



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

Sumário

Os quebra-mares de taludes são estruturas de protecção portuária muito comuns em Portugal e em cujo projecto se assume a necessidade de obras de manutenção ou reparação durante a sua vida útil. Para a avaliação da necessidade de realização das eventuais obras de manutenção ou reparação, é necessária a existência de um programa de acompanhamento da estrutura contemplando a medição de grandezas relevantes para essa avaliação.

Uma dessas grandezas é o volume erodido do manto protector por acção da agitação marítima, que pode determinar-se a partir de levantamentos consecutivos da envolvente dos taludes e com o qual se pode definir o dano da estrutura. Melby & Kobayashi (1999) apresentaram uma fórmula para previsão da evolução do dano em quebra-mares de taludes com base nas características da agitação neles incidente. Essas fórmulas, contudo, foram estabelecidas a partir de resultados de ensaios com modelo físico reduzido de um quebra-mar com mantos protectores constituídos por enrocamento, sendo por isso válidas apenas para aquela geometria.

Nesta comunicação apresentar-se-ão os resultados de um trabalho em curso no LNEC cujo objectivo é estender a gama de aplicação daquelas fórmulas avaliando a evolução do dano em mantos protectores de declives diferentes do considerado por aqueles autores.

Antes de passar a outros declives, começou-se por reproduzir as experiências descritas em Melby & Kobayashi (1999). Tratam-se de ensaios com modelo físico reduzido de longa duração em que sequências de estados de agitação estacionários vão atingindo o manto protector e se mede o volume erodido no final da actuação de cada estado de agitação. Uma vez que estes ensaios terminam apenas quando fica visível uma porção apreciável do filtro sob o manto protector, a sua duração pode variar entre 9 e 28 horas. A medição do volume erodido no final da actuação de cada estado de agitação é realizada a partir da reconstrução de pares estéreo em que se compensa a refacção induzida pela interface ar-água. Tal significa que aquelas fotografias podem ser tiradas mantendo-se a água no canal.

Palavras chave Quebra-mares de talude, Previsão da evolução dos danos no manto resistente, Ensaios em modelo reduzido, Reconstituição de cenas a partir de pares estéreo, Análise de risco, Estudo probabilístico

1 INTRODUÇÃO

Sendo os quebra-mares de taludes as estruturas de protecção portuária mais comuns em Portugal e cujo projecto assume a necessidade de obras de manutenção ou reparação durante a sua vida útil, para avaliar a necessidade de realização das eventuais obras de manutenção ou reparação é necessária a existência de um programa de acompanhamento da estrutura.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

O volume erodido do manto protector por acção da agitação marítima, é um indicador fundamental da evolução do dano de um quebra-mar. Este volume pode determinar-se a partir de levantamentos consecutivos da envolvente dos taludes e com o qual se pode definir o dano da estrutura.

A ruína de um quebra-mar pode ocorrer devido a diferentes modos de falha. De todos eles, a instabilização do manto resistente de um quebra-mar de taludes é a mais crítica para a integridade e funcionalidade.

A estabilidade do manto resistente de um quebra-mar de taludes é altamente variável e resultado de diversos aspectos, sendo os mais importantes:

- A agitação marítima
- A sua dimensão;
- O peso e o tipo de blocos que constituem o manto;
- O declive da envolvente do manto;
- A densidade do manto e modo de colocação dos blocos.

Essa variabilidade é bastante complexa e difícil de quantificar dado o alargado leque de combinações de variáveis envolvidas. Ela é dependente da natureza probabilística tanto das acções sobre a estrutura, como das condições de fronteira, as quais são também incertas dada a forma irregular do enrocamento e ao seu modo de colocação.

Melby (1999), motivado pela necessidade de avaliar com precisão a evolução do dano do manto de quebra-mares de taludes, realizou vários ensaios em modelo físico reduzido. Entre os objectivos anunciados para esses ensaios destacam-se os seguintes: determinação da velocidade de aumento do dano de mantos expostos prolongadamente a agitação extraordinária; desenvolvimento e avaliação de métodos de caracterização do dano; quantificação do desenvolvimento do dano mediante a variação das características da solicitação (como, por exemplo, o nível de repouso ou a altura de onda); quantificação da evolução de perfis da estrutura em função do valor do dano; quantificação da variabilidade espacial do dano.

As fórmulas de previsão da evolução do dano do manto de quebra-mares de taludes que viriam a ser propostas por Melby tiveram por base os resultados de cinco séries de ensaios de longa duração.

A primeira destas séries teve como objectivo levar o manto protector à ruína e durou 28,5 horas durante as quais se geraram seis estados de agitação. A passagem ao estado de agitação seguinte era efectuada quando, visualmente, se concluíra que o manto protector atingira o equilíbrio.

As restantes quatro séries de ensaios consistiram na reprodução de duas sequências diferentes de ondas e duas repetições destas sequências. Estas duas sequências diferentes pretenderam simular a acção de eventos extraordinários de agitação isolados.

Melby propôs, assim, uma fórmula para a evolução do dano numa secção do corpo principal de um quebra-mar exposto a estados de mar variáveis no tempo. Essas fórmulas, contudo, foram estabelecidas a partir de resultados de ensaios com modelo físico reduzido de um quebra-mar com manto protector constituído por enrocamento, sendo por isso válidas apenas para aquela geometria.

Como aquela fórmula apenas podia ser aplicada a estruturas sem danos no instante inicial ou cuja evolução do dano fosse conhecida, para superar essa limitação, Melby & Kobayashi (1999) rescreveram aquela fórmula, sendo assim a variação temporal da média do dano dada pela equação:



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

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

onde:

$\bar{S}(t)$ - Danos verificados no instante t ;

$\bar{S}(t_n)$ - Danos verificados no instante t_n ;

Onde $N_s = \frac{H_s}{Dn_{50}}$ é o número de estabilidade calculado com base na altura de onda significativa (H_s) e Dn_{50} o diâmetro nominal do enrocamento usado no manto protector;

T_m - Período médio de zero ascendente.

permitindo calcular, para cada intervalo em que H_s e T_m são constantes, o incremento do dano médio, S , possibilitando assim o cálculo da evolução do dano em situações em que a agitação é variável ao longo do tempo.

Ou alternativamente, utilizando dados espectrais

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

Onde $N_{m0} = \frac{H_{m0}}{Dn_{50}}$ sendo H_{m0} a altura de onda no momento $t=0$ e Dn_{50} o diâmetro nominal do enrocamento usado no manto protector;

T_{m0} - Período médio de zero ascendente no momento $t=0$

Segundo Melby (1999) o melhor ajuste das equações 1 e 2 aos resultados dos ensaios supracitados foi obtido com os seguintes valores: $a_s = 0,025$, $a_p = 0,022$ e $b = 0,25$. Assim sendo, as equações 1 e 2 podem escrever-se, respectivamente, da seguinte forma:

$$\bar{S}(t) = \bar{S}(t_n) + 0.025 (N_s)^5 T_m^{-0.25} (t^{0.25} - t_n^{0.25}) \quad \text{para} \quad t_n < t < t_{n+1} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\bar{S}(t) = \bar{S}(t_n) + 0.022 (N_{m0})^5 (T_p)^{-0.25} (t^{0.25} - t_n^{0.25}) \quad \text{para} \quad t_n < t < t_{n+1} \quad (\text{Eq. 4})$$

a_s , a_p e b são coeficientes empíricos de localização (dependentes da localização da rebentação) e de escala respectivamente determinados por Melby mediante a realização de ensaios anteriores;

Com esta fórmula 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 .

Assume-se, pois, de extrema utilidade, a aplicação destas fórmulas com o intuito de estimar a evolução do dano de uma estrutura, partindo dos danos verificados numa determinada fase da sua vida útil que não seja a pós-construção.

Sousa (2007) havia já proposto um modelo para a previsão da evolução do dano do manto protector de quebra-mares de talude, resultante da acoplagem do conceito de número de estabilidade crítico (Smith et al. 1992) à fórmula de Melby e Kobayashi (1999), simulando correctamente o carácter episódico do aumento do dano, bem como a tendência para a diminuição de velocidade de aumento do dano à medida que o valor do dano aumenta.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Nesse trabalho foi ainda exemplificada a aplicação do modelo preconizado, ao quebra-mar do porto de pesca de Sines, simulando-se a evolução do dano do manto deste ao longo de períodos de 100 anos utilizando-se para tal um método probabilístico de nível III.

Contrariamente aos ensaios em modelo físico reduzido normalmente utilizados para verificar o dimensionamento de quebra-mares de taludes e que consistem na avaliação da estabilidade e dos galgamentos da solução proposta para uma sequência de temporais de energia crescente e de duração limitada, os ensaios realizados no estudo objecto desta comunicação, compreenderam várias sequências de temporais e a sua duração foi substancialmente superior correspondendo a 8,5; 9 ou 28 horas consoante o ensaio, tendo por objectivo reproduzir as condições de geometria da estrutura, da agitação e duração dos ensaios realizados por Melby (1999).

Foram, assim, realizados 5 ensaios, cuja descrição é feita no ponto seguinte. No entanto, dado o tratamento dos dados dos restantes ensaios estar ainda em curso, nesta comunicação apenas serão apresentados os resultados de apenas uma série de ensaios.

Dada a grande solicitação ao LNEC para a realização de ensaios de estabilidade e galgamentos em modelo físico, por parte das entidades portuárias, seria de todo o interesse estender esses ensaios à previsão da evolução do dano ao longo da vida útil do quebra-mar.

Contudo, 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 impraticável no caso de ensaios tridimensionais, dada a necessidade de esvaziamento do tanque de duas em duas actuações de sequências de ondas.

Tendo em vista facilitar a realização de ensaios deste género, foi desenvolvido no âmbito do projecto que enquadrou o trabalho de Sousa (2007) um sistema para levantamento da envolvente do talude de modelos físicos de quebra-mares partindo de pares de fotografias desse talude, Ferreira et al. (2005). A vantagem desse sistema é levar em conta a refração introduzida na interface ar - água presente no canal onde se realiza o ensaio, o que dispensa o esvaziamento do canal reduzindo os tempos mortos na duração dos ensaios.

Embora em Sousa et al. (2007) se apresentem alguns resultados da avaliação do desempenho deste sistema, a sua operação ainda não é quotidiana no LNEC, pretendendo-se aferir a sua aplicabilidade aos ensaios em modelo reduzido.

Também Afonso (2008) fez uso desta técnica em ensaios em modelo reduzido tridimensional para o levantamento de perfis antes e depois de cada ensaio, concomitantemente com o uso de um perfilador mecânico.

Pretende-se, porém, com o presente estudo verificar se a utilização, de um modo sistemático, desta técnica de levantamento conduz a resultados fiáveis e coerentes e se é passível de ser utilizada em alternativa ao tradicional perfilador mecânico.

Este trabalho tem, pois, como objectivos:

- Verificar as fórmulas propostas por Melby-Kobayashi para evolução do dano em taludes de quebra-mares de enrocamento através dos resultados de ensaios em modelos físicos reduzidos de longa duração (ensaios com a duração de cerca de 9 e de 28,5 horas, dependendo das condições de ensaio);
- Promover a utilização de um método para levantamento da envolvente de taludes de quebra-mares baseado em estereofotogrametria;
- Lançar as bases para estender a utilização de fórmulas semelhantes às de Melby-Kobayashi na avaliação do dano de quebra-mares cujo manto protector incorpora 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.

2 ENSAIOS EM MODELO FÍSICO

2.1 Implementação do modelo

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 activa onda, AWASYS, Troch (2005), que permite uma absorção dinâmica da reflexão.



Figura 1 Canal de ondas irregulares COI1

O perfil longitudinal da implementação do modelo no canal é mostrado na Figura 2. Este perfil consiste numa rampa de cerca de 13,3 m com inclinação de 1:20 que termina numa plataforma horizontal onde foi construída a estrutura. O desenvolvimento dos fundos entre a rampa e o gerador é feito através de um declive de 1,3 % ao longo de 35,7 m. A Figura 3 ilustra o perfil transversal da estrutura ensaiada.

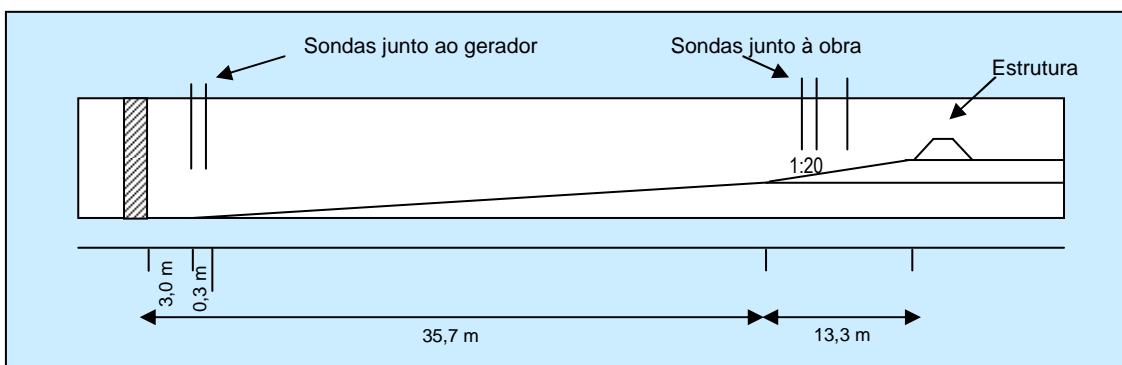


Figura 2 Implementação do modelo no canal. Perfil longitudinal.

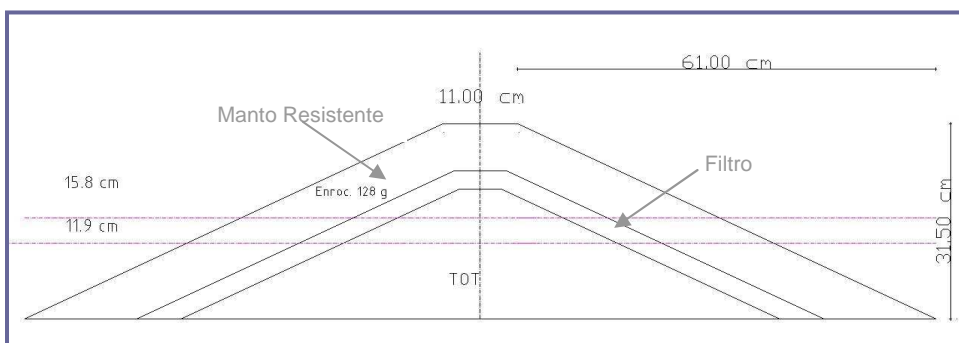


Figura 3 Perfil transversal da estrutura ensaiada.

2.2 Condições Experimentais

Com o objectivo de realizar ensaios com condições experimentais semelhantes às dos ensaios realizados por Melby para a previsão da evolução do dano em quebra-mares de talude, as condições experimentais utilizadas foram as que se encontram resumidas no Quadro 1.

Os elementos constituintes do manto protector, tal como no trabalho realizado por Melby, foram escolhidos à mão de modo a terem um peso uniforme de 128 g.

Dado o material utilizado ter uma massa volúmica de $2,7 \text{ g/cm}^3$, o diâmetro nominal Dn_{50} do material utilizado resultou igual a 3,64 cm.

Os elementos do manto foram colocados contiguamente aos elementos já colocados anteriormente sem serem empurrados, evitando-se também orientações particulares dos mesmos bem como padrões de colocação.

A densidade de colocação dos blocos, dispostos em duas camadas foi de 1285 blocos/m². A Figura 4 ilustra o aspecto da estrutura ensaiada.



Figura 4 Aspecto da estrutura ensaiada.

Quadro 1 Condições Experimentais

Condições Experimentais	
Profundidade no pé do talude	11,9 cm e 15,8 cm
Inclinação da praia	1:20
Inclinação do talude	1:2
Altura de coroamento	30,5 cm
Diâmetro Nominal do Enrocamento Dn_{50}	3,64 cm
Peso médio do Enrocamento	128 g
Densidade do enrocamento	$2,7 \text{ g/cm}^3$
Densidade de colocação dos blocos (duas camadas)	1285 blocos/m ²

2.3 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 três alturas de onda



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

significativa. O Quadro 2 resume as características da agitação utilizadas para gerar o sinal fornecido ao gerador de ondas irregulares.

As características da agitação incidente medidas na sonda mais perto do modelo estão resumidas no Quadro 3. Pretendeu-se inicialmente que as alturas de onda incidentes fossem da ordem de grandeza das dos ensaios realizados por Melby. No entanto, por limitação devido à rebentação e do equipamento de geração, as alturas de onda geradas foram inferiores às pretendidas.

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

<i>Ensaio</i>	<i>Profundidade no Pé Talude – ht (cm)</i>	<i>Profundidade junto ao gerador</i>	<i>Tp (s)</i>	<i>Hs (cm)</i>
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

Quadro 3 Características da agitação incidente medida na sonda mais próxima da estrutura

<i>Ensaio</i>	<i>Profundidade no Pé Talude – ht (cm)</i>	<i>Profundidade junto ao gerador</i>	<i>Tp (s)</i>	<i>Hs (cm)</i>
1	11,9	0,550	2,54	5,65
2	11,9	0,550	2,52	6,34
3	11,9	0,550	2,39	7,04
4	15,8	0,594	2,42	6,26
5	15,8	0,594	2,51	7,73
6	15,8	0,594	2,50	8,66

2.4 Séries de Ensaios

Ao todo foram realizadas cinco séries de ensaios (Quadro 4). Apenas a primeira série (Série A) não foi repetida. No entanto, no presente trabalho apenas serão apresentados os resultados respeitantes à Série C.

Quadro 4 Séries de ensaios realizadas

<i>Séries de ensaios</i>	<i>Ordem das condições de agitação</i>	<i>Nível de água</i>	<i>Duração</i>
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

Durante o ensaio A, a actuação de cada estado de mar de 15 minutos foi repetida, 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. Nos ensaios B e C o procedimento foi semelhante, tendo, no entanto, cada estado de mar uma duração total limitada, repartida também por períodos de 15 min (Quadro 5).

Quadro 5 Durações de actuação de cada ensaio

<i>Série A</i>		<i>Série B</i>		<i>Série C</i>	
<i>Ensaio</i>	<i>Duração (h)</i>	<i>Ensaio</i>	<i>Duração (h)</i>	<i>Ensaio</i>	<i>Duração (h)</i>
1	1,5	1	0,5	4	1
2	1,5	2	2	5	2
3	7,5	3	2	6	2
4	1	5	2	2	2
5	6	6	2	3	2
6	11				

O número de ondas para os ensaios A, B e C foi de 49194, 19167 e de 15621 respectivamente.

2.5 Medição da agitação

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

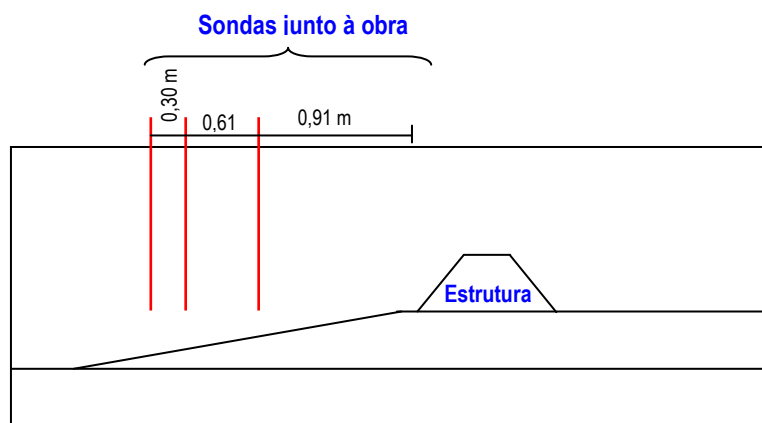


Figura 5 Esquema de colocação das sondas junto à obra

No início de cada sessão de ensaios foi efectuada a calibração das sondas com vista à obtenção das respectivas constantes de calibração, as quais foram posteriormente introduzidas no software de geração e aquisição de dados para a obtenção das características da agitação.

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 tratamento dos dados (alturas de onda significativas e períodos de pico) durante os ensaios foram efectuados mediante utilização do programa SAM - Simulação da Agitação Marítima, utilizado nos ensaios em modelo físico no Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas do DHA (Capitão, 2002).

A obtenção da agitação incidente foi efectuada através da geração prévia, com frequência de geração de 40 Hz, de um conjunto de ondas caracterizado por um espectro empírico do tipo JONSWAP ($\gamma=3,3$).

A Figura 6 ilustra a análise espectral de uma série de dados referentes à actuação de um estado de mar com a duração de 15 minutos.

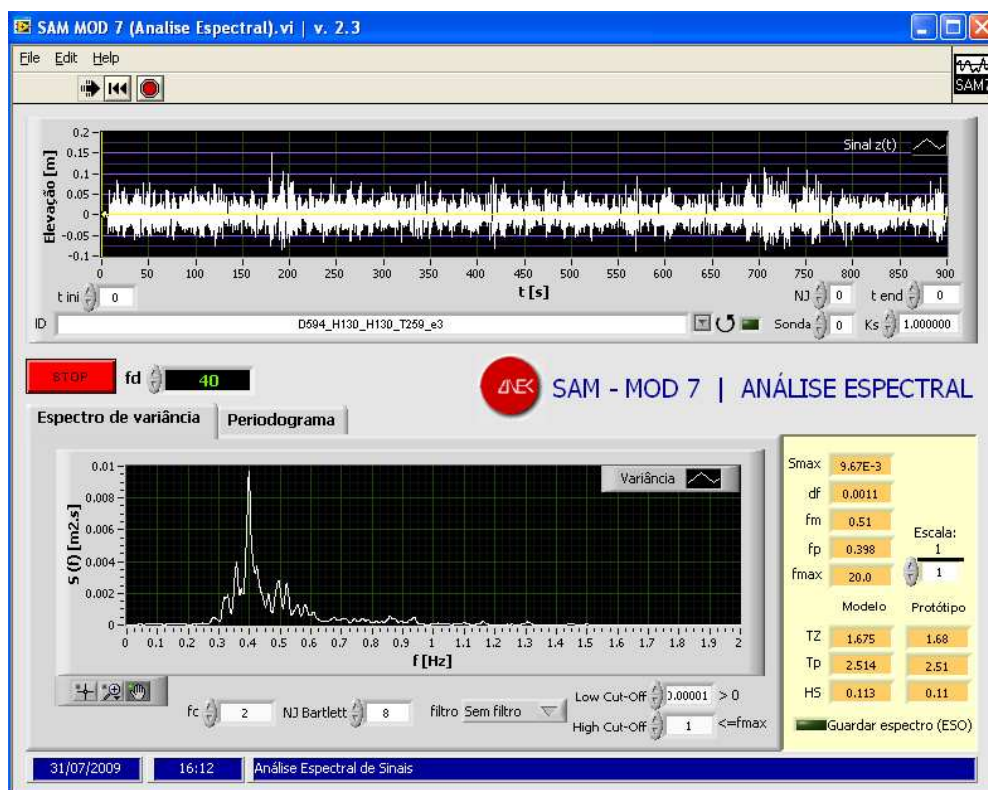


Figura 6 Análise espectral de uma aquisição de dados referentes à actuação de um estado de mar com a duração de 15 min

A separação da agitação incidente e reflectida em fundos com inclinação variável foi feita usando como entradas de dados as séries temporais da elevação da superfície livre em três sondas, utilizando o método de Baquerizo (1995), baseado no método de Mansard e Funke (1980). No entanto, no caso da série de ensaios C, tratado nesta comunicação, os parâmetros de agitação dizem respeito à agitação total (incidente+reflectida).

2.6 Levantamento dos perfis

2.6.1 Método de amostragem

Para a definição do grau de danos de um quebra-mar, existem inúmeras definições e parâmetros. Uma delas é a definição de Broderick e Arens (1982) e de Van der Meer (1988), os quais definiram o dano (S), como a área erodida relativa adimensional, usando os dados do levantamento de um perfil transversal do manto e dada por:

$$S = \frac{A_e}{Dn_{50}^2} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde A_e é a área erodida medida num determinado perfil transversal e Dn_{50} é o diâmetro nominal do enrocamento usado no manto protector.

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 um levantamento do perfil não danificado (L0) e 18 levantamentos (L1 a L18) ao longo das 9 horas de ensaio realizadas no caso das séries de ensaios B e C e de 60 levantamentos (L1 a L60) no caso da série de ensaios A.

No caso concreto da série de ensaios C, objecto do presente estudo, de forma a cobrir a máxima área de talude, este foi dividido em sete perfis, identificados na Figura 7. Deste modo, para cada um dos 18 levantamentos foram feitos levantamentos de 7 perfis.



Figura 7 Localização dos perfis levantados.

2.6.2 O método estereofotogramétrico

Com vista a evitar o esvaziamento do canal entre cada levantamento, pretendeu-se neste trabalho testar a qualidade dos levantamentos feitos através de processos de reconstrução de imagens estereoscópicas, em alternativa ao perfilador mecânico existente no LNEC.

A fotogrametria pode ser definida como a técnica de extrair de fotografias métricas, 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.

O equipamento utilizado consistiu em duas câmaras fotográficas montadas numa configuração fixa e aptas a disparar duas fotografias simultâneas (Figura 8).

Embora a separação entre as máquinas possa variar, esta terá que manter um limite aceitável. 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 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 óptima resolução e é compatível com o software de tratamento de dados.

A velocidade de abertura seleccionada, por ser a ideal para a profundidade de campo, foi de *f*/9.

A Figura 9 ilustra quatro pares de fotografias obtidos com as câmaras acima descritas.



Figura 8 Câmaras fotográficas utilizadas nos levantamentos



Figura 9 Exemplo de alguns pares estereofotogramétricos.

Foi utilizado um pacote de software desenvolvido em MATLAB™, que permite a reconstrução tridimensional usando pares de imagens de um mesmo cenário, obtidas apenas com um pequeno desfasamento entre si (cerca de 18 cm) (Ferreira et al, 2005).

O pacote de software utilizado consiste em duas aplicações distintas que se passam a descrever de seguida:

- **Calibração das câmaras:**

Consiste na identificação dos parâmetros das câmaras e sua posição perante o cenário observado (Figura 10). Cada vez que se inicia uma nova sessão fotográfica, os parâmetros da máquina tais como o zoom, a focagem e a orientação relativa podem variar. 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.

O primeiro canto seleccionado definirá a origem do referencial e o segundo canto definirá 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.

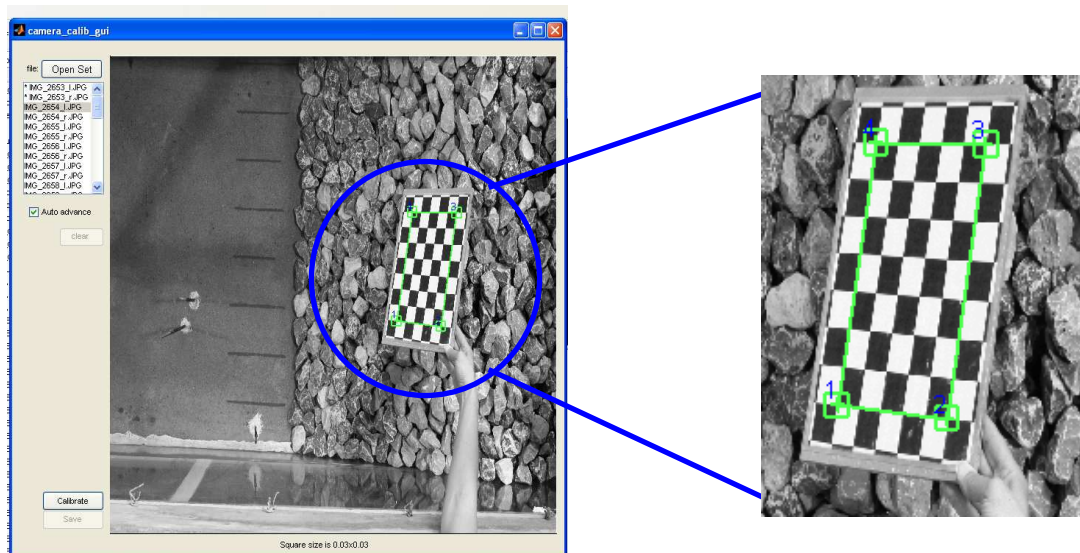


Figura 10 Processo de selecção dos cantos internos do alvo.

- **Reconstrução**

Consiste na identificação da profundidade a partir das duas vistas ligeiramente desfasadas do mesmo cenário. (Figura 11). É possível reconstruir a parte emersa, submersa ou ambas as partes, atendendo ao facto de o software rectificar o efeito da refacção existente no plano da água.

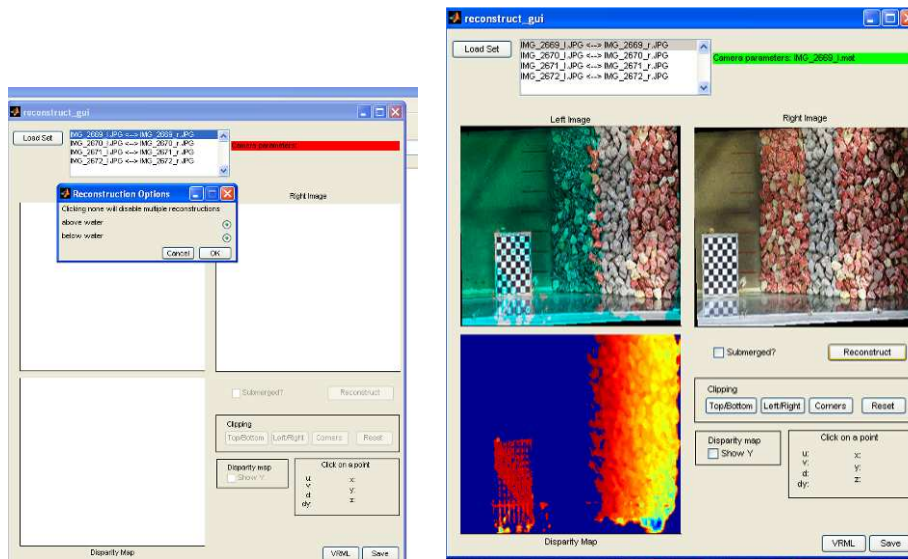


Figura 11 Reconstrução de um cenário parcialmente submerso, no início de um dos ensaios.

A partir da análise dos ficheiros reconstruídos com um programa elaborado em MatLab™, é possível obter ficheiros com as coordenadas (x,y,z) do cenário, permitindo extrair perfis (Figura 12) ou superfícies com o auxílio do Golden Software Surfer (Figura 13).

O Golden Software Surfer permite, usando os ficheiros de ternos extraídos das reconstruções, gerar grelhas de malha regular, a partir das quais é possível obter superfícies correspondentes aos levantamentos realizados.

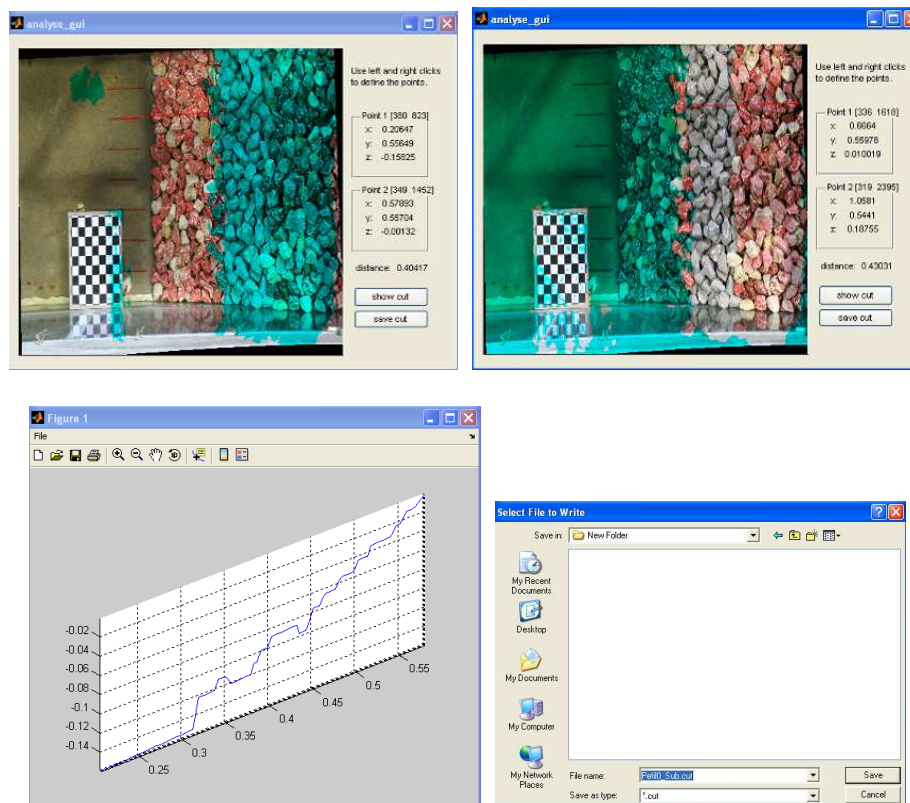


Figura 12 Extração de perfis através da análise das partes submersa e emersa de uma reconstrução.

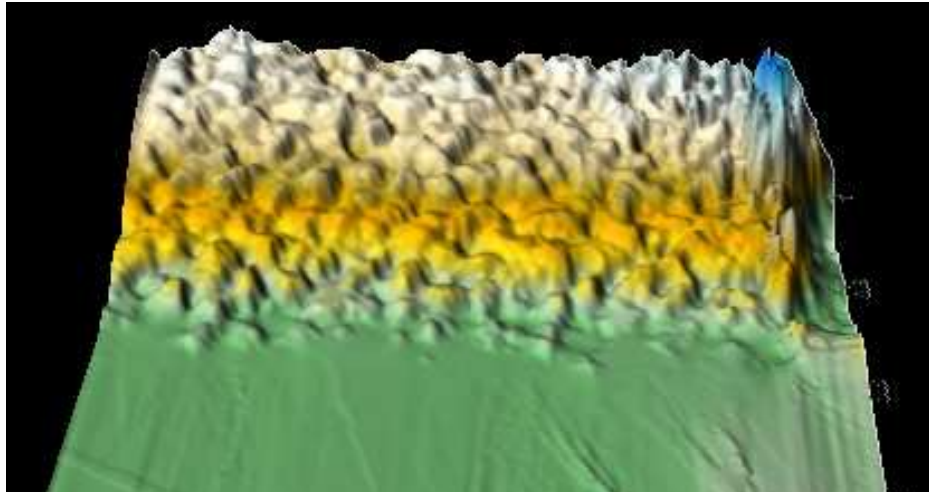


Figura 13 Envolvente definida pelo Surfer™ baseado nos pontos obtidos na reconstrução do talude a partir de um par estereofotogramétrico.

3 DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE DANO E PARÂMETROS DO PERFIL ERODIDO

Apesar do presente estudo ter consistido na realização de 5 ensaios, nesta comunicação apenas serão apresentados os resultados de apenas um dos ensaios (ensaio C), dado o tratamento dos dados dos restantes ensaios estar ainda em curso.

A Figura 14 ilustra o processo de evolução do manto resistente durante a série de ensaios C.

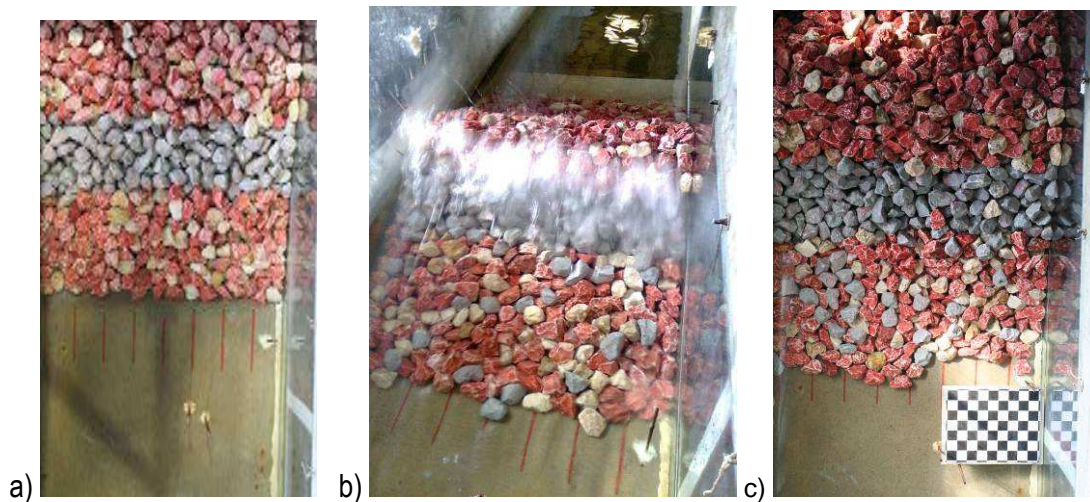


Figura 14 a) Aspecto do talude no início da série de ensaios C b) Aspecto do modelo durante a actuação do estado de mar c) Estado do talude no final da série de ensaios C

A determinação do nível de dano é caracterizada por S (Eq. 5). A profundidade erodida (E), a largura erodida (L) e a profundidade de cobertura (C) são usados para caracterizar a forma da zona do talude erodida (Figura 15).

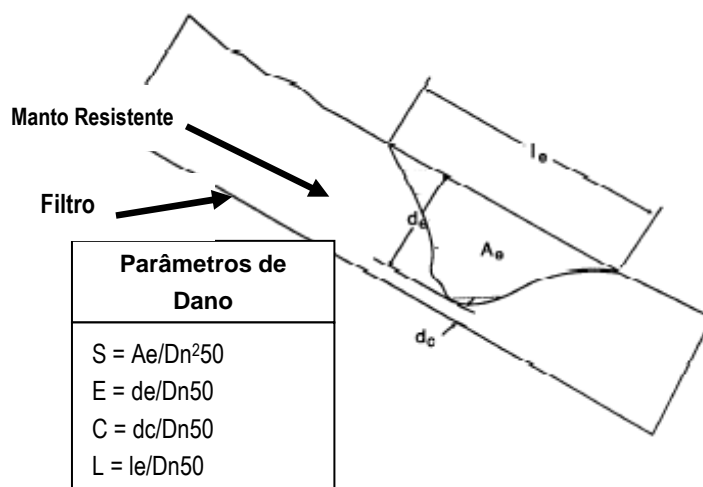


Figura 15 Definição dos parâmetros de dano

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).

A título de exemplo, ilustra-se na Figura 16 a evolução do perfil 4 (P4) ao longo dos 18 levantamentos efectuados.

Entre os levantamentos L0 e L3, o dano médio medido registou pequenas variações, coerentes com o aumento da altura de onda significativa. No entanto, entre L3 e L4 verificou-se um aumento abrupto do dano, o qual se manteve estável nos levantamentos seguintes.

Na Figura 17 ilustra-se a envolvente do manto definida com base no levantamento L8, com a ajuda do Golden Software Surfer. Nela é possível observar algumas distorções provocadas pelos reflexos no vidro do canal, alertando para a necessidade de evitar levantamentos em zonas sujeitas a reflexos.

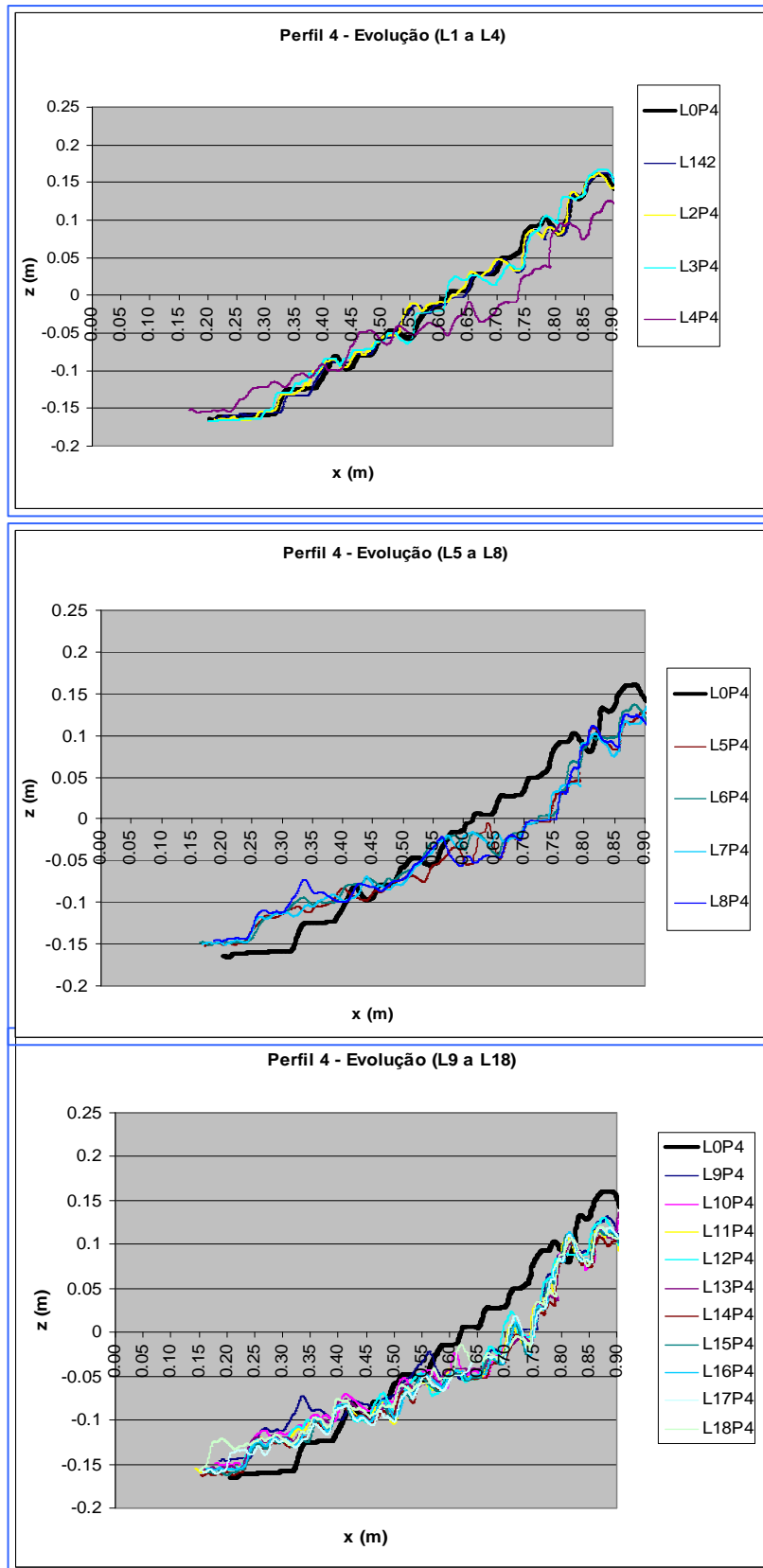


Figura 16 Evolução do Perfil P4 ao longo dos 18 levantamentos efectuados.

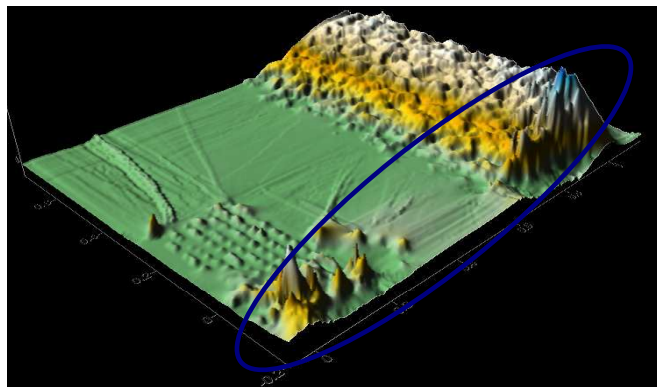


Figura 17 Distorções ocorridas no levantamento da envolvente do manto resistente devidas aos reflexos no vidro do canal

4 COMPARAÇÃO DOS VALORES PREVISTOS COM OS VALORES EXPERIMENTAIS

No Quadro 6 apresentam-se as médias dos danos ocorridos nos 7 perfis de cada um dos levantamentos, bem como os valores do dano médio previsto $\bar{S}(t)$ através da aplicação da fórmula apresentada por Melby (Eq. 4).

Quadro 6 Valores do dano médio previsto e do dano médio medido durante a série de ensaios C

	Ensaio	Profundidade (cm)	Hs (cm)	Tp (s)	Tempo decorrido (min)	Dano Médio Previsto $\bar{S}(t)$	Dano Médio medido \bar{S}
Lev 0	4	15,8 cm	10,5	2,59	0	0,00	0,00
Lev 1					30	1,70	1,43
Lev 2					60	2,24	1,61
Lev 3	5		13,0	2,59	90	2,73	1,96
Lev 4					120	3,13	16,51
Lev 5					150	3,48	17,43
Lev 6					180	3,78	14,72
Lev 7	6		14,0	2,59	210	4,18	15,76
Lev 8					240	4,54	14,51
Lev 9					270	4,87	14,72
Lev 10		300			5,18	17,31	
Lev 11	2	11,9 cm	11,0	2,48	330	5,27	18,93
Lev 12					360	5,35	17,43
Lev 13					390	5,43	16,64
Lev 14					420	5,50	16,25
Lev 15	3		12,0	2,48	450	5,61	16,26
Lev 16					480	5,71	17,08
Lev 17					510	5,81	17,92
Lev 18					540	5,90	16,48

A Figura 18 traduz a comparação entre os danos medidos nos levantamentos e os previstos pela fórmula.

Como se pode observar, entre o levantamento L0 e L3, os valores previstos foram praticamente coincidentes com os valores medidos. No entanto, tal como é evidente nos perfis ilustrados na Figura 16 no ponto anterior, entre o levantamento L3 e L4 verificou-se um aumento abrupto do dano médio medido. Tal aumento parece ter sido ampliado pelo 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, o que terá causado alguma distorção no referencial.

Por outro lado, possuindo a técnica fotogramétrica uma elevada sensibilidade na detecção de protuberâncias ou concavidades, a partir do momento em que a primeira camada do manto tenha sido removida em determinadas zonas do talude, alguns dos vazios existentes entre o enrocamento são também “levantados”, aumentando a diferença entre o perfil levantado e o perfil inicial. De modo a corrigir esse efeito, os perfis foram alvo de um alisamento aplicando uma média móvel.

A série de valores medidos apresenta aumentos e decréscimos do dano, típico do comportamento auto-regenerativo deste tipo de estruturas, 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 tende a repetir-se até não existir mais material capaz de colmatar os vazios provocados pela actuação da agitação.

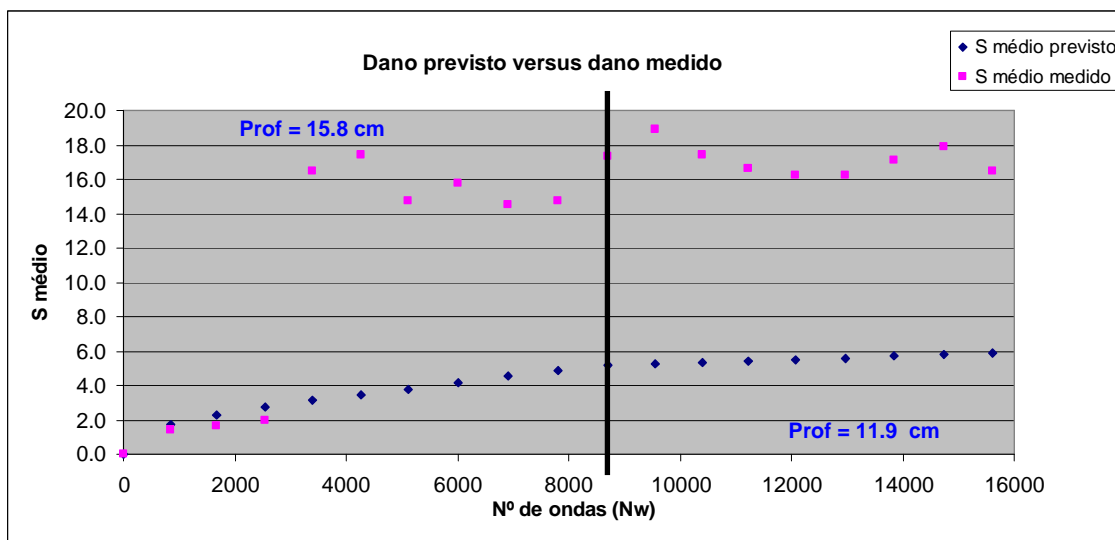


Figura 18 Comparação entre o dano médio medido e o dano médio previsto

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Apesar de apenas ter sido ainda tratada uma das cinco séries de ensaios realizadas (série de ensaios C), os valores do dano médio previsto acompanham a tendência do dano médio medido. Em curso está o tratamento das restantes séries de ensaios, com vista a testar a eficácia dos levantamentos baseados nesta técnica fotogramétrica em estudos onde é necessária a realização de levantamentos de forma intensiva.

É, pois, necessária a continuidade deste estudo com novas geometrias da estrutura, novos tipos de blocos e novas características de agitação marítima de modo a permitir uma melhor aferição das potencialidades desta técnica, dado que a sua utilização em ensaios em



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

modelo físico, para a previsão da evolução do dano em quebra-mares de talude, seria uma ferramenta valiosa, para a previsão das necessidades de obras de manutenção numa determinada fase da vida útil da estrutura de protecção, sendo para isso necessária a realização de ensaios de longa duração de modo a obter uma amostragem significativa de levantamentos.

Dos ensaios realizados sobressaíram, no entanto, algumas recomendações quanto à utilização da técnica fotogramétrica e que deverão ser tidas em conta.

- Tal como recomendado pela bibliografia relativa à utilização do software (Ferreira, 2005), 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 o eixo dos x e y, o que poderá introduzir alguns erros na reconstrução. A referência de pontos fixos do modelo poderão 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 e 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 pós-processamento dos dados dos levantamentos, nomeadamente a obtenção de perfis e a determinação dos seus correspondentes parâmetros de dano, nomeadamente a área erodida (A_e), é um processo moroso, especialmente se o número de perfis a levantar for significativo, como é 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 podem 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. Tal como foi mencionado anteriormente foi elaborado um programa em Visual Fortran™ que usa como “input” o perfil inicial e o perfil a comparar, sendo possível calcular a área erodida (A_e), a largura erodida (L) e a profundidade de cobertura (C).



6 CONTINUIDADE DO ESTUDO

O presente trabalho baseia-se num estudo ainda em curso no LNEC, emergindo algum optimismo quanto à aplicação da formulação de Melby-Kobayashi utilizando métodos fotogramétricos. Pretende-se, no entanto, 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 através do tratamento dos dados dos restantes ensaios realizados;
- Lançar as bases para estender a utilização de fórmulas semelhantes na avaliação da erosão de quebra-mares cujo manto protector incorpora 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.
- Optimizar o pós-processamento dos dados resultantes das calibrações e reconstruções fotogramétricas, 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.

7 Referências Bibliográficas

- Afonso, M.C. Influência da Obliquidade da Agitação e da Densidade de Colocação dos Blocos Antifer na Estabilidade de Obras Marítimas de Talude. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos. Abril de 2008.
- Broderick, L. L. (1983). Riprap stability a progress report. Proceedings of Coastal Structures '83, American Society of Civil Engineers.
- Baquerizo, A. (1995). Reflexión del oleaje en playas. Métodos de evaluación y de predicción. Tesis doctoral. Universidad de Cantabria. 180 pp.
- 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.; Santos, J.A.- Stereo reconstruction of a submerged scene. In Proceedings da 2nd Iberian Conference on Pattern Recognition, In Marques, J.S.; Pérez de la Blanca, N.; PINA, P., eds. Estoril: 7 a 9 de Junho. Springer, 2005, 102-109.
- Mansard, E.P.D. and E.R. Funke. 1980. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method, Proceedings of 17th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, 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.
- Melby, J.A. and Kobayashi, N. 1999. Damage Progression and variability on breakwaters trunks, Proceedings of Coastal Structures '99, 309-315.
- Sousa, I. and Santos, J.A. New tools for Risk Assessment of Rubble-Mound Breakwaters. Proceedings of ICCE2006.
- Sousa, I. Evolução do Dano do Manto Protector de Quebra-Mares de Taludes. Avaliação por Métodos Probabilísticos de Nível III. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Julho de 2007.
- Troch, P., 2005. User Manual: Active Wave Absorption System. Gent University, Dep. Civil Engineering, Denmark.
- Van der Meer, J. W. (1988). Rock slopes and gravel beaches under wave attack. Ph.D. theses, Delft University of Technology, The Netherlands; Also Delft Hydraulics Publ. 396.