

ANÁLISE BIDIMENSIONAL DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE ESTRUTURAS COSTEIRAS ATRAVÉS DE FERRAMENTAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM

Hugo Guedes Lopes¹, Francisco Taveira Pinto¹, Fernando Veloso Gomes¹, José Pedro Cabral¹, Rafael Molina Sánchez², Maria da Graça Neves³, Maria Teresa Reis³

¹ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP)

² Universidade Politécnica de Madrid (UPM)

³ Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)

RESUMO

O presente trabalho, enquadrado no projeto de Investigação DESTAQ (Desenvolvimento de Técnicas Avançadas de medição de velocidades para o estudo da interação entre quebramares destacados e obras portuárias) visa a análise do comportamento hidrodinâmico de um quebramar destacado como elemento de proteção de um quebramar de taludes principal. A análise é efetuada com recurso ao processamento de imagens vídeo (Molina *et al.*, 2008), integrando também o estudo dos campos de velocidades, aplicando a Técnica de PIV (*Particle Image Velocimetry - Velocimetria por Processamento de Imagem*).

O projeto contempla para além do processamento de imagem de ensaios em modelo físico, realizados na FEUP, a aplicação de modelos numéricos pelo LNEC.

Nesta comunicação serão apresentados e discutidos alguns resultados do estudo em modelo físico e das técnicas de processamento de imagem utilizadas, visando apresentar as vantagens das metodologias utilizadas como suporte à análise de ensaios em modelo reduzido em canal de ondas.

INTRODUÇÃO

A dificuldade de otimização das características deste tipo de estruturas, está intimamente ligada com a caracterização adequada de todos os parâmetros envolvidos na interação entre a ação da agitação e as estruturas costeiras, sem recurso à modelação física. Diversos estudos têm vindo a ser desenvolvidos com o objetivo de caracterizar de forma adequada parâmetros como a transmissão, a reflexão, e o galgamento, recorrendo a ensaios em modelo físico (Drei and Lamberti, 1999; Yamashiro *et al.*, 1999; Kriezi *et al.*, 1999; Gironella e Sanchez-Arcilla, 1999; Chapman *et al.*, 1999; Ilic *et al.*, 1999; Stamos *et al.*, 2001).

Projetos como o VOWS (2000), OPTICREST (2001), DELOS (2004) e o CLASH (2005), tiveram um papel muito importante. No que se refere ao galgamento o manual EUROTOP (2007), compilou manuais anteriores (Besley, 1999; TAW, 2002; EAK, 2002), e apresentou novas contribuições que resultaram de alguns dos projetos referidos anteriormente. Contudo, a maioria das fórmulas e aproximações foram desenvolvidas para estruturas de geometria “convencional”. A estrutura considerada neste trabalho, o Quebramar Norte do Porto de Leixões, é constituída por um quebramar de taludes protegido parcialmente por um quebramar submerso, Figura 1.

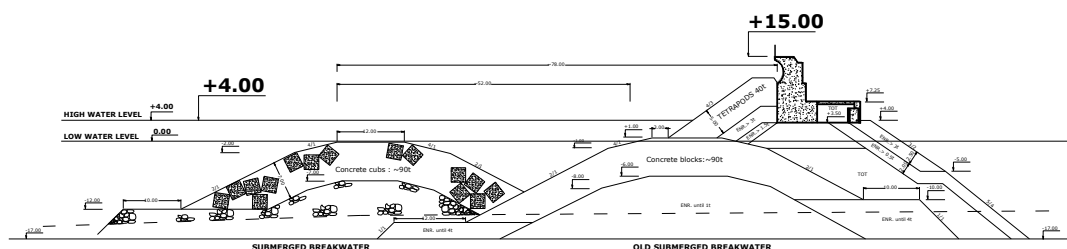


Figura 1. Secção Transversal do Quebramar Norte do Porto de Leixões.

No passado, a Técnica de Anemometria Laser-Doppler (Taveira Pinto, 2001) foi utilizada 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).

Este estudo pretende, para além de caracterizar o escoamento entre o quebramar destacado e o quebramar principal, medir o galgamento.

No presente artigo serão apresentados alguns resultados, para apoiar a aplicabilidade das técnicas utilizadas, bem como divulgar o interesse da sua aplicação em registos previamente adquiridos.

INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Os ensaios em modelo reduzido foram efetuados no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da SHRHA-DEC da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O tanque de ondas tem 28.0 m de comprimento, por 12.0 m de largura, e 1.2 m de profundidade.

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

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



Figura 2 – Sistema de Geração de ondas (modelo *HR Wallingford*), e canal lateral.

Construção do modelo

O modelo do quebramar Norte do Porto de Leixões foi construído à escala 1:60 tendo em consideração a dimensão do tanque de ondas e as limitações do equipamento de geração.

A Figura 3 apresenta o modelo construído.



Figura 3 – Modelo construído do Quebramar Norte do Porto de Leixões.

Equipamento de medição

Para controlo e medição das condições de ensaio foram utilizados dois tipos de equipamentos, sondas hidrodinâmicas e câmaras de vídeo, Figura 4.

Para controlo das condições de agitação foram colocadas 4 sondas hidrodinâmicas a barlamar da estrutura destacada, Figura 4, para registo da agitação incidente e determinação da reflexão, e uma sonda entre a estrutura destacada e o quebramar principal, para análise da transmissão.

Foram utilizadas duas câmaras GigE ethernet (UI 5220 e UI 5480 μ eye – 0.8 Mpx Megapixéis (Mpx) e até 90 fotografamas por segundo (fps); 5 Mpx e até 14 fps, respectivamente) para analisar o escoamento durante os ensaios e registar o movimento das partículas para a aplicação do PIV.

Os registos foram efetuados em duas secções da estrutura, na vizinhança do quebramar submerso e entre as duas estruturas, de modo a ser possível analisar de forma detalhada o escoamento na vizinhança das estruturas. A câmara de alta resolução (UI5480) foi utilizada para efetuar adicionalmente registos de maior detalhe em pequenos trechos da estrutura para uma análise posterior da resolução.

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 a ideia 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.



Figura 4 – Sondas hidrodinâmicas e equipamento vídeo.

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, cada uma com uma etapa com ondas regulares e outra com ondas irregulares, caracterizadas por diferentes configurações:

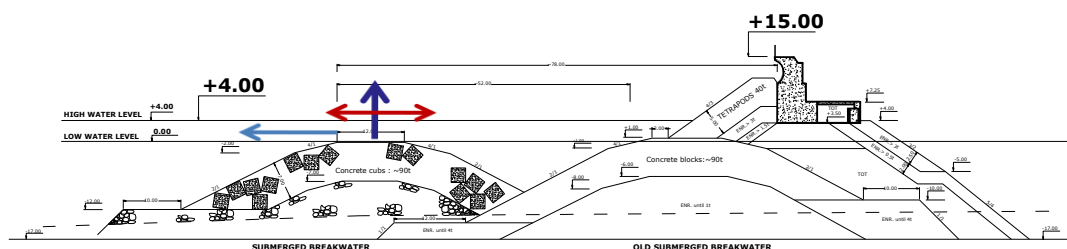


Figura 5 – Configurações testadas.

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

Cada fase incluiu duas etapas, e cada etapa contemplou três níveis de maré (NM) distintos: +0.0m (Z.H.), +2.0m (Z.H.), e +4.0m (Z.H.). A etapa 1 contemplou ondas regulares com alturas de onda entre 2.0 e 14.0m (Z.H.) e períodos de onda de 13 a 24s. A etapa 2 contemplou ondas irregulares (espectro Jonswap) com alturas de onda significativas entre 1.0 e 7.0m (Z.H.) e períodos de pico entre 13 e 24s. No decorrer dos ensaios, de acordo com os níveis de maré considerados, algumas das alturas de onda extremas não foram ensaiadas. Os valores apresentados referem-se a valores em protótipo.

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

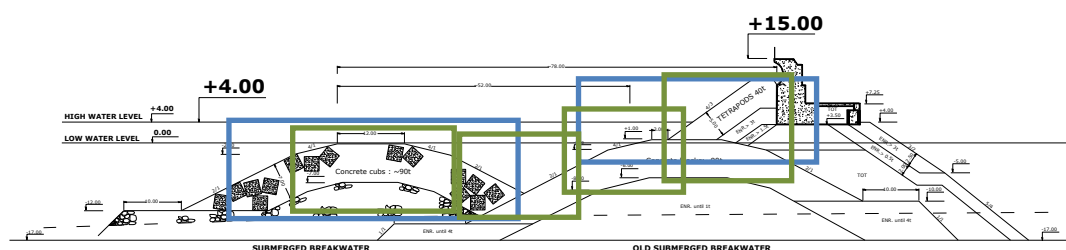


Figura 6 – Planos de câmara definidos.

RESULTADOS

Com o presente trabalho procurou-se definir metodologias de análise que fossem independentes do processo de aquisição, permitindo analisar vídeos recentes, mas também 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, 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 só 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 estará 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.

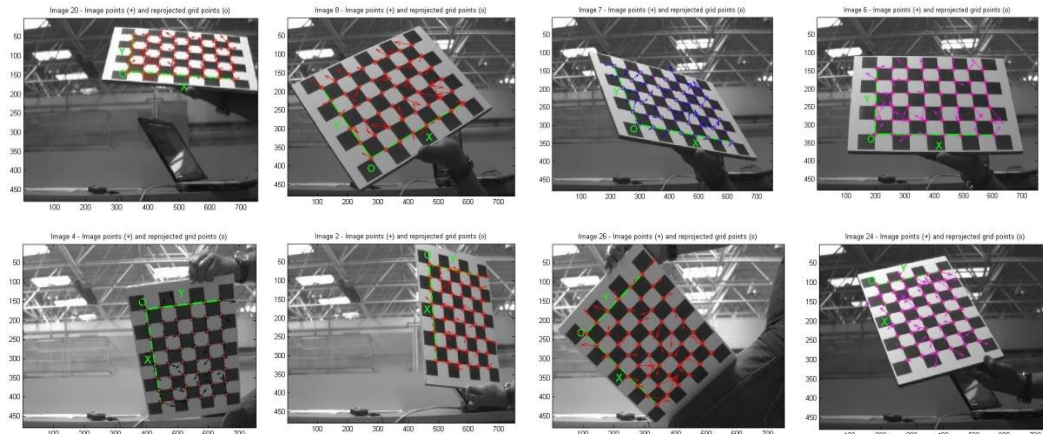


Figura 7 – Exemplos de imagens adquiridas para a correção de aberrações da lente.

Tratamentos de vídeos através do *software* ZEUS

O *software* Zeus, em desenvolvimento na Universidade Politécnica de Madrid (UPM), é 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. Apresentam-se em seguida algumas das funções utilizadas.

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.

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.

Variância

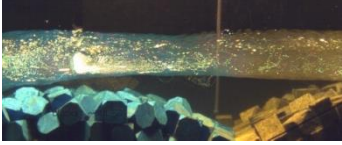
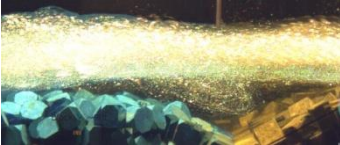

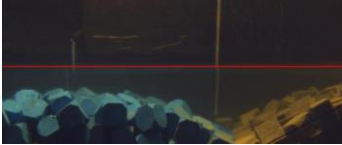


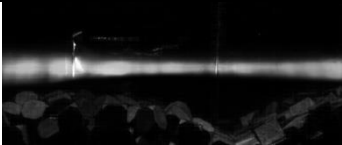


A análise da Variância resulta numa imagem, em tons de cinzento, com a mesma resolução do vídeo, em que a tonalidade de cada um dos seus pixéis é tanto mais próxima do branco, quanto maior tiver sido a variância cromática que esse pixel apresentou ao longo de todo o vídeo. Quando aplicada aos vídeos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

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

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

Na Tabela 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 sobre-elevação significativa (análise da média).

Tabela 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			

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

Na Tabela 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 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 o aumento do período da onda. Dado o elevado nível de maré, não se nota uma sobre-elevação significativa (análise da média).

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

	Teste 114 $H_s = 4\text{ m } T = 13\text{ s}$	Teste 118 $H_s = 4\text{ m } T = 15\text{ s}$	Teste 124 $H_s = 4\text{ m } T = 20\text{ s}$
Exposição Temporal			
Média			
Variância			

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

Na Tabela 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. Os resultados do Teste 124 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 sobre-elevação significativa (análise da média).

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


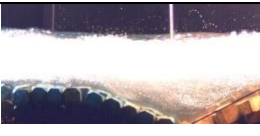

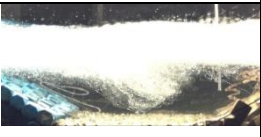
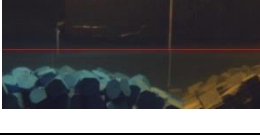
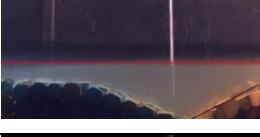
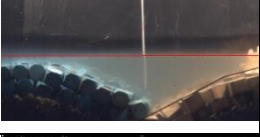
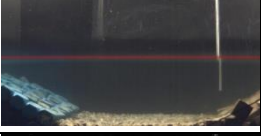

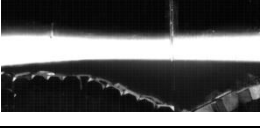

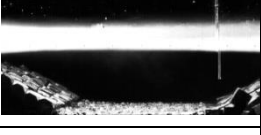
	Teste 124 $H_s = 4\text{ m } T = 20\text{ s}$	Teste 1636 $H_s = 4\text{ m } T = 20\text{ s}$	Teste 2536 $H_s = 4\text{ m } T = 20\text{ s}$	Teste 3736 $H_s = 4\text{ m } T = 20\text{ s}$
Exposição Temporal				
Média				
Variância				

	Fase 1 Coroamento Original	Fase 3 Largura do Coroamento +50%	Fase 2 Cota do Coroamento +50%	Fase 4 Distância do Coroamento +50%
--	-------------------------------	---	--------------------------------------	---

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

Na Tabela 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 sobre-elevação significativa (análise da média). Contudo, ao comparar este exemplo com o anterior, Tabela 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.

Tabela 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 ($H_s=4$ m) e período de pico de 20 s ($T_p=20$ s) constantes.

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

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 fotografias

que constituem o vídeo. Nesta imagem, cada coluna vertical de n pixéis, corresponde à coluna de pixéis varridos pelo alinhamento no n -ésimo fotograma, Figuras 9 e 10.

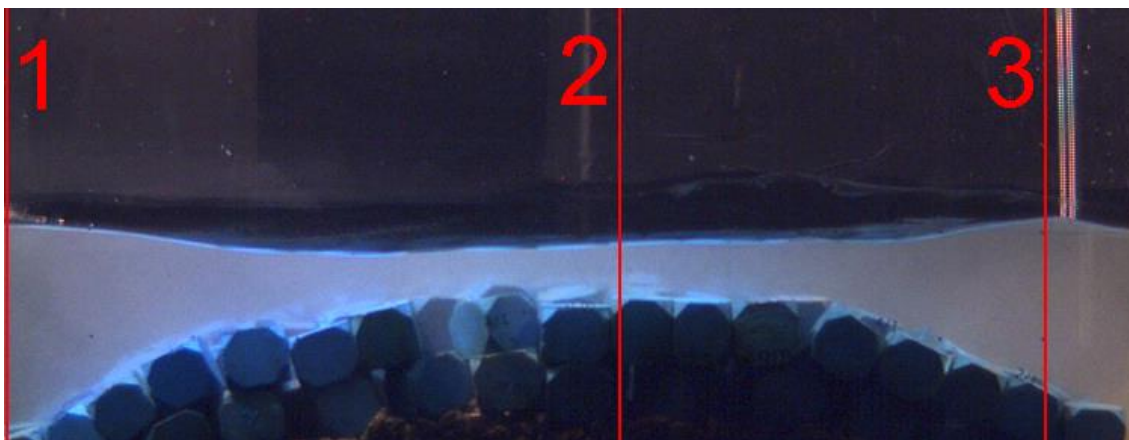


Figura 8 – Alinhamentos selecionados para a análise *Time Stack* (comuns aos Testes 702, 704 e 714).



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

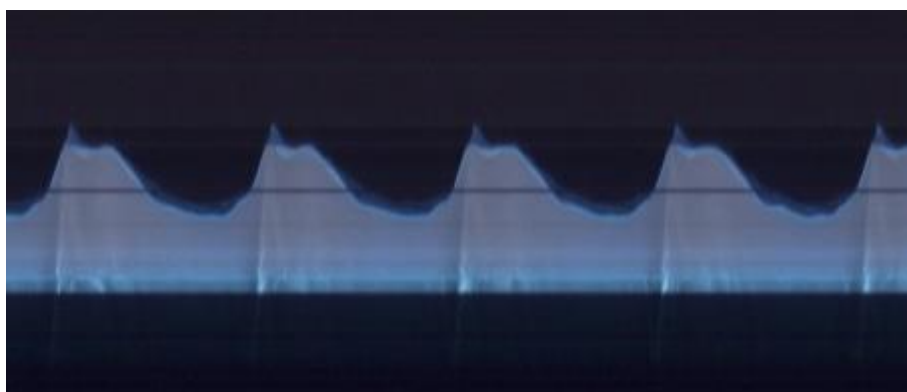


Figura 10 – Resultado da análise *Time Stack* para o alinhamento 3 (ampliação), do teste 702.

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).



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.

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).

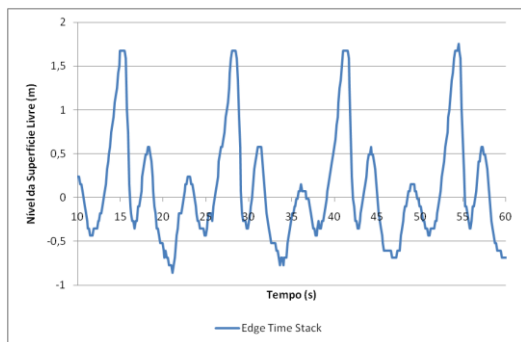


Figura 12 – Gráfico do resultado da análise *Edge Time Stack* para o alinhamento 3 do teste 702, após tratamento da imagem.

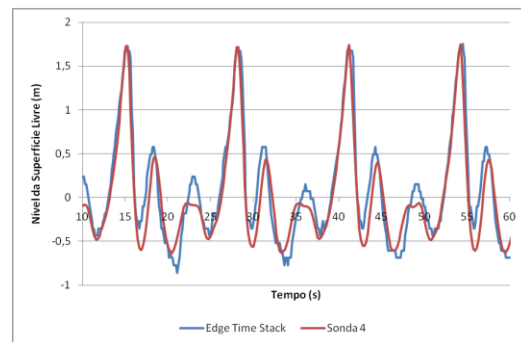


Figura 13 – Comparação gráfica do resultado da análise *Edge Time Stack* para o alinhamento 3 do teste 702, com o registo da Sonda 4 (posicionada imediatamente a sotamar do alinhamento 3).

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, Tabelas 5 a 8.

Tabela 5 – Características dos testes 702, 704 e 714.

Teste	Fase	Etapa	Nível de Maré	Iluminação	Valores Medidos em Protótipo (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

Tabela 6 – Características 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

Tabela 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%

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

Com o intuito de aprofundar o conhecimento sobre a correlação entre as leituras das sondas e os resultados da análise *Edge Time Stack* em alinhamentos verticais muito próximos das mesmas, efetuaram-se análises *Edge Time Stack* para os alinhamentos 1 e 2, Figura 14, do 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.

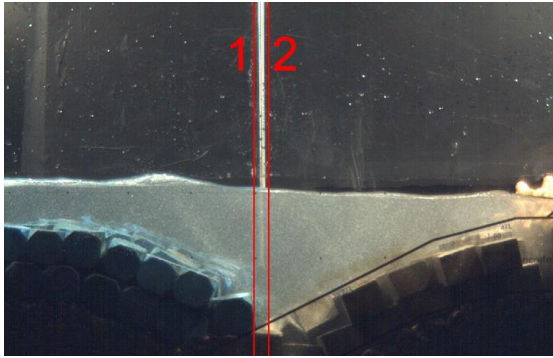


Figura 14 – Alinhamentos selecionados para a análise *Time Stack* no teste 5801.

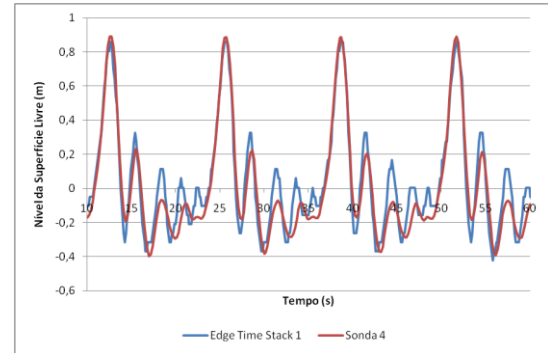


Figura 15 – Comparação gráfica do resultado da análise *Edge Time Stack* para o alinhamento 1 do teste 5801, com o registo da Sonda 4 (posicionada imediatamente a sotamar do alinhamento 1).

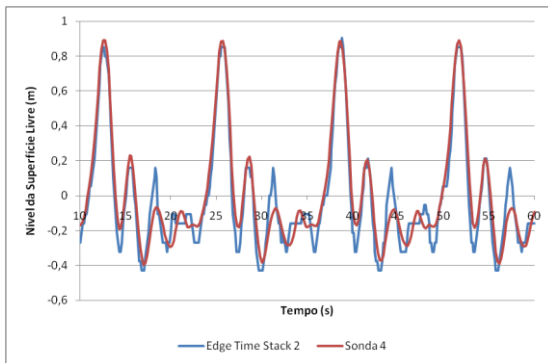


Figura 16 – Comparação gráfica do resultado da análise *Edge Time Stack* para o alinhamento 2 do teste 5801, com o registo da Sonda 4 (posicionada imediatamente a barlamar do alinhamento 2).

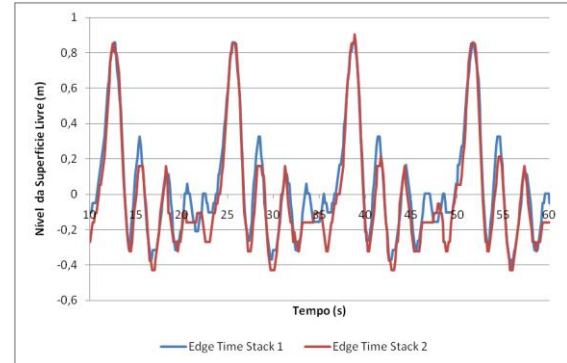


Figura 17 – Comparação gráfica entre os resultados da análise *Edge Time Stack* para o alinhamento 1 e para o alinhamento 2 do teste 5801.

As Tabelas 9 a 11 caracterizam e comparam as ondas registadas pelas sondas e os resultados da análise *Edge Time Stack* para os dois alinhamentos descritos.

Tabela 9 – Características do teste 5801.

Teste	Fase	Etapa	Nível de Maré	Iluminação	Valores Medidos em Protótipo (a barlamar da estrutura)	
					H (m)	T (s)
5801	1	1	4	Topo	1,6	12,4

Tabela 10 – Características das ondas registadas 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

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

Teste	Desvios Registados entre:			
	HETS 1 e H _{Sonda 4}	HETS 2 e H _{Sonda 4}	HETS 1 e H _{ETS 2}	T _{Sonda 4} e T _{ETS}
5801	+14,9%	+19,9%	-4,2%	+5,0%

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%), Tabelas 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 caraterísticas da ondulação, sem introduzir perturbações localizadas no escoamento (como acontece com as sondas de nível utilizadas).

Análise dos Campos de Velocidades

Introdução

A análise dos campos de velocidades pode ser utilizada como uma metodologia alternativa para caraterizar a eficiência hidrodinâmica de uma estrutura costeira. Nesse sentido, procurou-se no presente trabalho caraterizar os campos de velocidade aplicando os princípios básicos do PIV (Raffel *et al.*, 2007).

Com esta componente do trabalho pretendia-se desenvolver uma metodologia que permitisse a análise dos campos de velocidades em registos vídeo, sem o recurso a fontes de iluminação laser, procurando com isso reduzir os pré-requisitos necessários à 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.



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

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.

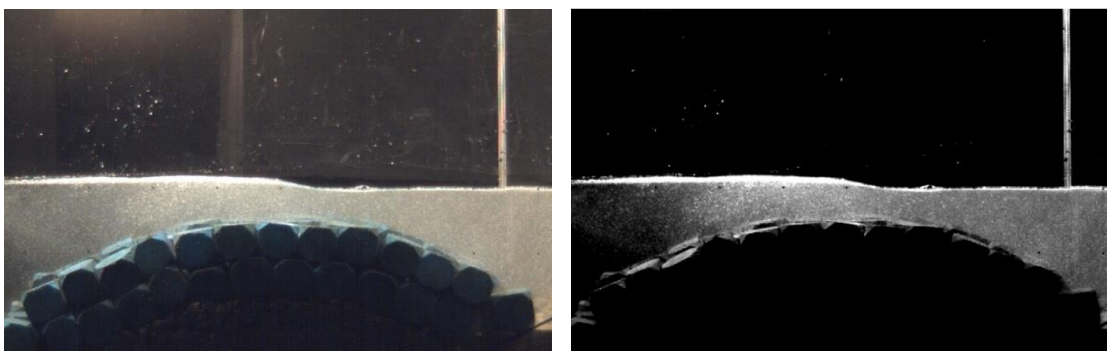


Figura 19 – Imagem antes e após a correção dos níveis de cor das imagens.

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 seguintes ilustram 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.

1º Exemplo – Teste 5701 – quebramar submerso – fotograma 76.

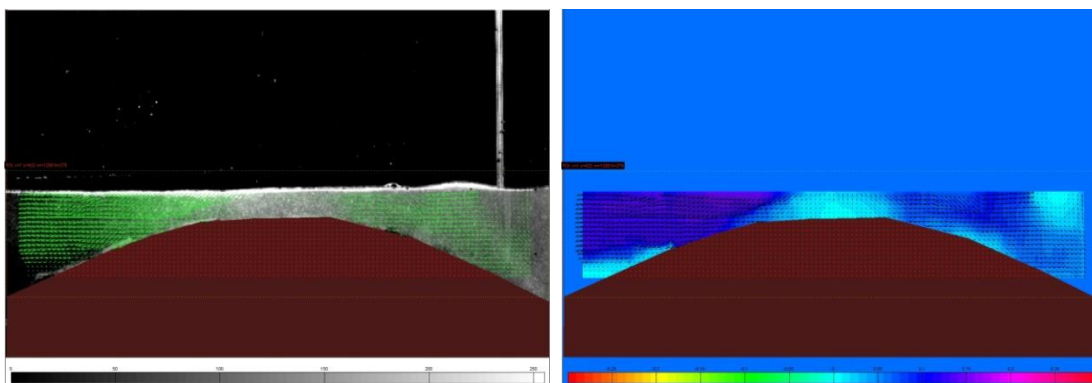


Figura 20 – Vetores velocidade e magnitude da velocidade.

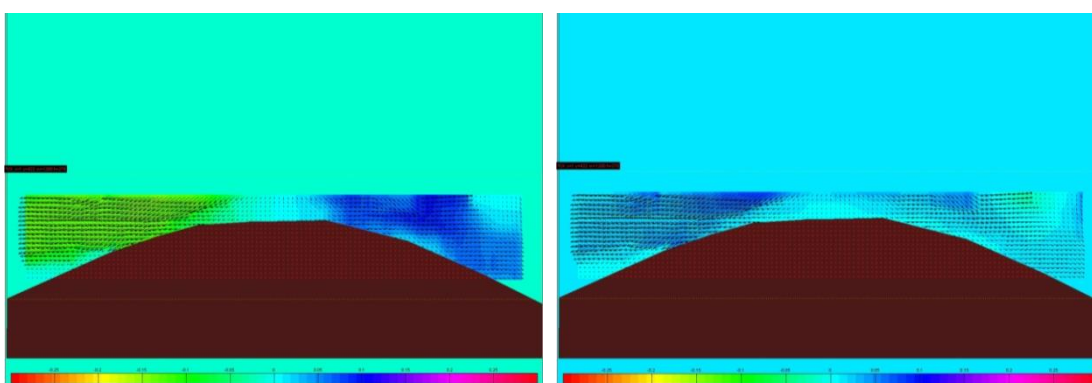


Figura 21 – Componente horizontal e componente vertical da velocidade.

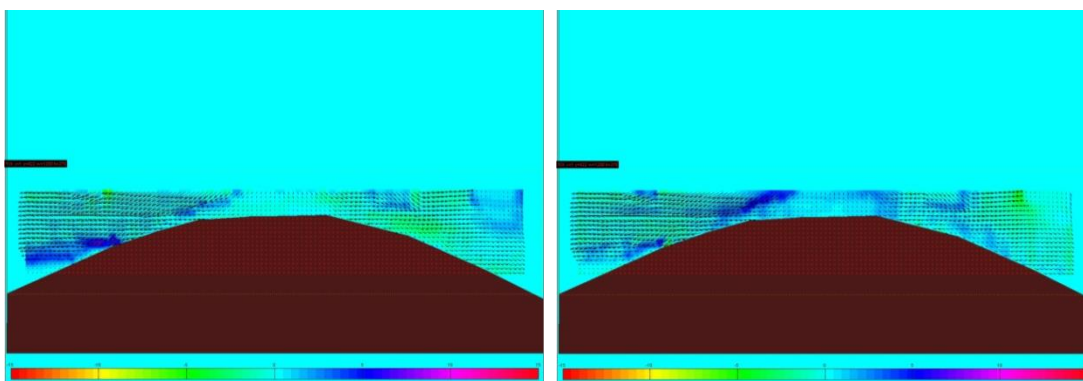


Figura 22 – Tensões tangenciais e deformação.

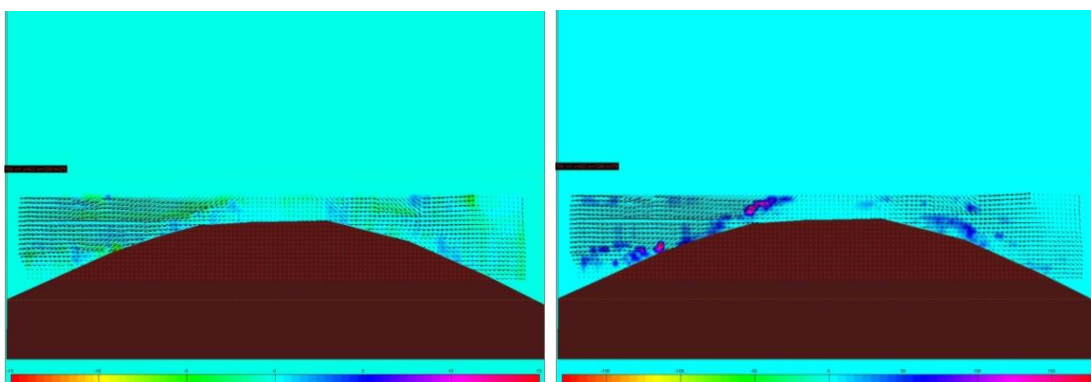


Figura 23 – Divergência e vórtices

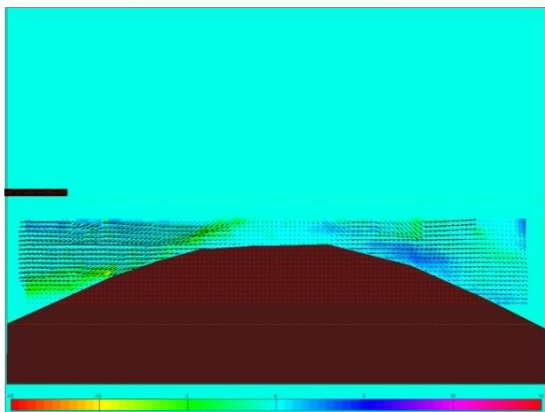


Figura 24 – Vorticidade

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.

Importa referir que na análise PIV a dimensão, densidade, e comportamento das partículas traçadoras no fluido condiciona a qualidade dos resultados. Também a resolução, a frequência de aquisição e as condições de iluminação têm um papel determinante nos resultados. Para além dos parâmetros referidos, 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 camera pode introduzir algumas distorções nos resultados.

2º Exemplo – Teste 5803 – área entre quebramares – fotograma 42.

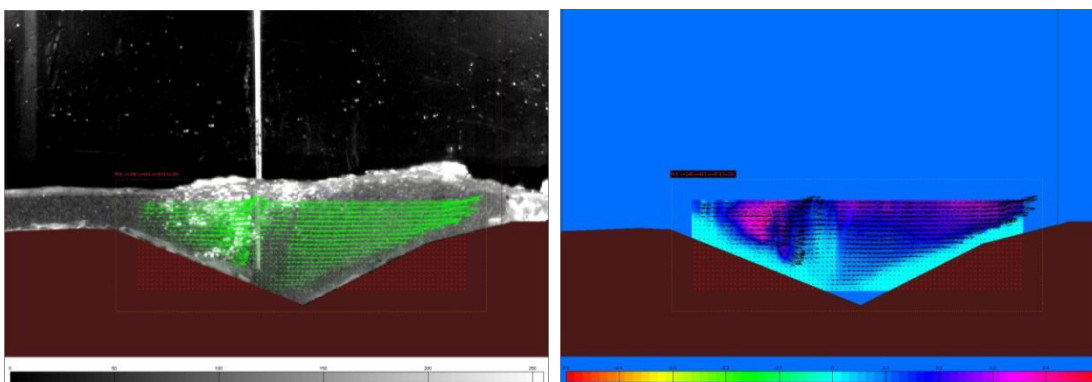


Figura 25 – Vetores velocidade e magnitude da velocidade.

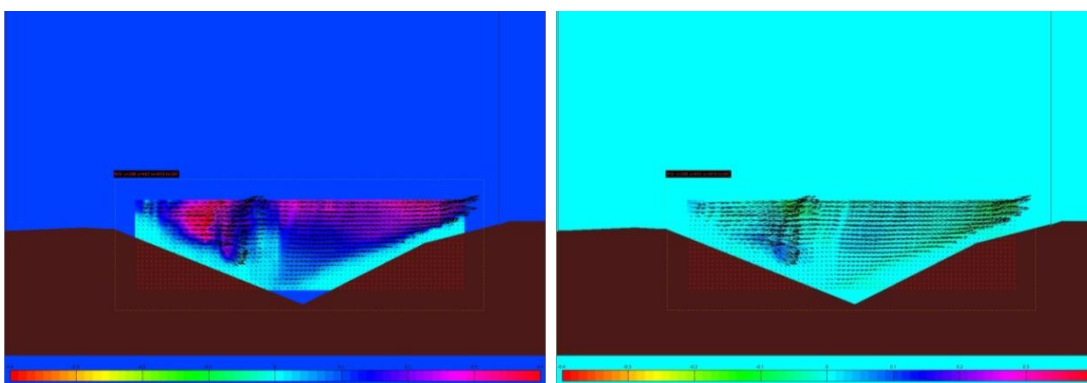


Figura 26 – Componente horizontal e componente vertical da velocidade.

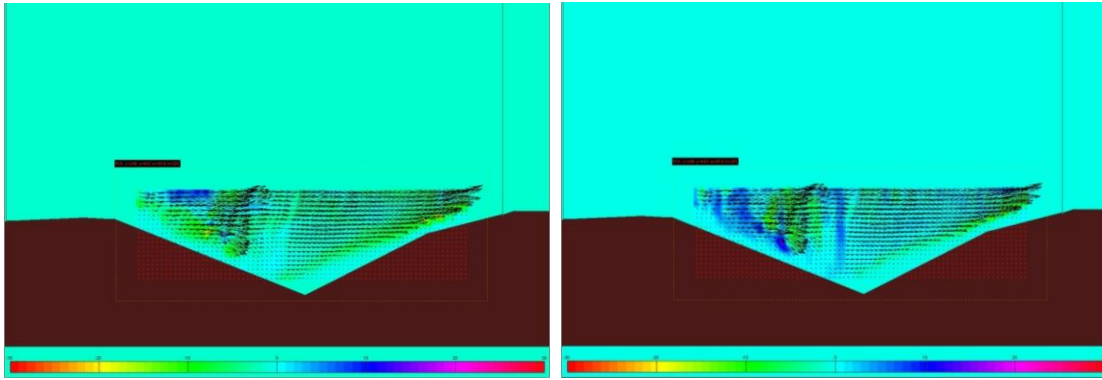


Figura 27 – Tensões tangenciais e deformação.

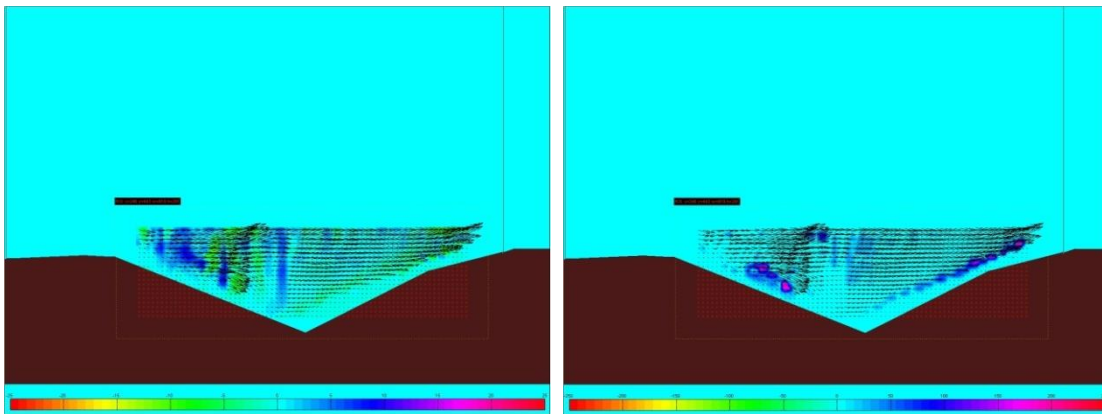


Figura 28 – Divergência e vórtices

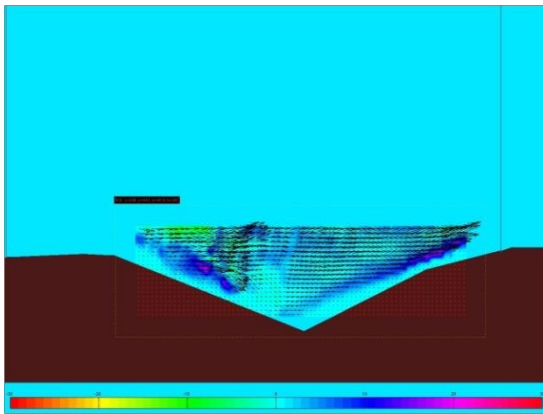


Figura 29 – Vorticidade

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.

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os resultados obtidos demonstram que 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.) 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 apicada 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.

Sendo esta uma nova área de abordagem, foram introduzidos alguns reajustes, em alguns aspetos da metodologia abordada, o que permitiu melhorar a qualidade dos resultados finais.

Espera-se com este estudo poder contribuir para a caracterização e otimização de quebramares submersos (nomeadamente ao nível da geometria e da distância à estrutura a proteger, 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 BIBLIOGRÁFICAS

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.