

# UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM PARA A ANÁLISE DA INTERAÇÃO ONDA-ESTRUTURA EM MODELOS FÍSICOS *Applying Image Processing Techniques for the Wave-Structure Interaction Analysis in Physical Models*

HUGO GUEDES LOPES <sup>(1)</sup>, FRANCISCO TAVEIRA-PINTO <sup>(2)</sup>, FERNANDO VELOSO-GOMES <sup>(3)</sup>,  
JOSÉ CABRAL <sup>(4)</sup> e RAFAEL MOLINA-SÁNCHEZ <sup>(5)</sup>

<sup>(1)</sup> Estudante de Doutoramento, FEUP/IPVC,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, hglopes@fe.up.pt

<sup>(2)</sup> Professor Catedrático, FEUP  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, fpinto@fe.up.pt

<sup>(3)</sup> Professor Catedrático, FEUP  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, vgomes@fe.up.pt

<sup>(4)</sup> Bolseiro de Investigação, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, dec11019@fe.up.pt

<sup>(5)</sup> Professor Associado, a Universidade Politécnica de Madrid,  
c/ Profesor Aranguren, s/n 28040 - Madrid, Spain, rmolina@caminos.upm.es

## Resumo

A análise da interação onda-estrutura é tradicionalmente efetuada através do estudo da agitação nas imediações das estruturas, eventualmente com recurso à caracterização da transmissão e da reflexão.

No presente estudo essa interação é analisada com recurso a ferramentas de processamento de imagem, procurando caracterizar os campos de velocidades e o escoamento superficial na vizinhança de uma estrutura destacada de proteção a um quebramar de taludes. A análise é efetuada por aplicação de técnicas de PIV (*"Particle Image Velocimetry"* - Velocimetria por processamento de imagem) e de processamento de imagens vídeo (*ZEUS software* - Molina *et al.*, 2008). Estas técnicas evidenciam-se por permitirem a caracterização simultânea de um determinado parâmetro em toda a área de medição, em oposição às técnicas como a Anemometria Laser Doppler (Taveira Pinto, 2001; Neves, 2008) que apenas permite a medição ponto-a-ponto. No presente artigo são debatidos alguns resultados do estudo, e apresentadas as principais vantagens das metodologias utilizadas na análise de ensaios em modelo físico.

**Palavras-Chave:** Modelos físicos, estruturas costeiras, técnicas de processamento de imagem, quebramares destacados.

## Abstract

The wave-structure interaction analysis is traditionally made by studying the wave climate in the vicinity of the structures, eventually sustained with transmission and reflection characterization.

In the present study that interaction study is made by using image processing techniques, aiming to characterize the velocity fields, and the surface flow in the vicinity of a detached structure that protected a rubble mound breakwater. The analysis is made by applying PIV (*"Particle Image Velocimetry"*) and video image processing techniques (*ZEUS software* - Molina *et al.*, 2008). These techniques allow simultaneous characterization of a certain parameter in the whole field measured, by contrast of other techniques like Laser Doppler Anemometry (Taveira Pinto, 2001; Neves, 2008) that are single point measuring techniques. The present article discusses some results of the study, and presents the advantages of the methodologies used on the analysis of physical modeling tests.

**Keywords:** Physical models, coastal structures, image processing, detached breakwaters.

## 1. Introdução

A interação entre a agitação e as estruturas costeiras apresenta uma elevada complexidade, com um conjunto alargado de parâmetros intervenientes, o que dificulta a otimização das estruturas costeiras, sem a realização de ensaios em modelo reduzido.

Nas últimas décadas foram efetuados importantes avanços, recorrendo a ensaios em modelo físico, com vista à caracterização adequada de parâmetros fundamentais como a transmissão, a reflexão e o galgamento (Drei e Lamberti, 1999; Yamashiro *et al.*, 1999; Kriezi *et al.*, 1999; e Sanchez-Arcilla, 1999; Ilic *et al.*, 1999; Stamos *et al.*, 2001).

Foram desenvolvidos diversos projetos internacionais, dos quais se destacam o VOWS (2000), OPTICREST (2001), DELOS (2004) e o CLASH (2005), que melhoraram de forma considerável o conhecimento acerca do comportamento das estruturas costeiras. Ao nível da caracterização dos galgamentos o desenvolvimento de um manual europeu, EUROTOP (2007), compilou anteriores manuais (Besley, 1999; TAW, 2002; EAK, 2002), e apresentou novas contribuições que resultaram de alguns dos projetos anteriormente referidos.

No entanto, a generalidade das equações teóricas existentes foram desenvolvidas para estruturas de geometria “convencional”. O caso de estudo utilizado no presente trabalho, o quebramar norte do Porto de Leixões, possui uma geometria pouco convencional, e é constituído por um quebramar de taludes protegido parcialmente por um quebramar submerso, Figura 1.

No passado, a Técnica de Anemometria Laser-Doppler (Taveira Pinto, 2001) foi utilizada no Laboratório de Hidráulica da FEUP para analisar os campos de velocidades nas proximidades de quebramares destacados. Mais recentemente, os sistemas PIV (*Particle Image Velocimetry* - Velocimetria por Processamento de Imagem) emergiram e a sua utilização em escoamentos em superfície livre tornou-se possível (Cowen *et al.*, 2003; Watanabe *et al.*, 2006).

O presente trabalho pretende analisar o escoamento superficial e os campos de velocidade na vizinhança da estrutura, sendo apresentados no presente artigo alguns resultados preliminares, para apoiar a aplicabilidade das técnicas utilizadas, bem como divulgar o interesse da sua aplicação em registos previamente adquiridos.

## 2. Instalação Experimental

Os ensaios em modelo reduzido foram realizados no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da SHRHA-DEC da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O tanque de ondas tem 28 m de comprimento, 12 m de largura e uma profundidade de 1.2 m.

O sistema de geração de ondas é composto por 16 módulos individuais do tipo pistão, fabricados pela HR Wallingford. Este sistema permite gerar quer agitação regular, quer agitação irregular, Figura 2.

Para a realização dos ensaios bidimensionais do quebramar norte do porto de Leixões, foi construído no interior do tanque de ondas um canal lateral com 0.75 m de largura, Figura 2.

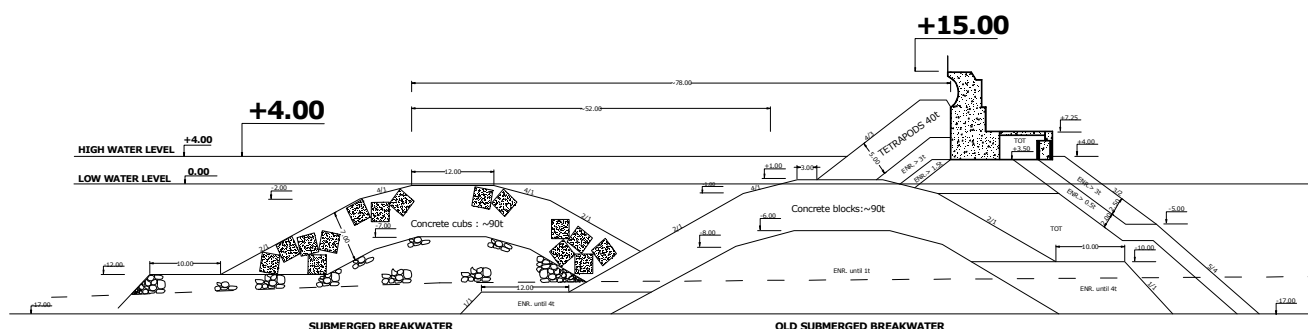


Figura 1. Secção transversal do quebramar Norte do porto de Leixões.



Figura 2. Sistema de geração de ondas (modelo HR Wallingford), e canal lateral.

## 2.1. Construção do modelo

O modelo do quebramar norte do Porto de Leixões tendo em consideração as dimensões do tanque de ondas e as limitações do equipamento de geração foi construído à escala 60, Figura 3.

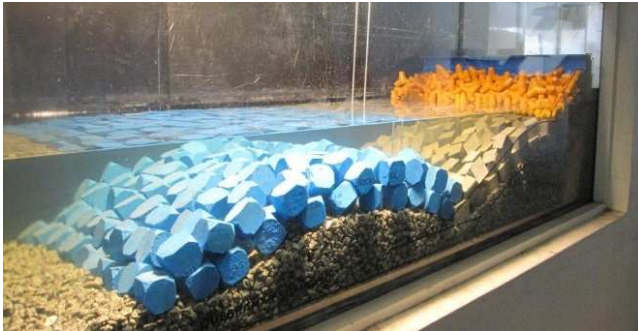


Figura 3. Modelo construído do quebramar norte do porto de Leixões.

## 2.2. Equipamento de medição

Para controlo e medição das condições de ensaio foram utilizadas sondas hidrodinâmicas e câmaras de vídeo, Figura 4.



Figura 4. Sondagens hidrodinâmicas e equipamento vídeo.

Foram colocadas quatro sondas hidrodinâmicas a barlar do quebramar destacado (para registo da agitação incidente e determinação da reflexão) e uma sonda entre a estrutura destacada e o quebramar principal (para análise da transmissão), Figura 4.

Para analisar o escoamento durante os ensaios e registar o movimento das partículas para a aplicação do PIV, foram utilizadas uma câmara GigE ethernet UI 5220 de 0.8 megapixéis, com uma taxa máxima de aquisição de 90 fotogramas por segundo e uma câmara GigE ethernet UI 5480 µEye de 5.0 megapixéis, com uma taxa máxima de aquisição de 14 fotogramas por segundo.

Em cada ensaio, foram adquiridos dois planos de câmara. Um na vizinhança do quebramar submerso e outro entre as duas estruturas. Isto de modo a ser possível analisar de forma detalhada o escoamento na zona entre as duas estruturas.

Registos adicionais (de maior detalhe) em pequenos trechos da estrutura foram adquiridos com a câmara de alta resolução (GigE ethernet UI 5480 µEye).

Em sistemas tradicionais de PIV e PTV é utilizada uma fonte luminosa laser para iluminação da área de interesse. Nos ensaios descritos no presente artigo, foi testada uma abordagem distinta, recorrendo a focos de halogéneo convencionais (2 focos de 300W).

A utilização de focos de halogénio segue o pressuposto inicial de definir uma metodologia de análise económica e com um reduzido número de pré-requisitos, que possa ser aplicada a quaisquer condições de ensaio em canal de ondas com rebentação.

## 3. Plano de Ensaios

O plano de ensaios foi definido tendo em consideração a agitação local e o objetivo último de analisar a interação entre o quebramar destacado e o quebramar de taludes principal. Nesse sentido, foram definidas quatro fases de ensaio, Figura 5, com diferentes configurações do quebramar destacado:

- Fase 1 - Quebramar destacado com cota de coroamento a +0.0m (Z.H.);
- Fase 2 - Quebramar destacado com cota de coroamento a +2.0m (Z.H.);
- Fase 3 - Quebramar destacado a uma distância do quebramar principal 50% superior;
- Fase 4 - Quebramar destacado com uma largura de coroamento 50% superior.

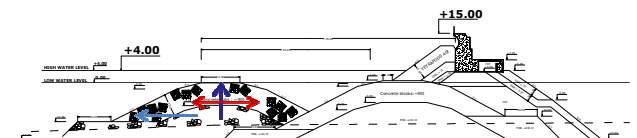


Figura 5. Configurações testadas.

Cada fase de ensaios foi testada quer com agitação regular (com alturas de onda entre 2 e 14 m (Z.H.) e períodos de onda entre 13 a 24 s), quer com agitação irregular (espectro JONSWAP com alturas de onda significativas compreendidas entre 1 e 7 m (Z.H.) e períodos de pico entre 13 e 24) e foram testados três níveis de maré (NM) distintos: +0.0 m (Z.H.), +2.0 m (Z.H.), e +4.0 m (Z.H.). Os valores apresentados referem-se a valores em protótipo. No decorrer dos ensaios, de acordo com os níveis de maré considerados, algumas das alturas de onda extremas não foram ensaiadas.

Foram adquiridos diversos planos de câmara consoante as características da agitação e a geometria da estrutura a testar, Figura 6. Para cada ensaio foram efetuados pelo menos dois registos vídeo em áreas distintas.

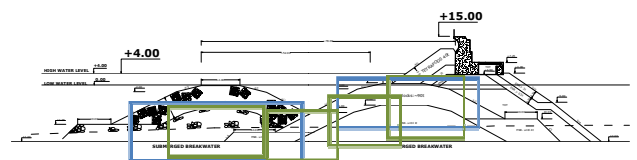


Figura 6. Planos de câmara definidos.

## 4. Resultados

No presente trabalho procuraram-se definir metodologias de análise que fossem independentes do processo de aquisição, permitindo deste modo analisar tanto vídeos novos como antigos. Apesar dessa preocupação, o rigor e qualidade dos resultados dependerá sempre da qualidade dos registos existentes, ao nível das condições de iluminação, do posicionamento da câmara, do contraste, da calibração e da correção das distorções.

Contudo, para um adequado processamento da informação, é necessário cumprir adequadamente um conjunto de tarefas. A calibração e a correção de aberrações é de extrema importância tendo em vista a obtenção de resultados quantitativos e não apenas qualitativos.

As tarefas a cumprir para garantir uma boa qualidade dos resultados são as seguintes:

- Iluminação e posicionamento da câmara - Boas condições de iluminação e um posicionamento otimizado da câmara podem melhorar o rigor dos resultados;
- Definição da área de interrogação - A escolha adequada da área a registar em vídeo é fundamental, uma vez que apenas estarão disponíveis resultados nas áreas registadas;
- Aquisição do vídeo - A aquisição pode ser efetuada com qualquer tipo de câmara, contudo a resolução e qualidade dos resultados será dependente da qualidade original do vídeo;
- Calibração e correção de aberrações - A correção de distorções e das aberrações das lentes constitui a primeira importante tarefa, tendo em vista a obtenção de resultados quantitativos (Figura 7);
- Processamento - Diversas análises podem ser efetuadas com recurso ao software ZEUS (UPM, 2011), sendo cinco delas apresentadas no presente artigo;
- Resultados qualitativos e quantitativos - Cumprindo as tarefas acima descritas é possível obter resultados quantitativos.

#### 4.1. Tratamentos de vídeos através do software ZEUS

Para a análise do escoamento superficial foi utilizado o *software* Zeus, em desenvolvimento na Universidade Politécnica de Madrid (UPM), composto por três módulos: aquisição, conversão e pós-processamento.

No presente trabalho foi utilizado apenas o módulo de pós-processamento, que inclui, para além da correção das distorções um conjunto alargado de funções. Apresenta-se, em seguida, uma descrição das funções utilizadas.

##### 4.1.1. Média

A análise da Média resulta numa imagem, com a mesma resolução do vídeo, em que a cor de cada um dos seus pixels é a cor média que esse pixel apresentou ao longo de todo o vídeo.

Quando aplicada aos vídeos do presente estudo, a análise da média permite determinar a posição mais frequente do nível da água durante o ensaio.

Esta análise pode ser feita no formato original (RGB) ou separadamente no R (vermelho), G (verde) e B (azul). Através da separação cromática é possível, em determinadas condições, realçar a linha da superfície livre. Durante os ensaios apresentados, tal evidência não foi confirmada.

##### 4.1.2. Variância

A análise da Variância resulta numa imagem, em tons de cinzento, com a mesma resolução do vídeo, em que a tonalidade de cada um dos seus pixels é tanto mais próxima do branco, quanto maior tiver sido a variância cromática que esse pixel apresentou ao longo de todo o vídeo.

Quando aplicada aos vídeos do presente estudo, a análise da variância permite obter informação acerca do dinamismo do escoamento de cada zona da imagem durante o ensaio, surgindo as zonas mais dinâmicas (ou de maior dissipação) a branco e as zonas menos dinâmicas em tons escuros.

##### 4.1.3 Exposição Temporal

A análise da Exposição Temporal resulta numa imagem, com a mesma resolução do vídeo, em que a cor de cada um dos seus pixels é a cor mais próxima do branco puro que esse pixel apresentou ao longo de todo o vídeo.

Quando aplicada aos vídeos do presente estudo, a análise da exposição temporal permite obter quantitativamente a envolvente do escoamento na duração total do ensaio.

Apresentam-se, de seguida, quatro exemplos comparativos de resultados obtidos através das análises exposição temporal, média e variância.

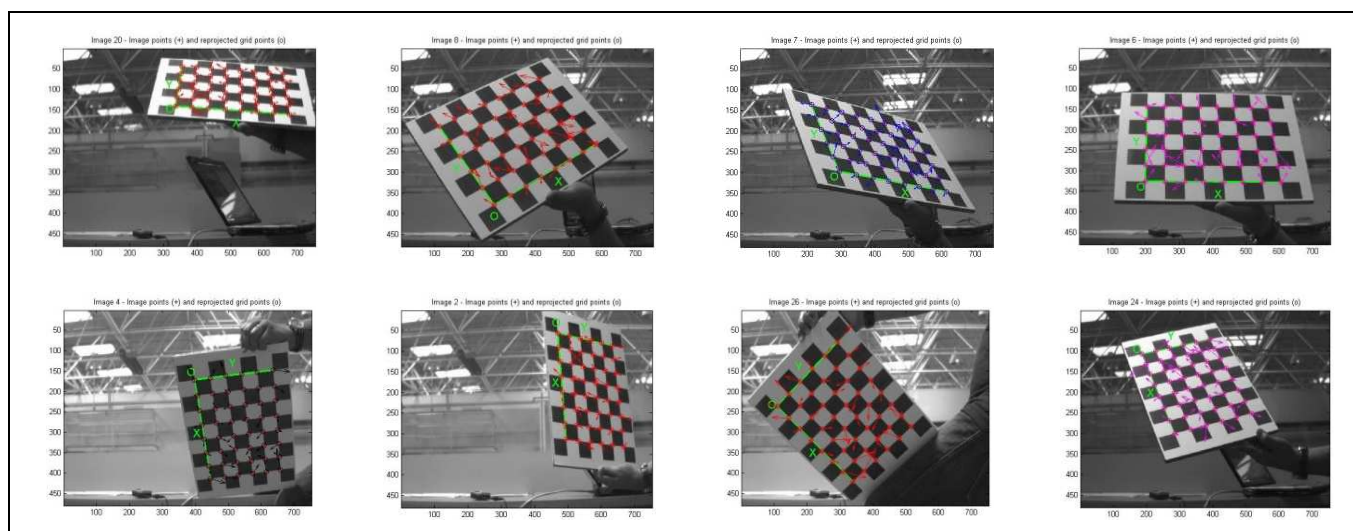


Figura 7. Exemplos de imagens adquiridas para a correcção de aberrações da lente.

1º Exemplo - Altura de onda crescente (Configuração Original, NM = 4.0 m, T=20 s).

No Quadro 1, comparam-se os resultados obtidos através das análises exposição temporal, média e variância em três testes onde se varia a altura de onda e se mantêm os restantes parâmetros (configuração do quebramar submerso, nível de maré e período da onda).

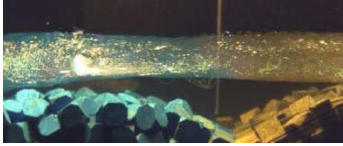
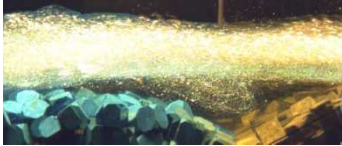
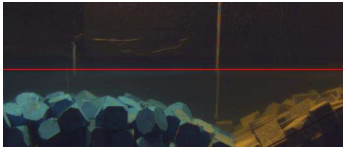
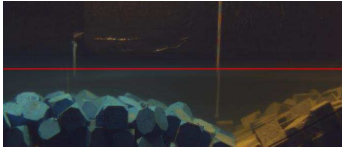
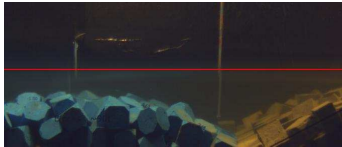
Note-se o claro aumento da envolvente do escoamento (análise da exposição temporal) e das zonas mais dinâmicas (análise da variância) com o aumento da altura de onda. Dado o elevado nível de maré, não se nota uma sobrelevação significativa (análise da média).

2º Exemplo - Período crescente (Configuração Original, NM = 4.0 m,  $H_s = 4$  m).

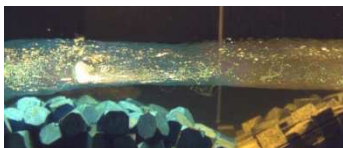
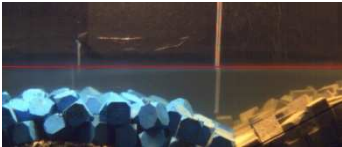
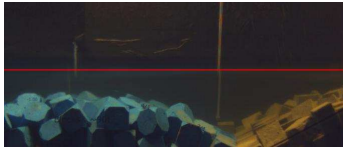
No Quadro 2, comparam-se os resultados obtidos através das análises exposição temporal, média e variância em três testes onde se varia o período da onda e se mantêm os restantes parâmetros (configuração do quebramar submerso, nível de maré e altura da onda).

Os resultados do Teste 124 são mais escuros devido à menor intensidade de iluminação durante a aquisição do vídeo original. Note-se que a envolvente do escoamento (análise da exposição temporal) e as zonas mais dinâmicas (análise da variância) pouco variam com o aumento do período da onda. Dado o elevado nível de maré, não se nota uma sobrelevação significativa (análise da média).

Quadro 1. Processamento da Exposição Temporal, Média e Variância para a Configuração Original, NM=4.0 m - Luz de Topo. Análise para períodos de pico ( $T_p$ ) constantes e alturas de onda significativas ( $H_s$ ) crescentes.

|                    | Teste 124 $H_s = 4$ m T = 20 s                                                      | Teste 126 $H_s = 6$ m T = 20 s                                                       | Teste 127 $H_s = 7$ m T = 20 s                                                        |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Exposição Temporal |    |    |    |
| Média              |   |   |   |
| Variância          |  |  |  |

Quadro 2. Processamento da Exposição Temporal, Média e Variância para a Configuração Original d=4.0m Luz de Topo. Análise para alturas de onda significativas ( $H_s$ ) constantes e períodos de pico ( $T_p$ ) crescentes.

|                    | Teste 114 $H_s = 4$ m T = 13 s                                                      | Teste 118 $H_s = 4$ m T = 15 s                                                       | Teste 124 $H_s = 4$ m T = 20 s                                                        |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Exposição Temporal |  |  |  |
| Média              |  |  |  |
| Variância          |  |  |  |

3º Exemplo – Variação da configuração do quebramar submerso I ( $H_s = 4$  m,  $T = 20$  s,  $NM = 4.0$  m).

No Quadro 3, comparam-se os resultados obtidos através das análises exposição temporal, média e variância em quatro testes onde se mantêm a onda incidente com 4 m de altura de onda e com um período de 20 s, e o nível de maré (NM) de +4.0m; e se varia a configuração do quebramar submerso.

Note-se que a envolvente do escoamento (análise da exposição temporal) e as zonas mais dinâmicas (análise da variância) pouco variam com a alteração da configuração do quebramar submerso.

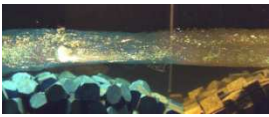
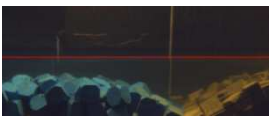
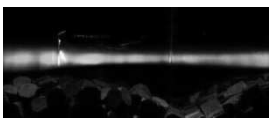
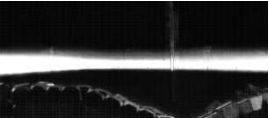
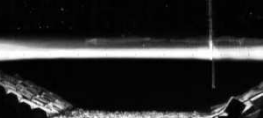
Dado o elevado nível de maré, não se nota sobrelevação significativa (análise da média).

4º Exemplo – Variação da configuração do quebramar submerso II ( $H_s = 6$  m,  $T = 20$  s,  $NM = 4.0$  m).

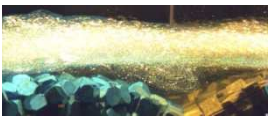
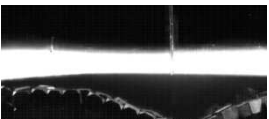
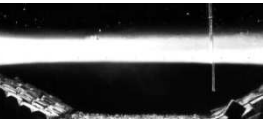
No Quadro 4, comparam-se os resultados obtidos através das análises exposição temporal, média e variância em quatro testes onde se mantêm a onda incidente com 6 m de altura de onda e com um período de 20 s, e o nível de maré de +4.0m; e se varia a configuração do quebramar submerso. Os resultados do Teste 126 são mais escuros devido a menor intensidade de iluminação durante a aquisição do vídeo original.

Note-se que a envolvente do escoamento (análise da exposição temporal) e as zonas mais dinâmicas (análise da variância) pouco variam com a alteração da configuração do quebramar submerso. Dado o elevado nível de maré, não se nota uma sobrelevação significativa (análise da média). Contudo, ao comparar este exemplo com o anterior, Quadro 3, nota-se claramente um aumento da envolvente do escoamento (análise da exposição temporal) e das zonas mais dinâmicas (análise da variância) com o aumento da altura de onda.

Quadro 3. Processamento da Exposição Temporal, Média e Variância para as diversas configurações do quebramar submerso. Análise para alturas de onda significativa de 4 m ( $H_s = 4$  m) e período de pico de 20 s ( $T_p = 20$  s) constantes.

|                    | Teste 124<br>$H_s = 4$ m $T = 20$ s                                                 | Teste 1636<br>$H_s = 4$ m $T = 20$ s                                                | Teste 2536<br>$H_s = 4$ m $T = 20$ s                                                 | Teste 3736<br>$H_s = 4$ m $T = 20$ s                                                  |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Exposição Temporal |   |   |   |   |
| Média              |  |  |  |  |
| Variância          |  |  |  |  |
|                    | Fase 1<br>Coroamento Original                                                       | Fase 3<br>Largura do Coroamento +50%                                                | Fase 2<br>Cota do Coroamento +50%                                                    | Fase 4<br>Distância do Coroamento +50%                                                |

Quadro 4. Processamento da Exposição Temporal, Média e Variância para as diversas configurações do quebramar submerso. Análise para uma altura de onda significativa de 6 m ( $H_s = 6$  m) e período de pico de 20 s ( $T_p = 20$  s) constantes.

|                    | Teste 126<br>$H_s = 6$ m $T = 20$ s                                                 | Teste 1638<br>$H_s = 6$ m $T = 20$ s                                                | Teste 2538<br>$H_s = 6$ m $T = 20$ s                                                 | Teste 3738<br>$H_s = 6$ m $T = 20$ s                                                  |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Exposição Temporal |  |  |  |  |
| Média              |  |  |  |  |
| Variância          |  |  |  |  |
|                    | Fase 1<br>Coroamento Original                                                       | Fase 3<br>Largura do Coroamento +50%                                                | Fase 2<br>Cota do Coroamento +50%                                                    | Fase 4<br>Distância do Coroamento +50%                                                |

#### 4.1.4. Time Stack e Edge Time Stack

O software Zeus, através da análise Time Stack combinada com a análise Edge Time Stack, fornece informação acerca da variação da superfície livre, num determinado alinhamento previamente definido, ao longo de todo o ensaio.

##### Time Stack

Na análise Time Stack selecionam-se, no vídeo, os alinhamentos verticais que se pretendem analisar, Figura 8. O resultado da análise é uma imagem cuja altura é o número de pixéis do alinhamento vertical previamente selecionado e a largura, em pixéis, o número de fotogramas que constituem o vídeo.

Nesta imagem, cada coluna vertical de  $n$  pixéis, corresponde a coluna de pixéis varridos pelo alinhamento no  $n$ -ésimo fotograma, Figuras 9 e 10.



Figura 8. Alinhamentos selecionados para a análise Time Stack (comuns aos Testes 702, 704 e 714).



Figura 9. Resultado da análise Time Stack para o alinhamento 3, do teste 702.

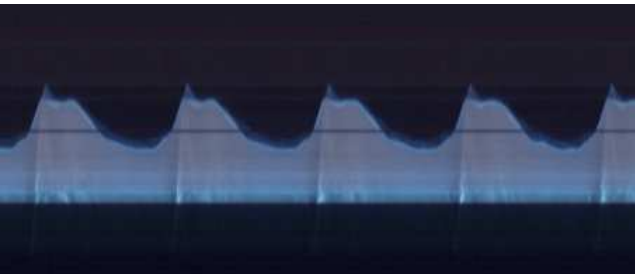


Figura 10. Resultado da análise Time Stack para o alinhamento 3 (ampliação), do teste 702.

##### Edge Time Stack

A imagem obtida pela análise Time Stack precisa de ser binarizada antes de se efetuar a análise Edge Time Stack, Figura 11, (isto é, todos os seus pixéis terão de ser brancos ou pretos) de forma a evidenciar a superfície livre (zona submersa a preto e zona emersa a branco).

Neste estudo as binarizações foram efetuadas com recurso ao programa de manipulação de imagens GNU - GIMP 2.6.

A análise Edge Time Stack delimita, através de uma linha, a fronteira da superfície livre na imagem obtida, na análise Time Stack, após binarização (Figura 11).

Esta análise fornece também as coordenadas de cada ponto da linha, o que permite traçar um gráfico da variação da superfície livre ao longo do tempo (Figura 10).

Para tal, é necessário introduzir dois parâmetros: a taxa de fotogramas por segundo do vídeo (define a escala do tempo) e o comprimento do alinhamento vertical previamente definido na análise Time Stack (define a escala do nível da superfície livre).



Figura 11. Resultado da análise Edge Time Stack para o alinhamento 3 do teste 702, após binarização da imagem (ampliação). Note-se o desaparecimento do pequeno pico de espuma no topo das cristas e a linha, a verde, que define o contorno da superfície livre.

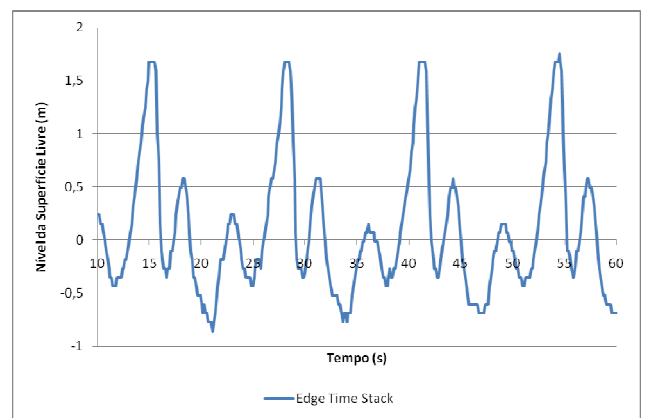


Figura 12. Gráfico do resultado da análise Edge Time Stack para o alinhamento 3 do teste 702, após tratamento da imagem.

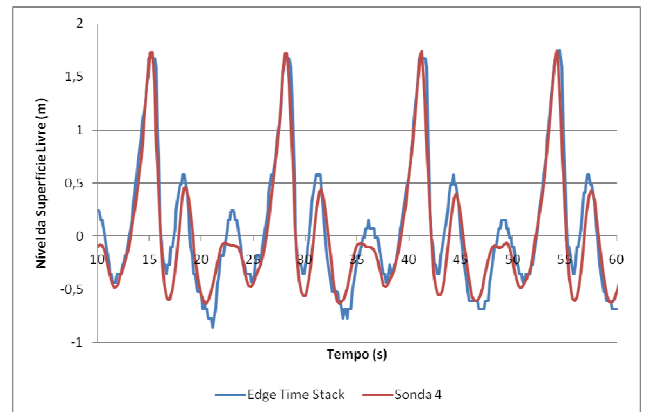


Figura 13. Comparação gráfica do resultado da análise Edge Time Stack para o alinhamento 3 do teste 702, com o registo da Sonda 4 (posicionada imediatamente a sotamar do alinhamento 3).

Torna-se interessante comparar o resultado da análise Edge Time Stack para o alinhamento 3, no Teste 702, com o registo da Sonda 4 que se encontra posicionada imediatamente a sotamar do alinhamento 3, Figura 13. Note-se a boa correlação, entre os dois, em relação ao período e à elevação da superfície livre.

De seguida, mostram-se quatro tabelas que caracterizam e comparam as ondas registadas pelas sondas e os resultados da análise Edge Time Stack para os três alinhamentos descritos anteriormente, Quadros 5 a 8.

Quadro 5. Caraterísticas dos testes 702, 704 e 714.

| Teste | Fase | Etapa | Nível de Maré | Iluminação | Valores Medidos em Protótipo<br>(a barlar da estrutura) |       |
|-------|------|-------|---------------|------------|---------------------------------------------------------|-------|
|       |      |       |               |            | H (m)                                                   | T (s) |
| 702   | 4    | 1     | 4             | Topo       | 2,7                                                     | 12,4  |
| 704   | 4    | 1     | 4             | Topo       | 6,0                                                     | 12,4  |
| 714   | 4    | 1     | 4             | Topo       | 9,3                                                     | 19,8  |

Quadro 6. Caraterísticas das ondas registadas na Sonda 4 e nos alinhamentos do *Edge Time Stack*, nos testes 702, 704 e 714.

| Teste | Alinhamento 1 |       | Alinhamento 2 |       | Alinhamento 3 |       | Sonda 4 |
|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------|
|       | H (m)         | T (s) | H (m)         | H (m) | H (m)         | T (s) | H (m)   |
| 702   | 2,6           | 13,0  | 3,0           | 2,3   | 2,4           | 13,0  | 2,3     |
| 704   | 5,5           | 13,0  | 5,7           | 2,8   | 3,3           | 13,0  | 2,8     |
| 714   | 11,1          | 20,0  | 5,2           | 3,6   | 4,8           | 20,0  | 3,6     |

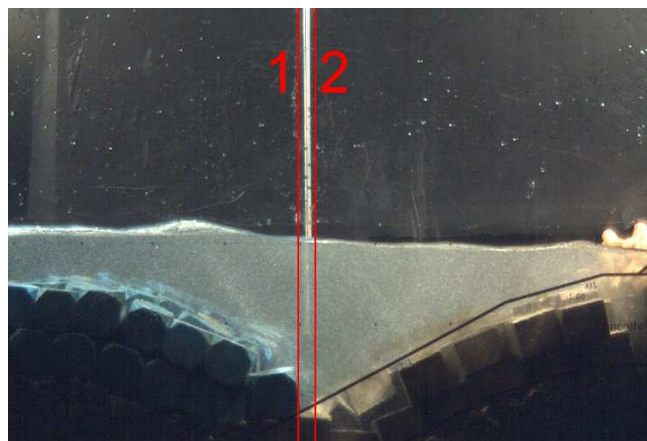
Quadro 7. Coeficientes de transmissão medidos com as sondas e com a análise *Edge Time Stack* nos testes 702, 704 e 714.

| Teste | $H_{\text{Sonda4}}/H_{\text{Onda a barlar da estrutura}}$ | $H_{\text{ETS3}}/H_{\text{ETS1}}$ | Desvio |
|-------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------|
| 702   | 0,85                                                      | 0,90                              | +5,9%  |
| 704   | 0,48                                                      | 0,60                              | +25,5% |
| 714   | 0,39                                                      | 0,44                              | +12,5% |

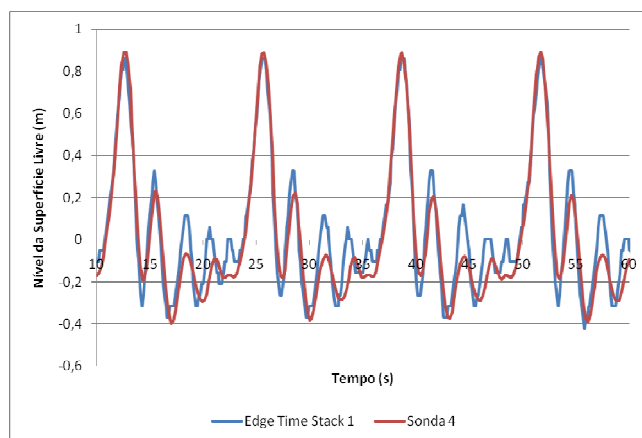
Quadro 8. Desvios registados entre as leituras das Sondas e as análises *Edge Time Stack* nos testes 702, 704 e 714.

| Teste | Desvios Registados entre:                                   |                                         |                                        |
|-------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|
|       | $H_{\text{ETS1}}$ e $H_{\text{Onda a barlar da estrutura}}$ | $H_{\text{ETS3}}$ e $H_{\text{Sonda4}}$ | $T_{\text{Sonda4}}$ e $T_{\text{ETS}}$ |
| 702   | -4,4%                                                       | +1,2%                                   | +5,1%                                  |
| 704   | -8,0%                                                       | +15,5%                                  | +4,6%                                  |
| 714   | +19,1%                                                      | +34,0%                                  | +1,0%                                  |

Com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre a correlação entre as leituras das sondas e os resultados da análise *Edge Time Stack*, efetuaram-se análises *Edge Time Stack* para os alinhamentos 1 e 2, Figura 14, do Teste 5801.

Figura 14. Alinhamentos selecionados para a análise *Time Stack* no teste 5801.

O alinhamento 1 encontra-se imediatamente a barlar da sonda 4 e o alinhamento 2 imediatamente a sotamar da mesma. Os resultados obtidos encontram-se nas Figuras 15 a 17.

Figura 15. Comparação gráfica do resultado da análise *Edge Time Stack* para o alinhamento 1 do teste 5801, com o registo da Sonda 4 (posicionada imediatamente a sotamar do alinhamento 1).

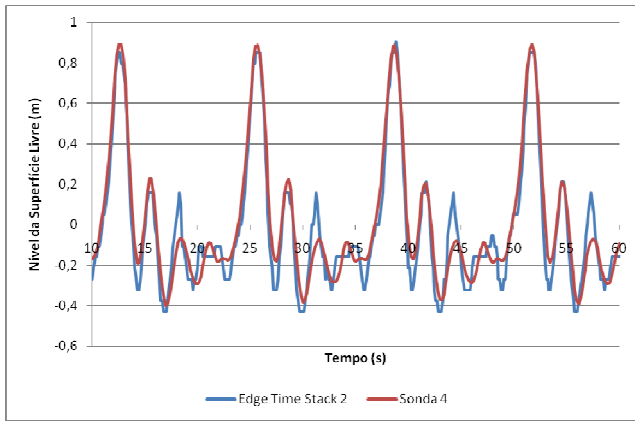


Figura 16. Comparação gráfica do resultado da análise *Edge Time Stack* para o alinhamento 2 do teste 5801, com o registro da Sonda 4 (posicionada imediatamente a barlar do alinhamento 2).

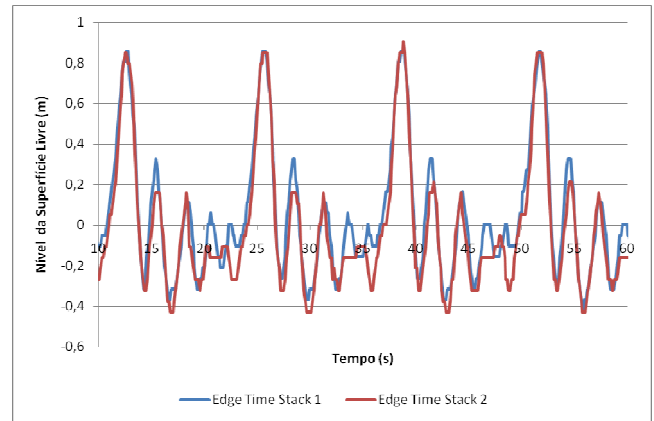


Figura 17. Comparação gráfica entre os resultados da análise *Edge Time Stack* para o alinhamento 1 e para o alinhamento 2 do teste 5801.

Quadro 9. Características do teste 5801.

| Teste | Fase | Etapa | Nível de Maré | Iluminação | Valores Medidos em Protótipo<br>(a barlar da estrutura) |       |
|-------|------|-------|---------------|------------|---------------------------------------------------------|-------|
|       |      |       |               |            | H (m)                                                   | T (s) |
| 5801  | 1    | 1     | 4             | Topo       | 1,6                                                     | 12,4  |

Quadro 10. Características das ondas registradas na Sonda 4 e nos alinhamentos do *Edge Time Stack* no teste 5810.

| Teste | Alinhamento 1 |       | Sonda 4 | Alinhamento 2 |       |
|-------|---------------|-------|---------|---------------|-------|
|       | H (m)         | T (s) | H (m)   | H (m)         | T (s) |
| 5801  | 1,2           | 13,0  | 1,1     | 1,3           | 13,0  |

Quadro 11. Desvios registados entre as leituras da Sonda 4 e as análises *Edge Time Stack* no teste 5801.

|       | Desvios Registados entre: |                           |                         |                          |
|-------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Teste | $H_{ETS1}$ e $H_{Sonda4}$ | $H_{ETS2}$ e $H_{Sonda4}$ | $H_{ETS1}$ e $H_{ETS2}$ | $T_{Sonda4}$ e $T_{ETS}$ |
| 5801  | +14,9%                    | +19,9%                    | -4,2%                   | +5,0%                    |

Os Quadros 9 a 11 caracterizam e comparam as ondas registradas pelas sondas e os resultados da análise *Edge Time Stack* para os dois alinhamentos descritos.

#### 4.1.5. Comentários acerca dos resultados obtidos na análise *Edge Time Stack*:

Após a análise dos resultados acima apresentados, retiram-se as seguintes conclusões preliminares relativas à análise *Edge Time Stack*:

- Determina relativamente bem os períodos das ondas testadas (desvios inferiores a 5%), Quadros 8 e 11;
- Carateriza igualmente bem as amplitudes máximas das ondas, Figuras 13 a 16, sobretudo para alturas de onda menores;
- Apresenta dificuldade em seguir a variação da superfície livre nas pequenas oscilações que se verificam nas cavas das ondas maiores.

É da opinião dos autores que os desvios verificados se devem sobretudo a:

- Dificuldade em delimitar o contorno da superfície livre durante a binarização da imagem resultante da análise *Time Stack* (a água a escorrer no vidro perturba o contraste entre a zona emersa e zona imersa);

- Condições de iluminação na aquisição dos vídeos não otimizadas para este tipo de análise (alguns reflexos perturbam igualmente o contraste entre a zona emersa e a zona imersa).

Apesar das dificuldades acima apresentadas, dada a facilidade com que, com este tipo de análise, se conseguem obter leituras da variação da superfície livre em qualquer alinhamento vertical da zona filmada e a relativa boa correlação dessas leituras com as leituras das sondas, considera-se que se trata de uma técnica com potencial para ser explorada e otimizada. A sua aplicação permitiria simplificar o processo de recolha de informação sobre as características da ondulação, sem introduzir perturbações localizadas no escoamento (como acontece com as sondas de nível utilizadas).

## 4.2. Análise dos campos de velocidades

A análise dos campos de velocidades representa uma metodologia alternativa para avaliar a eficiência hidrodinâmica de uma estrutura costeira.

Assim, procurou-se no presente trabalho caracterizar os campos de velocidade aplicando os princípios básicos do PIV (Raffel *et al.*, 2007).

Nesta componente do trabalho pretendia-se desenvolver uma metodologia que permitisse a análise dos campos de velocidades em registos vídeo, sem a utilização de fontes de iluminação laser, procurando deste modo facilitar a sua aplicação. Nesse sentido, manteve-se a instalação experimental descrita anteriormente, tendo-se apenas adicionado traçadores (*"seeding particles"*) ao fluido para permitir através de uma análise fotograma-a-fotograma seguir a trajetória das partículas.

Foram testados diversos traçadores (areia, farinhas, resinas). Os exemplos que se apresentam utilizaram uma resina, Pliolite, como traçador.

Apesar da simplicidade conceptual, são necessários diversos pré-tratamentos de imagem para permitir obter os campos de velocidades.

Em primeiro lugar, é necessário converter os registos vídeo em fotogramas e corrigir as distorções introduzidas pelas lentes das câmaras, Figura 18. Segue-se a correção dos níveis de cor das imagens com vista à melhoria do contraste entre as partículas traçadoras e o fluido, Figura 19. Após os tratamentos descritos, as imagens selecionadas em cada ensaio foram analisadas em *software* próprio, com vista à análise das velocidades das partículas no interior do fluido. O *software* selecionado para a análise PIV foi o PIVLAB (versão 1.2), um software de distribuição gratuita. A opção teve em consideração a ideia inicial de definir uma metodologia com um número reduzido de pré-requisitos.

As Figuras 20 a 28 apresentam alguns dos resultados obtidos com o processamento da informação no PIVLAB, nomeadamente os vetores de velocidade, a magnitude da velocidade, as componentes horizontal e vertical da velocidade, tensão tangencial, deformação, divergência, vórtices e vorticidade. Foram selecionados dois testes para ilustrar os resultados que se obtém do processamento, o primeiro com um plano de câmara que abrange a proximidade do quebramar submerso, e o segundo abrangendo a área entre os dois quebramares.

Importa referir que, na análise PIV, a dimensão, a densidade e o comportamento das partículas traçadoras no fluido condicionam a qualidade dos resultados. Também a resolução, a frequência de aquisição e as condições de iluminação são determinantes nos resultados.

Para além dos parâmetros anteriores, existe também influência do comportamento não puramente bidimensional do escoamento, isto é, o movimento das partículas traçadoras ao longo do plano perpendicular ao plano de câmara pode introduzir algumas distorções nos resultados.

A água a escorrer na superfície do vidro e os reflexos provocados pela superfície livre foram também efeitos identificados como potenciais responsáveis por algumas distorções nos resultados, em especial, próximo da linha de água.



Figura 18. Imagem antes e após a correção das distorções da lente.

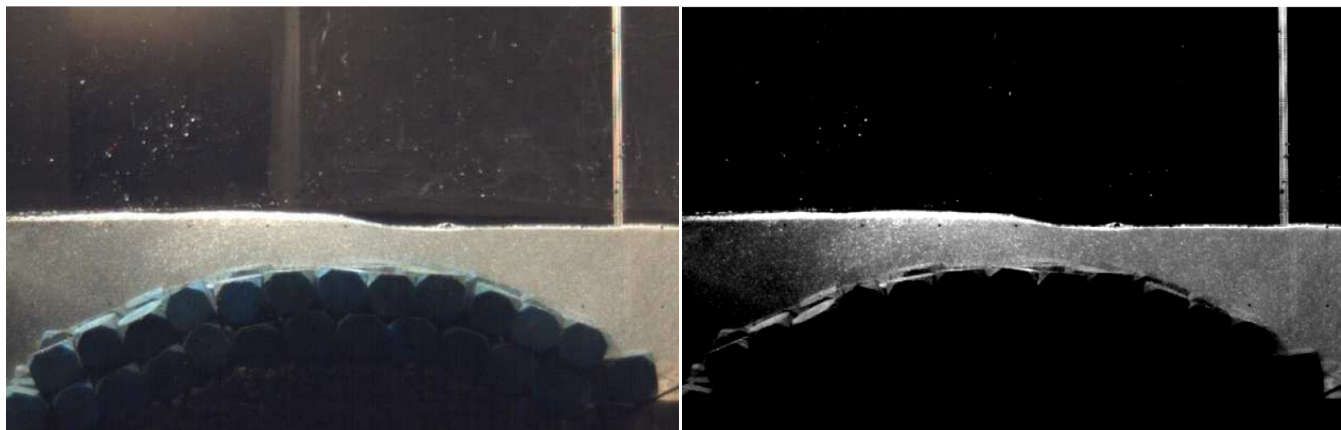


Figura 19. Imagem antes e após a correção dos níveis de cor das imagens.

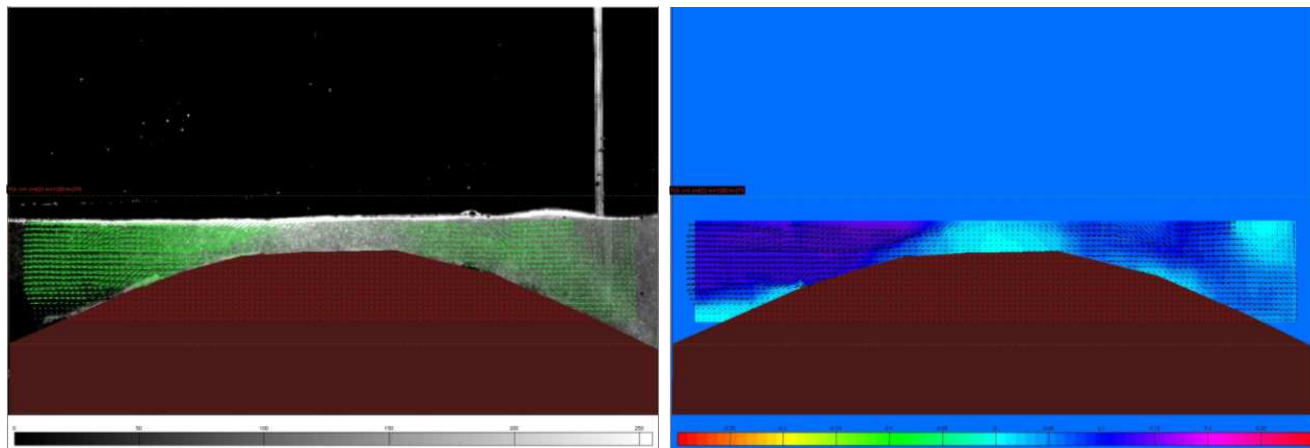


Figura 20. Vetores velocidade e magnitude da velocidade (teste 5701 – quebramar submerso – fotograma 76).

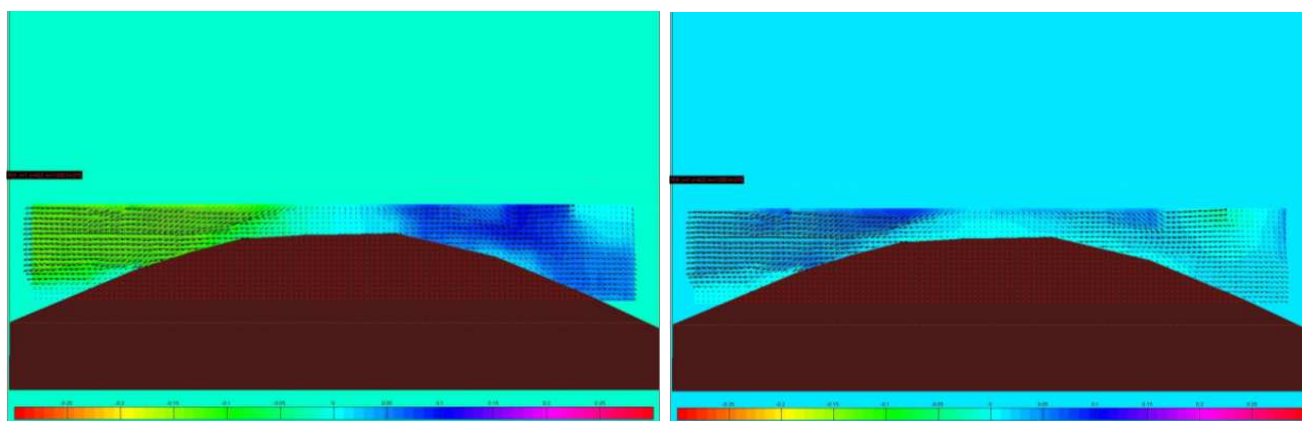


Figura 21. Componente horizontal e componente vertical da velocidade (teste 5701 – quebramar submerso – fotograma 76).

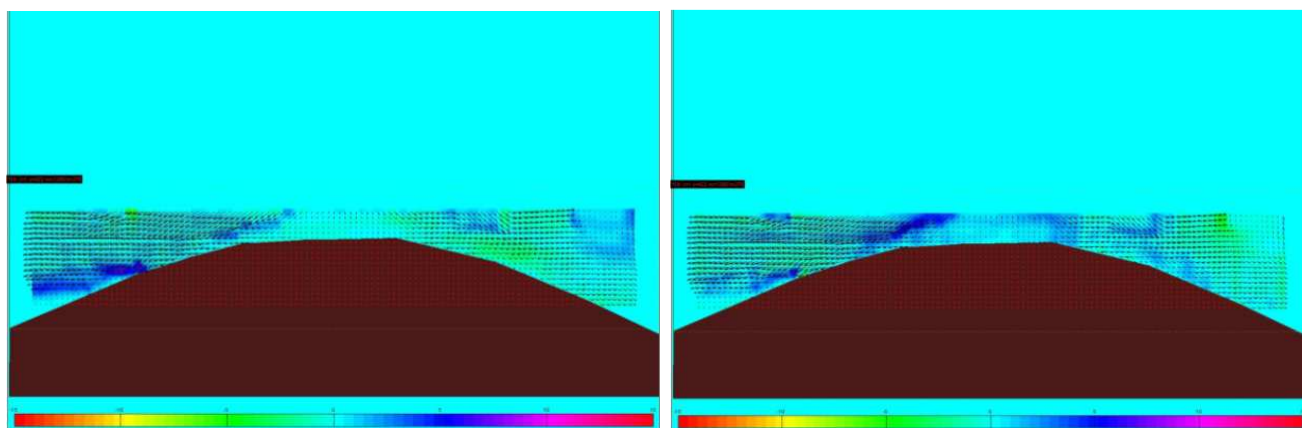


Figura 22. Tensões tangenciais e deformação (teste 5701 – quebramar submerso – fotograma 76).

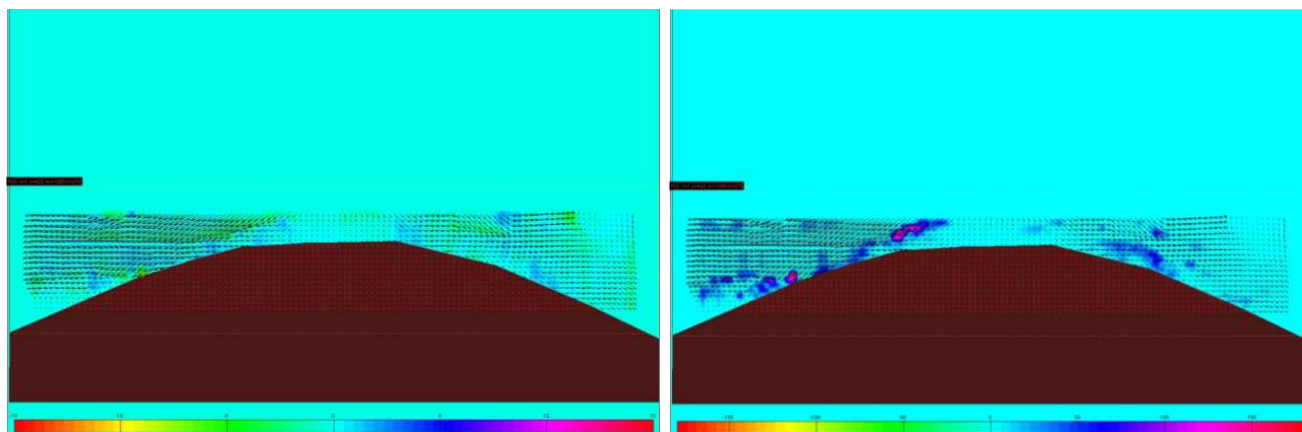


Figura 23. Divergência e vórtices (teste 5701 – quebramar submerso – fotograma 76).

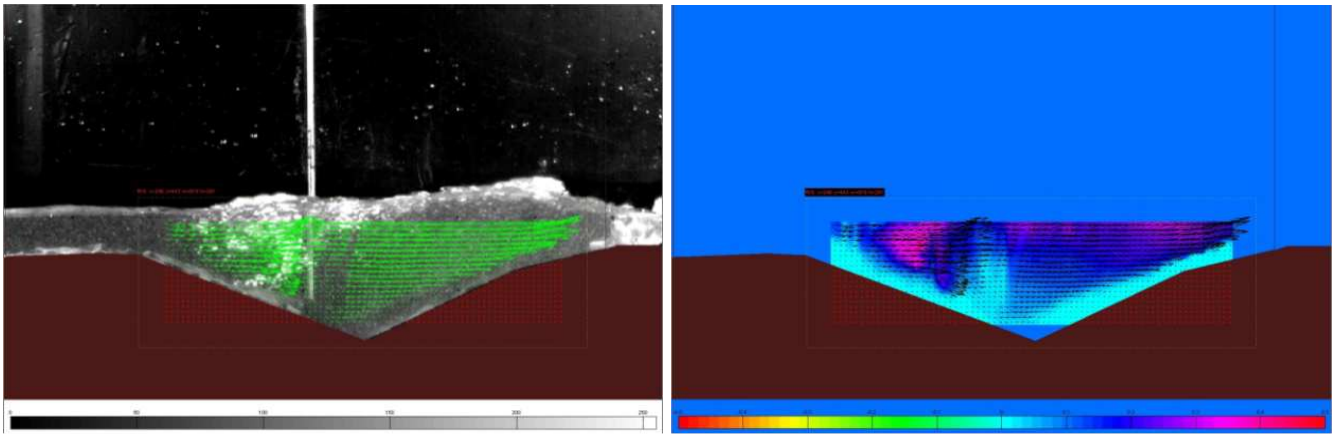


Figura 24. Vetores velocidade e magnitude da velocidade (teste 5803 – área entre quebra-mares – fotograma 42).

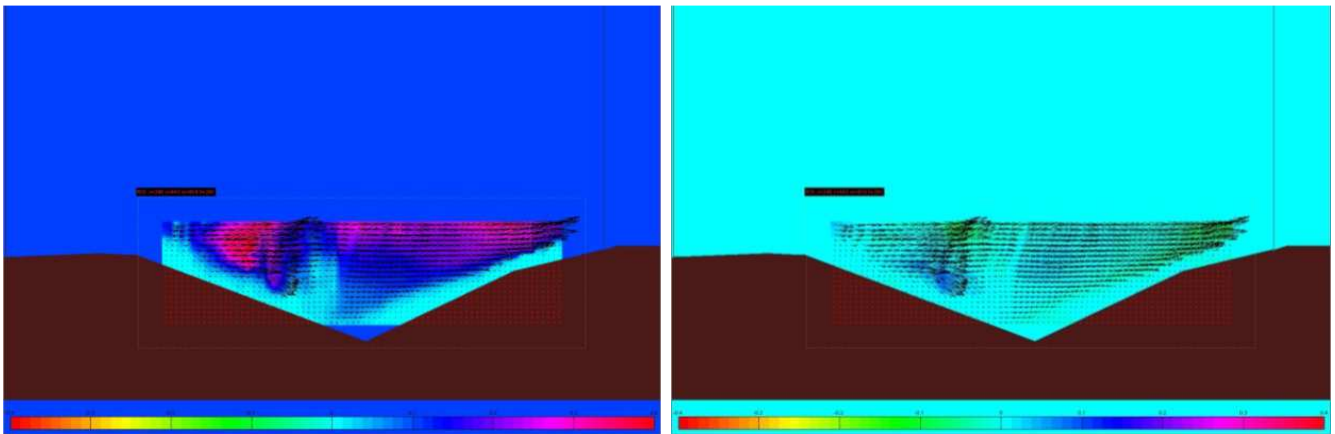


Figura 25. Componente horizontal e componente vertical da velocidade (teste 5803 – área entre quebra-mares – fotograma 42).

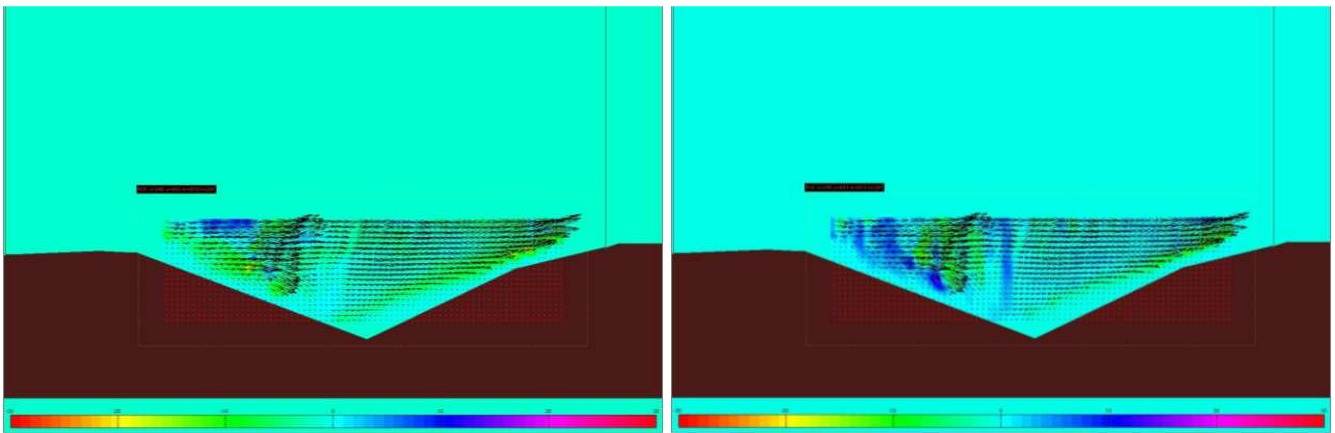


Figura 26. Tensões tangenciais e deformação (teste 5803 – área entre quebra-mares – fotograma 42).

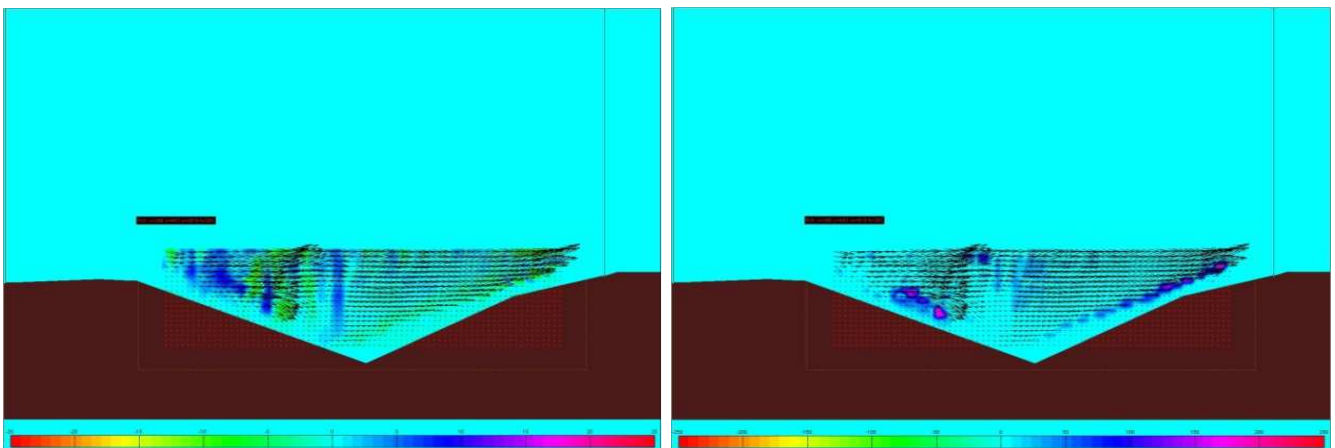


Figura 27. Divergência e vórtices (teste 5803 – área entre quebra-mares – fotograma 42).

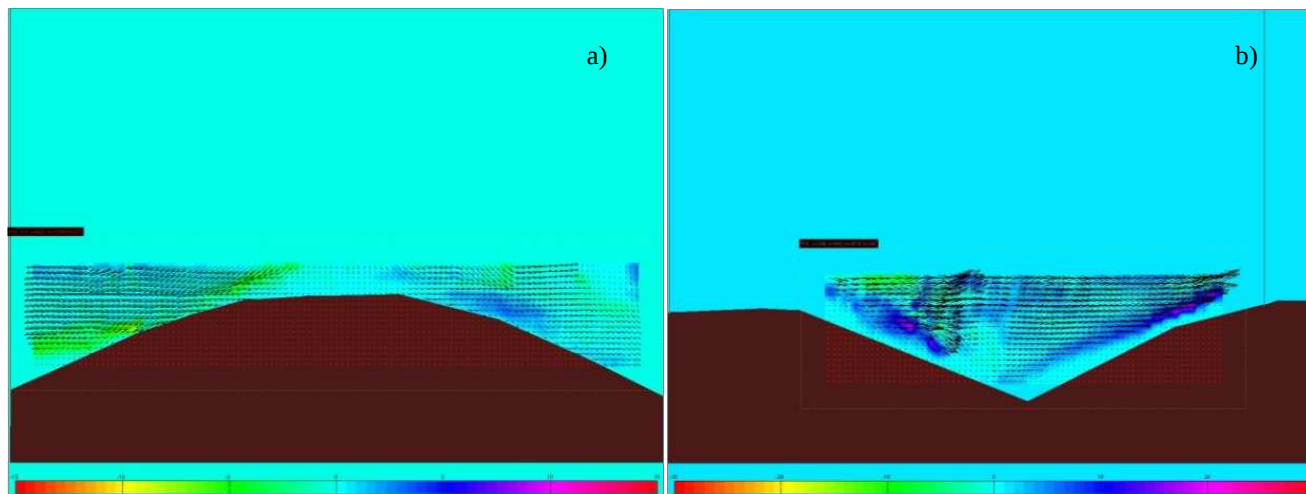


Figura 28. Vorticidade: a) 1º Exemplo – Teste 5701 – quebramar submerso; b) 2º Exemplo – Teste 5803 – área entre quebramares.

Da análise das figuras referentes ao segundo exemplo apresentado é possível verificar que a presença da sonda é perceptível na análise PIV, na perturbação do escoamento que se observa a sotamar da sonda. Também as bolhas de ar são identificadas no seu movimento ascensional após a rebentação da onda. A emulsão ar-água dificulta em alguns casos o rastreamento das partículas na medida em que se torna difícil identificar as partículas traçadoras, e distinguir o brilho das partículas do brilho provocado pela emulsão.

## 5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

As técnicas de processamento de imagem vídeo podem ser muito úteis, aumentando significativamente os resultados obtidos a partir de um registo vídeo convencional de um ensaio em modelo físico.

O processamento de registos vídeo de ensaios em modelo físico é possível, e permite uma elevada diversidade de análises (média, variância, Exposição temporal, “Time stack”, etc.), permitindo retirar informação adicional sem um custo significativo.

O estudo apresentado encontra-se ainda em curso, e também nos campos de velocidades e características associadas do escoamento a metodologia aplicada tem mostrado bons resultados.

No segundo exemplo apresentado, a influência da sonda e de bolhas de ar no seio do líquido durante e após a rebentação das ondas sobre a estrutura submersa, é identificada no rastreamento do escoamento. Este facto pode ser considerado relevante na medida em que permite analisar escoamentos multifásicos.

Espera-se com este estudo poder contribuir para a caracterização e otimização de quebramares submersos (tendo em consideração o clima de agitação local da obra a implantar, e as características do escoamento entre a estrutura principal e o quebramar destacado).

## Referências

- Besley, P. (1999) Overtopping of seawalls – design and assessment manual. R & D Technical Report W 178, Environment Agency, Bristol, ISBN 1 85705 069 X.
- Cowen, E.A., Sou, I.M., Liu, P.L.F., Raubenheimer, B. (2003) Particle image velocimetry measurements within a laboratory-generated swash zone. *JOURNAL OF ENGINEERING MECHANICS-ASCE* 129 (10):1119-1129.
- Drei, E., Lamberti, A. (1999). Wave pumping effect of a submerged barrier. *Proc. International Conference on Coastal Structures*, pp. 667– 674.
- EAK (2002) Empfehlungen des Arbeitsausschusses Küstenschutzwerke. *Die Küste*. H. 65.
- Ilic, S., Pan, S., Chapman, B., Chadwick, A.J., O'Connor, B.A., MacDonald, N.J. (1999) Laboratory measurements of flow around a detached breakwater scheme. *Proc. International Conference on Coastal Structures*, pp. 813–822.
- Kriezi, E.E., Karambas, Th.V., Prinos, P., Tilegrafos, A., Gironella, X., Mosso, C. (1999) Reflection and transmission for submerged and rubble-mound breakwater. *Proceedings of the International Conference on Coastal Structures*, pp. 689– 696.
- Lamberti, A., 2005. Editorial paper on DELOS project. *Coastal Engineering* 52, 815–818 (Elsevier).
- Molina, R., Ortega, M., Moyano, J., Losada, M. (2008) Analysis of the wave interaction with rubble-mound breakwaters using video imagery techniques. *Proceedings of Mediterranean Days of Coastal and Port Engineering, PIANC, Palermo*.
- Raffel, M.; Willert, C.; Wereley, S.; Kompenhans, J. (2007). *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. Springer-Verlag. ISBN 3-540-72307-2.
- Sánchez-Arcilla, A., Alsina, J.M., Cáceres, I., González-Marco, D., Sierra, J.P., Peña, C. (2004) Morphodynamic on a beach with a submerged detached breakwater. *Proc. 29th International Conference on Coastal Engineering. ASCE, Lisbon*.
- Stamos, D.G., Hajj, M.R. (2001) Reflection and transmission of waves over submerged breakwaters. *JOURNAL OF ENGINEERING MECHANICS-ASCE* 127 (2):99-105.

- Taveira Pinto, F. (2001) *Análise das Oscilações e dos Campos de Velocidades nas Proximidades de Quebramares Submersos, sob a Acção da Agitação Marítima*, FEUP, Volume 1, 316 pp e Volume 2 (anexos), 323 pp. (in portuguese)
- TAW (2002) Technical Report – Wave run-up and wave overtopping at dikes. Technical Advisory Committee for Flood Defence in the Netherlands (TAW). Delft.
- Watanabe, Y, Hideshima, Y., Shigematsu, T., Takehara, K. (2006) Application of three-dimensional hybrid stereoscopic particle image velocimetry to breaking waves. *Measurement Science & Technology*, 17(10), 1456-1469.
- Yamashiro, M., Yoshida, A., Irie, I. (1999) Experimental study on wave field behind a submerged breakwater. *Proc. International Conference on Coastal Structures*, pp. 675– 682.
- Sítios de Internet:
- CLASH (2005) - <http://www.clash-eu.org/>
- DELOS (2004) - <http://www.delos.unibo.it/>
- OPTICREST (2001) - <http://awwww.ugent.be/opticrest/>
- VOWS (2000) - <http://www.vows.ac.uk/>