zona central, de maior emulsão de ar, enquanto que na zona com menos ar emulsionado obteve uma distribuição parcial.

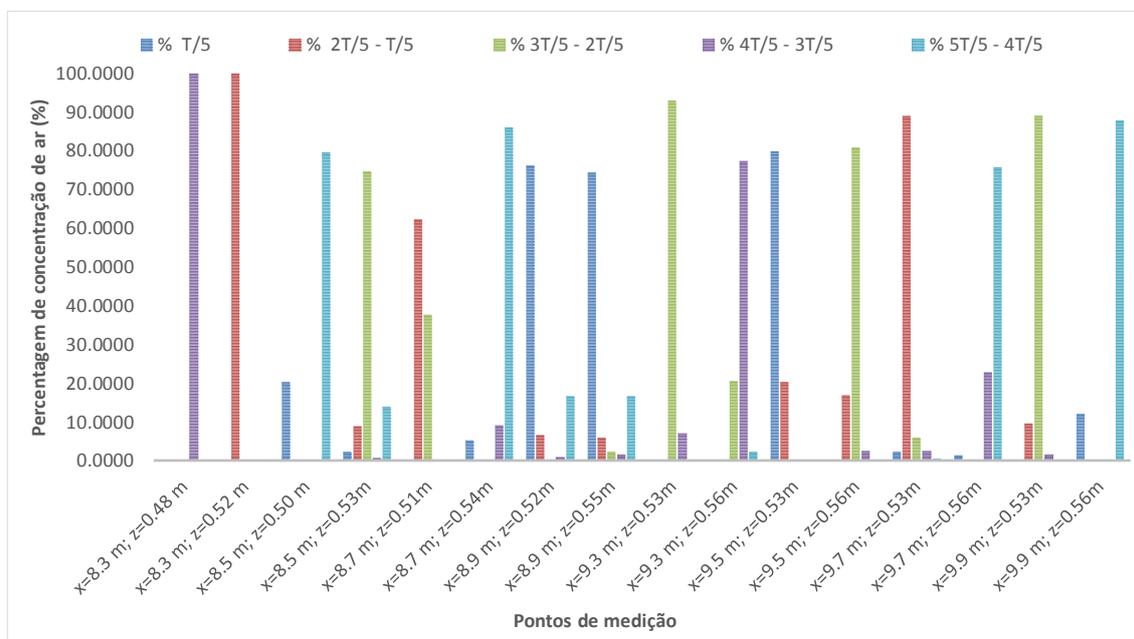


Figura 22 – Distribuição da percentagem de concentração de ar na rebentação mergulhante em cada quinto de período de onda, para cada ponto de medição.

## 5 CONCLUSÕES

O trabalho aqui apresentado avalia o desempenho de um código de análise de imagem para a quantificação e caracterização do ar emulsionado no processo de rebentação de onda.

Foram apresentadas duas metodologias para a validação do método de análise de imagem. A primeira validação fez-se com recurso à injeção de bolhas de ar através de uma bomba de ar, verificando-se uma diferença relativa média de 3% em relação aos valores medidos experimentalmente com o cilindro volumétrico. Foi também apresentada uma validação com uma sonda de deteção de bolhas de ar, aplicada à situação de rebentação mergulhante, onde se obtiveram diferenças relativas em média de 13 %, para concentrações de ar superiores a 1 %. O método de análise de imagem afigura-se assim adequado para a quantificação e caracterização do teor de ar emulsionado.

Foram apresentados resultados de concentração de ar para os casos de rebentação de onda progressiva e mergulhante. Na zona da rebentação, os resultados do valor médio por onda da concentração de ar são mais elevados para a rebentação mergulhante, sendo mais concentrados no tempo quando comparados com os relativos à rebentação progressiva.

A rebentação progressiva evidencia uma rebentação mais suave, com a penetração do ar a ser feita durante a quase totalidade do período de onda, excetuando nas secções com menor concentração de ar.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Rogério Castilho Gomes o apoio concedido na montagem do equipamento de medição para a aquisição dos dados com a sonda de deteção de bolhas de ar.

O primeiro autor agradece à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) o financiamento através da bolsa de doutoramento SFRH/BD/52483/2014.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Batjes J. A. (1974). Surf Similarity. *Coastal Engineering Proceedings*, 14, 1–30.
- Blenkinsopp, C. E., & Chaplin, J. R. (2011). Void fraction measurements and scale effects in breaking waves in freshwater and seawater. *Coastal Engineering*, 58, 417–428.
- Chanson, H., Aoki, S., & Hoque, A. (2002). Scaling Bubble Entrainment And Dispersion In Vertical Circular Plunging Jet Flows : Freshwater Versus Seawater. In *Proc. 5th Intl Conf. On Hydrodynamics ICHD2002*.
- Chanson, H., & Jaw-Fang, L. (1997). Plunging jet characteristics of plunging breakers. *Coastal Engineering*, 31(1-4), 125–141.
- Cox, D. T., & Shin, S. (2003). Laboratory Measurements of Void Fraction and Turbulence in the Bore Region of Surf Zone Waves. *Journal of Engineering Mechanics*, 129, 1197–1205.
- Gomes, R. C. (2017) " Emulsionamento de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores de cheias em degraus com soleira em teclado de piano". Tese de Mestrado em Engenharia Civil, IST-UL, Lisboa.
- Hoque, A., & Aoki, S. (2008). Air entrainment and associated energy dissipation in steady and unsteady plunging jets at free surface. *Applied Ocean Research*, 30, 37–45.
- Horikawa, K., & Kuo, C.-T. (1966). A study on wave transformation inside surf zone. *Proc. 10th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Vol. 1*, 217–233.
- Lim, H. J., Chang, K.-A., Huang, Z.-C., & Byoungjoon Na. (2015). Experimental study on plunging breaking waves in deep water. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120, 1–43.
- Matos, J. (1999) "Emulsionamento de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus". Dissertação de Doutoramento, IST-UL, Lisboa.
- Meireles, I.O.C. (2004) " Caracterização do escoamento deslizante sobre turbilhões e energia específica residual em descarregadores e cheias em degraus" Tese de Mestrado em Engenharia Civil, IST-UL, Lisboa.
- Mori, N., & Kakuno, S. (2008). Aeration and bubble measurements of coastal breaking waves. *Fluid Dynamics Research*, 40, 616–626.
- Neves, D. R. C. B., Pires-Silva, A. A., Siebring, A. A., Fortes, C. J. E. M., & Matos, J. (2017). Air injection effect on wave propagation: experimental modelling. *Proc. Short Course on Applied Coastal Research, SCACR2017, Santander*.
- Reis, M. I. F. (2015). "Estudo experimental do escoamento em descarregadores de cheias em degraus com soleira em teclado de piano" Tese de Mestrado em Engenharia Civil, IST-UL, Lisboa.