



A Fotogrametria Aplicada à Verificação da Evolução da Erosão em Taludes de Quebra-mares em Ensaios em Modelo Reduzido

Rute LEMOS, João A. SANTOS

Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Tel. 218 443 427, Fax. 218 443 019
E-mail: rlemos@lnec.pt, jasantos@lnec.pt

Sumário

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 objectos nelas contidos.

Este método faz uso de um software (Ferreira, 2006) 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 enrocamento (Lemos, 2010), 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 protector incorpore elementos artificiais como cubos ou tetrápodos.

Palavras chave Quebra-mares de talude, Ensaios em modelo reduzido, Evolução da Erosão, Fotogrametria

1 INTRODUÇÃO

Os quebra-mares de taludes são as estruturas mais utilizadas para a criação de condições de abrigo nos portos portugueses instalados em costa aberta.

Os projectos destas estruturas são realizados no pressuposto de que, durante o período de vida útil das mesmas, serão necessárias obras de reparação, quando as solicitações excederem as condições de projecto, e de manutenção, e quando o estado de fadiga dos materiais puser em causa a estabilidade das estruturas.

O custo destas estruturas e as dificuldades inerentes à sua construção, bem como as consequências da sua ruína nas operações portuárias, justificam a existência de programas de monitorização das mesmas estrutura, de modo a que as intervenções de reparação e manutenção acima referidas possam ser realizadas em tempo útil e com o menor custo possível.

O volume erodido do manto protector de um quebra-mar de taludes por acção da agitação marítima é um indicador fundamental da sua evolução, podendo determinar-se a partir de levantamentos consecutivos da envolvente do manto.

Melby (1999) propôs uma fórmula que permite avaliar a evolução do dano (expresso como $S = A_e/Dn_{50}^2$) partindo da medida da variação em relação ao perfil inicial do perfil da envolvente de quebra-mares de taludes. Tal fórmula foi desenvolvida a partir ensaios de longa duração com modelos físicos reduzidos nos quais se levantou da envolvente de um quebra-mar de enrocamento sujeitos a uma sucessão de estados de agitação.

A motivação do presente trabalho foi, pois, fazer uma primeira abordagem a este tipo de ensaios, com vista a alargar o âmbito dos ensaios de estabilidade e galgamentos de quebra-mares de taludes, realizados no LNEC em modelo físico reduzido, de modo a realizar a previsão da evolução do dano deste tipo de estruturas.

A necessidade de realização de numerosos levantamentos ao longo deste tipo de ensaios torna morosa a execução dos mesmos, se para isso for necessário o esvaziamento do canal (no caso de ensaios bidimensionais), ou mesmo impraticável no caso de ensaios tridimensionais, dada a necessidade de esvaziamento frequente do tanque.

Para reduzir estes tempos mortos, investiga-se neste trabalho a operacionalidade de uma técnica de levantamento da envolvente do manto baseada na reconstituição de cenas submersas a partir de pares de fotografias obtidos sem o esvaziamento do tanque ou canal onde a estrutura está a ser ensaiada.

Os objectivos deste estudo foram, pois:

- Aplicar as fórmulas propostas por Melby para previsão da evolução da erosão em taludes de quebra-mares de enrocamento aos resultados de ensaios com modelos físicos reduzidos de longa duração;
- 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 detectar possíveis limitações da técnica a modelos de quebra-mares cujo manto protector incorpore uma combinação de elementos artificiais e naturais (por ex^o tetrápodos e enrocamentos)

No capítulo seguinte serão descritos os procedimentos de levantamento em ensaios de modelo reduzido a partir da reconstituição de pares de fotografias, enquanto nos capítulos 3 e 4 se apresentam resultados da aplicação daqueles procedimentos no levantamento de taludes de enrocamento e de blocos artificiais e enrocamento, respectivamente. O capítulo 5 termina a comunicação com as conclusões do trabalho já realizado.

2 LEVANTAMENTO ATRAVÉS DO MÉTODO FOTOGRAMÉTRICO

A fotogrametria pode ser definida como a técnica de extrair de fotografias, a forma, as dimensões e a posição dos objectos 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. Para esse efeito, sobre o canal foi instalada uma estrutura que permitiu colocar as câmaras fotográficas nos levantamentos fotogramétricos.

O equipamento utilizado consistiu em duas câmaras fotográficas montadas numa configuração fixa e aptas a disparar duas fotografias simultâneas (Figura 1).



Figura 1 - Câmaras fotográficas utilizadas nos levantamentos

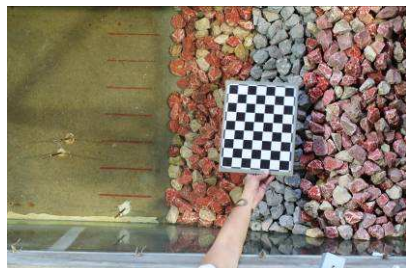
A Figura 2 ilustra alguns dos pares estereofotogramétricos obtidos durante um dos levantamentos efectuados.



IMG_2202_l.JPG



IMG_2202_r.JPG



IMG_2204_l.JPG



IMG_2204_r.JPG

Figura 2 - Exemplo de alguns pares estereofotogramétricos

Embora a separação entre as máquinas possa variar, esta terá que manter um limite aceitável, pois uma grande separação conduzirá a fotografias de faces diferentes do mesmo

objecto, tornando a reconstrução impossível. Todos os levantamentos apresentados nesta comunicação foram realizados com uma distância fixa de aproximadamente 16 cm entre os centros das lentes das câmaras.

Foram utilizadas câmaras fotográficas digitais (Canon EOS 350D) com lentes de distância focal fixa de 35 mm (Canon EF 35 mm $f/2$), permitindo trabalhar com três tipos de resolução; 1728x1152 pixel (baixa), 2496x1664 pixel (média) e 3456x2304 pixel (alta), originando ficheiros com 2, 4 e 8 megapixel respectivamente. A resolução ideal para este tipo de trabalho é a média, dado que permite obter fotografias com boa resolução e é compatível com o software de tratamento de dados.

A velocidade de abertura seleccionada, por ser a ideal para uma distância de focagem de cerca de 2 m, foi de $f/9$. A Figura 8 ilustra quatro pares de fotografias obtidos com as câmaras acima descritas.

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 (Ferreira, 2006). O pacote de software utilizado consiste em duas aplicações distintas que se descrevem de seguida.

2.1 Calibração das câmaras

Consiste na identificação dos parâmetros das câmaras e sua posição perante o cenário observado. Cada vez que se inicia uma nova sessão fotográfica, os parâmetros da máquina tais como a focagem e a orientação relativa podem variar, em resultado de uma ligeira mudança na posição das câmaras relativamente ao objecto fotografado. É, pois, recomendado que para cada sessão seja feita uma calibração.

O processo de calibração consiste em seleccionar os quatro cantos internos de um padrão axadrezado, cuja dimensão da quadrícula servirá de referência para as dimensões do cenário reconstruído (Figura 3). A mesma quadrícula serve também como referência para a identificação do plano de água.

O primeiro canto seleccionado define a origem do referencial e o segundo canto a direcção do eixo dos x . A selecção dos cantos deverá ser feita contra o sentido do ponteiro dos relógios, devendo a ordem de selecção ser mantida constante para cada par de fotografias. É necessário um mínimo de dois pares de fotografias para o processo de calibração. No entanto, para resultados satisfatórios, será conveniente a utilização de cerca de 15 pares de fotografias.

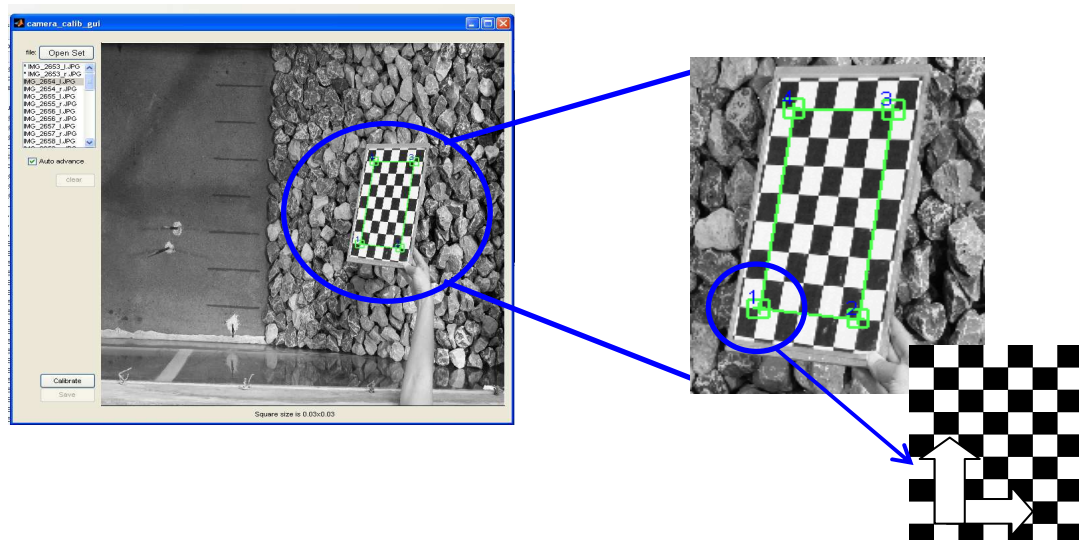


Figura 3 - Processo de selecção dos cantos internos do alvo

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.

2.2 Reconstrução

Consiste na identificação da profundidade a partir das duas vistas ligeiramente desfasadas do mesmo cenário (Figura 4). Com o software utilizado é possível reconstruir a parte emersa, submersa ou ambas as partes, uma vez que este é capaz de rectificar o efeito da refração existente no plano da água.

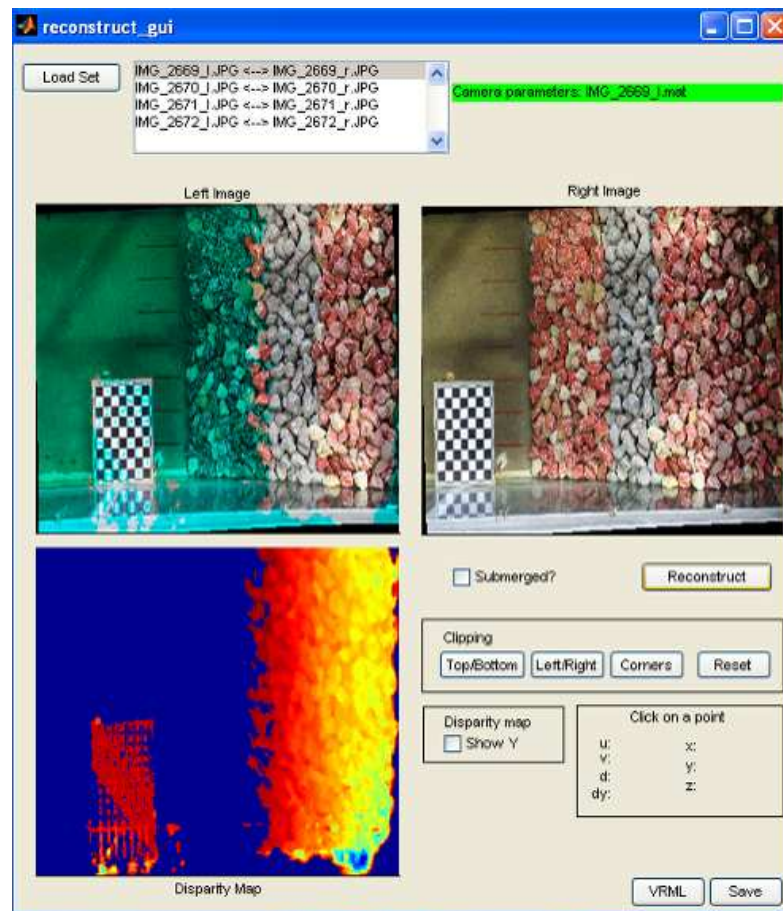


Figura 4 - Reconstrução de um cenário parcialmente submerso, no início de um dos ensaios

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 5).

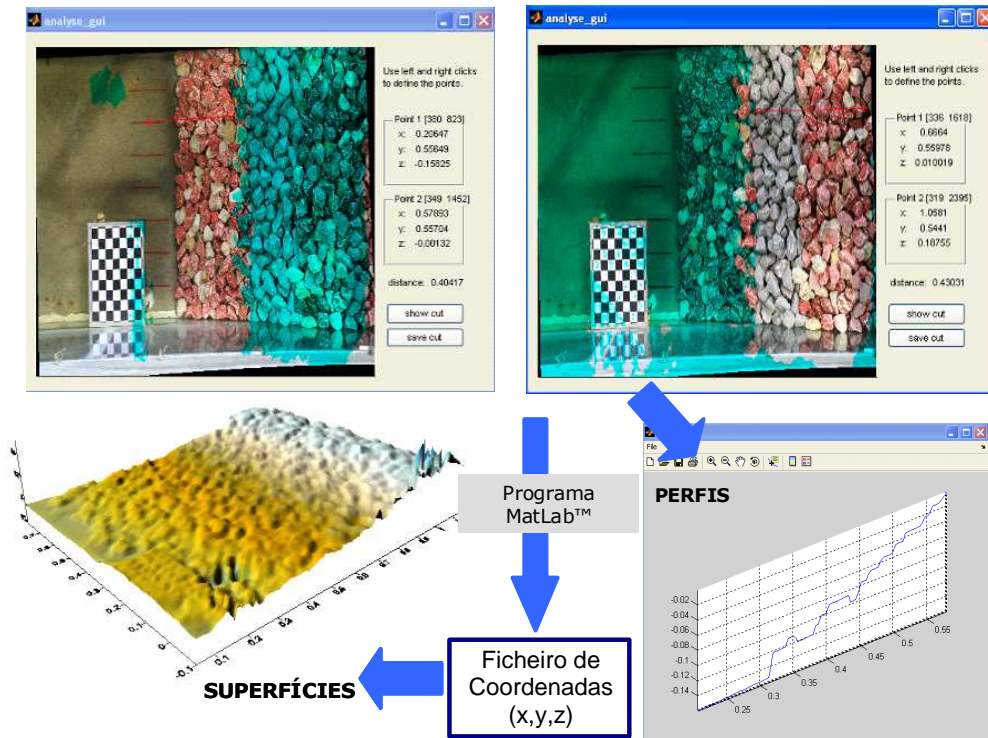


Figura 5 - Extração de perfis através da análise das partes submersa e emersa de uma reconstrução

3 TALUDES DE ENROCAMENTO

Um dos primeiros testes ao pacote de levantamento a partir de reconstituição fotogramétrica foi um conjunto de ensaios (realizados nas instalações experimentais do Departamento de Hidráulica e Ambiente - Figura 6), que pretendia reproduzir os apresentados por Melby (1999). Para tal utilizou-se um 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 7). 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 activa onda, AWASYS, Troch (2005), que permite uma absorção dinâmica da reflexão.



Figura 6 - Instalações experimentais do Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC



Figura 7 - Canal de ondas irregulares COI1: a) Vista exterior; b) Vista superior; c) Vista interior

3.1 Condições experimentais e implementação do modelo físico no canal

Na realização dos ensaios em modelo físico, foram utilizadas as condições experimentais que se encontram resumidas no Quadro 1.

Condições Experimentais	
Inclinação da praia	1:20
Inclinação do talude	1:2
Altura de coroamento	30,5 cm
Diâmetro nominal do enrocamento D_{n50}	3,64 cm
Peso médio do enrocamento	128 g
Densidade do enrocamento	2,7 g/cm ³
Densidade de colocação dos blocos (duas camadas)	1285 blocos/m ²

Quadro 1 - Condições experimentais

O perfil longitudinal consiste numa rampa de cerca de 11,3 m com inclinação de 1:20 (inclinação da praia) que termina numa plataforma horizontal onde foi construída a estrutura. A profundidade junto ao pé do talude foi de 11,9 cm ou 15,8 cm consoante o nível de água ensaiado. O desenvolvimento dos fundos entre a rampa e o gerador é feito através de um declive de 2,2 % ao longo de 15,2 m (Figura 8).

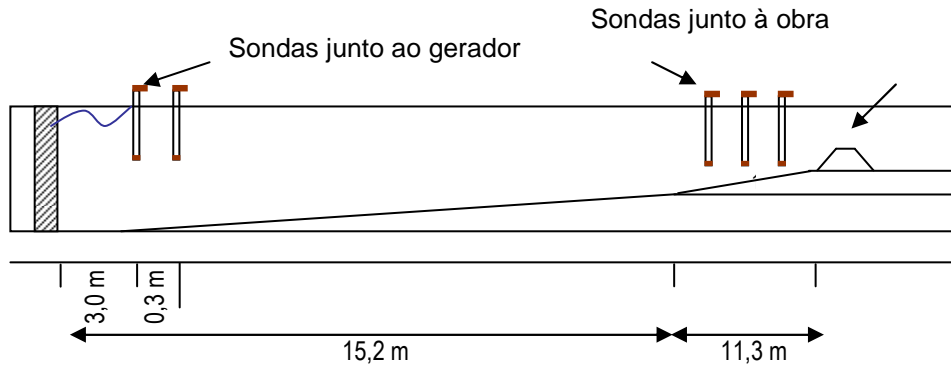


Figura 8 - Perfil longitudinal da estrutura ensaiada

O modelo ensaiado possuía características análogas às dos quebra-mares correntemente construídos, sendo constituído por um núcleo, um filtro e um manto protector.

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, M_{50} , de 32 g. A Figura 9 ilustra o aspecto da estrutura ensaiada e o seu perfil transversal.

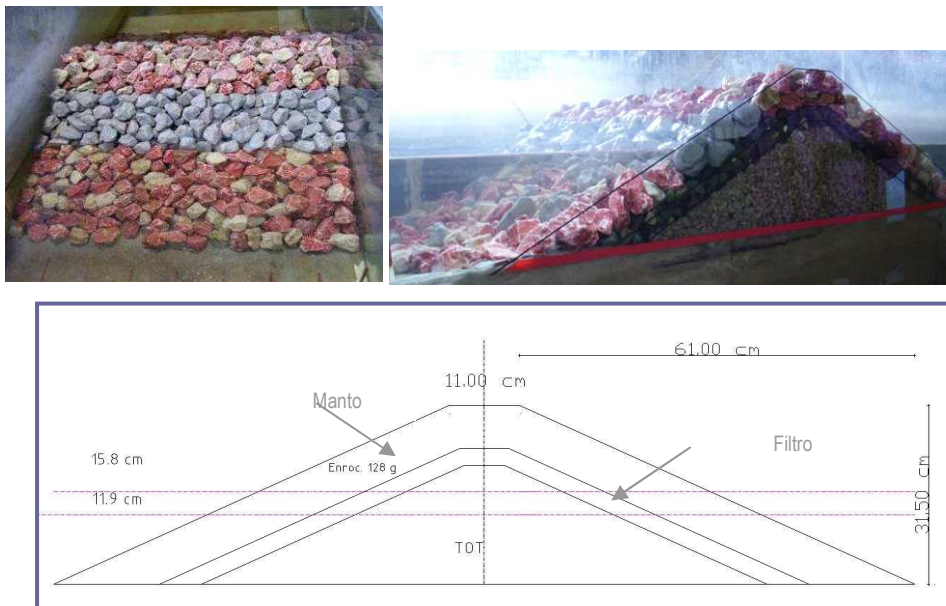


Figura 9 - Aspecto da estrutura ensaiada (a) e respectivo perfil transversal (b)

No presente trabalho, de modo a obter-se uma amostragem significativa dos danos ocorridos no talude do quebra-mar para a série de ensaios de que se mostram resultados, foi feito, para além de um levantamento do perfil não danificado (L0), 57 levantamentos (L1 a L57). Em cada levantamento foram extraídos 7 perfis segundo os alinhamentos mostrados na Figura 10, obtendo-se assim 399 perfis da totalidade dos ensaios realizados.



Figura 10 - Localização dos perfis levantados

3.2 Determinação do nível de dano e parâmetros 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 (1982) e de Van der Meer (1999), os quais definiram o dano (S) como a área transversal erodida adimensionalizada pelo quadrado do diâmetro nominal dos elementos do manto protector Eq. (1).

$$S = \frac{A_e}{\left(\frac{M_{50}}{\rho_s}\right)^{2/3}} = \frac{A_e}{D_{n50}^2} \quad (1)$$

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

Usando um programa elaborado em Visual Fortran™ que usa como dados de entrada o perfil inicial e o perfil a comparar, é possível calcular a área erodida (A_e), a largura erodida (L) e a profundidade de cobertura (C), embora apenas a A_e tenha sido objecto de tratamento para a determinação do dano. São, no entanto, dados valiosos para tratamento estatístico bem como para estabelecer um relacionamento da evolução dos valores desses parâmetros com a evolução do dano (S). A Figura 11 ilustra a definição dos parâmetros de dano.

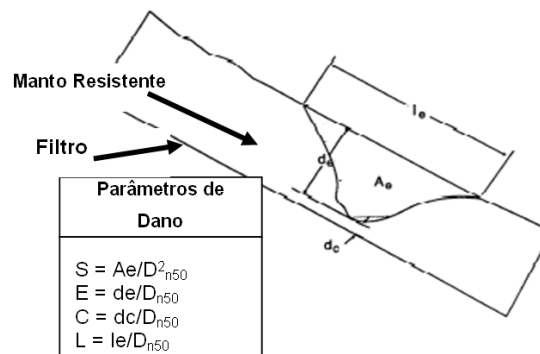


Figura 11 - Definição dos parâmetros de dano

Em cada um dos levantamentos foi considerada a maior área erodida de cada um dos sete perfis, com vista ao cálculo do dano para cada perfil. Por fim foi determinado o dano médio medido.

Na Figura 12 são apresentados alguns gráficos exemplificativos da evolução dos perfis levantados ao longo de uma série de ensaios. Neles é possível observar a progressão gradual do dano, verificando-se, no final da série de ensaios, o aparecimento do tradicional perfil em “S”.

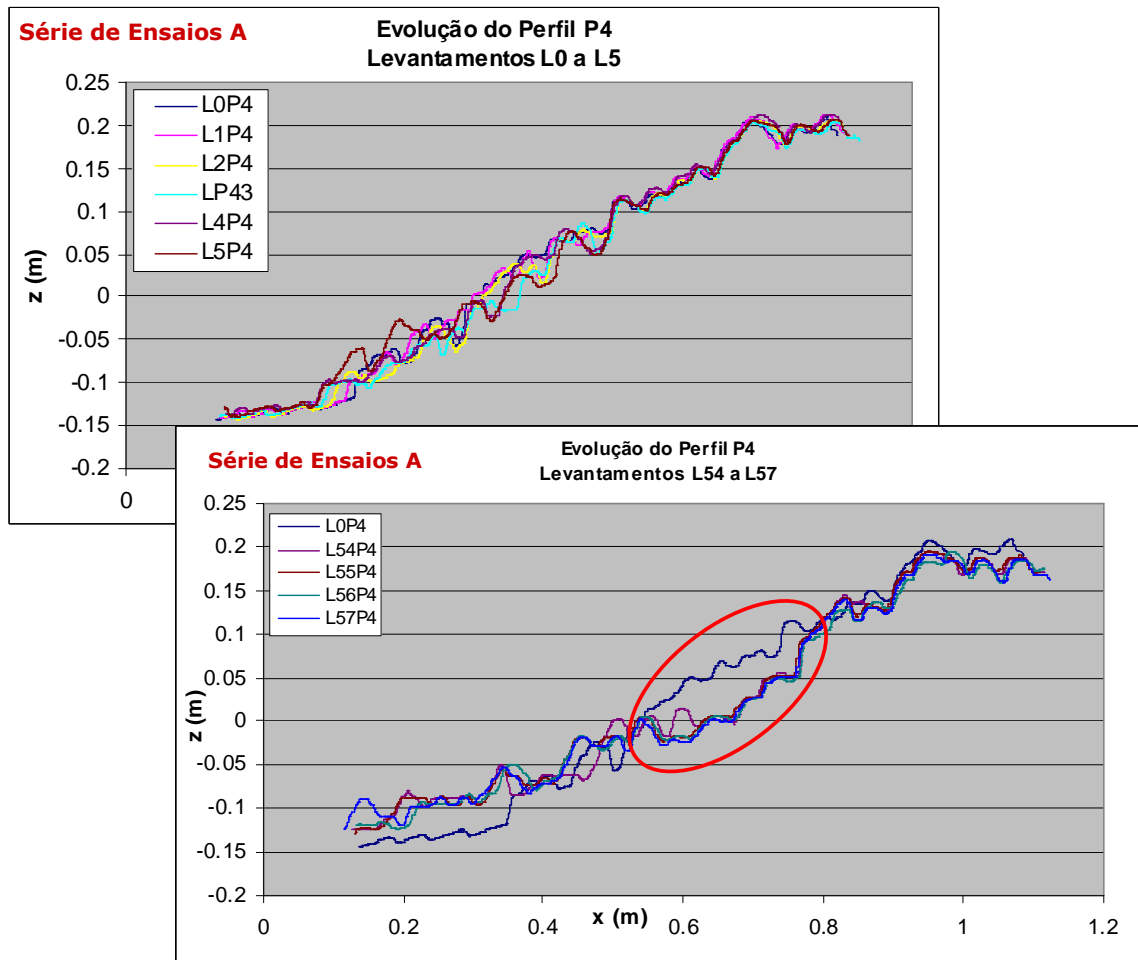


Figura 12 - Evolução do Perfil P4 entre o levantamento inicial (L0) e final (L57)

A Figura 13 ilustra o aspecto do perfil ensaiado, bem como o respectivo levantamento fotogramétrico da envolvente no final da mesma série de ensaios.

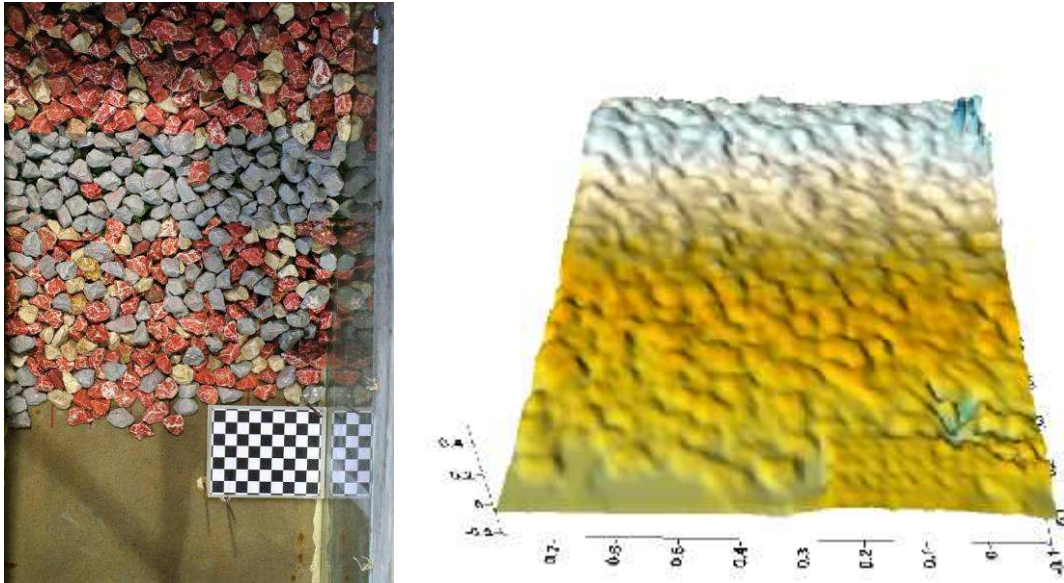


Figura 13 - Evolução do Perfil P4 entre os levantamentos inicial (L0) e final (L57)

A Figura 14 representa um gráfico relativo a um levantamento realizado no final da série de ensaios já mencionada, com e sem água no canal. Neste caso, a altura de água sobre o pé do talude era 15.8 cm. Estes tipo de levantamentos, realizados com o objectivo de se verificar a qualidade da correcção da refacção na interface ar-água, por parte do software de reconstrução, revelaram que as diferenças entre ambos foram mínimas, tendo a máxima diferença de cotas registada, sido de cerca de 1,9 cm na zona do pé do talude (assinalada a vermelho). Assim sendo, poderá afirmar-se que a reconstrução realizada na parte submersa do talude corrige a refacção com a fiabilidade necessária.

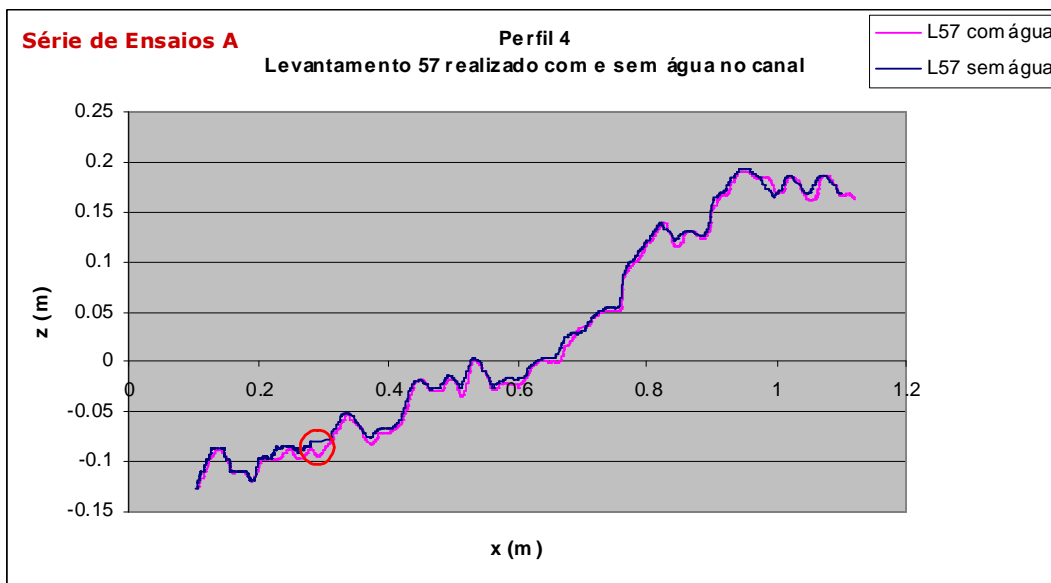


Figura 14 - Levantamentos comparativos do talude realizados com e sem água no canal

4 TALUDE DE ELEMENTOS ARTIFICIAIS E ENROCAMENTO

Com vista a detectar possíveis limitações da técnica a modelos de quebra-mares cujo manto protector incorpore uma combinação de elementos artificiais e naturais, tais como, por exemplo tetrápodos e enrocamento, foram realizadas algumas reconstruções fotogramétricas, utilizando um modelo de quebra-mar, cujo manto de protecção do extradorso era constituído por tetrápodos com massa de 320 g, dispostos em duas camadas, que se apoiavam numa berma de pé de talude constituída por enrocamento com massas compreendida entre 48 e 96 g (Figura 15 a)).

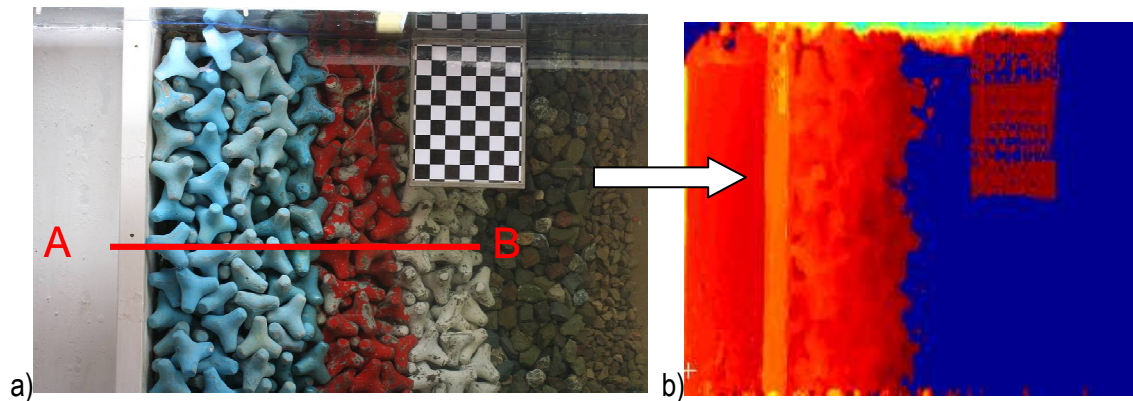


Figura 15 - a) Talude constituído por tetrápodos e enrocamentos. b) Reconstrução fotogramétrica do talude

Os fundos em frente ao local de implantação do perfil foram reproduzidos por intermédio de uma rampa com uma inclinação de cerca de 1:30 a partir da cota do pé do talude, até à cota -0,62 m(ZH) (Figura 16).

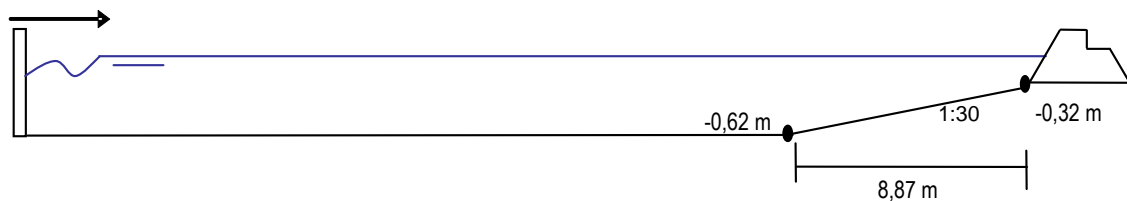


Figura 16 - Esquema da implantação do modelo no canal de ondas irregulares

A partir da reconstrução fotogramétrica, obteve-se uma primeira matriz de reconstrução, permitindo criar uma grelha a partir da qual foi possível obter a envolvente da totalidade do talude (manto resistente constituído por tetrápodos e banquetas de pé do talude constituído por enrocamentos)

A Figura 17 ilustra a envolvente obtida, bem como um perfil representativo do talude (Perfil A-B).

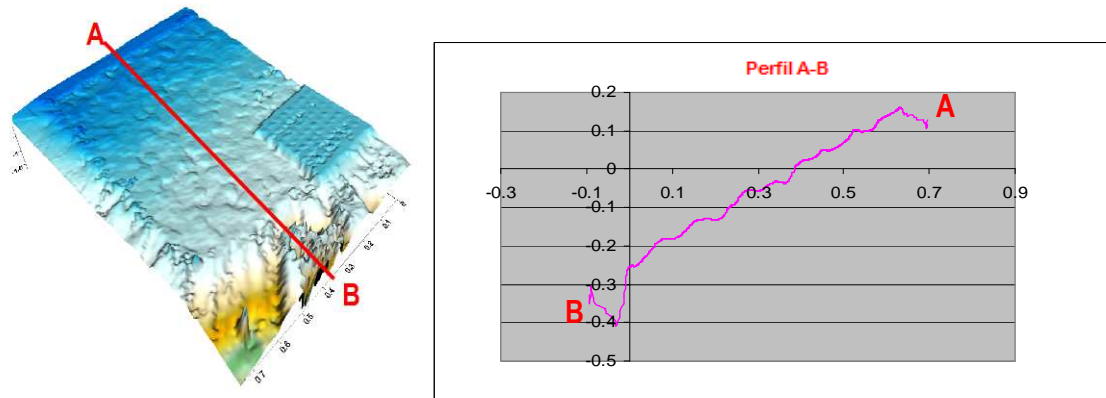


Figura 17 - Perfil A-B obtido a partir da matriz de reconstrução

Os comportamentos da envolvente e do perfil apresentaram cotas compatíveis com a realidade, sensivelmente até à linha da banquetta do pé do talude (onde ocorre uma mudança brusca no padrão do cenário fotografado). Para cotas abaixo dessa linha, os valores obtidos diminuem bruscamente, não correspondendo ao perfil realmente fotografado.

Utilizando a mesma reconstrução, foi criada uma nova matriz, eliminando-se desta vez os pontos coordenados correspondentes à zona afectada, conseguindo-se uma envolvente com melhor definição (Figura 18).

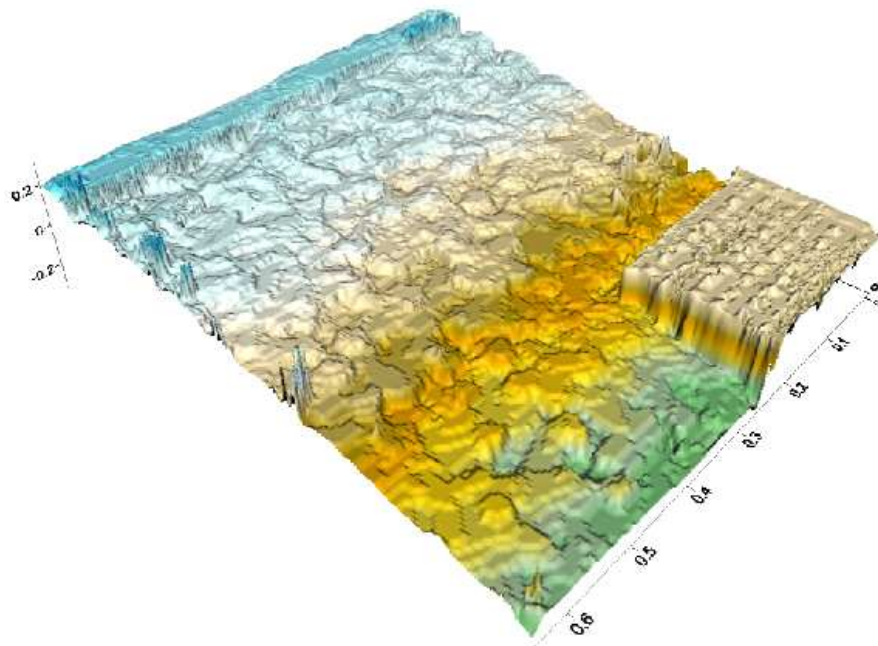


Figura 18 - Envolvente do talude, obtida a partir da matriz de reconstrução corrigida

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Do presente estudo 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 extracções de novos perfis, em locais diferentes.

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

- Tal como recomendado na bibliografia relativa à utilização do software de calibração e reconstrução (Ferreira, 2006), 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;
- O alvo, embora confinado lateralmente, é passível de sofrer alguns movimentos segundo os eixos dos x e y, o que poderá introduzir alguns erros na reconstrução. A referenciação de pontos fixos do modelo poderá ajudar a superar este problema;
- Eventuais mudanças de nível de água terão que ser contabilizadas aquando da obtenção dos perfis levantados. O levantamento de “perfis de controlo”, ou seja, levantamentos dos perfis praticamente a seco, onde a origem das cotas é na realidade o fundo do canal junto ao pé do talude são uma ajuda preciosa na resolução deste problema.
- Tratando-se de um ensaio em canal não deverão ser levantados perfis demasiado perto dos vidros, dado que a existência de reflexos dificultará a reconstrução nesses locais.

Continuidade do estudo

O presente trabalho baseia-se num estudo ainda em curso no LNEC, do qual tem surgido algum optimismo quanto à aplicação dos métodos fotogramétricos nos levantamentos efectuados. A sua utilização em ensaios em modelo físico, para a previsão da evolução do dano em quebra-mares de taludes seria uma ferramenta valiosa, tanto para a previsão das necessidades de obras de manutenção numa determinada fase da vida útil da estrutura de protecção de modo a prever estados de ruína, como para a previsão de custos de manutenção da obra ao longo da sua vida útil.

Salienta-se que este trabalho faz parte de um estudo que pretende, a curto prazo, realizar uma série de tarefas que permitam complementar o estudo, tais como:

- Conseguir uma amostragem significativa de perfis de modo a comparar os valores de dano medidos com os valores previstos pela fórmula de Melby.
- Lançar as bases para estender a utilização de fórmulas semelhantes a diferentes climas de agitação e ainda à avaliação da erosão de quebra-mares com diferentes geometrias, aprofundando ainda aplicabilidade da técnica fotogramétrica a taludes de quebra-mares cujo manto protector incorpore diferentes combinações de materiais.
- Apesar de, ao longo deste trabalho se ter desenvolvido algum software com vista a agilizar o pós-processamento dos dados resultantes das calibrações e reconstruções fotogramétricas, é de todo o interesse a criação de mais software auxiliar, de modo a sistematizar esse processamento, atendendo a que a quantidade de dados, quer respeitantes à agitação, quer respeitantes aos levantamentos, é normalmente volumosa e de tratamento moroso, merecendo, por isso, um tratamento mais expedito.



6 Referências Bibliográficas

- 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.
- Lemos, R. (2010). 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.
- Melby, J.A. "Damage Progression on Rubble-Mound Breakwaters". Technical Report CHL-99-17. US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, USA (1999)
- Troch, P. *User Manual: Active Wave Absorption System*. Gent University, Dep. Civil Engineering, Denmark (2005).
- 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)
- 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.