

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010**

**VERIFICAÇÃO DE FÓRMULAS PARA A EVOLUÇÃO DA EROSÃO EM
TALUDES DE QUEBRA-MARES**

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

RESUMEN: (*1^{era}. hoja*)

Os quebra-mares de taludes são estruturas de protecção portuária em cujo projecto se assume a necessidade de obras de manutenção ou reparação durante a sua vida útil. Uma das grandezas relevantes para a avaliação da necessidade de realização de obras é o volume erodido do manto protector por acção da agitação marítima. Melby (1999) apresentou uma fórmula para previsão da evolução do dano em quebra-mares de taludes com base nas características da agitação neles incidente. Neste trabalho apresentam-se os resultados do trabalho realizado com o objectivo de avaliar a aplicabilidade daquela fórmula em condições de agitação diferentes das consideradas por aquele autor.

De modo a atingir esse objectivo reproduziram-se as experiências descritas por Melby (1999). Tratam-se de ensaios de longa duração em modelo físico reduzido em que sequências de estados de agitação estacionários vão atingindo o manto protector e se mede a área erodida no final da actuação de cada estado de agitação. Esta medição foi realizada a partir da reconstrução de pares estereoscópicos de fotografias em que a refração induzida pela interface ar-água é corrigida. Tal significa que aquelas fotografias podem ser tiradas mantendo-se a água no canal. Pretendeu-se, com a utilização desta técnica de levantamento avaliar a sua operacionalidade em ensaios de longa duração, para os quais seja necessário o levantamento exaustivo de perfis.

ABSTRACT:

Breakwaters are maritime structures, whose project assumes the need of maintenance or repair works during their lifetime. One of the quantities to evaluate the need of repair works is the eroded volume from the armour slope. Melby (1999) presented a formula for predicting the damage evolution of rubble mound breakwaters based on the incident wave characteristics. This work presents the results of the assessment of the applicability of that formula for wave conditions different from those considered by Melby.

In order to attain this goal, the tests performed by Melby (1999) were reproduced. These are long-term scale model tests in which sequences of stationary waves reach the armour layer and the eroded area is measured at the end of each test. This measurement was carried out using photographs stereoscopic reconstruction, in which, refraction due to the air-water interface is corrected. This means that it is not necessary to empty the flume in order to take those photographs. The use of this survey technique aimed to infer on its operability in long-term scale model tests, where intensive profile survey is necessary.

PALAVRAS CHAVE: Quebra-mar, Evolução do dano, Fotogrametria

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 da estrutura, de modo a que as intervenções de reparação e manutenção possam ser realizadas em tempo útil e com o menor custo possível.

A ruína de um quebra-mar pode ocorrer devido a diferentes modos de falha. No entanto, de todos eles, a instabilização do manto resistente de um quebra-mar de taludes é a mais crítica para a sua integridade e funcionalidade, dado que a perda de blocos do manto pode resultar na perda de materiais finos, originando fenómenos de infra-escavação, especialmente se várias quedas ocorrerem na mesma zona do manto.

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

Fazendo-se uso da formulação proposta por Melby (1999), que teve por base os resultados de cinco séries de ensaios de longa duração, é possível prever a evolução do dano do manto resistente de um quebra-mar de taludes numa determinada fase da vida útil da estrutura.

Para os casos em que se tem uma sequência de estados de agitação, a formulação proposta por Melby foi a seguinte:

$$\bar{S}(t) = \bar{S}(t_n) + a_s (N_s)^5 T_m^{-b} (t^b - t_n^b) \quad \text{para} \quad t_n < t < t_{n+1} \quad [1]$$

onde:

- $\bar{S}(t)$ - Danos verificados no instante t ;
- $\bar{S}(t_n)$ - Danos verificados no instante t_n ;
- N_s é o número de estabilidade calculado pela Eq [3]

Este modelo permite calcular, para cada intervalo em que H_s e T_m são constantes, o incremento do dano médio, \bar{S} , possibilitando assim o cálculo da evolução do dano em situações em que a agitação é variável ao longo do tempo. Alternativamente, utilizando dados espectrais foi proposta a Equação

$$\bar{S}(t) = \bar{S}(t_n) + a_p (N_{m0})^5 (T_p)^{-b} (t^b - t_n^b) \quad \text{para} \quad t_n < t < t_{n+1} \quad [2]$$

onde:

- $N_{m0} = \frac{H_{m0}}{\Delta D_{n50}} \quad [3]$
- H_{m0} é a altura de onda significativa definida a partir do espectro do estado de agitação;
- T_p é o período de pico do espectro.

Nas Eqs [1] e [2], a_s , a_p e b são coeficientes empíricos de localização (dependentes da localização da rebentação) e de escala, respectivamente, determinados mediante a realização de ensaios. O melhor ajuste das Eqs 1 e 2 aos resultados dos ensaios supracitados, foi obtido com os seguintes valores: $a_s=0,025$, $a_p=0,0202$ e $b=0,25$.

$$\bar{S}(t) = \bar{S}(t_n) + 0.025(N_s)^5 T_m^{-0.25} (t^{0.25} - t_n^{0.25}) \text{ para } t_n < t < t_{n+1} \quad [4]$$

$$\bar{S}(t) = \bar{S}(t_n) + 0.0202(N_{m0})^5 (T_p)^{-0.25} (t^{0.25} - t_n^{0.25}) \text{ para } t_n < t < t_{n+1} \quad [5]$$

Com estas equações é possível determinar a evolução dos danos ocorridos entre t_n e t_{n+1} sem que seja necessário saber a sua evolução anterior a t_n . Contudo, é necessário saber a duração dos consecutivos estados de agitação que solicitaram o quebra-mar durante o intervalo de tempo em estudo. No entanto, tal formulação não é suficientemente geral para ser aplicada a todos os tipos de elementos utilizados nos mantos protectores nem a todas as inclinações do manto, ou seja, é necessário o ajuste da mesma para cada tipo de estrutura e características de agitação, sendo para isso, necessária, a realização de ensaios de longa duração em modelo físico reduzido.

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, visando a gestão dos resultados neles obtidos 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.

Este trabalho tem, pois, como objectivos:

- 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.

ENSAIOS EM MODELO FÍSICO

Os ensaios foram realizados nas instalações experimentais do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) num dos canais de ondas irregulares, designado por COI1. Este canal tem, aproximadamente, 50 m de comprimento, 1,60 m de largura e 0,80 m 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 o sistema AWASYS (Active Wave Absorption System), de absorção activa da onda (Troch, 2005), que permite uma absorção dinâmica da reflexão.

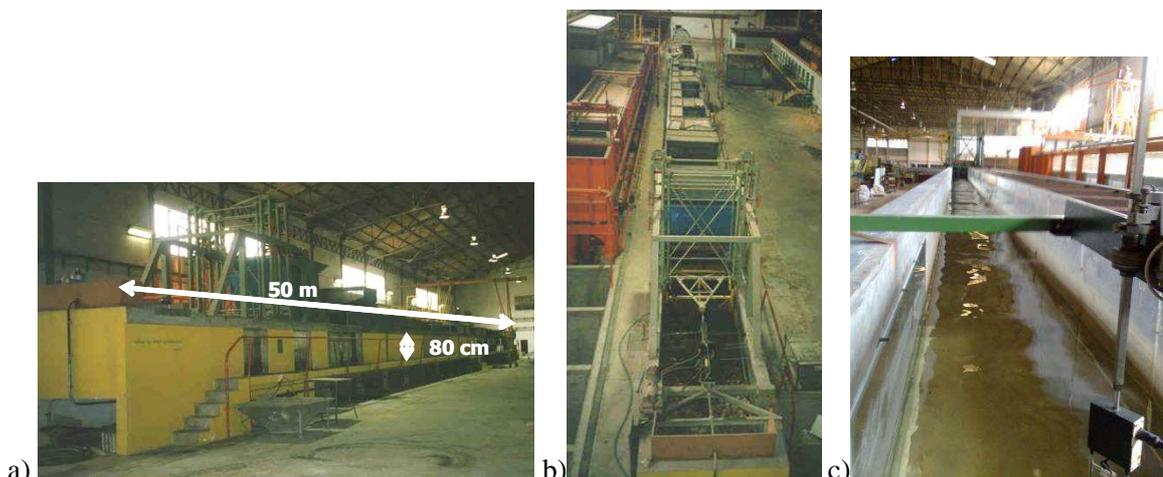


Figura 1 - Canal de ondas irregulares COI1: a) Vista exterior; b) Vista superior; c) Vista interior.

Condições experimentais e implementação do modelo físico no canal

As condições experimentais utilizadas na realização dos ensaios foram as que se encontram resumidas no Quadro 1.

Quadro 1 - Condições experimentais

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

O perfil longitudinal da implementação do modelo no canal é ilustrado na Figura 2. Este perfil 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.

Salienta-se o facto de a parte inicial da propagação da onda não ser exactamente igual à dos ensaios que conduziram à formulação, dado que tanto a altura de água junto ao gerador, como a distância de propagação da onda entre o batedor e a praia, são inferiores às dos ensaios descritos por Melby (1999).

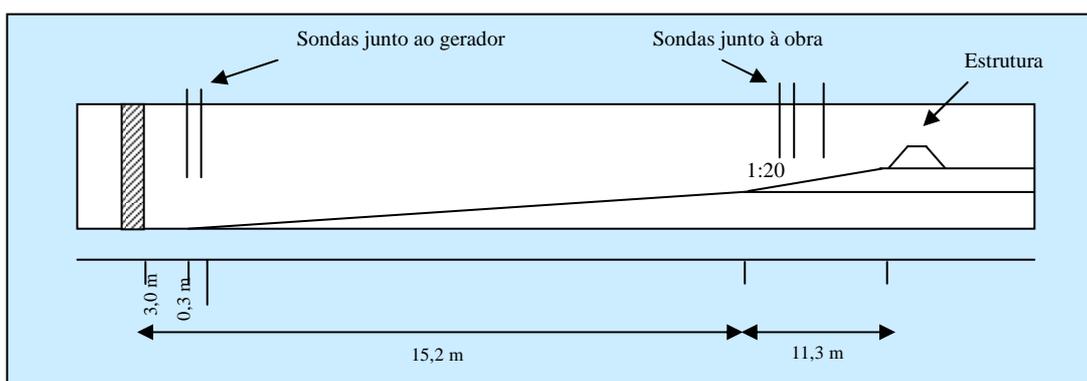


Figura 2 - Perfil longitudinal da estrutura ensaiada.

O modelo ensaiado foi em tudo semelhante ao utilizado nos ensaios que originaram a formulação e de características análogas às dos quebra-mares correntemente construídos: núcleo; filtro e manto protector. O 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, igual a um quarto da massa mediana dos elementos do manto protector.

Os elementos constituintes do manto protector foram escolhidos à mão com o intuito de terem peso uniforme e igual a 128 g. Dado o material utilizado ter massa volúmica igual a $2,7 \text{ g/cm}^3$, o diâmetro nominal, D_{n50} , do material utilizado resultou igual a 3,64 cm. Os elementos do manto foram colocados contiguamente aos elementos já colocados sem serem empurrados e evitaram-se orientações particulares dos elementos e padrões de colocação. A Figura 3 ilustra o aspecto da estrutura ensaiada e o seu perfil transversal.

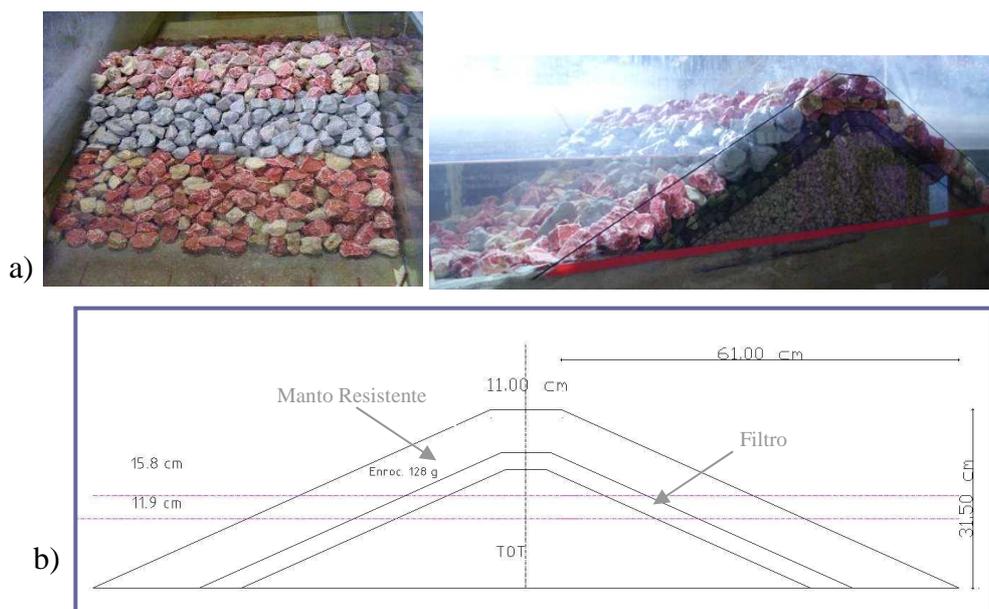


Figura 3 - Aspecto da estrutura ensaiada (a) e respectivo perfil transversal (b).

Agitação incidente

Os ensaios foram realizados com ondas irregulares, tendo sido reproduzidos 6 estados de agitação, utilizando dois níveis de água, dois períodos de pico e seis alturas de onda significativa. O Quadro 2 resume as características da agitação utilizadas para gerar o sinal fornecido ao gerador de ondas irregulares.

Quadro 2 - Características da agitação utilizadas para gerar o sinal fornecido ao gerador de ondas irregulares

Ensaio	Profundidade no Pé Talude – h_t (cm)	Profundidade junto ao gerador (m)	T_p (s)	H_{m0} (cm)
1	11,9	0,550	2,48	9,0
2	11,9	0,550	2,48	11,0
3	11,9	0,550	2,48	12,0
4	15,8	0,594	2,59	10,0
5	15,8	0,594	2,59	13,0
6	15,8	0,594	2,59	14,0

A obtenção da agitação incidente foi efectuada através da geração prévia, com uma frequência de geração de 40 Hz, de um conjunto de ondas caracterizado por um espectro empírico do tipo, com um factor de pico, ou factor de esbelteza do espectro, $\gamma=3,3$.

Na medição da agitação foram utilizadas 5 sondas resistivas, duas junto ao batedor e três junto à estrutura a ensaiar, de modo a permitir a separação da agitação incidente e reflectida e cujas posições são ilustradas na Figura 4.

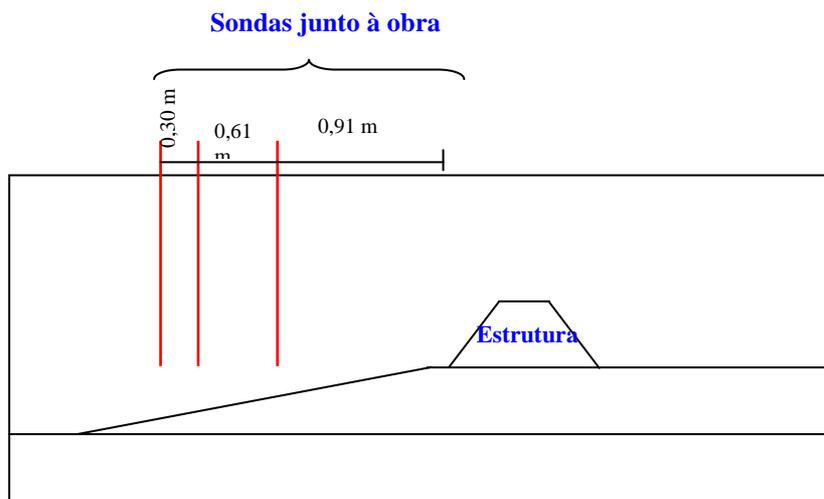


Figura 4 - Esquema de colocação das sondas junto à obra

No início de cada sessão de ensaios procedeu-se à calibração daquelas sondas, donde resultaram as respectivas constantes de calibração, as quais foram posteriormente introduzidas no software de geração e aquisição de dados.

Foram feitos registos da agitação durante os ensaios de modo a possibilitar a determinação dos valores das alturas de onda significativa e períodos de pico.

Os espectros da agitação gerados e a aquisição de dados, bem como o seu tratamento (alturas de onda significativas e períodos de pico) durante os ensaios, foram efectuados mediante utilização do programa SAM - Simulação da Agitação Marítima (Capitão, 2002), uma ferramenta básica dos ensaios em modelo físico no Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas do DHA.

A Figura 5 ilustra os resultados da análise espectral de uma série temporal da elevação da superfície livre referente à actuação de um estado de mar com a duração de 15 minutos.

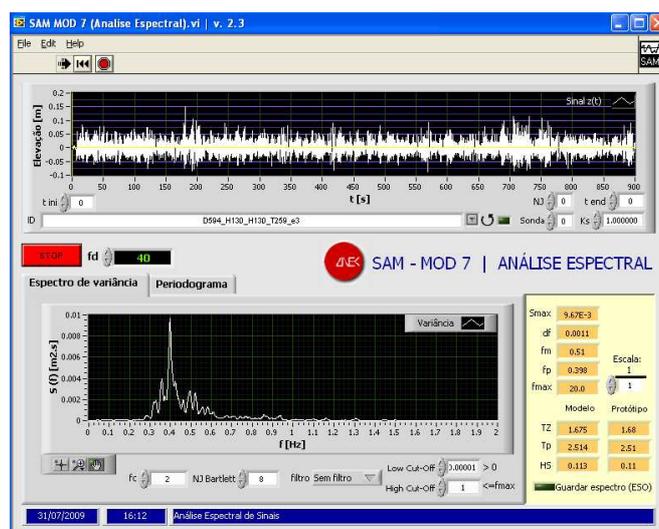


Figura 5 - Análise espectral de um sinal obtido na aquisição de dados durante um estado de mar.

A separação da agitação incidente da reflectida nas imediações da estrutura, foi feita recorrendo ao grupo de três sondas colocadas nas imediações do pé do talude, onde os fundos têm profundidade

variável, tendo sido, por isso, utilizando o método de Baquerizo (1995), baseado no método de Mansard e Funke (1980).

Os Quadros 3 e 4 resumem as características da agitação total e incidente, respectivamente, na sonda mais próxima da estrutura obtidas nos ensaios.

Quadro 3 - Características da agitação total medida na sonda mais próxima da estrutura

Ensaio	Prof. junto ao gerador - h (cm)	Prof. junto ao pé do talude - h_t (cm)	T_p (s)	H_s (cm)
1	55,0	11,9	2,37	10,0
2	55,0	11,9	2,37	11,0
3	55,0	11,9	2,37	12,0
4	59,4	15,8	2,50	10,5
5	59,4	15,8	2,50	13,0
6	59,4	15,8	2,50	14,0

Quadro 4 - Características da agitação incidente medida na sonda mais próxima da estrutura

Ensaio	Prof. junto ao gerador - h (cm)	Prof. junto ao pé do talude - h_t (cm)	T_m (s)	H_{mo} (cm)	Número de Iribarren	Coef. de Reflexão - R
1	55,0	11,9	2,18	7,32	0,50	0,49
2	55,0	11,9	2,14	8,20	0,47	0,49
3	55,0	11,9	2,03	8,54	0,43	0,50
4	59,4	15,8	2,14	6,28	0,53	0,52
5	59,4	15,8	2,09	7,73	0,47	0,52
6	59,4	15,8	2,01	8,62	0,43	0,52

Séries de ensaios

Ao todo foram realizadas cinco séries de ensaios (Quadro 5). Apenas a primeira série (Série A) não foi repetida. No entanto, dada a morosidade do pós-processamento dos dados resultantes dos ensaios, no presente trabalho apenas foram tratados os resultados respeitantes às séries A, B e C, sem repetições.

Quadro 5 - Séries de ensaios realizadas

Séries de ensaios	Ordem das condições de agitação	Nível de água	Duração
A	1, 2, 3, 4, 5, 6	Baixo-Alto	28,5 h
B	1, 2, 3, 5, 6	Baixo-Alto	8,5 h
C	4, 5, 6, 2, 3	Alto-Baixo	9,0 h

A série de ensaios A obedeceu à actuação dos seis estados de mar por ordem crescente de intensidade. Cada estado de mar actuou repetidamente em ensaios de 15 minutos, até se verificar a estabilização dos danos. Passou-se de seguida ao estado de mar seguinte, tendo sido feito um levantamento do talude de duas em duas actuações, ou seja, de 30 em 30 minutos. A duração total desta série de ensaios foi de cerca de 28,5 horas até ser atingida a ruína. Nas séries de ensaios B e C, o nível de água foi crescente e decrescente, respectivamente. O procedimento de ensaio foi semelhante ao da série de ensaios A, tendo, no entanto, cada estado de mar uma duração total limitada, repartida também por períodos de 15 min (Quadro 6).

Quadro 6 - Durações de actuação de cada ensaio

Série A		Série B		Série C	
Ensaio	Duração (h)	Ensaio	Duração (h)	Ensaio	Duração (h)
1	1,5	1	0,5	4	1
2	1,5	2	2	5	2
3	7,5	3	2	6	2
4	1	-	-	2	2
5	6	5	2	3	2
6	11	6	2	-	-

O número de ondas para os ensaios A, B e C foi de 49194, 14764 e de 15621, respectivamente.

Levantamento dos perfis através do método fotogramétrico

No presente trabalho, de modo a obter-se uma amostragem significativa dos danos ocorridos no talude do quebra-mar para todas as séries de ensaios, foi feito, para além de um levantamento do perfil não danificado (L0), 17 levantamentos (L1 a L17), no caso da série de ensaios B, 18 levantamentos (L1 a L18), no caso da série de ensaios C e 57 levantamentos (L1 a L57) no caso da série de ensaios A.

De forma a cobrir a máxima área de talude, este foi dividido em sete perfis, identificados na Figura 6. Deste modo, para cada um dos levantamentos das séries A e C, foram extraídos 7 perfis, numa totalidade de 399 e 126 perfis respectivamente.



Figura 6 - Localização dos perfis levantados

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 desfasadas.

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 7).

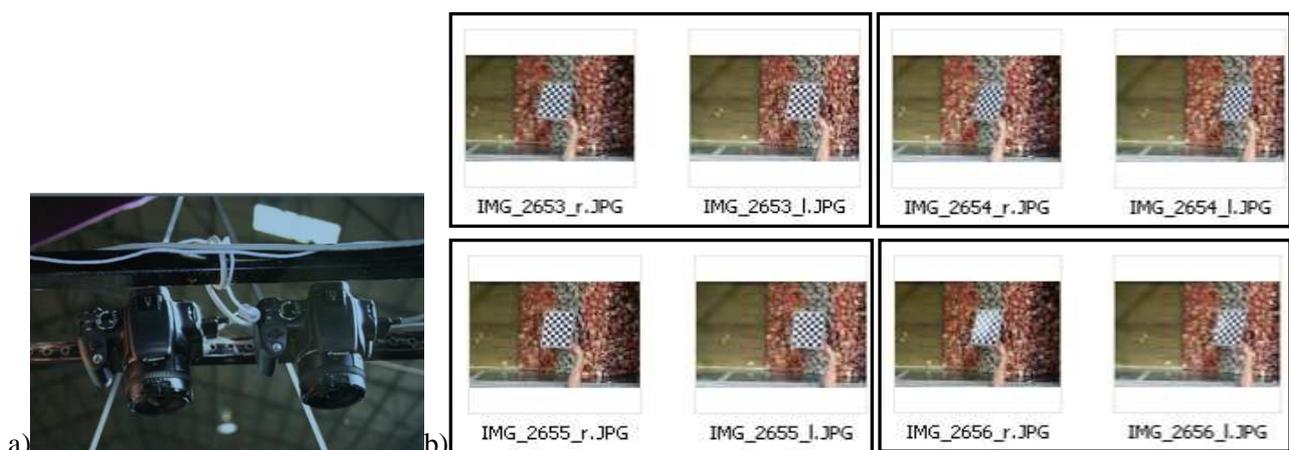


Figura 7 – a) câmaras fotográficas utilizadas nos levantamentos. B) Exemplo de alguns pares estereofotogramétricos

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 ensaios descritos foram realizados com uma distância fixa de aproximadamente 16 cm entre os centros das lentes das câmaras.

As câmaras fotográficas são digitais e equipadas 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 *et al*, 2006). 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 (Figura 8). 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. Além disso, a mesma quadrícula serve também como referência para a identificação do plano de água.

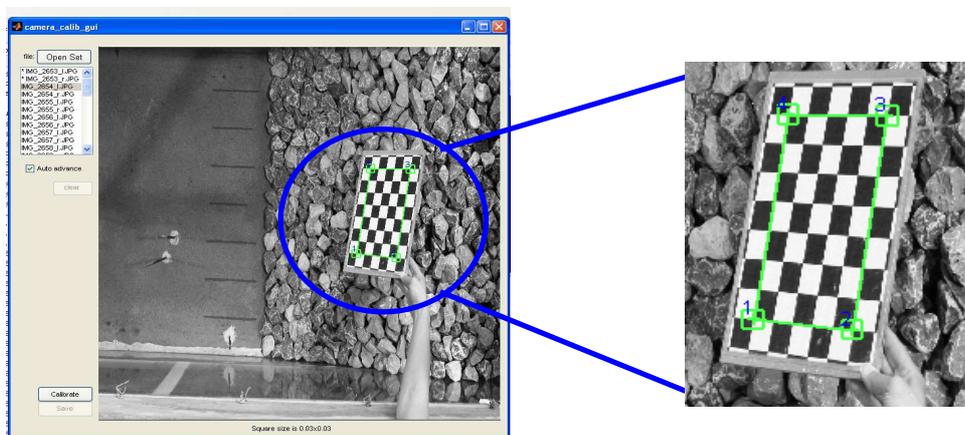


Figura 8 - Processo de selecção dos cantos internos do alvo

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, é conveniente a utilização de cerca de 15 pares de fotografias.

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 9). É possível reconstruir a parte emersa, submersa ou ambas as partes, uma vez que o software é capaz de rectificar o efeito da refacção existente no plano da água.

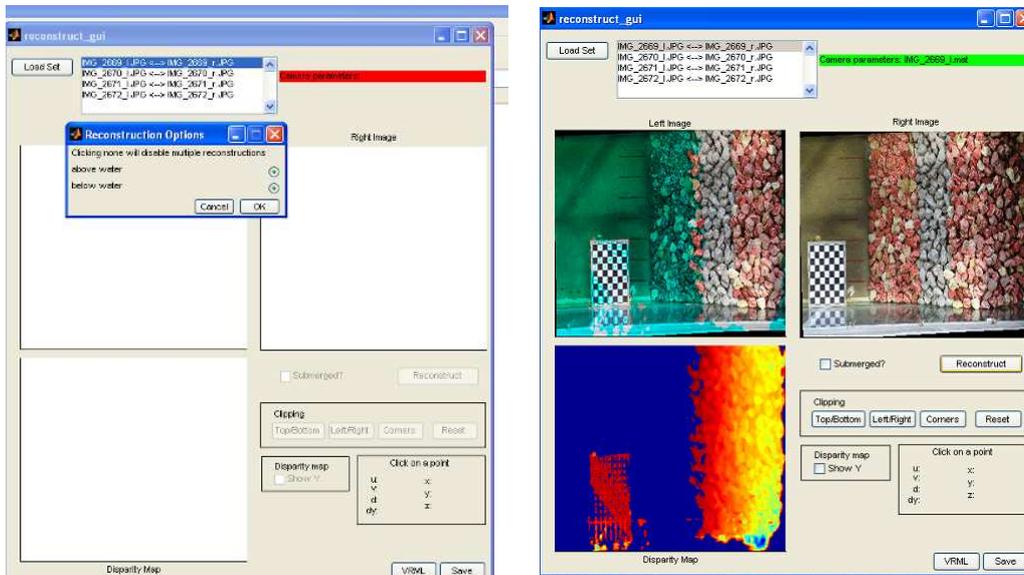


Figura 9 - Reconstrução de um cenário parcialmente submerso, no início de um dos ensaios

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 10).

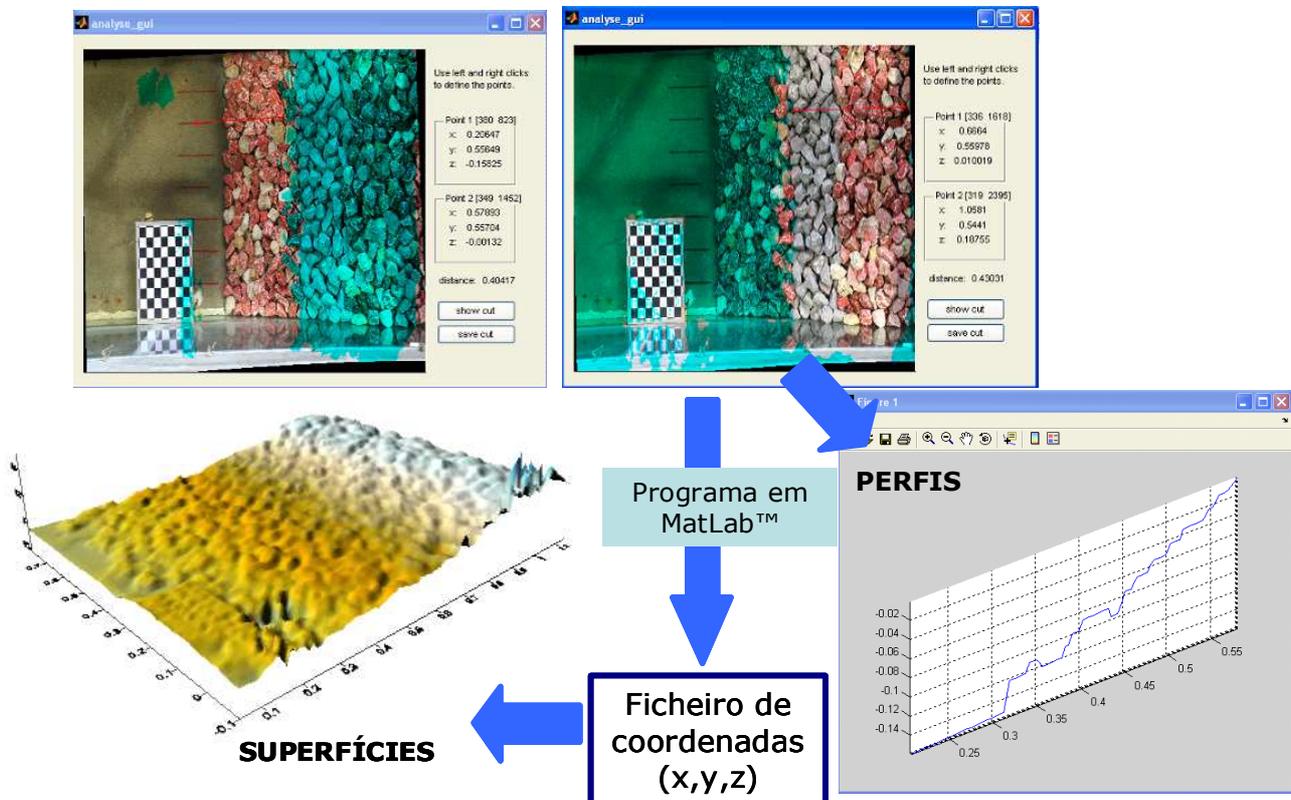


Figura 10 - Extração de perfis através da análise das partes submersa e emersa de uma reconstrução.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Com recurso ao software SAM foi feito o registo das séries temporais da elevação da superfície livre para a totalidade dos ensaios. Verificou-se que as condições de agitação reproduzidas foram consideravelmente inferiores às utilizadas por Melby (1999), em termos de alturas de onda incidente. Verificou-se também que, para o nível de água mais elevado, a rebentação não ocorria na praia, mas sim sobre o talude do quebra-mar conduzindo a danos mais elevados do que os observados nos ensaios que conduziram à formulação.

Não sendo possível fazer a comparação dos resultados dos presentes ensaios com os resultados obtidos nos ensaios realizados por Melby, não foi possível validar as fórmulas de previsão por ele propostas. Revelou-se, sim, de todo o interesse averiguar de que modo variam os resultados inerentes à aplicação da formulação de previsão quando são utilizadas condições de agitação diferentes das usadas nos estudos originais.

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 (1988), os quais definiram o dano (S) como a área transversal erodida adimensionalizada pelo quadrado do diâmetro nominal dos elementos do manto protector Eq. [6]. A Figura 11 ilustra a definição dos parâmetros de dano.

$$S = \frac{A_e}{\left(\frac{M_{50}}{\rho_s}\right)^{2/3}} = \frac{A_e}{D_{n50}^2} \quad [6]$$

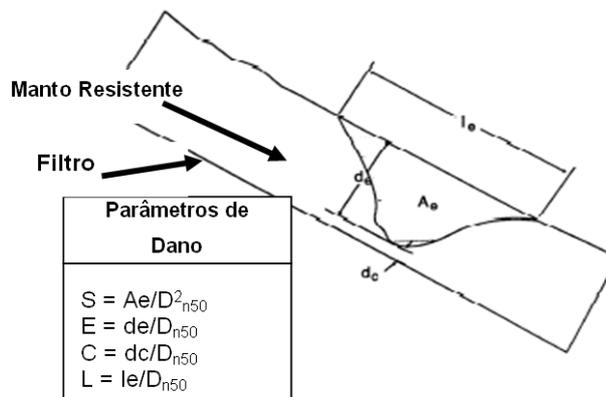


Figura 11 - Definição dos parâmetros de dano

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). Destes quatro parâmetros apenas a A_e foi 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). Para a determinação do dano médio medido, em cada um dos perfis levantados foi considerada a maior área erodida de cada um dos perfis.

Na Figura 12 são apresentados alguns gráficos exemplificativos da evolução dos perfis levantados nos ensaios A e B. Neles é possível observar a progressão gradual do dano, verificando-se o aparecimento do tradicional perfil em “S”.

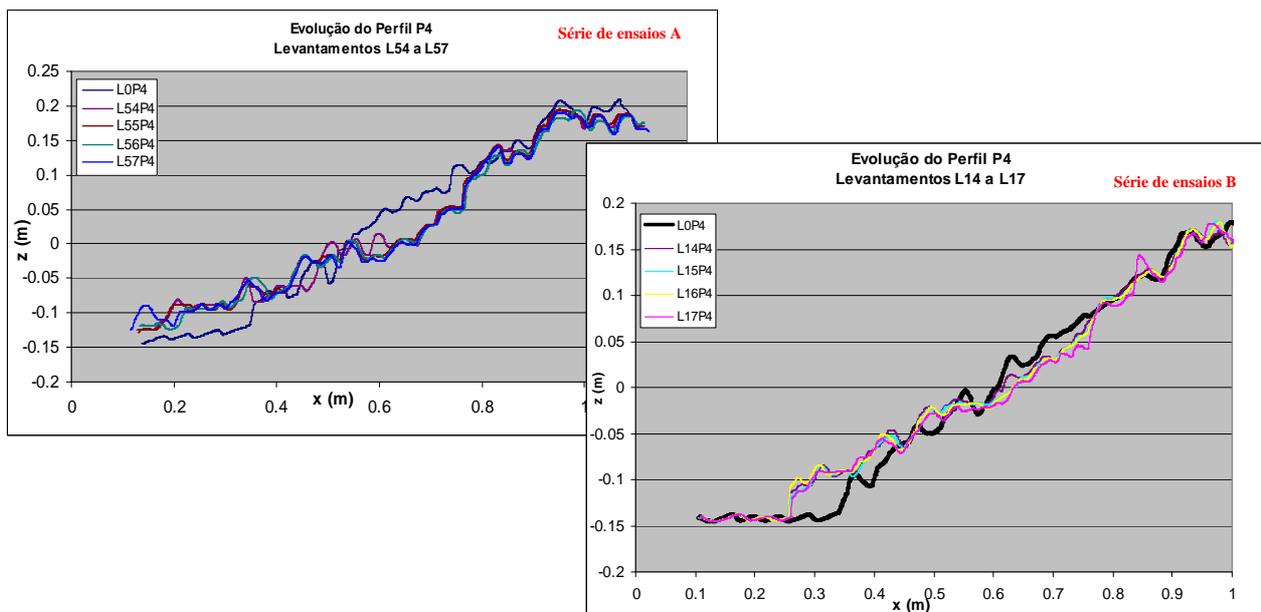


Figura 12 - Série de ensaios A e B. Evolução do Perfil P4 entre os Levantamentos iniciais (L0) e finais.

Neste trabalho não serão apresentados os resultados da série de ensaios C, dado que entre os levantamentos L3 e L4 se verificou um aumento abrupto do dano médio medido, não concordante com o incremento do dano realmente observado. Tal aumento parece coincidir com o facto de os levantamentos L0 a L3 e L4 a L18 terem sido realizados em dias distintos, existindo a possibilidade de a calibração das câmaras no segundo dia ter sofrido alguma distorção, originando parâmetros diferentes e causado alguma distorção no referencial.

COMPARAÇÃO DOS VALORES PREVISTOS COM OS VALORES EXPERIMENTAIS

As Figuras 14 e 15 traduzem a comparação entre os danos medidos nos levantamentos e os previstos pela fórmula de Melby para os ensaios A e B respectivamente.

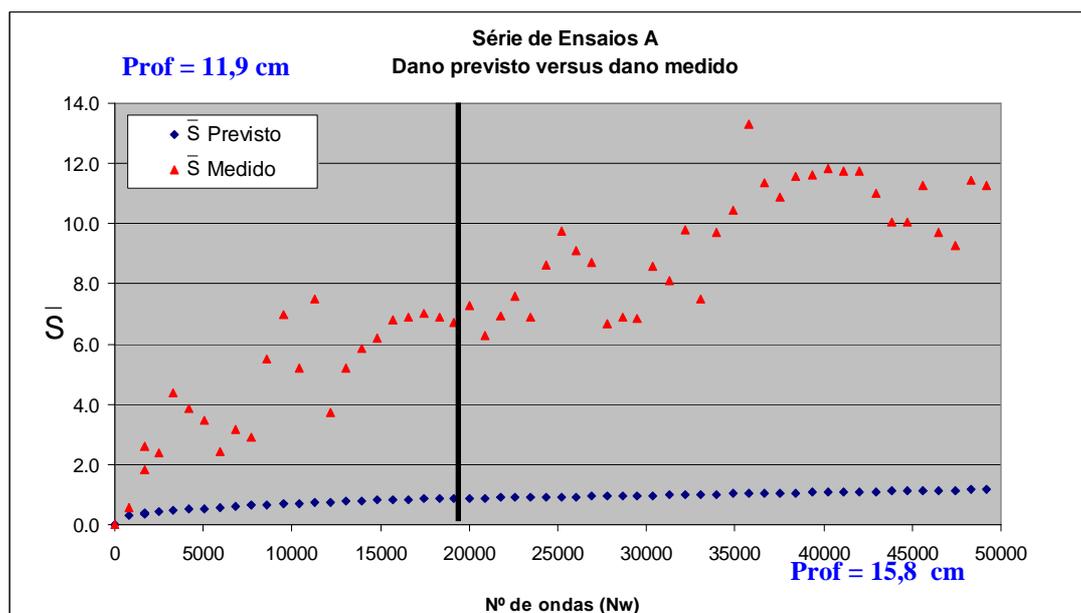


Figura 14 - Série de ensaios A. Comparação entre o dano médio previsto e o dano médio medido

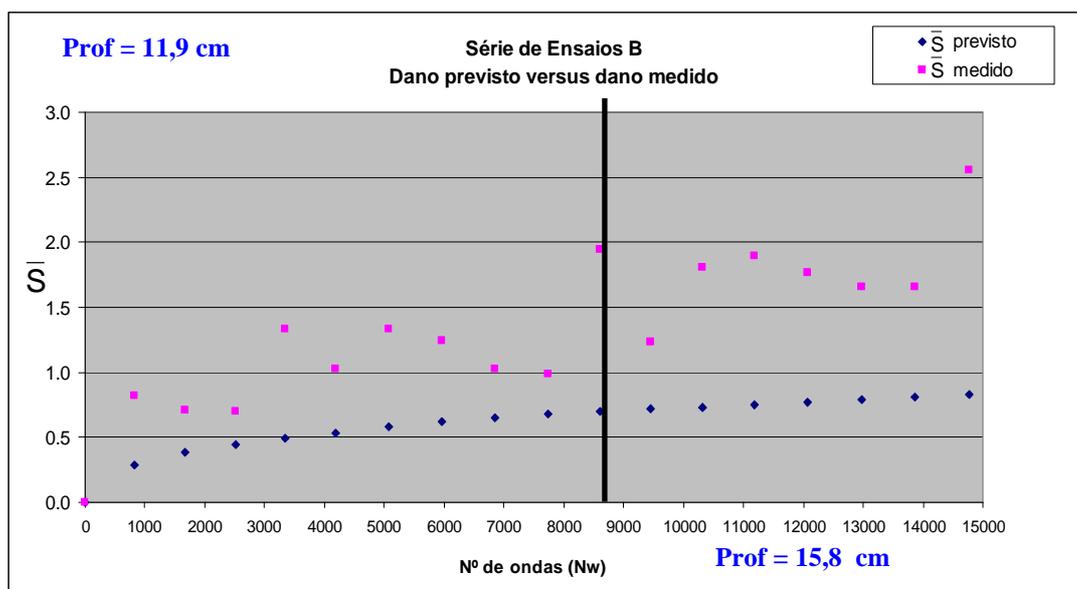


Figura 15 - Série de ensaios B. Comparação entre o dano médio previsto e o dano médio medido

No que concerne à série de ensaios A, a curva dos valores previstos ficou aquém dos valores medidos. Neste caso, tal como na série de ensaios B, é bastante evidente o efeito dos parâmetros de agitação incidente, com especial relevo para altura de onda, serem consideravelmente inferiores à gama de parâmetros de agitação reproduzidos nos ensaios que originaram esta formulação.

O dano médio previsto pela Eq. [5] é fortemente dependente do número de estabilidade N_{m0} , dado o número de estabilidade estar elevado à quinta potência. Isto implica que, pequenas variações na altura de onda utilizada nos ensaios que originaram a formulação, traduzem-se em relativamente grandes diferenças entre o dano médio previsto e o dano médio medido.

Ao longo das três séries de ensaios, as séries de valores do dano medido apresentam aumentos e decréscimos, típicos do comportamento auto-regenerativo dos quebra-mares de taludes. Ou seja, no local onde em determinado levantamento existia uma considerável área erodida, no levantamento seguinte, outros blocos removidos de faixas superiores vêm preencher esses vazios, para, no levantamento seguinte, se verificar de novo a sua remoção. Este processo tenderá a repetir-se até não existir mais material capaz de colmatar os vazios provocados pela actuação da agitação.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Embora as características geométricas da estrutura fossem em tudo semelhantes às da estrutura utilizada nos ensaios que deram origem à formulação, as condições de propagação da onda ao longo do canal foram diferentes, tendo as condições de agitação reproduzidas sido inferiores, em termos de alturas de onda, às que Melby utilizou. Assim sendo, os valores do dano médio previsto, calculado com base nessas condições, não convergiam para o dano médio medido durante os ensaios, dado que a expressão utilizada é bastante limitativa no que diz respeito à gama de parâmetros de agitação. Pequenas variações nos valores da altura de onda incidente conduzem a valores de previsão do dano médio muito diferentes.

Dado que a formulação em causa não apresenta um carácter geral, estando restringida à gama de parâmetros de agitação e tipo de rebentação utilizados nos ensaios que lhe deram origem, revela-se necessário proceder ao ajuste dos seus coeficientes empíricos de modo a fazer os valores convergirem qualquer que seja a ordem de actuação dos estados de mar, seguido da sua validação através de novos ensaios em modelo físico.

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 *et al*, 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.
- Durante o desenvolvimento do estudo emergiram alguns problemas inerentes à realização dos ensaios e à utilização do software:
 - O alvo, embora confinado lateralmente, ainda 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;
 - Mudanças de nível de água terão que ser contabilizados aquando da obtenção dos perfis levantados. Um padrão de calibração pintado ou fixo no fundo do canal seria uma solução para este problema, implicando, no entanto, uma alteração do software de calibração. Na ausência desta alteração tornou-se evidente a necessidade de realizar 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. A placa do padrão de calibração poderá assim considerar-se fixa nas três direcções (x, y, z). Assim sendo, sempre que se inicia ou termina uma sessão de trabalho e aproveitando ainda eventuais mudanças de nível de água, é aconselhável, sempre que se trate de um ensaio em canal, o esvaziamento do mesmo até à cota do pé do talude com vista à obtenção de um par de fotografias;
 - Tratando-se de um ensaio em canal não deverão ser levantados perfis demasiado perto dos vidros, dado que a existência de reflexos tornará a reconstrução pouco fiável nesses locais.

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, fazendo uso de equipamento relativamente económico - apenas duas câmaras fotográficas. Permite, após a conclusão dos ensaios e recorrendo aos ficheiros das reconstruções realizadas para cada levantamento, realizar extracções de novos perfis, em locais diferentes. No entanto, devido a ainda não estar automatizado o pós-processamento dos dados dos levantamentos, com vista à determinação dos seus correspondentes parâmetros de dano, nomeadamente a área erodida, este revelou-se um processo moroso, especialmente se o número de perfis levantados for significativo, como foi o caso do presente estudo.

Contudo, é de toda a conveniência que este processamento seja feito na sequência dos ensaios, de modo a detectar eventuais erros na calibração ou reconstrução que poderiam pôr em causa a obtenção do correcto levantamento dos perfis. Assim sendo, revestir-se-ia de extrema utilidade a automatização do pós-processamento dos dados e a criação de um pacote de software de forma a tornar a sua aplicabilidade mais fácil e fiável.

Continuidade do estudo

O presente trabalho baseia-se num estudo ainda em curso no LNEC, do qual tem surgido algum optimismo quanto à aplicação da formulação de Melby, utilizando 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 está longe de estar concluído, sendo ainda necessário 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 através do tratamento dos dados dos restantes ensaios realizados (repetições das séries de ensaios B e C).
- Lançar as bases para estender a utilização de fórmulas semelhantes a diferentes climas de agitação e ainda à avaliação da erosão de quebra-mares cujo manto protector incorpore elementos artificiais como cubos ou tetrápodos, dado que as fórmulas que se pretendem verificar basearam-se em dados obtidos em ensaios onde foi utilizado enrocamento.
- 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baquerizo, A. (1995). *Reflexión del oleaje en playas. Métodos de evaluación y de predicción*. Tesis doctoral. Universidad de Cantabria.

Broderick, L. e Ahrens, J. P. (1982). *Rip-rap stability scale effects*. Technical Paper 82-3, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.

Capitão, R. (2002). *Modelação estocástica numérica e física da agitação marítima*. Tese de doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Ferreira, R., Costeira, J.P., Silvestre, C., Sousa, I. e Santos, J.A. (2006). "Using stereo image reconstruction to survey scale models of rubble-mound structures". *Proceedings of the 1st CoastLab 2006 - International Conference on the application of physical modelling to port and coastal protection*. Porto, Portugal, pp.107-116.

Mansard, E.P.D. e E.R. Funke (1980). "The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method". *Proceedings of the 17th ICCE*, ASCE. Sydney, Australia, pp. 154-172.

Melby, J.A. (1999). *Damage Progression on Rubble-Mound Breakwaters*. Technical Report CHL-99-17. US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, USA.

Troch, P. (2005). *User Manual: Active Wave Absorption System*. Gent University, Dep. Civil Engineering, Denmark.

Van der Meer J. W. (1999). "Design of concrete Armour Layers". *Proceedings of the Coastal Structures '99 Conference*. Vol. 1. Santander, Spain, pp. 213-221.