

Ensaios em Modelo Reduzido de Quebra-mares de Taludes Aplicação da Fotogrametria no Levantamento de Perfis

Rute Lemos¹, Joana Contente² e João Alfredo Santos³

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil, DHA, Av. Brasil, 101, Lisboa, Portugal

email: rlemos@lnec.pt <http://www.lnec.pt>

²Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, Faro, Portugal

³Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Área Departamental de Engenharia Civil, Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1, Lisboa, Portugal

Sumário

A confirmação da eficácia do dimensionamento prévio do manto resistente de um quebra-mar é conseguida através de ensaios em modelo físico reduzido, onde é feita a análise do comportamento hidráulico e/ou estrutural dos seus elementos constituintes.

Para avaliar o nível de dano ocorrido ao longo dos ensaios em modelo reduzido, recorre-se por vezes ao levantamento de perfis transversais do perfil ensaiado. De modo a facilitar essa tarefa, tem vindo a testar-se recentemente, no LNEC, a utilização de um método de levantamento da envolvente de taludes de quebra-mares, baseado em estereofotogrametria - técnica de extrair de fotografias, a forma, as dimensões e a posição dos objetos nelas contidos.

Palavras-chave: Ensaios em modelo físico reduzido; Fotogrametria; Levantamento de perfis

1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento prévio do manto resistente de um quebra-mar carece de confirmação da sua eficácia através de ensaios em modelo físico reduzido, onde é feita a análise do comportamento hidráulico e/ou estrutural dos seus elementos constituintes.

Para avaliar o nível de dano ocorrido ao longo dos ensaios em modelo reduzido, recorre-se por vezes ao levantamento de perfis transversais do perfil ensaiado.

O perfilador mecânico tem sido até agora o método tradicionalmente utilizado. No entanto, a sua utilização nem sempre é fácil, dependendo da granulometria e tipo de blocos (naturais ou artificiais) do manto resistente.

Recentemente tem vindo a testar-se no LNEC, a utilização de um método de levantamento da envolvente de taludes de quebra-mares, baseado em estereofotogrametria - técnica de extrair de fotografias, a forma, as dimensões e a posição dos objetos nelas contidos.

Este método faz uso de um software [1] que permite corrigir a refração da luz na interface ar água, permitindo realizar os levantamentos sem que seja necessário esvaziar o canal.

Apesar desta técnica ter sido já testada de um modo intensivo em ensaios de quebra-mares cujo manto era constituído por blocos naturais [2], tendo sido obtidos resultados positivos, pretende-se agora dar continuidade a estes testes, avaliando a fiabilidade desta técnica em modelos de quebra-mares, cujo manto protetor incorpore elementos artificiais como cubos ou tetrápodos.

Os objetivos deste trabalho têm sido, pois:

- Avaliar o desempenho de um método para levantamento da envolvente de taludes de quebra-mares baseado em estereofotogrametria;
- Realizar levantamentos de mantos de quebra-mares utilizando o método fotogramétrico, com vista a detetar possíveis limitações da técnica a modelos de quebra-mares cujo manto protetor incorpore uma combinação de elementos artificiais e naturais (por ex^o tetrápodos e enrocamentos)

2 ENSAIOS EM MODELO FÍSICO

2.1 Condições de Ensaio e Variantes Ensaaiadas

Os ensaios foram realizados num dos canais de ondas irregulares do LNEC, designado por COI1. O canal COI1 tem, aproximadamente, 50 m de comprimento, 80 cm de largura e 80 cm de profundidade (Figura 1). Nele é possível a geração de ondas regulares e irregulares. Para tal, está equipado com um gerador do tipo pistão com um sistema de absorção ativa de onda, AWASYS [3] que permite uma absorção dinâmica da reflexão.

Os ensaios foram realizados com ondas irregulares, tendo sido reproduzidos dois níveis de maré; Baixa-mar (BM) e Preia-mar (PM), dois períodos de pico ($T_p = 2,22$ s e $T_p = 2,59$ s) e quatro alturas de onda (13,7 cm, 17,1 cm, 18,8 cm e 20,5 cm). A Tabela 1 resume as condições de ensaio utilizadas.

Tabela 1. Condições de agitação utilizadas nos ensaios (valores no modelo)

Ensaio	Prof. junto ao gerador (cm)		Prof. junto ao pé do talude (cm)		T_p (s)	H_s (cm)
	BM	PM	BM	PM		
1	57,6	63,6	28	34	2,22	13,7
2					2,22	17,1
3					2,59	17,1
4					2,59	18,8
5					2,22	20,5
6					2,59	20,5

O modelo ensaiado possuía características análogas às dos quebra-mares correntemente construídos, sendo constituído por um núcleo, um filtro e um manto protetor. O seu núcleo era constituído por material de todo o tamanho (T.O.T.). O filtro, por seu lado, era constituído por enrocamento com uma massa mediana, de 16-48 g.

O manto resistente e a banquetta do pé do talude foram sofrendo ajustamentos no que diz respeito ao tipo e arranjo cromático dos blocos utilizados (fatores que potencialmente influenciam a qualidade dos levantamentos) de modo a determinar as melhores condições físicas para a realização dos levantamentos.

Foram, assim, testadas diferentes variantes, as quais se passam a descrever:

- Variante 1: O manto resistente era constituído por tetrápodos de 328 g pintados de três cores diferentes, identificando faixas horizontais de cotas. A banquetta do pé do talude era constituída por enrocamento de 48-96 g. (Figura 1).
- Variante 2: O manto resistente era constituído por tetrápodos de 200 g, e por uma faixa de cubos Antifer, também eles com 200 g, colocados na base do pé do talude. A banquetta do pé do talude era constituída por enrocamento de 48-96 g. (Figura 2a).
- Variante 3: O manto resistente era constituído por cubos Antifer de 200 g, interrompidos por uma faixa de tetrápodos de 200 g, colocados sensivelmente na zona ativa do manto. A banquetta do pé do talude era constituída por enrocamento de 48-96 g. (Figura 2b).
- Variante 4: O manto resistente era constituído por tetrápodos de 328 g pintados de três cores diferentes, colocados segundo um padrão cromático aleatório. A banquetta do pé do talude era constituída por enrocamento de 48-96 g (Figura 2c).
- Variante 5: O manto resistente e a banquetta do pé do talude eram ambos constituídos por tetrápodos de 328 g pintados de três cores diferentes, colocados segundo um padrão cromático aleatório. (Figura 2d).
- Variante 6: O manto resistente era constituído por tetrápodos de 328 g pintados de três cores diferentes, colocados ao longo do talude segundo um padrão aleatório de cores. A banquetta era constituída por enrocamento de 48-96 g pintado de vermelho (Figura 2e).

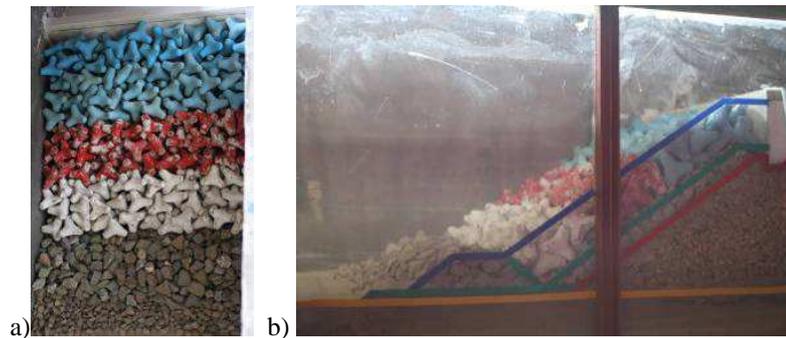


Figura 1. Aspeto da estrutura ensaiada (a) e respetivo perfil transversal (b)

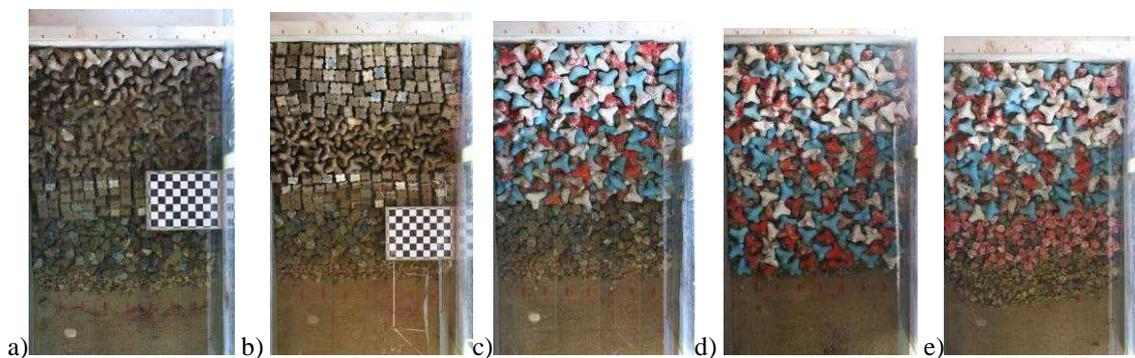


Figura 2. Aspeto das variantes ensaiadas: a) Variante 2, b) Variante 3, c) Variante 4, d) Variante 5 e) Variante 6

2.2 Levantamento da Envolvente do Manto. O Método Fotogramétrico

A fotogrametria pode ser definida como a técnica de extrair de fotografias, a forma, as dimensões e a posição dos objetos nelas contidos. No caso da estereofotogrametria, esse processo permite obter imagens tridimensionais a partir de pares de fotografias do mesmo cenário, tiradas de localizações ligeiramente afastadas (Figura 3a)).

A estereofotogrametria baseia-se no mesmo princípio da visão binocular, onde a imagem é captada pelos olhos individualmente e transmitidas ao cérebro, o qual deverá ser capaz de fundir as duas imagens ligeiramente diferentes numa só imagem, resultando daí uma visão estéreo ou estereopsia.

No presente trabalho, foi instalada sobre o canal uma estrutura que permitiu colocar as câmaras fotográficas sobre o cenário a fotografar. O equipamento utilizado consistiu em duas câmaras fotográficas montadas numa configuração fixa e aptas a disparar duas fotografias simultâneas (Figura 3b)).

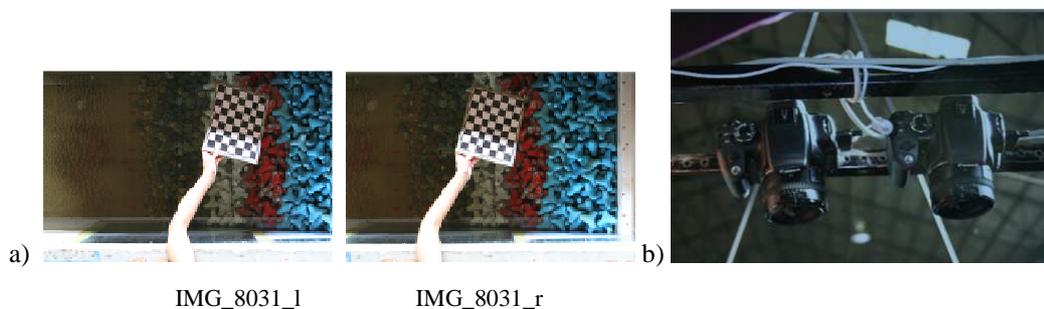


Figura 3 a) Exemplo de um par estereofotogramétrico. b) Câmaras fotográficas utilizadas nos levantamentos.

Embora a separação entre as máquinas possa variar, esta terá que obedecer a um compromisso entre uma separação generosa (a qual facilitará a reconstrução tridimensional) e a separação a partir da qual já se estarão a fotografar faces diferentes do mesmo objeto, tornando a reconstrução impossível. No presente estudo, todos os levantamentos descritos foram realizados com uma distância fixa de aproximadamente 16 cm entre os centros das lentes das câmaras.

Foi utilizado um pacote de software que permite a reconstrução tridimensional usando pares de imagens de um mesmo cenário, obtidas apenas com um pequeno desfasamento entre si. O pacote de software utilizado consiste em duas aplicações distintas que se descrevem de seguida.

Calibração das câmaras:

Consiste na identificação dos parâmetros das câmaras e sua posição perante o cenário observado [1]. Cada vez que se inicia uma nova sessão fotográfica, a posição e orientação das câmaras podem variar, em resultado de uma ligeira mudança na posição das mesmas relativamente ao objeto fotografado. É, pois, recomendado que para cada sessão seja feita uma calibração.

O processo de calibração consiste em selecionar os quatro cantos internos de um padrão axadrezado, cuja dimensão da quadrícula servirá de referência para as dimensões do cenário reconstruído (Figura 4). A mesma quadrícula serve também como referência para a identificação do plano de água. O primeiro canto selecionado define a origem de referencial e o segundo canto a direção do eixo dos x .

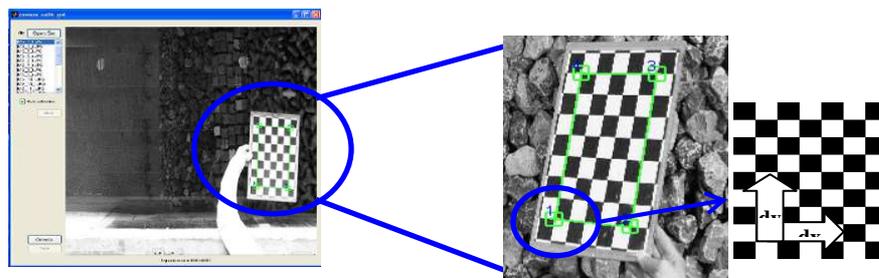


Figura 4. Processo de seleção dos cantos internos do alvo

Este processo reveste-se de uma importância vital para a obtenção de resultados fiáveis, dado que dele dependem todas as dimensões do cenário a reconstruir. No final do procedimento de calibração, para cada par de fotografias (esquerda e direita), é obtido um ficheiro que contém toda a informação relativa aos parâmetros das câmaras.

Reconstrução:

Consiste na identificação da profundidade a partir das duas vistas ligeiramente desfasadas do mesmo cenário (Figura 5). Com o software utilizado é possível reconstruir a parte emersa, submersa ou ambas as partes, uma vez que este é capaz de retificar o efeito da refração existente no plano da água.

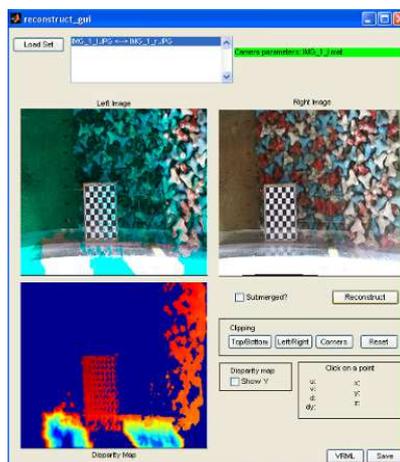


Figura 5. Reconstrução de um cenário parcialmente submerso, no início de um dos ensaios.

A partir da análise dos ficheiros reconstruídos é possível obter ficheiros com as coordenadas (x,y,z) do cenário, tanto da parte emersa como da submersa, permitindo extrair perfis ou superfícies com o auxílio do Golden Software Surfer (Figura 6).

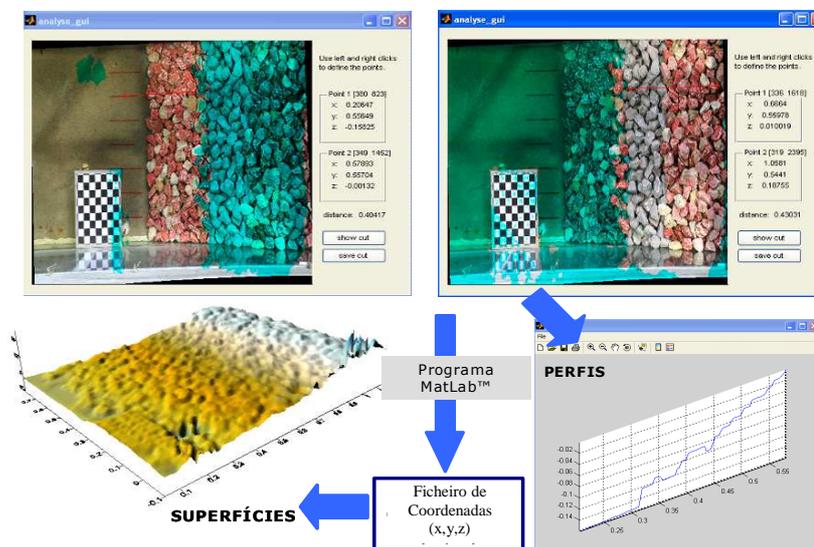


Figura 6 - Extração de perfis através da análise das partes submersa e emersa de uma reconstrução

2.3 Determinação dos Parâmetros de Dano do Perfil Erodido

Para o grau de danos de um quebra-mar, existem várias definições e parâmetros. A definição de dano utilizada neste trabalho foi a de Broderick e Ahrens [4] e de Van der Meer [5], os quais definiram o dano (S) como a área transversal erodida adimensionalizada pelo quadrado do diâmetro nominal dos elementos do manto protetor ($S=Ae/Dn_{50}^2$).

Partindo dos perfis levantados é possível calcular a área erodida, comparando-os com perfis levantados antes do início do ensaio (não danificado).

3 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados, em termos gráficos, dos levantamentos do manto resistente realizados com as diferentes variantes do perfil ensaiado. São ainda apresentados os cálculos dos parâmetros de dano dos perfis erodidos para os levantamentos onde a área erodida foi mais significativa.

Embora estivessem previstos sete levantamentos para cada uma das variantes ensaiadas (um levantamento inicial e um no final de cada um dos seis ensaios realizados - Tabela 1), a ocorrência de ruína súbita do perfil ou a perda de levantamentos devido a dificuldades na reconstrução fotogramétrica, apenas permitiu a apresentação de alguns dos levantamentos previstos em cada série de ensaios.

Com vista a uma boa caracterização do talude, este foi dividido em 7 perfis (P1 a P7) (Figura 7). Na apresentação dos resultados relativos às diferentes variantes ensaiadas foram selecionados os perfis mais representativos dos danos ocorridos.

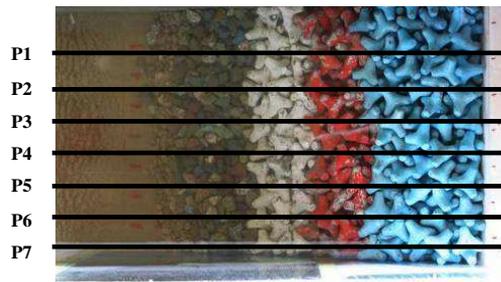


Figura 7. Localização dos perfis P1 a P7

Para calcular a área erodida em cada ensaio, num determinado perfil, recorreu-se ao software existente, elaborado em Visual Fortran™, o qual usa como dados de entrada a série de pontos do perfil inicial e a do perfil a comparar. Com este programa é possível calcular a área erodida (A_e), a largura erodida (l_e) e a profundidade erodida (d_e). Para a determinação do dano num determinado perfil, foi considerada a maior área erodida nesse perfil.

3.1 Variante 1

Durante o programa de ensaios com a Variante 1, verificou-se que, durante a série de ensaios de Preia-mar, se registaram apenas algumas quedas localizadas de tetrápodos - Figura 8.

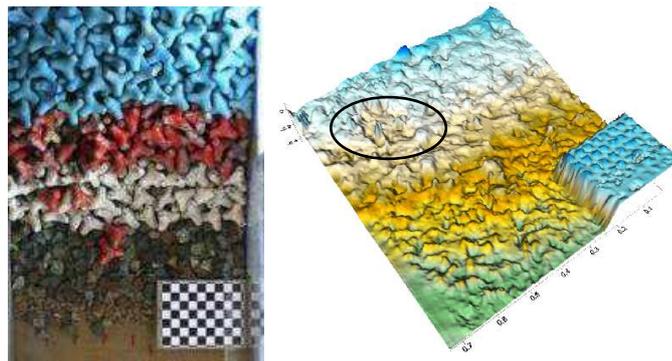


Figura 8. Variante 1. Estado e envolvente do talude correspondentes ao levantamento no final da série de ensaios de Preia-mar

A Figura 9 ilustra a evolução e o cálculo dos parâmetros de dano do Perfil 2 (escolhido por ser aquele onde se registaram alguns danos) entre os levantamentos inicial e final, realizados durante a série de ensaios de Preia-mar.

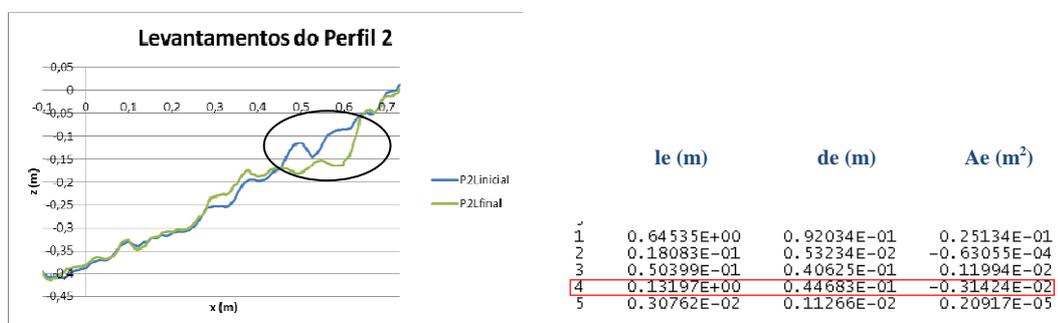


Figura 9. Evolução do Perfil 2 e cálculo dos parâmetros de dano entre os levantamentos inicial e final realizados durante a série de ensaios de Preia-mar.

3.2 Variante 2

Com esta variante, pretendeu-se testar as potencialidades da técnica aquando da utilização de um padrão monocromático do manto resistente. Pretendeu-se ainda, aumentar o nível de danos, utilizando tetrápodos de menor peso (200 g), alternados por uma faixa de cubos Antifer, também eles com 200 g.

Durante as séries de ensaios realizadas com esta variante, obtiveram-se danos significativos. Verificou-se, no entanto, que todos os levantamentos efetuados não apresentavam boa definição, especialmente nos limites da fotografia, não se distinguindo os diferentes tipos de blocos nem os danos ocorridos. A Figura 10 ilustra o levantamento final da série de ensaios realizada com o nível de Preia-Mar.

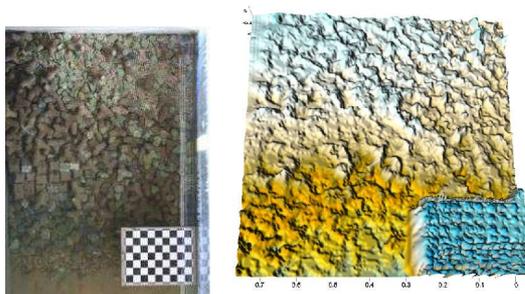


Figura 10. Variante 2. Estado e envolvente do manto resistente correspondentes aos levantamentos final da série de ensaios de Preia-mar.

A Figura 11 ilustra a evolução do Perfil 3 e o cálculo dos parâmetros de dano entre os levantamentos inicial e final relativos à série de ensaios de Preia-mar.

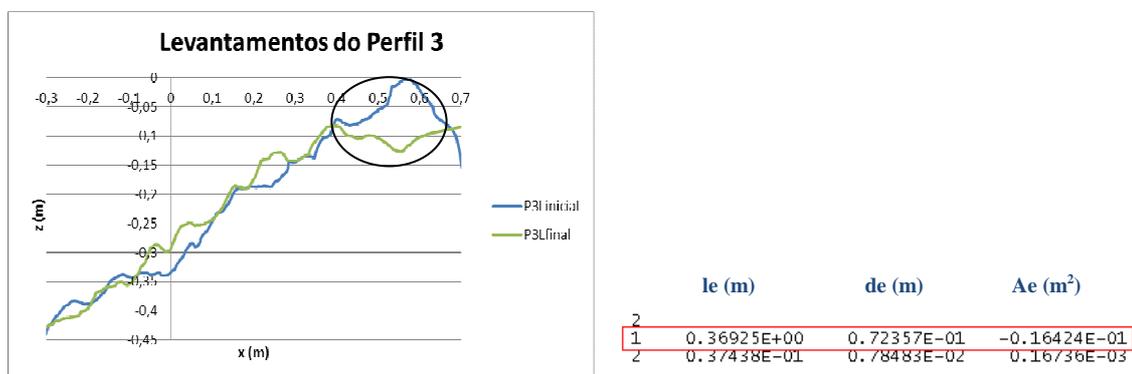


Figura 11. Evolução do Perfil 3 e cálculo dos parâmetros de dano entre os levantamentos inicial e final relativos à série de ensaios de Preia-mar

3.3 Variante 3

Com o objetivo de detetar se a falibilidade dos levantamentos da Variante 2 residia no padrão monocromático, ou na textura muito regular do talude, foi testada uma nova variante do perfil com textura menos homogénea (Figura 12). Para isso utilizaram-se cubos Antifer de 200 g, interrompidos por uma faixa de tetrápodos de 200 g, colocados sensivelmente na zona ativa do manto. A banquetta era constituída por enrocamento de 48-96 g.

A reconstrução da envolvente do talude, desta variante, permitiu verificar que se mantinha a pouca definição dos seus elementos constituintes, bem como as dificuldades de reconstrução nos limites da fotografia (Figura 12).

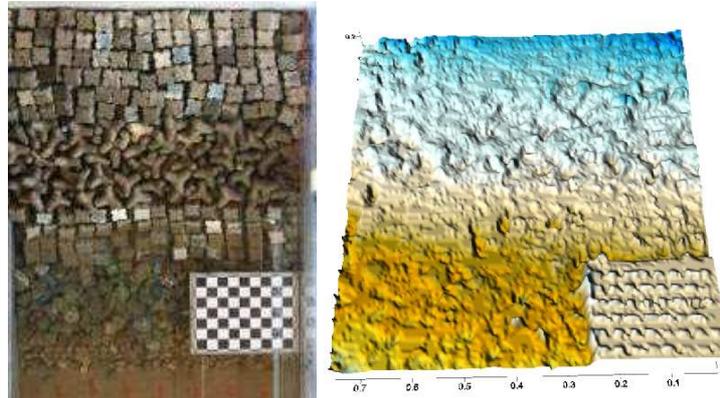


Figura 12. Variante 3. Estado e envolvente do manto resistente correspondentes ao levantamento realizado

3.4 Variante 4

Com os ensaios desta variante, pretendeu-se testar a eficácia do levantamento fotogramétrico na presença de um manto com uma textura regular mas com um padrão cromático irregular, tendo para isso sido utilizado um manto de tetrápodos pintados de três cores diferentes e colocados segundo um padrão de cores aleatório. A banquetta do pé do talude continuou no entanto, a ser constituída por enrocamento de cor homogénea, de modo a testar a definição do levantamento na transição de um padrão colorido para um padrão monocromático.

Nos levantamentos realizados com esta variante, obtiveram-se envolventes do manto, com melhor definição dos elementos constituintes do manto resistente, sendo mesmo possível identificar os tetrápodos removidos e os depositados sobre a banquetta do pé do talude. Contudo, manteve-se a pouca precisão da reconstrução na zona da banquetta do pé do talude (1) - Figuras 13 e 14.

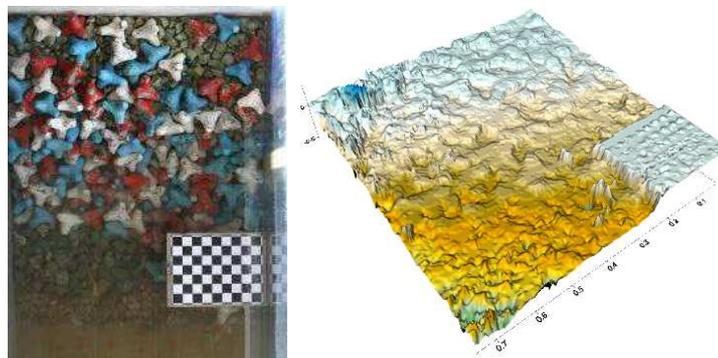


Figura 13. Variante 4. Estado e envolvente do manto resistente correspondentes ao levantamento final relativo à série de ensaios de Baixa-mar

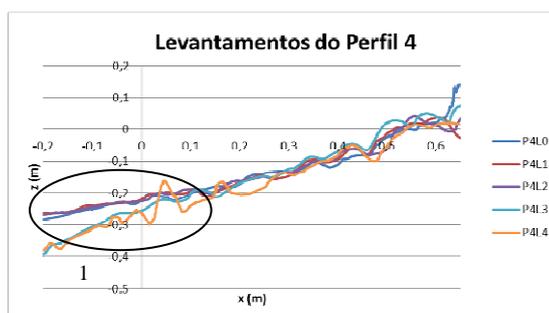


Figura 14. Evolução do Perfil 4 ao longo da série de ensaios de Baixa-mar

3.5 Variante 5

Com o objetivo de introduzir diferenças cromáticas entre o talude e o fundo do canal, realizou-se um único levantamento em que tanto o manto resistente como o pé do talude são totalmente constituídos por tetrápodos pintados, utilizando três cores diferentes, à semelhança da variante anterior. Com esta variante, obteve-se um levantamento mais preciso (Figura 15).

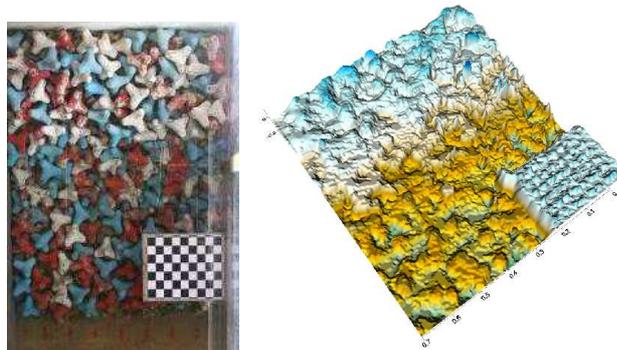


Figura 15. Variante 5. Estado e envolvente do manto resistente correspondentes ao levantamento realizado

3.6 Variante 6

Nesta variante, a alteração introduzida em relação à variante anterior, foi a utilização de enrocamento colorido na banquetta do pé do talude, tendo-se conseguido melhorar significativamente a definição da banquetta do pé do talude (Figura 16).



Figura 16. Variante 6. Estado e envolvente do talude correspondentes ao levantamento realizado no final da série de ensaios de Baixa-mar

A Figura 17 ilustra a evolução do Perfil P2 ao longo dos levantamentos realizados, identificando-se os locais de remoção de tetrápodos ao nível do coroamento (1) bem como de enrocamento da berma do pé do talude (2).

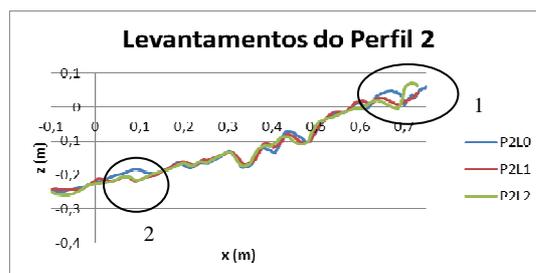


Figura 17. Evolução do Perfil 2 ao longo da série de ensaios de Baixa-mar

3.7 Teste Realizado com uma Estrutura Oca Sobre o Pé do Talude

Neste ensaio, para além de ter sido testada a qualidade do levantamento da envolvente do talude, pretendeu-se também verificar a eficácia da técnica no levantamento de estruturas ocas, preenchidas com enrocamento, bem como comparar a dimensão real de um objeto com as suas dimensões obtidas através do levantamento.

Para o efeito, foi colocado sobre a banquetta do pé do talude, um recipiente transparente preenchido com enrocamento, de cor diferente do da banquetta, o qual foi alvo de um levantamento inicial (Figura 18a). Foi feito um segundo levantamento simulando a erosão do conteúdo do recipiente (Figura 18b).

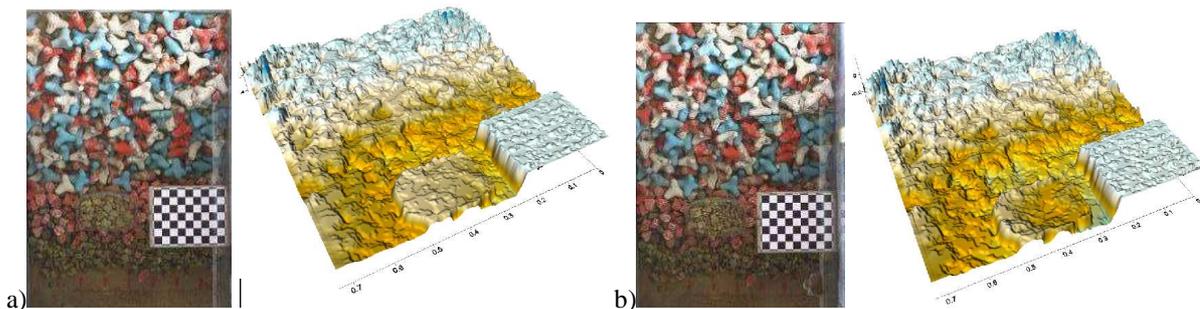


Figura 18. Estado e envolvente do talude correspondentes aos levantamentos a) inicial e b) final

A Figura 19 ilustra o levantamento inicial, realizado com o perfil intacto e o levantamento final, realizado com o perfil erodido. Ilustra ainda o cálculo dos parâmetros de dano medidos entre os dois levantamentos. Obtiveram-se levantamentos praticamente coincidentes, exceto no local de remoção do material (1). Por ser transparente, não foi conseguido o levantamento do recipiente propriamente dito, embora se tenha conseguido o levantamento do material nele contido. O erro registado no levantamento (diferença entre a cota máxima do enrocamento contido no recipiente e a respetiva cota obtida no levantamento) foi de cerca de 2 mm.

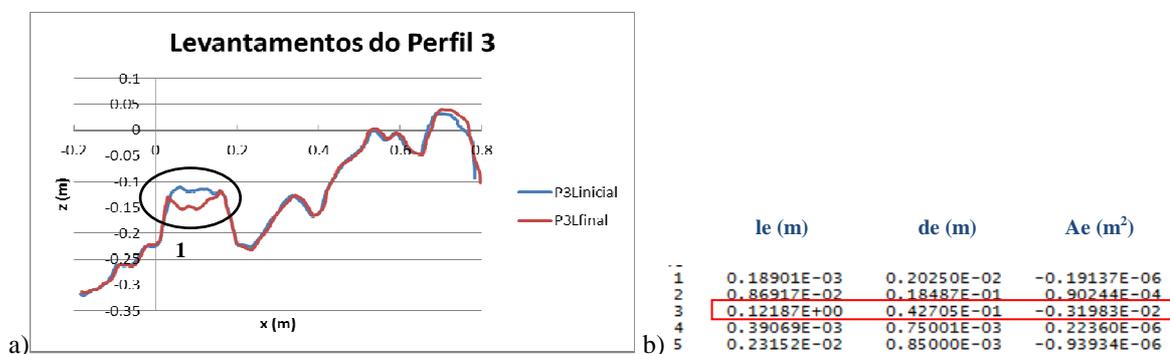


Figura 19. Perfil 3. a) Levantamentos inicial e final b) Cálculo dos parâmetros de dano

4 CONCLUSÕES

Do presente trabalho concluiu-se que o método estereofotogramétrico de levantamentos é um método de aplicação simples, apesar de exigir alguns cuidados durante a fase de calibração dos parâmetros das câmaras. É um método que faz uso de equipamento relativamente económico - apenas duas câmaras fotográficas. Permite ainda, após a conclusão dos ensaios e recorrendo aos ficheiros das reconstruções realizadas para cada levantamento, realizar extrações de novos perfis, em locais diferentes.

Dos ensaios realizados sobressaíram algumas adversidades quanto à utilização da técnica fotogramétrica e que deverão ser tidas em conta:

- O reflexo do talude no vidro do canal, bem como a reflexão provocada pela iluminação existente por cima do canal de ensaios, provocaram distorções na reconstrução fotogramétrica do talude;
- A eventual mobilidade do alvo, provocou flutuações da coordenada “x” nos perfis levantados, sendo necessário a sua posterior correção com recurso a pontos de referência existentes nos perfis, tais como a cota de fundação e a de coroamento;
- Devido às grandes dimensões do modelo, tornou-se difícil o enquadramento fotográfico da totalidade do perfil de modo a que as extremidades esquerda e direita do modelo não apresentassem variações impeditivas da reconstrução fotogramétrica. Pares estereofotogramétricos em que as fotos difiram significativamente uma da outra provocarão distorções nos limites esquerdo e direito do cenário levantado;
- Objetos a flutuar acidentalmente na água provocaram picos de cotas na reconstrução da envolvente;
- A técnica de levantamento fotogramétrico demonstrou não ser eficiente quando os blocos constituintes do talude e o fundo do canal possuem cores semelhantes. A qualidade da reconstrução fotogramétrica revelou-se tanto melhor quanto mais heterogéneo for o padrão de cores utilizado nos blocos do manto resistente.

Para minimizar os problemas causados por estas adversidades aconselha-se:

- Tal como recomendado na bibliografia relativa à utilização do software de calibração e reconstrução [1], a fase de calibração das câmaras é de extrema importância, dado que dela dependem a boa caracterização geométrica do cenário e a boa orientação dos eixos;
- Os elementos fotografados deverão ser comuns nas duas fotografias, de modo a permitir a correta reconstrução dos pares estereofotogramétricos. Deverá ser previamente testada a distância ideal entre as lentes das duas câmaras;
- A confinção do alvo em todas as direções num ponto comum para Baixa-mar e para Preia-mar, de modo a limitar as suas oscilações;
- A utilização de blocos com cores contrastantes entre si e entre o fundo do canal;
- Pretende-se futuramente testar o uso de lentes fotográficas antirreflexo de modo a minimizar os efeitos da iluminação e da reflexão nos levantamentos.

REFERÊNCIAS

1. Ferreira, R., Costeira, J.P., Silvestre, C., Sousa, I. e Santos, J.A. *Using stereo image reconstruction to survey scale models of rubble-mound structures. 1st CoastLab 2006 - International Conference on the application of physical modelling to port and coastal protection*. Porto, Portugal (2006), pp.107-116.
2. Lemos, R. Verificação de fórmulas para a evolução da erosão em taludes de quebra-mares. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (2010).
3. Troch, P. *User Manual: Atime Wave Absorption System*. Gent University, Dep. Civil Engineering, Denmark (2005).
4. Broderick, L. e Ahrens, J. P. “Rip-rap stability scale effects”. Technical Paper 82-3, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS (1982)
5. Van der Meer J. W. *Design of Concrete Armour Layers*. Losada (ed.), Balkema, Rotterdam. *Coastal Structures '99 Conference. Vol. 1*. Santander, Spain (1999), pp. 213-221.