

RESUMO

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 destas obras, é necessária a existência de um programa de acompanhamento da estrutura contemplando a medição de grandezas relevantes para essa avaliação. Uma destas 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 (1999) apresentou uma fórmula para previsão da evolução do dano em quebra-mares de taludes com base nas características da agitação neles incidente.

Nesta dissertação 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. Uma vez que estes ensaios terminam apenas quando fica visível uma porção apreciável do filtro sob o manto protector, a sua duração é substancialmente superior à dos ensaios comuns de estabilidade e galgamentos deste tipo de estrutura.

A medição da área erodida no final da actuação de cada estado de agitação 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.

Palavras chave: Quebra-mares de taludes, Previsão da evolução dos danos no manto resistente, Ensaios em modelo reduzido, Reconstrução de cenas a partir de pares estéreo, Análise de risco.

ABSTRACT

Breakwaters are very common maritime structures in Portugal whose project assumes the need of maintenance or repair works during their lifetime. To evaluate the need for these works, a structure monitoring programme where the relevant quantities are measured, is necessary. One of these quantities is the eroded volume from the armour slope, which can be determined from consecutive surveys of the breakwater envelope and with which one can infer the damage of the structure. Melby (1999) presented a formula for predicting the damage evolution of rubble mound breakwaters based on the incident wave characteristics.

This dissertation 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. Since these tests will end only when a sizable portion of the undelayer is visible, their duration is higher than that ordinary scale model tests of stability and overtopping performed for this kind of structures.

The measurement of the eroded area at the end of the tests 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.

Key-words: Rubble mound breakwaters, Prediction of armour layer damage progression, Scale model tests. Stereo reconstruction, Risk analysis.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi possível graças à disponibilização da instalação experimental do Departamento de Hidráulica e Ambiente do Laboratório Nacional de Engenharia Civil e à colaboração de todos os colegas com quem usualmente trabalho em equipa.

Agradeço, pois:

Ao meu orientador Doutor João Alfredo Santos do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pelo seu constante acompanhamento, orientação e disponibilidade.

À minha orientadora Doutora Maria da Graça Lopes, Prof. Coordenadora com agregação do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, por ter aceite ser minha orientadora e pela sua disponibilidade.

À Eng^a Maria da Graça Neves, com quem pude contar de forma excepcional em vários momentos deste trabalho.

Ao Eng^o Rui Capitão, ao Eng^o Gabriel Silva, à Eng^a Maria Teresa Reis e à Eng^a Conceição Fortes, pela sua colaboração e motivação em diversas fases do desenvolvimento do trabalho.

Ao Eng^o Marcos Rita, pela disponibilização dos meios e das instalações experimentais.

A toda a equipa de trabalho do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, na qual estou inserida, pela sua flexibilidade na gestão do meu trabalho profissional.

À equipa que me acompanhou nos ensaios: Branca Branco, Ana Passarinho, Odair Maurício Ana Sofia, Eng^o Carlos Galvão e João Manuel Pereira, pelo seu empenho e disponibilidade.

Uma referência especial à minha família, sem o apoio da qual este trabalho teria sido extremamente difícil.

INDICE GERAL

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação do trabalho desenvolvido e principais objectivos.....	1
1.2	Conteúdo da dissertação.....	4
2	EVOLUÇÃO DO DANO NO MANTO DE QUEBRA-MARES DE TALUDES.....	5
2.1	Generalidades sobre quebra-mares de taludes.....	5
2.2	A importância da modelação física no dimensionamento de quebra-mares	7
2.3	Evolução do dano do manto de quebra-mares de taludes	11
2.3.1	Estabilidade do manto resistente.....	11
2.3.2	Métodos de avaliação dos danos	14
2.3.3	Fórmulas empíricas de previsão da evolução dos danos.....	16
2.3.4	O trabalho experimental realizado por Melby	19
3	ENSAIOS EM MODELO FÍSICO.....	25
3.1	Considerações iniciais	25
3.2	Instalações de ensaios	25
3.3	Condições experimentais e implementação do modelo físico no canal.....	27
3.4	Agitação incidente	29
3.5	Séries de ensaios	36
3.6	Levantamento dos perfis através do método fotogramétrico	37
3.7	Considerações finais	48
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	51
4.1	Caracterização da agitação	51
4.2	Determinação do nível de dano e parâmetros do perfil erodido	52
5	COMPARAÇÃO DOS VALORES PREVISTOS COM OS VALORES EXPERIMENTAIS	61
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	65
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
	ANEXO 1- ESPECTROS CORRESPONDENTES AOS SEIS ESTADOS DE MAR REGISTRADOS NAS CINCO SONDAS	75
	ANEXO 2 - PERFIS RESULTANTES DOS LEVANTAMENTOS	89
	ANEXO 3 - DANO MÉDIO MEDIDO AO LONGO DAS SÉRIES DE ENSAIOS..	101
	ANEXO 4 - FOTOGRAFIAS.....	107

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Exemplo de um quebra-mar de taludes. Quebra-mar da Figueira da Foz	2
Figura 2.1 - Partes constituintes do perfil corrente de um quebra-mar de taludes	5
Figura 2.2 - Pontos singulares de um quebra-mar	6
Figura 2.3 - Modos de rotura associados a um quebra-mar de taludes.....	6
Figura 2.4 - Modos de rotura associados a um manto protector	7
Figura 2.5 - Tipos de rebentação da onda.....	12
Figura 2.6 - Coeficientes de permeabilidade para diferentes condições	13
Figura 2.7 - Esquema de um perfil do quebra-mar com a indicação da área erodida e da profundidade mínima de cobertura	14
Figura 2.8 - Definição dos parâmetros de dano	21
Figura 3.1 - Vista geral das instalações experimentais do Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC	25
Figura 3.2 - Canal de ondas irregulares COI1: a) Vista exterior; b) Vista Superior; c) Vista interior	26
Figura 3.3 - Perfil longitudinal da estrutura ensaiada	28
Figura 3.4 - Perfil longitudinal da implantação no canal do modelo ensaiado por Melby	28
Figura 3.5 - Aspecto da estrutura ensaiada (a) e respectivo perfil transversal (b)	29
Figura 3.6 - Esquema de colocação das sondas junto à obra.....	30
Figura 3.7 - Sonda mais próxima da estrutura	31
Figura 3.8 - Equipamento informático utilizado na geração de agitação e aquisição de dados.....	31
Figura 3.9 - Análise espectral de um sinal obtido na aquisição de dados referentes à actuação de um estado de mar com a duração de 15 minutos.....	32
Figura 3.10 - Variação da profundidade relativa com a relação altura de onda/amplitude do gerador	34
Figura 3.11 - Localização dos perfis levantados	38
Figura 3.12 - Perfilador utilizado por Melby na medição do dano do manto protector de quebra-mares de taludes	38

Figura 3.13 - Estrutura metálica onde foram instaladas as câmaras fotográficas utilizadas nos levantamentos fotogramétricos.....	40
Figura 3.14 - Câmaras fotográficas utilizadas nos levantamentos	41
Figura 3.15 - Exemplo de alguns pares estereofotogramétricos	41
Figura 3.16 - Processo de selecção dos cantos internos do alvo	42
Figura 3.17 - Reconstrução de um cenário parcialmente submerso, no início de um dos ensaios	43
Figura 3.18 - Extracção de perfis através da análise das partes submersa e emersa de uma reconstrução. a) Detalhe da extracção do perfil da parte submersa e da parte emersa. b) Perfil obtido e exportação das suas coordenadas para um ficheiro do tipo .txt	44
Figura 3.19 - Envoltente definida pelo Surfer™ baseado nos pontos obtidos na reconstrução do talude a partir de um par estereofotogramétrico no final da série de ensaios A.....	45
Figura 3.20 - Distorções ocorridas no levantamento da envoltente do manto resistente devidas aos reflexos no vidro do canal	45
Figura 4.1 - Série de ensaios A. Aspecto da rebentação sobre o talude do quebra-mar	51
Figura 4.2 - Transposição das coordenadas dos perfis para o plano horizontal.....	53
Figura 4.3 - Procedimento de cálculo dos parâmetros caracterizadores do dano: l_e , d_e e A_e	54
Figura 4.4 - Série de ensaios A. Perfil P4. Levantamentos comparativos do talude realizados com e sem água no canal.....	55
Figura 4.5 - Comparação entre o dano medido no perfil P4 e a média do dano obtido nos perfis P1 a P7, durante a série de ensaios A	57
Figura 4.6 - Dano médio medido durante a série de ensaios C.....	57
Figura 5.1 - Série de ensaios A. Comparação entre o dano médio previsto e o dano médio medido.	63
Figura 5.2 - Série de ensaios B. Comparação entre o dano médio previsto e o dano médio medido.	64
Figura A1.1 - Estado de agitação 1. Espectros registados nas duas sondas junto ao gerador.....	77
Figura A1.2 - Estado de agitação 1. Espectros registados nas três sondas junto à estrutura	78

Figura A1.3 - Estado de agitação 2. Espectros registados nas duas sondas junto Ao gerador	79
Figura A1.4 - Estado de agitação 2. Espectros registados nas três sondas junto à estrutura.....	80
Figura A1.5 - Estado de agitação 3. Espectros registados nas duas sondas junto ao gerador.....	81
Figura A1.6 - Estado de agitação 3. Espectros registados nas três sondas junto à estrutura.....	82
Figura A1.7 - Estado de agitação 4. Espectros registados nas duas sondas junto ao gerador.....	83
Figura A1.8 - Estado de agitação 4. Espectros registados nas três sondas junto à estrutura.....	84
Figura A1.9 - Estado de agitação 5. Espectros registados nas duas sondas junto ao gerador.....	85
Figura A1.10 - Estado de agitação 5. Espectros registados nas três sondas junto à estrutura.....	86
Figura A1.11 - Estado de agitação 6. Espectros registados nas duas sondas junto ao gerador.....	87
Figura A1.12 - Estado de agitação 6. Espectros registados nas três sondas junto à estrutura.....	88
Figura A2.1 - Série de ensaios A. Evolução do Perfil P4. Levantamentos L0 a L10.....	91
Figura A2.2 - Série de ensaios A. Evolução do Perfil P4. Levantamentos L11 a L21.....	92
Figura A2.3 - Série de ensaios A. Evolução do Perfil P4. Levantamentos L22 a L30.....	93
Figura A2.4 - Série de ensaios A. Evolução do Perfil P4. Levantamentos L31 a L40.....	94
Figura A2.5 - Série de ensaios A. Evolução do Perfil P4. Levantamentos L41 a L50.....	95
Figura A2.6 - Série de ensaios A. Evolução do Perfil P4. Levantamentos L51 a L57.....	96
Figura A2.7 - Série de ensaios B. Evolução do Perfil P4. Levantamentos L0 a L8.....	97
Figura A2.8 - Série de ensaios B. Evolução do Perfil P4. Levantamentos L9 a L17.....	98
Figura A2.9 - Série de ensaios C. Evolução do Perfil P4. Levantamentos L1 a L8.....	99

Figura A2.10 - Série de ensaios C. Evolução do Perfil P4. Levantamentos L9 a L18.....	100
Figura A4.1 - Série de ensaios A. Aspecto do talude do quebra-mar no Início, a meio e no final da série de ensaios respectivamente.....	109
Figura A4.2 - Série de ensaios B. Aspecto do talude do quebra-mar no Início e no final da série de ensaios respectivamente.....	110
Figura A4.3 - Série de ensaios C. Aspecto do talude do quebra-mar no Início e no final da série de ensaios respectivamente.....	111

INDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 - Condições experimentais	27
Quadro 3.2 - Características da agitação utilizadas para gerar o sinal fornecido ao gerador de ondas irregulares.....	29
Quadro 3.3 - Características da agitação total medida na sonda mais próxima da estrutura	35
Quadro 3.4 - Características da agitação incidente medida na sonda mais próxima da estrutura.....	35
Quadro 3.5 - Características das séries temporais dos estados de agitação incidente utilizados nos ensaios realizados por Melby medidas na sonda mais próxima do pé do talude	36
Quadro 3.6 - Séries de ensaios realizadas	36
Quadro 3.7 - Durações de actuação de cada ensaio	37
Quadro 3.8 - Sistematização dos procedimentos inerentes ao levantamento dos perfis	46
Quadro 4.1 - Dano médio (\bar{S}) medido durante a série de ensaios A.....	58
Quadro 4.2 - Dano médio (\bar{S}) medido durante a série de ensaios B.....	59
Quadro 4.3 - Dano médio (\bar{S}) medido durante a série de ensaios C.....	59
Quadro 5.1 - Série de ensaios A. Comparação entre o dano médio medido e o dano médio previsto	62
Quadro 5.2 - Série de ensaios B. Comparação entre o dano médio medido e o dano médio previsto	63
Quadro A3.1 - Dano médio (\bar{S}) medido ao longo da série de ensaios A	103
Quadro A3.2 - Dano médio (\bar{S}) medido ao longo da série de ensaios B	105
Quadro A3.3 - Dano médio (\bar{S}) medido ao longo da série de ensaios C	105

SIMBOLOGIA

A_e	área erodida do perfil do manto
a_s e a_p	coeficientes empíricos dependentes da localização da rebentação
b	coeficiente empírico dependente da escala do modelo
C	profundidade mínima de cobertura do manto de um quebra-mar adimensionalizada por D_{n50}
dc	profundidade mínima de cobertura do manto de um quebra-mar
de	profundidade erodida do manto de um quebra-mar
D_{n50}	diâmetro nominal de um enrocamento com a massa correspondente a 50% na curva de distribuição dos pesos acumulados
D_n	diâmetro nominal de um bloco
$D_{\%}$	percentagem de área média erodida de um perfil relativamente à área média do perfil original
E	profundidade erodida do manto de um quebra-mar adimensionalizada por D_{n50}
g	aceleração da gravidade
H	altura de onda
h	profundidade junto ao gerador
H_{m0}	altura de onda significativa definida a partir do espectro do estado de agitação
H_o	altura de onda em grandes profundidades
H_s	altura de onda significativa (média do terço mais elevado das alturas de onda de uma série de ondas)
h_t	profundidade junto do pé do talude
k	número de onda
kh	profundidade relativa
K_D	coeficiente de estabilidade em função da forma e da localização do bloco
K_{Δ}	coeficiente de forma dos blocos
L	Comprimento de onda
L	largura erodida do manto de um quebra-mar adimensionalizada por D_{n50}
le	largura erodida do manto de um quebra-mar

L_o	comprimento de onda em grandes profundidades
L_{om}	comprimento de onda em grandes profundidades, correspondente ao período médio
L_{op}	comprimento de onda em grandes profundidades, correspondente ao período de pico
L_p	comprimento de onda, correspondente ao período de pico
M_{50}	peso emerso do enrocamento correspondente a 50% na curva de distribuição dos pesos acumulados
n	número de camadas de blocos no manto
N_{m0}	parâmetro de estabilidade dos blocos no manto calculado com base na altura de onda significativa definida a partir do espectro do estado de agitação (H_{m0})
N_{od}	coeficiente de estabilidade, considerando o número de blocos, numa faixa do manto com a largura do diâmetro nominal do bloco, que se deslocam para fora do manto
$N_{o,mov}$	número de blocos, dentro de uma faixa do manto com a largura do diâmetro nominal do bloco, que se movimentam uma amplitude maior que 0,5 vezes o diâmetro nominal do bloco
N_r	número de blocos por unidade de área de talude
N_s	parâmetro de estabilidade dos blocos no manto calculado com base na altura de onda significativa (H_s)
N_w	número de ondas
N_z	número de ondas correspondente a uma tempestade
P	porosidade da camada do manto
P'	coeficiente de permeabilidade
r	espessura da camada do manto
R	coeficiente de reflexão
R_c	distância entre o nível da água e o coroamento da estrutura ou "freeboard"
S	parâmetro de danos ou área erodida adimensionalizada por D_{n50}
S_o	amplitude máxima do gerador
\bar{S}	dano médio
$\bar{S}(t_n)$	dano médio verificado no instante t_n
$\bar{S}(t)$	dano médio verificado no instante t onde $t_n < t < t_{n+1}$
T	período de onda

T_p	período de pico do espectro de um estado de agitação
T_m	período médio de zero ascendente de uma série de ondas
t	duração de exposição a um estado de agitação
W	peso emerso do bloco
α	ângulo do talude ou do fundo com a horizontal
Δ	densidade relativa do bloco submerso
ξ	número de Iribarren
ξ_{mc}	número de Iribarren correspondente ao tipo de rebentação, para ondas irregulares
ξ_o	número de Iribarren definido originalmente para ondas regulares
ξ_{om}	número de Iribarren correspondente ao período médio, para ondas irregulares
ξ_{op}	número de Iribarren correspondente ao período de pico, para ondas irregulares
ϕ	densidade de colocação dos blocos
γ	factor de esbelteza do espectro de JONSWAP
γ_s	peso volúmico do material que constitui o bloco
γ_w	peso volúmico da água
ρ	massa volúmica do fluido
ρ_s	massa volúmica do material que constitui o bloco

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação do trabalho desenvolvido e principais objectivos

O transporte marítimo de pessoas e bens implica a existência de áreas onde a agitação marítima seja reduzida, de modo a viabilizar as operações de acostagem, carga e descarga de navios.

Inicialmente, apenas as áreas naturalmente abrigadas, tais como baías, estuários e zonas protegidas por cabos, eram utilizadas para esse fim. A necessidade de criar condições de abrigo, em locais onde elas não existiam naturalmente, em zonas de grande importância económica, conduziu à utilização de estruturas artificiais de grande desenvolvimento linear: os quebra-mares.

Também a protecção da linha de costa obriga por vezes à construção de obras de abrigo com vista a proteger pessoas e bens em locais vulneráveis às condições de agitação mais desfavoráveis.

Os quebra-mares de taludes são as estruturas mais utilizadas para a criação de condições de abrigo nos portos portugueses instalados em costa aberta (Silva, 1995). Estes quebra-mares são constituídos por um núcleo de materiais soltos indiferenciados que é protegido por uma ou mais camadas de material, também solto, mas de peso mais seleccionado, de enrocamento ou elementos artificiais de betão (Figura 1.1).

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.

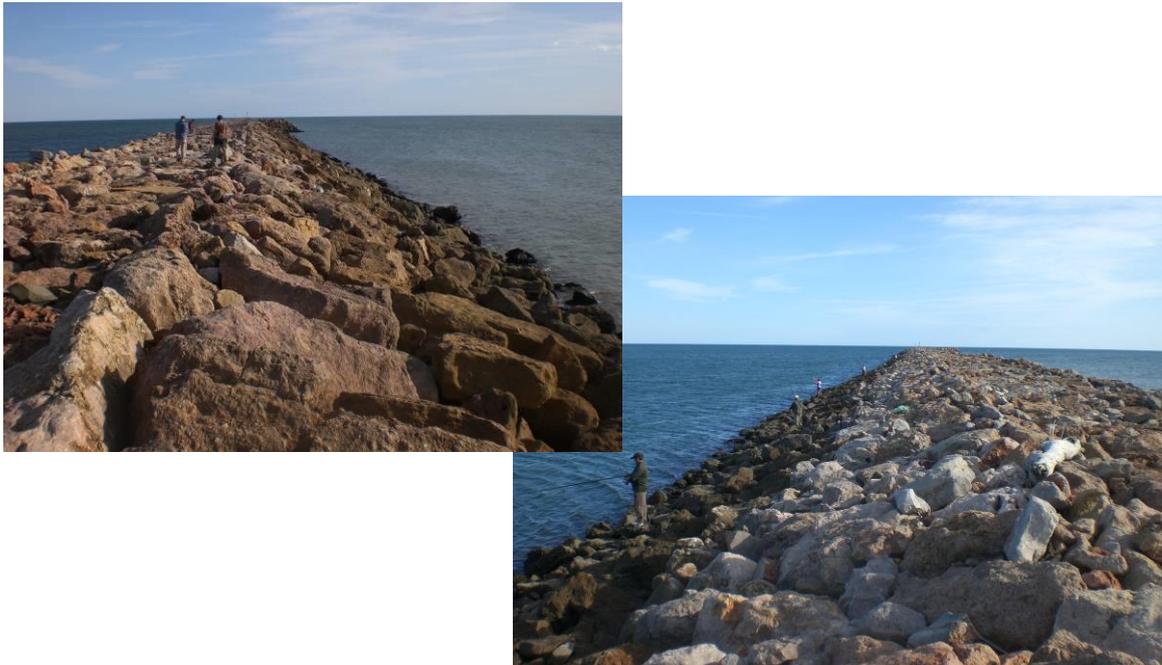


Figura 1.1 - Exemplo de um quebra-mar de taludes. Quebra-mar da Figueira da Foz

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.

Para além dos programas de monitorização realizados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) a cerca de 32 estruturas de protecção marítima existentes em Portugal Continental, com vista a identificar a eventual

necessidade de obras de reparação, tem vindo a fazer sentir-se a necessidade da criação de ferramentas que permitam prever a evolução do dano de um quebra-mar ao longo da sua vida útil. Pretende-se, desse modo, poder quantificar a probabilidade de o dano exceder um determinado limite, prevenindo a ruína da estrutura e os elevados custos inerentes à sua reconstrução e/ou à eventual inoperacionalidade das infraestruturas às quais serve de protecção.

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.

Contudo, 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 em modelo físico reduzido.

A motivação da presente dissertação é, 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.

Com este trabalho pretendeu-se contribuir para este objectivo promovendo-se a validação da fórmula proposta por Melby (1999). Tal implicou a realização de ensaios em modelo reduzido de longa duração com uma estrutura idêntica à testada por aquele autor e a medição da evolução do dano nos intervalos da actuação dos estados de agitação constituintes das séries de temporais testadas.

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.

1.2 Conteúdo da dissertação

O trabalho desenvolvido é apresentado em 6 capítulos. Depois deste capítulo de introdução, descreve-se, no Capítulo 2, como se enquadra o presente trabalho na temática da avaliação do dano em quebra-mares de taludes, passando pela apresentação de algumas generalidades sobre quebra-mares de taludes, pela importância da modelação física no dimensionamento dos quebra-mares e pela referência a algumas fórmulas empíricas de previsão da evolução do dano ao longo da sua vida útil. No Capítulo 3 descrevem-se as experiências realizadas em modelo físico bidimensional no âmbito do presente trabalho. O Capítulo 4 é dedicado à apresentação e análise dos resultados experimentais. No Capítulo 5 é descrita a aplicação da formulação proposta por Melby, seguida da comparação do dano previsto pela fórmula com o dano obtido experimentalmente. A dissertação termina no Capítulo 6 com as conclusões do trabalho apresentado, bem como com algumas recomendações para estudos futuros.

2 EVOLUÇÃO DO DANO NO MANTO DE QUEBRA-MARES DE TALUDES

2.1 Generalidades sobre quebra-mares de taludes

De um modo simplista, pode afirmar-se que os quebra-mares de taludes são estruturas constituídas por um núcleo de forma prismática, de material designado T.O.T (todo o tamanho), onde se podem encontrar materiais com dimensões muito variadas. São protegidos por blocos, naturais ou artificiais, de peso e volume adequados ao regime de extremos de agitação marítima esperado na zona de implantação da estrutura ao longo da sua vida útil. Aqueles blocos estão normalmente dispostos em duas camadas, constituindo o chamado manto protector. Pode ainda existir uma camada de filtro entre o núcleo e o manto protector. Na Figura 2.1 apresentam-se as partes constituintes do perfil corrente de um quebra-mar de taludes.

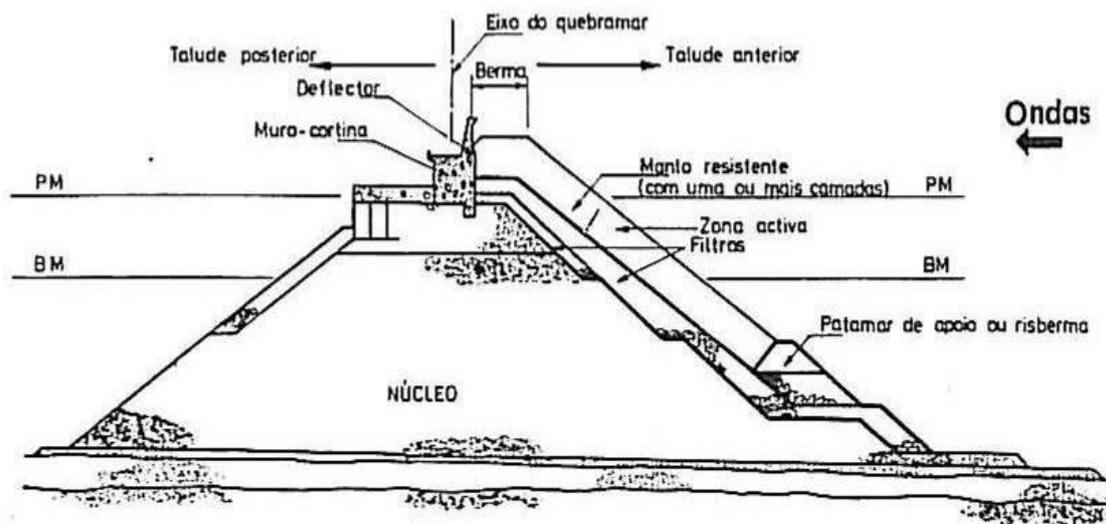


Figura 2.1 - Partes constituintes do perfil corrente de um quebra-mar de taludes. (Pita, 1984)

Um quebra-mar tem, ao longo do seu desenvolvimento, pontos singulares, de que são exemplo o enraizamento, o tronco, as zonas de curva se existirem e a cabeça (Figura 2.2).

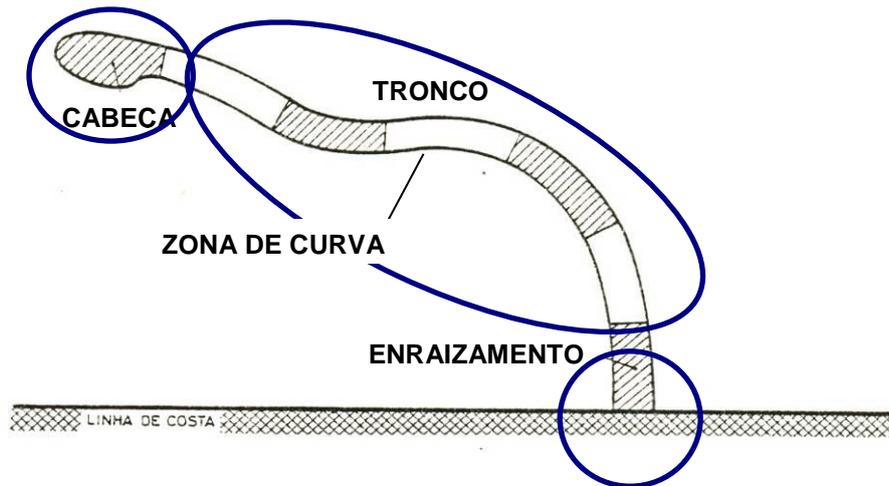


Figura 2.2 - Pontos singulares de um quebra-mar (adaptada de Pita, 1984)

De acordo com o U. S. Army Corps of Engineers (USACE, 2006), os modos de rotura que podem ocorrer num quebra-mar durante o período de vida útil da obra estão associados às causas ilustradas na Figura 2.3.

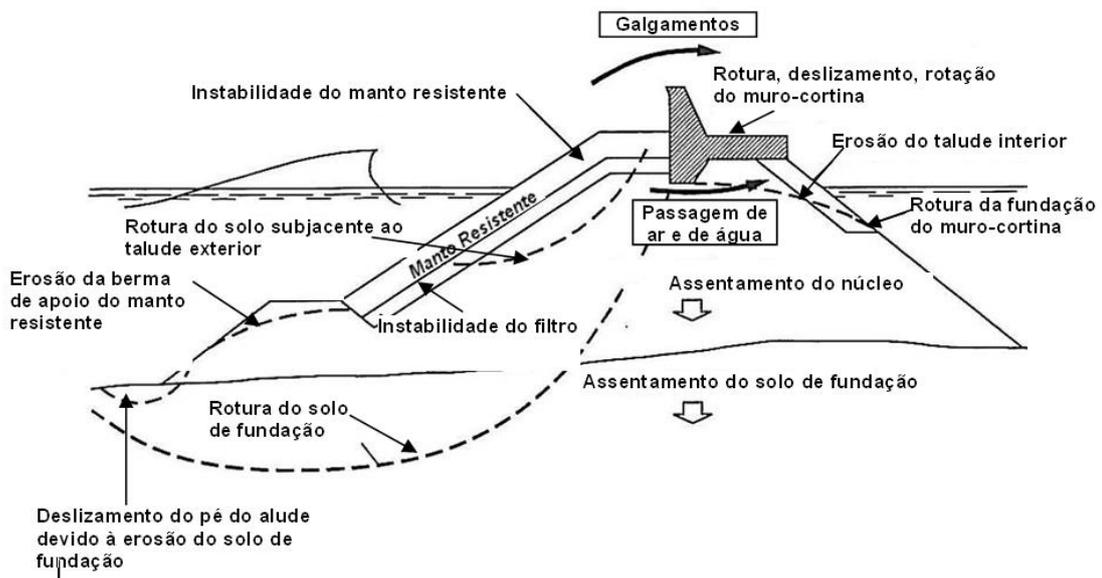


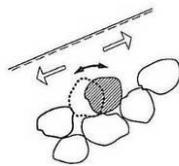
Figura 2.3 - Modos de rotura associados a um quebra-mar de taludes (adaptado de USACE, 2006)

No entanto, aquando do dimensionamento de um quebra-mar, a instabilização do manto resistente é o modo de ruína que suscita maior preocupação por ser o mais comum.

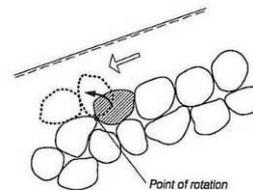
Dado o manto resistente ser o elemento constituinte do quebra-mar destinado a dissipar a energia proveniente da agitação incidente, a ocorrência de falhas ao longo do mesmo com eventual exposição dos filtros conduz, normalmente, a fenómenos de infra-escavação devido à saída de finos e à diminuição da sua capacidade de dissipação de energia, podendo eventualmente culminar com a ruína do quebra-mar se não forem feitas obras de reparação.

Segundo Burcharth (1993) os modos de rotura associados a um manto protector são os definidos na Figura 2.4.

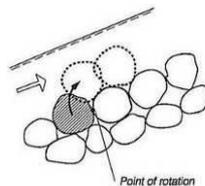
- a) Movimento dos elementos do manto para cima e para baixo mantendo-se na camada



- b) Rotação do elemento do manto e subsequente deslocamento no sentido descendente



- c) Rotação do elemento do manto e subsequente deslocamento no sentido ascendente



- d) Escorregamento de vários elementos

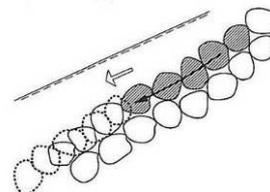


Figura 2.4 - Modos de rotura associados a um manto protector (Burcharth,1993)

2.2 A importância da modelação física no dimensionamento de quebra-mares

O dimensionamento do manto resistente de um quebra-mar de taludes, inicia-se pela determinação do peso dos blocos através da fórmula de Hudson, (1959). Este é um pré-dimensionamento, dado que esta fórmula não

entra em linha de conta com alguns factores inerentes à agitação e à própria estrutura.

$$W = \frac{\gamma_s H_s^3}{K_D \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right)^3 \cotg \alpha} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

onde:

- W é o peso emerso do bloco;
- H_s é a altura de onda significativa de projecto junto à obra;
- γ_s é peso volúmico do material que constitui o bloco;
- γ_w é o peso volúmico da água;
- $\cotg \alpha$ é a cotangente do ângulo que o talude faz com os fundos;
- K_D é o coeficiente de estabilidade;

De acordo com o descrito no U. S. Army Corps of Engineers (1984), K_D depende dos seguintes factores:

- Tipo de blocos;
- Número de camadas do manto;
- Forma e localização do bloco (cabeça, zona de rebentação, etc.);
- Modo de colocação dos blocos;
- Ângulo de incidência da onda na estrutura;
- Tipo de onda (com rebentação ou sem rebentação).

Na Eq. 2.1, apenas H_s caracteriza as acções enquanto os restantes factores caracterizam a estrutura.

De acordo com o USACE (1984), o número de blocos por unidade de área (N_r) e a espessura da camada do manto (r) são determinados pelas Eqs. 2.2 e 2.3, respectivamente.

$$N_r = n K_\Delta \left(1 - \frac{P}{100} \right) \left(\frac{\gamma_s}{W} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

onde:

- P é a porosidade da camada do manto;
- K_{Δ} é o coeficiente de forma dos blocos.

ambos dependentes do tipo de bloco (liso ou rugoso) e do número de camadas, n , a utilizar.

A espessura do manto resistente é calculada através da Eq. 2.3

$$r = n K_{\Delta} \left(\frac{W}{\gamma_s} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

onde:

- n é o número de camadas de blocos do manto.

Este dimensionamento prévio do manto resistente do quebra-mar carece, no entanto, de confirmação da sua eficácia através de ensaios em modelo físico reduzido, onde é feita uma análise do comportamento hidráulico e/ou estrutural do manto resistente. Estes ensaios são realizados à escala, utilizando-se a menor escala possível, de modo a obter um modelo o mais próximo possível do tamanho real por forma a reduzir efeitos de escala.

De acordo com a porção da estrutura representada, os ensaios podem classificar-se em:

Tridimensionais

- Reproduzindo-se a batimetria e linha de costa da zona em estudo e a geometria das obras, de modo a simular o melhor possível todos os factores intervenientes nas características da agitação utilizada, por exemplo a obliquidade das ondas, as características dos fundos e a orla costeira.

Bidimensionais

- Reproduzindo-se um trecho (secção transversal), apenas, da obra em estudo.

A modelação física permite uma visualização muito elucidativa dos fenómenos, reproduzindo fenómenos complexos de difícil representação e solução em modelos numéricos.

Um ensaio consiste, normalmente, na actuação de um estado de agitação caracterizado por uma altura de onda significativa (H_s), um período de pico (T_p) proveniente de uma determinada direcção de agitação (rumo) para um determinado nível de maré.

Uma classificação dos ensaios em modelo físico segundo os objectivos do mesmo, pode ser a seguinte:

- Ensaio de Estabilidade - Quantificação visual das quedas e dos movimentos, sendo posteriormente determinadas as suas percentagens e atribuídos os graus dos critérios de classificação de quedas e movimentos.
- Ensaio de Galgamentos - Consistem na qualificação visual dos galgamentos, com atribuição do grau do critério de classificação de galgamentos e na medição do volume de água galgado.
- Ensaio de Agitação - Consistem na aquisição dos dados das sondas colocadas nos pontos característicos que se pretendem estudar, na aquisição dos dados de uma sonda colocada junto ao gerador (ao largo). Posteriormente é feito o cálculo dos índices de agitação em cada ponto através da relação entre as alturas de onda em cada ponto e ao largo.
- Ensaio de Pressões - Consistem na colocação de sensores de pressão nas zonas em estudo de modo a permitir estudar os seus efeitos na estrutura.

Assim, os ensaios de estabilidade em modelo físico de uso corrente visam apenas a verificação da estabilidade do manto resistente para determinadas condições de agitação com vista a avaliar se o grau de quedas e de movimentos se situa dentro dos limites admissíveis para que a geometria do projecto do quebra-mar seja adoptada na sua construção.

Estes ensaios não contemplam, no entanto, a previsão da evolução da estrutura mediante as sucessões de temporais, avaliando apenas o comportamento da mesma, mediante a acção da agitação actuante.

Surgiu assim a perspectiva de avaliar, com um plano de ensaios mais longo e aplicando a formulação proposta por Melby (1999) a previsão da evolução do dano ao longo da vida útil do quebra-mar.

2.3 Evolução do dano do manto de quebra-mares de taludes

2.3.1 Estabilidade do manto resistente

A definição da estabilidade de um quebra-mar de taludes está geralmente relacionada com o grau de danos causados pela acção das ondas no manto resistente. As principais acções que actuam num quebra-mar são: a agitação marítima; as correntes, as marés, os sismos e os tsunamis. De todas estas acções, a agitação marítima é sem dúvida a acção mais importante, por ser a mais recorrente.

O tipo de rebentação da onda sobre a estrutura é um dos factores de grande importância na determinação do nível de danos no manto do quebra-mar. Os tipos de rebentação podem ser identificados através do parâmetro “surf similarity”, ξ , também denominado por número de Iribarren.

Considerando ondas regulares, o parâmetro “surf similarity”, ξ_o , foi definido pela Eq. 2.4.

$$\xi_o = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_o}{L_o}}} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

onde:

- H_o é a altura de onda em grandes profundidades;
- L_o é o comprimento de onda em grandes profundidades;
- α é o ângulo do fundo com a horizontal.

Na Figura 2.5, apresentam-se os quatro tipos de rebentação da onda e os correspondentes limites do parâmetro “surf similarity”, ξ_o , para taludes impermeáveis.

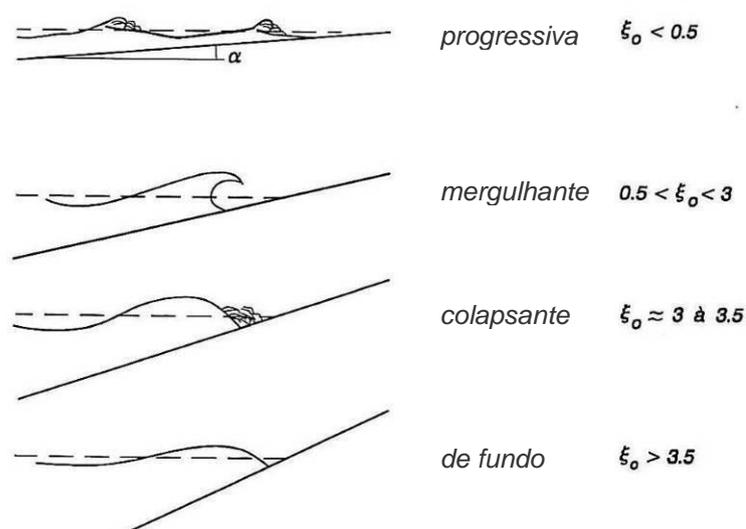


Figura 2.5 - Tipos de rebentação da onda (USACE, 2006)

Ainda no USACE (2006) e para ondas irregulares, os parâmetros “surf similarity”, ξ_{om} e ξ_{op} , correspondentes aos períodos médio e de pico, respectivamente, são definidos pelas Eqs. 2.5 e 2.6.

$$\xi_{om} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_s}{L_{om}}}} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

$$\xi_{op} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_s}{L_{op}}}} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

onde:

- L_o é o comprimento de onda em grandes profundidades;
- L_{op} L_{om} são o comprimento de onda em grandes profundidades correspondentes ao período de pico e ao período médio respectivamente.

Van der Meer (1988) sugere os seguintes limites de valores para a determinação do tipo de rebentação de agitação com ondas irregulares, em taludes de enrocamento e sem ocorrência de galgamentos.

$$\begin{aligned} \xi_{om} < \xi_{mc} & \quad \text{Rebentação mergulhante} \\ \xi_{om} > \xi_{mc} & \quad \text{Rebentação de fundo} \end{aligned}$$

em que ξ_{om} e ξ_{mc} são dados pelas Eq. 2.5 e 2.7 respectivamente

$$\xi_{mc} = (6,2 P' ^{0,31} (\tan \alpha)^{0,5})^{\frac{1}{P' + 0,5}} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

onde:

- P' é o coeficiente de permeabilidade.

A uma maior porosidade corresponde uma maior dissipação da energia da onda incidente. Assim sendo, o número de Iribarren em ondas limitadas pela profundidade diferirá consoante a porosidade do manto resistente e a inclinação do talude. O coeficiente P' foi determinado por Van der Meer (1988) em função do tipo de perfil transversal da obra e considera os valores definidos na Figura 2.6.

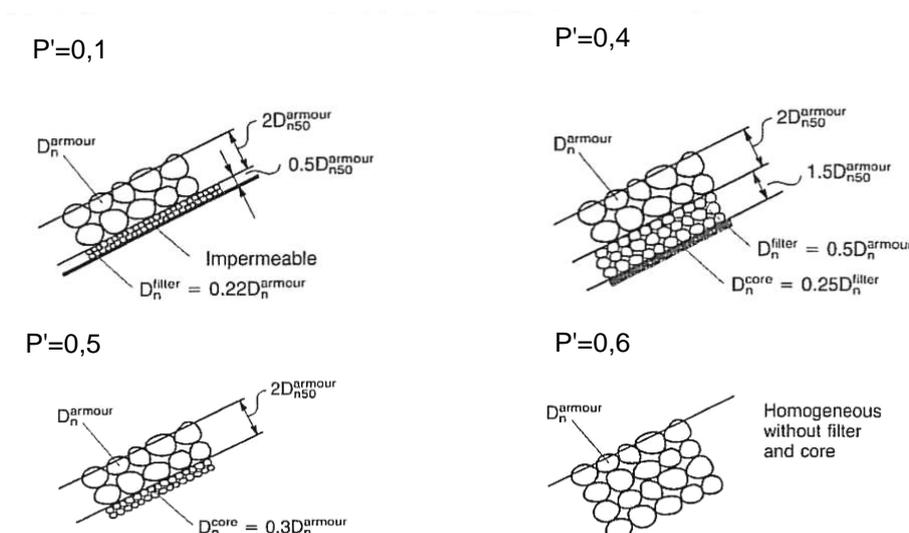


Figura 2.6 - Coeficientes de permeabilidade para diferentes condições (Van der Meer, 1988)

Por outro lado há também as características estruturais, as quais influenciam a estabilidade do manto protector de um quebra-mar, tais como a dimensão, peso e tipo de blocos que constituem o manto, o declive do talude e o modo de colocação dos blocos.

2.3.2 Métodos de avaliação dos danos

Aquando do dimensionamento do manto de um quebra-mar são consideradas condições extremas da agitação marítima e um valor máximo para a percentagem de danos admissível. Existem, no entanto, diferentes métodos de avaliação dos danos. Seguidamente serão descritos dois dos métodos considerados relevantes no âmbito deste trabalho e que se focam primordialmente na avaliação do dano em taludes constituídos por enrocamento, dado ser esta uma das condições do presente estudo.

Método do volume erodido

O método do volume erodido consiste na avaliação do dano através do levantamento de perfis com a ajuda de um perfilador mecânico.

Para definir o dano é feita a média dos levantamentos de diversos perfis ao longo do quebra-mar para determinar um perfil médio que será posteriormente subtraído a um perfil médio não danificado, de modo a obter uma área erodida média ao longo da zona activa do manto. A Figura 2.7 esquematiza a área erodida e a espessura mínima de cobertura.

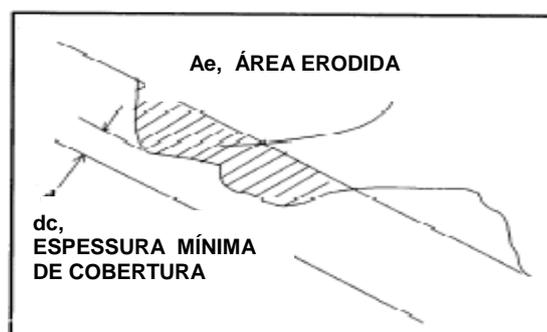


Figura 2.7 - Esquema de um perfil do quebra-mar com a indicação da área erodida e da profundidade mínima de cobertura

A área média erodida, A_e , é depois dividida pela área média do perfil original (não danificado), conforme a Eq. 2.8

$$D_{\%} = \frac{\text{Média da área erodida nos perfis}}{\text{Área média do perfil original}} 100\% \quad (\text{Eq. 2.8})$$

A percentagem considerada como dano nulo, segundo Hudson (1959) corresponde a $D_{\%} < 1\%$.

Segundo o USACE (1984), o critério de dano nulo (corresponde a $D_{\%} < 5\%$, não estando bem clara a razão deste critério menos restritivo.

Broderick e Ahrens (1982) e Van der Meer (1988) definiram um índice adimensional caracterizador do dano usando levantamentos de perfis e que é definido pela Eq. 2.9:

$$S = \frac{A_e}{\left(\frac{M_{50}}{\rho_s}\right)^{2/3}} = \frac{A_e}{D_{n50}^2} \quad (\text{Eq. 2.9})$$

onde:

- A_e é o volume erodido por unidade de comprimento ou área erodida do perfil transversal do manto;
- M_{50} é a massa mediana do bloco de enrocamento na curva de distribuição de massa;
- ρ_s é a massa volúmica dos blocos de enrocamento que constituem o manto;
- D_{n50} é o diâmetro nominal do enrocamento dado pela Eq. 2.10.

$$D_{n50} = \left(\frac{M_{50}}{\rho_s}\right)^{1/3} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

O tamanho do pé do perfilador é determinado de modo a que o levantamento do perfil não danificado coincida com o perfil teórico do talude.

A diferença entre o método tradicional do volume erodido e o método de Broderick e Ahrens reside na adimensionalização da área erodida através da sua divisão pelo quadrado do diâmetro nominal.

Método da contagem de blocos

Hedar (1960), Owen e Allsop (1983), Hughes (1993) e Davies et al. (1994) descreveram a medida do dano através da contagem de blocos removidos. Actualmente são também utilizadas técnicas de processamento digital de imagens, apesar do seu processamento ser bastante demorado. Para valores relativamente baixos de estragos, os métodos de contagem de blocos revelam-se bastante eficazes. No entanto, revelam o mesmo defeito do método do volume erodido: a concentração dos danos não é especificada e a máxima profundidade erodida não é contabilizada.

2.3.3 Fórmulas empíricas de previsão da evolução dos danos

As primeiras fórmulas para o dimensionamento dos elementos do manto protector remontam à década de trinta do século passado, nomeadamente as publicadas por Iribarren (1938).

Posteriormente surgiram diferentes fórmulas de dimensionamento para determinação do peso dos blocos, todas semi-empíricas, deduzidas a partir dos resultados de ensaios em modelo físico e tendo por base a experiência existente e as considerações teóricas relacionadas com o comportamento de blocos sob a acção da agitação.

De todas as fórmulas apresentadas posteriormente para o dimensionamento do peso dos blocos nas obras marítimas de talude, destacam-se as fórmulas de Hudson (1959) e de Van der Meer (1988), por serem muito utilizadas.

A **fórmula de Hudson**, apresentada anteriormente através da Eq. 2.1, teve por base os trabalhos anteriores de Iribarren (1938).

Definindo a fórmula de Hudson em função do parâmetro de estabilidade do manto, N_s , obtém-se a seguinte expressão:

$$N_s = \frac{H}{\Delta D_n} = (K_D \cot \alpha)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Eq. 2.11})$$

onde:

- H é a altura de onda;
- Δ é a densidade relativa do bloco submerso;
- D_n é o diâmetro nominal do bloco;
- K_D é o coeficiente de estabilidade em função da forma e da localização do bloco;
- α é o ângulo do talude ou do fundo com a horizontal.

A fórmula de Hudson não considera o modo e a densidade de colocação dos blocos. Para além disso, não existem estudos sistemáticos para a determinação do coeficiente de estabilidade, K_D , aplicado nesta fórmula, considerando diferentes porosidades e diferentes modos de colocação dos blocos. Este coeficiente é função da forma e da localização do bloco considerado na fórmula, por exemplo, se está localizado na cabeça ou no corpo do quebra-mar ou ainda se está localizado na zona de rebentação ou fora da zona de rebentação.

Van der Meer (1988) propôs a seguinte fórmula, obtida com base em resultados de ensaios em modelo físico sobre a estabilidade de taludes de enrocamento:

$$\frac{H_s}{\Delta D_n} = f(S^{t1} \xi^{t2} N_z^{t3} \alpha^{t4} P^{t5}) \quad (\text{Eq. 2.12})$$

onde:

- H_s é a altura de onda significativa;
- Δ é a densidade relativa do bloco submerso;
- D_n é o diâmetro nominal do bloco;
- S é o parâmetro de danos (Eq. 2.9);
- ξ é o número de Iribarren (Eq. 2.5);

- N_z é o número de ondas correspondente a uma tempestade;
- α é o ângulo do talude ou do fundo com a horizontal;
- P' é o coeficiente de permeabilidade (Figura 2.6);
- t_1 a t_5 são coeficientes empíricos determinados com base em resultados experimentais.

Posteriormente a Eq. 2.12 foi adaptada para mantos constituídos por blocos artificiais do tipo Antifer, tendo sido apresentada em função do número de blocos que se deslocam para fora do manto (N_{od}) numa faixa com a largura nominal do bloco. Foi também apresentada em função do número de movimentos dos blocos ($N_{o,mov}$).

Van der Meer (1999) apresentou uma nova fórmula de dimensionamento dos blocos, considerando a influência da sua densidade de colocação, ϕ , e distância entre o nível da água e o coroamento da estrutura, R_c , na estabilidade do manto de blocos.

Até à presente data têm sido realizados vários ensaios em modelo físico para determinar os coeficiente K_D (e também N_{od} na fórmula de Van der Meer) válidos para diferentes condições de ensaio.

No entanto, estas fórmulas não permitem prever o resultado da solicitação dos mantos protectores por uma agitação diferente da agitação de projecto.

No caso da fórmula de Hudson, e dado que o dano assumido no dimensionamento está implícito no valor de K_D , não é possível prever a evolução do dano do manto protector de quebra-mares de taludes ao longo da sua vida útil. A fórmula de Van der Meer, por seu turno, já permite fazer uso de mais informação sobre a agitação incidente possibilitando a determinação do peso dos blocos em função do dano, S , admissível para mantos de enrocamento e do valor de N_{od} para mantos de blocos artificiais, que se permitem admitir na estrutura a dimensionar. No entanto, permite apenas prever o dano partindo da pós-construção, ou seja de estruturas ainda não danificadas.

2.3.4 O trabalho experimental realizado por Melby

Ensaio em modelo físico

Melby (1999), motivado pela necessidade de avaliar a evolução do dano do manto de quebra-mares de taludes, realizou uma série de ensaios em modelos físicos reduzidos. Essa necessidade resultou da carência de dados que suportem a previsão da evolução do dano, por a maioria dos estudos de estabilidade se basearem em ensaios de curta duração, não utilizarem sequências de estados de agitação e fazerem uso de rebentação não limitada pelos fundos. De entre os objectivos anunciados para esses ensaios destacavam-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 e quantificação da variabilidade espacial do dano.

As fórmulas de previsão da evolução do dano do manto de quebra-mares de taludes propostas basearam-se nos resultados de cinco séries de ensaios de longa duração. A primeira destas séries (Série de ensaios A) teve como objectivo levar o manto protector à ruína, durou 28,5 horas durante as quais se geraram os estados de agitação descritos no Quadro 3.2 (ver secção 3.4) pela ordem que nela constam. A passagem ao estado de agitação seguinte era efectuada quando, visualmente, se concluía que o manto protector atingira o equilíbrio.

Os restantes quatro ensaios consistiram na reprodução de duas sequências diferentes de ondas e duas repetições destas sequências.

Estas duas sequências diferentes (Séries de ensaios B e C) pretenderam simular a acção de eventos extraordinários de agitação isolados. No ensaio B começou-se por fazer incidir na estrutura os estados de agitação correspondentes à menor profundidade (estados de agitação 1, 2 e 3) e de seguida os estados de agitação 5 e 6 (a que corresponde a maior

profundidade). No ensaio C geraram-se primeiramente os estados de agitação correspondentes à maior profundidade (estados de agitação 4, 5 e 6) e seguidamente os estados de agitação 2 e 3 (a que corresponde a menor profundidade). Os ensaios foram conduzidos gerando agitação durante períodos de 15 minutos e deixando a água repousar completamente no intervalo entre períodos de geração de agitação. Efectuaram-se levantamentos do manto protector a cada dois períodos de geração, ou seja, a cada meia hora de acção da agitação sobre a estrutura.

Estes ensaios foram realizados com duas estruturas contíguas, que ocupavam toda a largura do canal, o que permitiu, no final de cada período de geração de agitação, obter o levantamento de dezasseis perfis.

Definição dos parâmetros de avaliação dos danos

Mediante a utilização dos perfis medidos com o perfilador mecânico, foram determinados, para cada perfil, os níveis de dano, caracterizados pela área erodida adimensionalizada pelo diâmetro nominal (S), como proposto por Broderick e Ahrens (1982) e por Van der Meer (1988), na Eq. 2.9.

Dada a necessidade de caracterizar a forma da zona erodida tanto perpendicularmente ao manto, como ao longo do talude, foram também adimensionalizadas as seguintes grandezas: a profundidade erodida (d_e), a profundidade mínima de cobertura (d_c) e a largura erodida (l_e). Esta adimensionalização consiste na relação com o diâmetro nominal D_{n50} do enrocamento e encontra-se ilustrada na Figura 2.8.

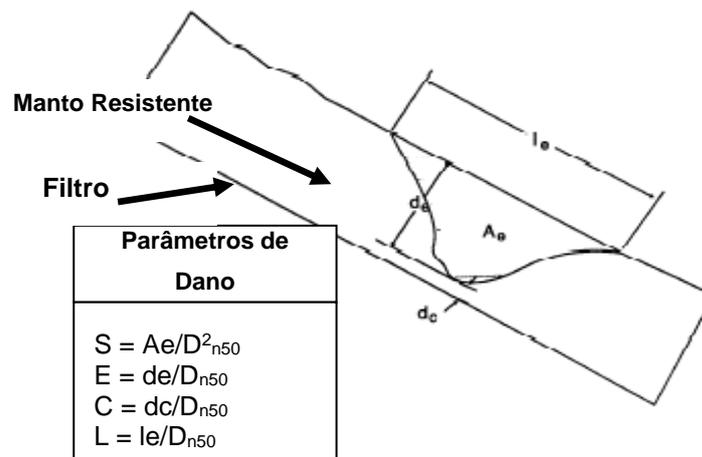


Figura 2.8 - Definição dos parâmetros de dano

Através dos levantamentos dos perfis obtidos, foi também realizada uma análise estatística dos valores de E, C e L, tendo sido estabelecidas relações que determinam o modo como os valores médios destes parâmetros evoluem, em função da progressão do dano médio.

Desenvolvimento do modelo de previsão da evolução do dano

Partindo das fórmulas de Van der Meer (1988), Melby (1999) propôs como primeira abordagem um modelo de previsão da evolução do dano do manto protector, baseado nas características estatísticas da série temporal de agitação:

$$S = a_s N_s^5 \left(\frac{t}{T_m} \right)^b \quad (\text{Eq. 2.13})$$

onde:

- S é o parâmetro de danos;
- a_s e b são coeficientes empíricos;
- N_s é o número de estabilidade calculado com base em H_s
- t é a duração da exposição a um estado de agitação onde as características da agitação (altura significativa, H_s , e período médio, T_m), podem assumir-se constantes naquele intervalo de tempo.

Para os casos em que se tem uma sequência de estados de agitação, foi proposto o seguinte modelo:

$$\bar{S}(t) = \bar{S}(t_n) + a_s (N_s)^5 T_m^{-b} (t^b - t_n^b) \quad \text{para} \quad t_n < t < t_{n+1} \quad (\text{Eq. 2.14})$$

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. 2.11.

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 Eq. 2.15:

$$\bar{S}(t) = \bar{S}(t_n) + a_p (N_{m0})^5 (T_p)^{-b} (t^b - t_n^b) \quad \text{para} \quad t_n < t < t_{n+1} \quad (\text{Eq. 2.15})$$

onde:

- $N_{m0} = \frac{H_{m0}}{\Delta D_{n50}} \quad (\text{Eq. 2.16})$
- 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 2.13, 2.14 e 2.15, 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 2.14 e 2.15 aos resultados dos ensaios supracitados, foi obtido com os seguintes valores: $a_s=0,025$, $a_p=0,022$ e $b=0,25$.

Na sequência de testes de confirmação das equações, Sousa (2007) verificou a existência de um erro de impressão, sendo o valor correcto de $a_p = 0,0202$ e não $a_p = 0,022$. Assim sendo, as Eqs. 2.14 e 2.15 podem escrever-se, respectivamente, da seguinte forma:

$$\bar{S}(t) = \bar{S}(t_n) + 0.025(N_s)^5 T_m^{-0.25} (t^{0.25} - t_n^{0.25}) \text{ para } t_n < t < t_{n+1} \quad (\text{Eq. 2.17})$$

$$\bar{S}(t) = \bar{S}(t_n) + 0.0202(N_{m0})^5 (T_p)^{-0.25} (t^{0.25} - t_n^{0.25}) \text{ para } t_n < t < t_{n+1} \quad (\text{Eq. 2.18})$$

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.

Com vista a aplicar a formulação proposta por Melby, foi necessário realizar ensaios em modelo físico bidimensional, os quais serão descritos no capítulo seguinte.

3 ENSAIOS EM MODELO FÍSICO

3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são descritas as instalações de ensaio, a implementação do modelo e o equipamento de ensaio e de medição. São também descritas as condições experimentais do estudo, a metodologia utilizada e por fim as técnicas de análise dos resultados.

3.2 Instalações de ensaios

Os ensaios foram realizados nas instalações experimentais do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) (Figura 3.1) num dos canais de ondas irregulares, designado por COI1.

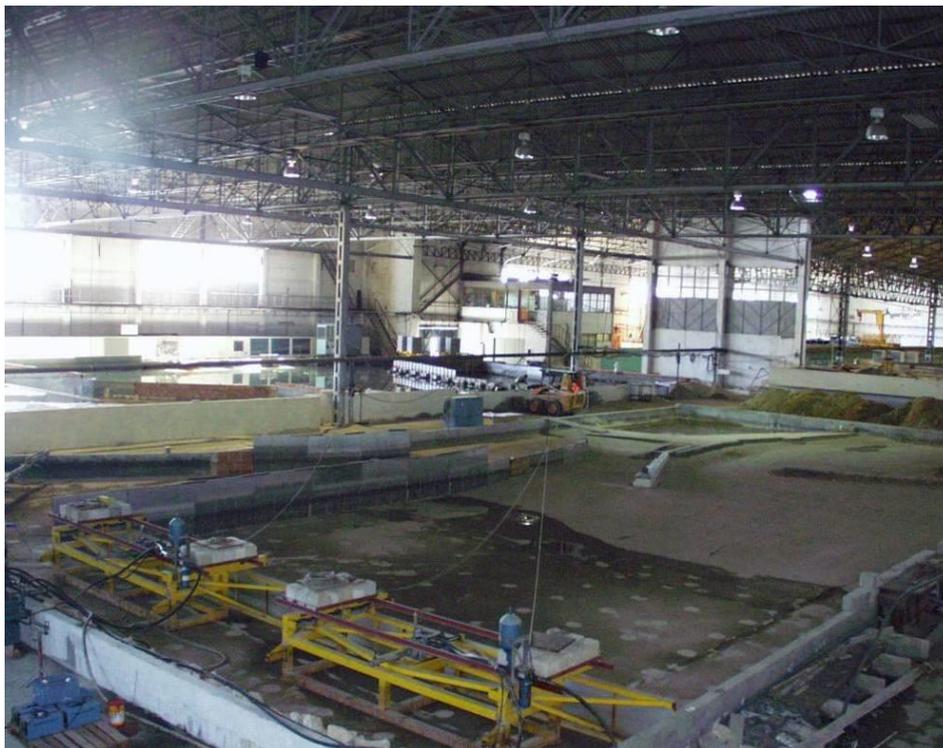


Figura 3.1 - Vista geral das instalações experimentais do Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC

O canal COI1 tem, aproximadamente, 50 m de comprimento, 1,60 m de largura e 0,80 m de profundidade (Figura 3.2). 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.

As ondas geradas propagam-se ao longo do canal e, ao encontrarem a estrutura, são reflectidas, em maior ou menor quantidade, consoante a porosidade da estrutura, propagando-se no sentido do sistema de geração, onde serão novamente reflectidas.

O sistema AWASYS é baseado na medição em tempo real da elevação da superfície livre em dois pontos simultaneamente, os quais estão localizados, neste caso, a cerca de 3,0 m e 3,3 m do gerador. Essa medição leva à geração de um sinal destinado a evitar a reflexão da onda no batedor. Assim sendo, a onda gerada é composta por um sinal que reproduz a onda que se pretende simular e por outro sinal compensatório da onda reflectida pela estrutura.

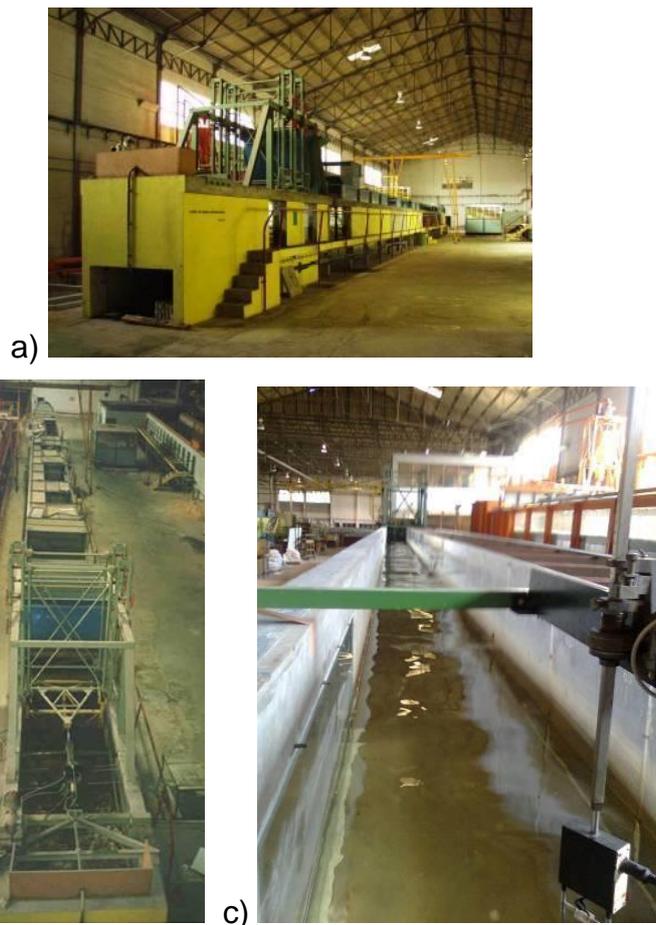


Figura 3.2 - Canal de ondas irregulares COI1: a) Vista exterior; b) Vista superior; c) Vista interior

3.3 Condições experimentais e implementação do modelo físico no canal

Com o objectivo de realizar ensaios semelhantes aos descritos por Melby (1999) para a previsão da evolução do dano em quebra-mares de taludes, as condições experimentais utilizadas foram as que se encontram resumidas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Condições experimentais

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

O perfil longitudinal da implementação do modelo no canal é ilustrado na Figura 3.3. 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 (Figura 3.3). Salienta-se o facto de a parte inicial da propagação da onda não ser exactamente igual à dos ensaios que conduziram à formulação de Melby, 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).

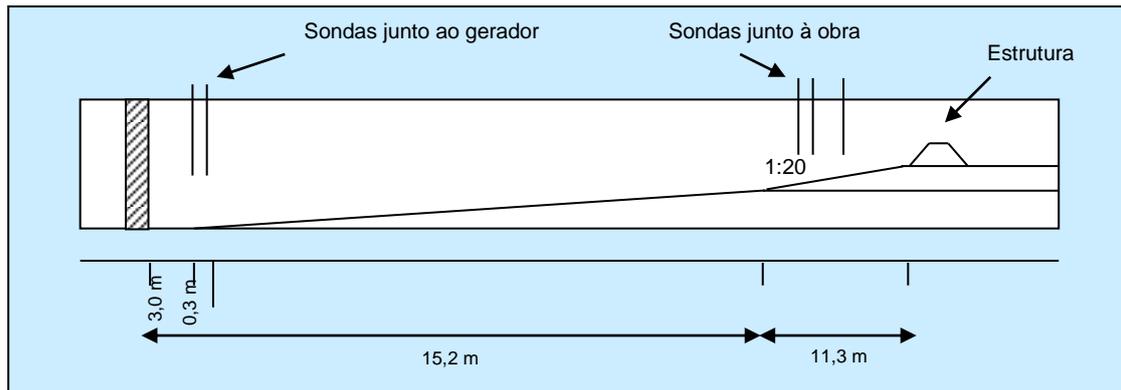


Figura 3.3 - Perfil longitudinal da estrutura ensaiada

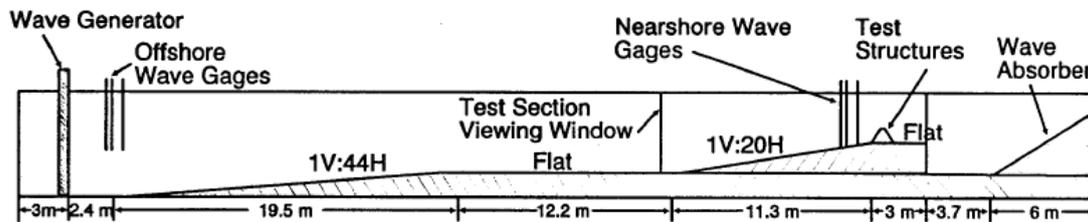


Figura 3.4 - Perfil longitudinal da implantação no canal do modelo ensaiado por Melby (adaptado de Melby, 1999)

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 3.5 ilustra o aspecto da estrutura ensaiada e o seu perfil transversal.

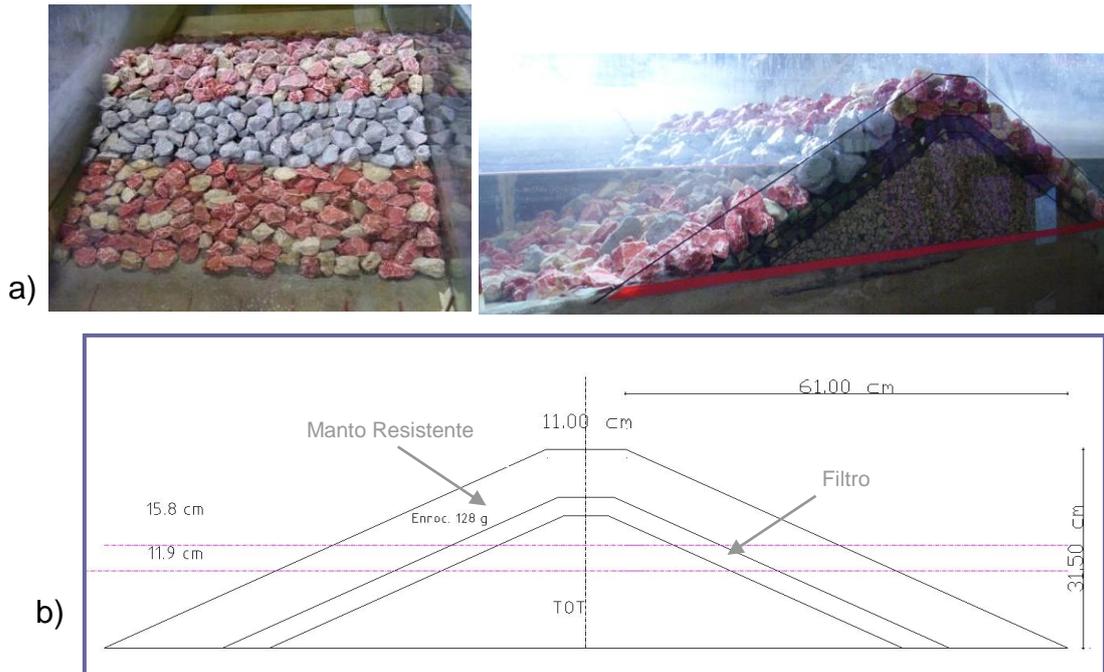


Figura 3.5 - Aspecto da estrutura ensaiada (a) e respectivo perfil transversal (b)

3.4 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 3.2 resume as características da agitação utilizadas para gerar o sinal fornecido ao gerador de ondas irregulares.

Quadro 3.2 - 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 JONSWAP (JOINT NORTH SEA WAVE PROJECT) com um factor de pico, ou factor de esbelteza do espectro, $\gamma=3,3$.

Designam-se por espectros empíricos as expressões que pretendem representar o espectro de variância correspondente a um dado estado de mar em função de certos parâmetros facilmente determináveis, tais como a profundidade no local de geração da agitação e o período de pico da agitação.

Existem vários espectros empíricos propostos. No entanto, o espectro empírico de JONSWAP parece ser aquele onde se verificam mais semelhanças para frequências próximas das frequências de pico entre o espectro empírico e o espectro calculado a partir de registos feitos na costa portuguesa (Pita, 1984). Assim sendo, no presente trabalho foi este o espectro utilizado na geração da agitação.

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 3.6. A Figura 3.7 ilustra a posição da sonda localizada mais perto da estrutura.

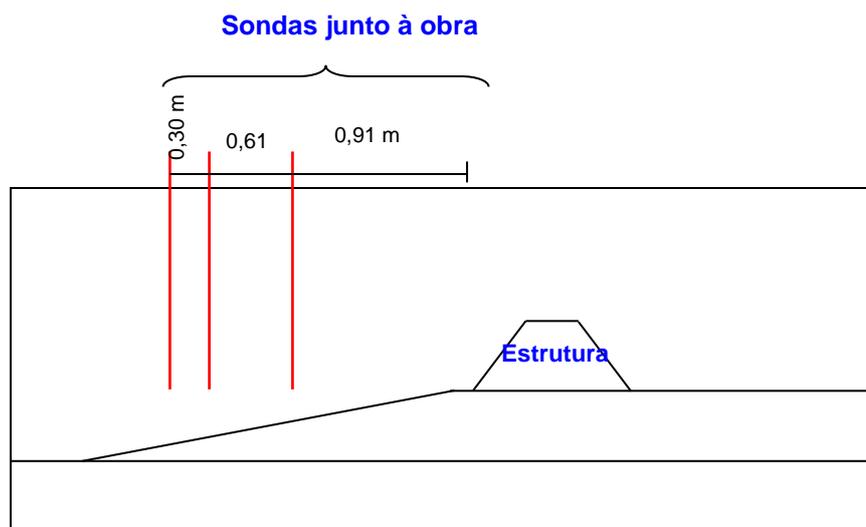


Figura 3.6 - Esquema de colocação das sondas junto à obra

Como recomendado em regras de boa prática, (Hughes, 1993), 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.



Figura 3.7 - Sonda mais próxima da estrutura

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 3.8 ilustra o equipamento informático utilizado na geração da agitação e aquisição de dados.



Figura 3.8 - Equipamento informático utilizado na geração de agitação e aquisição de dados

A Figura 3.9 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.

No Anexo 1 podem ser consultados os espectros correspondentes aos seis estados de agitação gerados, obtidos das séries temporais respectivas, medidas na sonda mais próxima da estrutura.

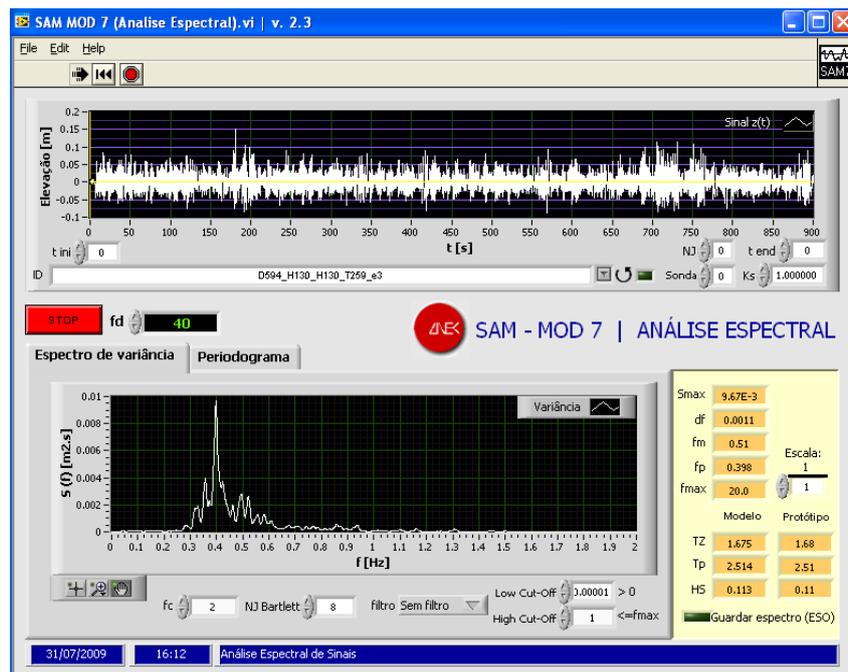


Figura 3.9 - Análise espectral de um sinal obtido na aquisição de dados referentes à actuação de um estado de mar com a duração de 15 minutos

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).

O método de Baquerizo é uma adaptação do método de Mansard e Funke, o qual apenas podia ser utilizado em pontos com fundos a profundidade constante. O método adaptado permite, assim, realizar a separação em locais

com fundos inclinados, que é o caso do presente estudo, mediante a utilização de três sondas.

O método usado por Melby (1999) para separar a agitação incidente e reflectida foi o método preconizado por Goda e Suzuki (1976) e modificado por Kobayashi, Cox e Wurjanto (1990) que determinam os espectros e as séries temporais da agitação incidente e da agitação reflectida na sonda instalada no local com menor profundidade, mais próximo da estrutura.

Apesar de diferentes, os dois métodos costumam produzir resultados bastante aproximados.

Embora se pretendesse inicialmente que as alturas de onda incidentes fossem idênticas às dos ensaios realizados por Melby, verificou-se que, por limitação devido à rebentação da onda e do equipamento de geração, as alturas de onda geradas foram inferiores às conseguidas por Melby nos seus ensaios. Tal facto foi confirmado através de uma verificação expedita da altura máxima que o gerador seria capaz de gerar atendendo à altura de água junto ao gerador, período de pico e à amplitude máxima do batedor.

Sendo a equação de geração de agitação do gerador de ondas dada pela Eq. 3.1, é possível determinar a altura de onda máxima passível de ser gerada, atendendo às características da agitação e da amplitude máxima do gerador.

$$\frac{H}{S_0} = \frac{4\sinh^2 kh}{\sinh 2kh + 2kh} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

onde:

- H é altura de onda gerada;
- S_0 é a amplitude máxima do gerador;
- $L = \frac{gT^2}{2\pi}$ é o comprimento de onda, e é função do período (T);
- $k = \frac{2\pi}{L}$ é o número de onda;
- h é a profundidade junto ao gerador;
- $kh = \frac{2\pi}{L} * h$ é a profundidade relativa;

O número de onda representa a quantidade de ondas por unidade de distância, ou seja, o número de vezes que uma onda atinge a mesma fase numa determinada distância de propagação.

A Figura 3.10 mostra, para uma amplitude máxima (S_o) de 0,25 m, a curva que representa a profundidade relativa versus a relação Altura de Onda/ Amplitude do Gerador.

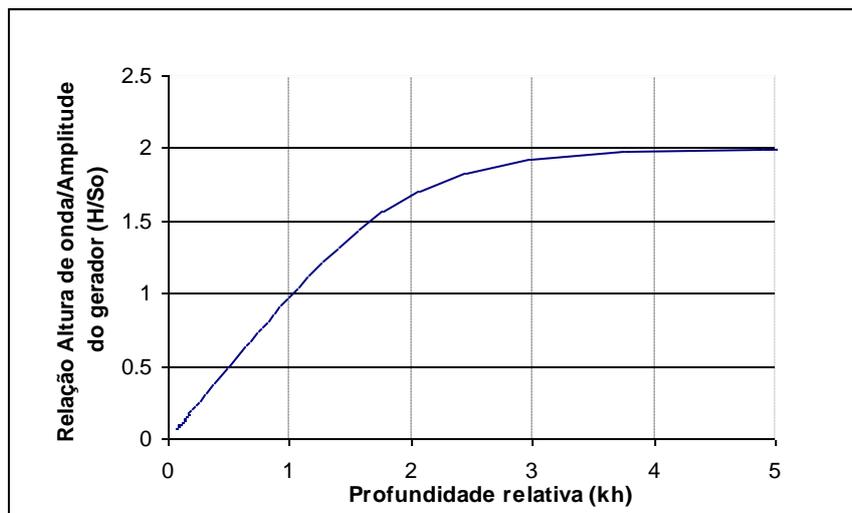


Figura 3.10 - Variação da profundidade relativa com a relação altura de onda/amplitude do gerador

Dado que a profundidade relativa, kh , aumenta com o decréscimo do comprimento de onda, L , e conseqüentemente do período, T , o único modo de obter uma maior relação de H/S_o seria diminuir o período ou aumentar a profundidade junto ao gerador. Dado que esta última solução era fisicamente impossível dadas as características do canal, ficaria apenas a hipótese de gerar agitação com um período inferior, trabalhando, de qualquer modo, com condições de agitação diferentes das utilizadas nos ensaios que conduziram à formulação.

Os Quadros 3.3 e 3.4 resumem as características da agitação total e incidente, respectivamente, na sonda mais próxima da estrutura obtidas nos ensaios.

O número de Iribarren constante do Quadro 3.4, foi calculado com base na expressão Eq. 2.6, onde $\alpha = (1/2)$ é o ângulo do talude do quebra-mar com a horizontal. Dado que os valores de ξ_{om} são consistentemente maiores do que $\xi_{mc} = 3,54$, calculado a partir da Eq. 2.7, é possível afirmar que a rebentação é do tipo mergulhante.

Quadro 3.3 - 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 3.4 - 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

A título comparativo, o Quadro 3.5 resume as características das séries temporais dos seis estados de agitação incidente utilizados nos ensaios realizados por Melby.

Quadro 3.5 - Características das séries temporais dos estados de agitação incidente utilizados nos ensaios realizados por Melby medidas na sonda mais próxima do pé do talude

<i>Ensaio</i>	<i>Prof. junto ao gerador - h (cm)</i>	<i>Prof. junto ao pé do talude - h_t (cm)</i>	<i>T_m (s)</i>	<i>H_{mo} (cm)</i>	<i>Coef. de Reflexão - R</i>
1	112,7	11,9	1,72	9,78	0,59
2	112,7	11,9	1,70	12,4	0,60
3	112,7	11,9	1,72	14,2	0,60
4	116,5	15,8	1,72	10,5	0,61
5	116,5	15,8	1,69	13,6	0,62
6	116,5	15,8	1,68	15,8	0,61

3.5 Séries de ensaios

Ao todo foram realizadas cinco séries de ensaios (Quadro 3.6), respeitando a ordem e a duração das séries de ensaios realizadas por Melby. 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 3.6 - 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

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 3.7).

Quadro 3.7 - 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	-	-	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.

3.6 Levantamento dos perfis através do método fotogramétrico

Tal como foi anteriormente mencionado, 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 como já foi indicado na Eq. 2.9.

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 3.11. 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 3.11 - Localização dos perfis levantados

Nos ensaios de Melby, as medições do dano efectuadas nas estruturas ensaiadas foram realizadas recorrendo ao equipamento electromecânico apresentado na Figura 3.12 (Winkelman, 1998).



Figura 3.12 - Perfilador utilizado por Melby na medição do dano do manto protector de quebra-mares de taludes (Melby, 1999)

O equipamento fazia o levantamento simultâneo de oito perfis da envolvente da estrutura e é constituído por oito braços providos de uma rótula que lhes permite deslocamentos angulares relativamente ao carro que desliza ao longo do canal. Mediante a leitura contínua das diferenças de potencial induzidas pelos potenciómetros instalados (oito rotativos, um para cada braço, e um deslizante para o carro) foi possível reconstituir digitalmente oito perfis efectuando apenas uma passagem do equipamento ao longo da estrutura.

Segundo Melby (1999) este equipamento permite obter resultados mais precisos dos que obtidos por sondas acústicas ou por lasers de varrimento, sem a necessidade do pós-processamento requerido por estes métodos. Outra vantagem deste equipamento reside no facto de permitir efectuar os levantamentos sem esvaziar o canal de ensaios.

Dado que o perfilador mecânico existente no LNEC não produz resultados aceitáveis quando utilizado em levantamentos da zona submersa da estrutura e tendo em vista evitar o esvaziamento do canal entre cada levantamento, foi testada neste trabalho, a qualidade dos levantamentos feitos através de processos de reconstrução fotogramétrica de imagens estereoscópicas, em alternativa ao perfilador mecânico existente no LNEC. Sousa e Santos (2006), bem como Afonso (2008) haviam já comparado esta técnica com o uso de perfilador laser e mecânico, respectivamente.

O 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 desfasadas.

Sobre o canal foi instalada uma estrutura que permitiu colocar as câmaras fotográficas nos levantamentos fotogramétricos (Figura 3.13).

O equipamento utilizado consistiu em duas câmaras fotográficas montadas numa configuração fixa e aptas a disparar duas fotografias simultâneas (Figura 3.14).

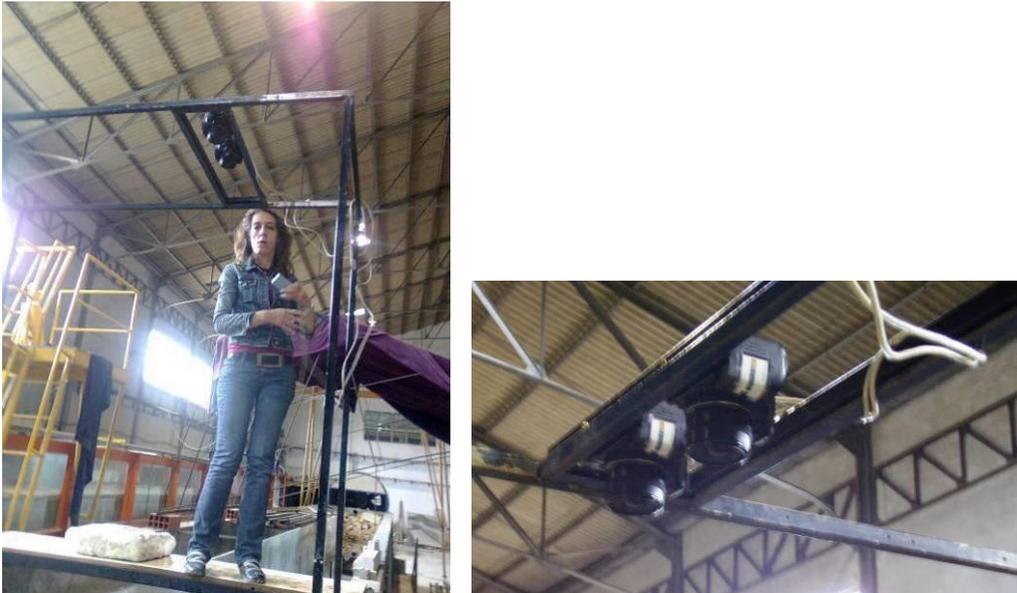


Figura 3.13 - Estrutura metálica onde foram instaladas as câmaras fotográficas utilizadas nos levantamentos fotogramétricos

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 3.15 ilustra quatro pares de fotografias obtidos com as câmaras acima descritas.

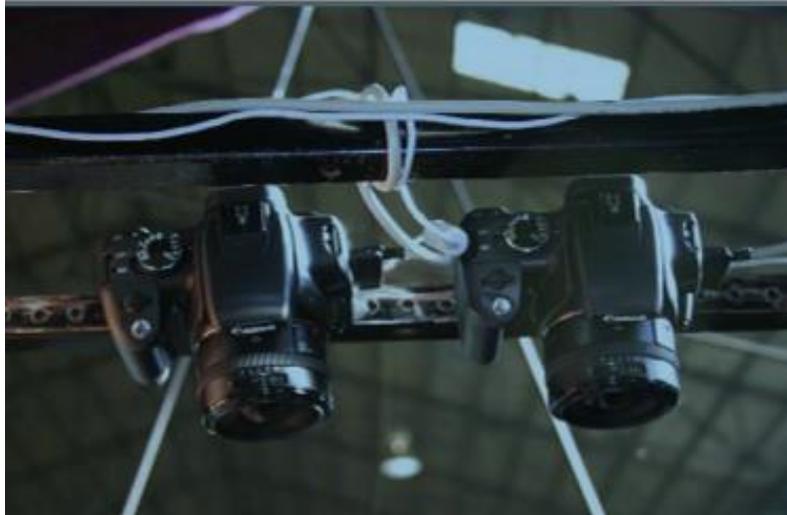


Figura 3.14 - Câmaras fotográficas utilizadas nos levantamentos

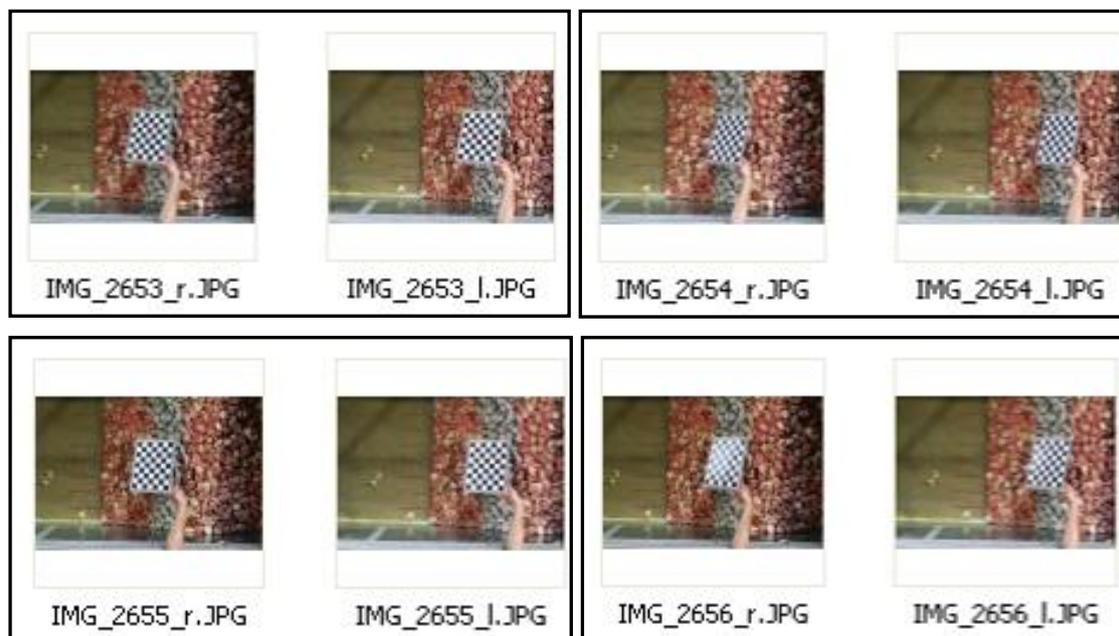


Figura 3.15 - Exemplo de alguns pares estereofotogramétricos

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 3.16). 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.

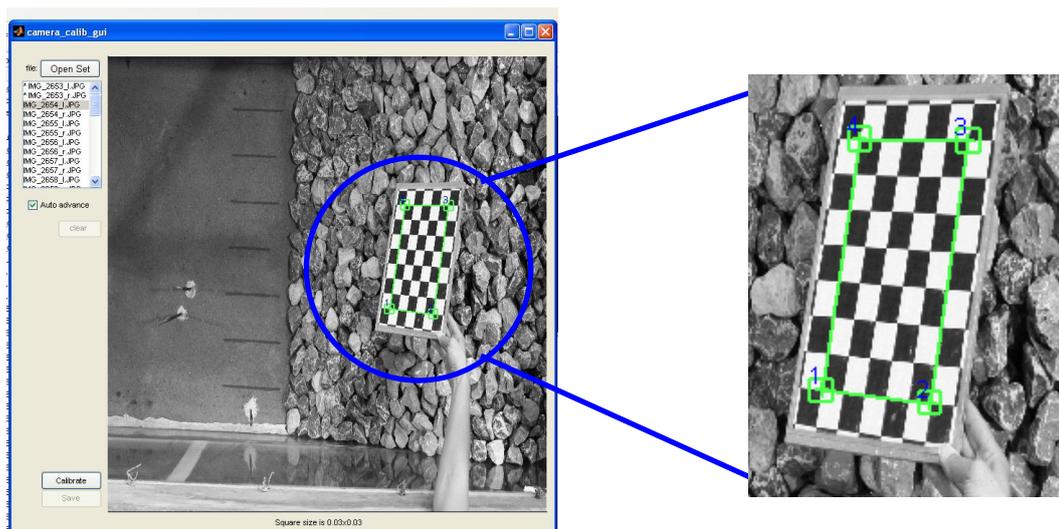


Figura 3.16 - Processo de selecção dos cantos internos do alvo

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 3.17). 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.

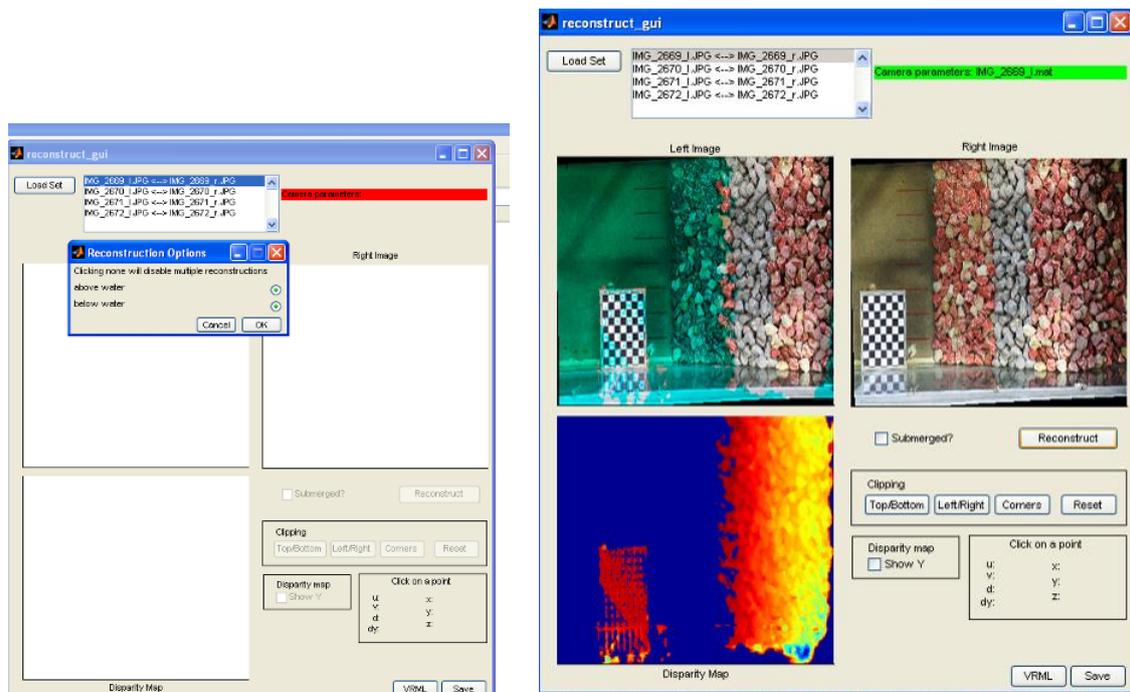


Figura 3.17 - Reconstrução de um cenário parcialmente submerso, no início de um dos ensaios

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, tanto da parte emersa como da submersa, permitindo extrair perfis

(Figura 3.18) ou superfícies com o auxílio do Golden Software Surfer (Figura 3.19).

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.

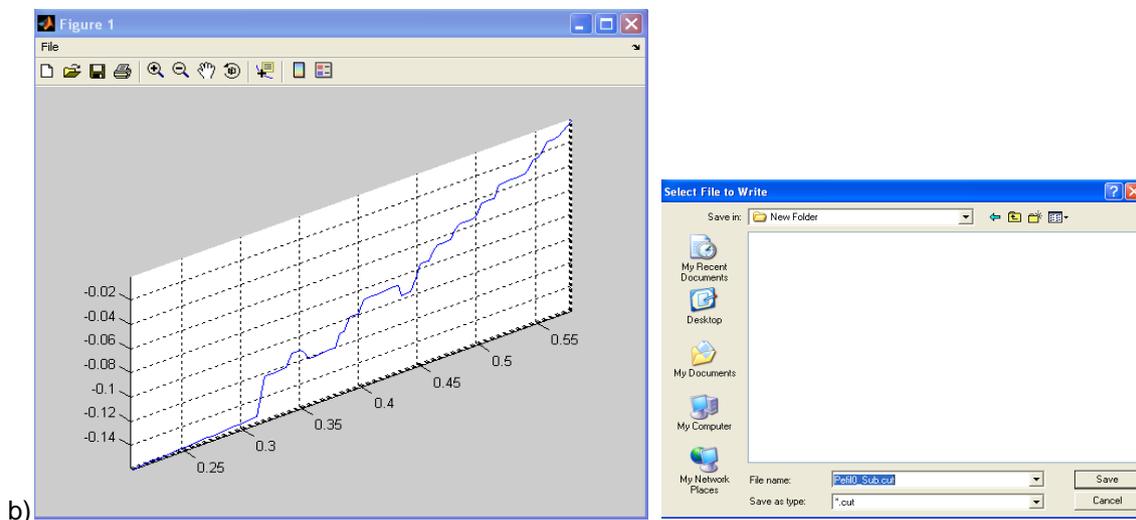
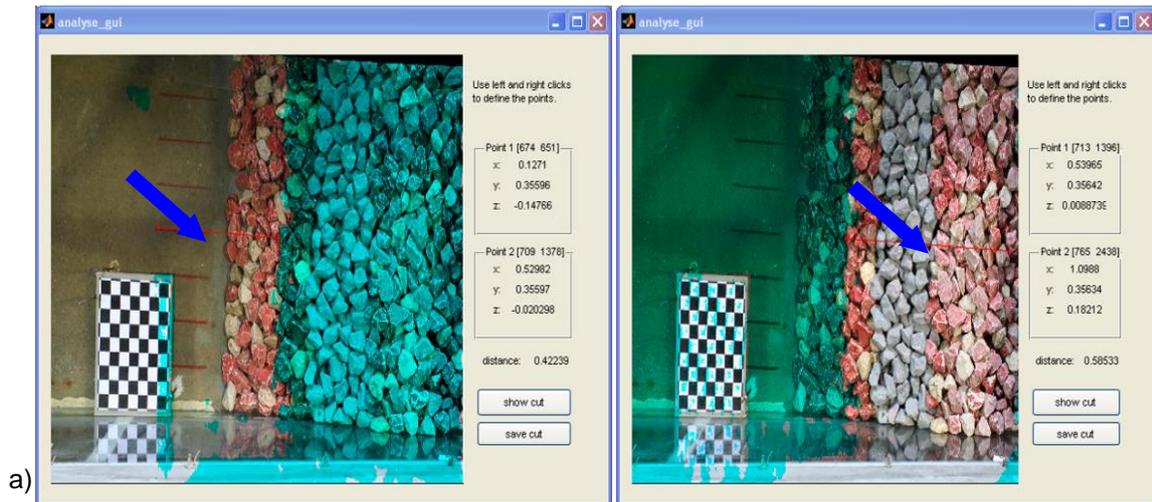


Figura 3.18 - Extracção de perfis através da análise das partes submersa e emersa de uma reconstrução. a) Detalhe da extracção do perfil da parte submersa e da parte emersa. b) Perfil obtido e exportação das suas coordenadas para um ficheiro do tipo .txt

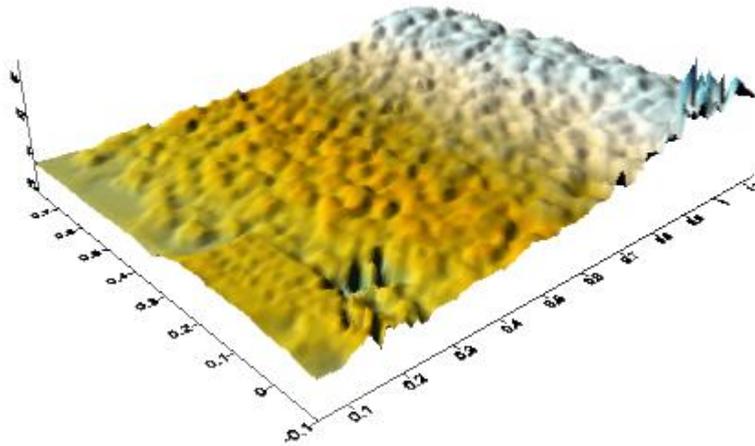


Figura 3.19 - Envolvente definida pelo Surfer™ baseado nos pontos obtidos na reconstrução do talude a partir de um par estereofotogramétrico no final da série de ensaios A

Com o intuito de sistematizar todos os procedimentos inerentes ao processo de levantamento dos perfis, estes são resumidos no Quadro 3.8, mostrando-se ainda as adversidades inerentes a um procedimento incorrecto e os cuidados a ter para os evitar.

Na Figura 3.20 ilustra-se a envolvente do manto definida com base no levantamento inicial da série de ensaios A, com a ajuda do Golden Software Surfer. Nela é possível observar algumas distorções provocadas pelos reflexos no vidro do canal, bem como nas imediações do alvo de calibração, alertando para a necessidade de evitar levantamentos em zonas sujeitas a reflexos sempre que estes não possam ser eliminados.

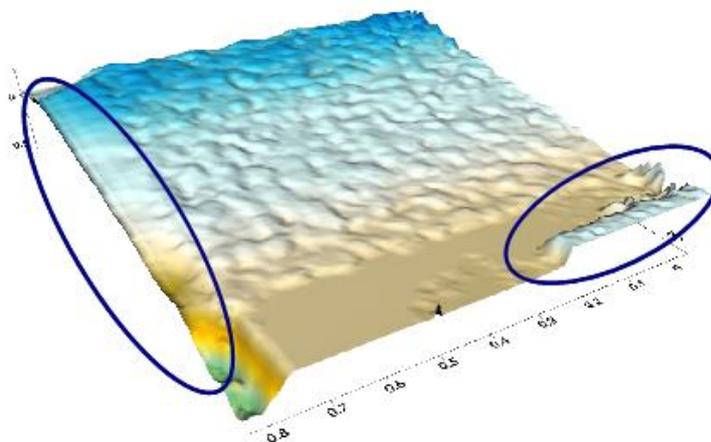


Figura 3.20 - Distorções ocorridas no levantamento da envolvente do manto resistente devidas aos reflexos no vidro do canal

Quadro 3.8 - Sistematização dos procedimentos inerentes ao levantamento dos perfis

PROCEDIMENTO	MOROSIDADE	POSSÍVEIS ADVERSIDADES	AÇÕES MINIMIZADORAS
Montagem das câmaras fotográficas	Pouca	Focagens diferentes para as duas máquinas. Distância entre as duas máquinas muito grande ou muito pequena.	Após focagem automática, verificação se a focagem está em modo fixo. Assegurar que as distância entre os focos das lentes das duas máquinas está entre 16 cm e 18 cm.
Fotografar o alvo axadrezado para calibração dos parâmetros das câmaras	Pouca	Reflexos no alvo ou fotografias desfocadas.	Tirar fotos suficientes de modo a poder desprezar fotografias inutilizadas, garantindo cerca de 15 fotos por calibração.
Fotografar o modelo com a periodicidade necessária (levantamentos)	Pouca	Autonomia das máquinas durante ensaios de longa duração. Movimentos do alvo de calibração flutuante. Alterações no nível da água.	Desligar as máquinas entre levantamentos, se estes forem muito espaçados no tempo. Em cada disparo, verificar que ambas as máquinas funcionaram. Confinar os movimentos do alvo flutuante, através de varões implantados nos fundos. Aguardar a estabilização do nível da água antes de fotografar a estrutura. Verificação periódica do nível da água. Note-se que os parâmetros das máquinas são calibrados para um determinado nível, fazendo dele a origem das coordenadas utilizadas nas medições que se seguirem.

Quadro 3.8 - Sistematização dos procedimentos inerentes ao levantamento dos perfis (cont.)

PROCEDIMENTO	MOROSIDADE	POSSÍVEIS ADVERSIDADES	ACÇÕES MINIMIZADORAS
Fotografar o modelo com a periodicidade necessária (levantamentos) (cont.)			Sempre que possível, aproveitando o início e o final das sessões de trabalho, deverão ser feitos levantamentos de controlo, com o canal vazio.
Aplicação do Software de Calibração das câmaras	Alguma	Impossibilidade de realizar a calibração devido à incompatibilidade das imagens adquiridas pelas duas câmaras, quase sempre devida a troca dos pares fotogramétricos. Troca da ordem de selecção dos 4 pontos delimitantes do alvo de calibração, resultando numa orientação errada dos eixos.	Atribuir uma nomenclatura clara a cada par fotogramétrico (esquerda e direita) logo após a sua cópia para o disco rígido. Verificação de que o sentido de selecção dos pontos é feita no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio.
Aplicação do Software de Reconstrução das imagens dos levantamentos	Alguma	O número de pontos dos pares de fotos a reconstruir ser demasiado grande, para ser processado pelo software, tornando impossível a reconstrução.	Programar as máquinas para fotografar com média resolução (cerca de 2496x1664 pixel).
Extracção dos perfis sob a forma de pontos (x,y,z)	Manual (com o pacote de software original): Muita Automático (com o software elaborado em MatLab): Pouca	Manual: Não conseguir levantar o perfil sempre no mesmo local, podendo variar as coordenadas (x, y).	Seleccionar os pontos rigorosamente (o que torna o processo extremamente moroso).
Aplicação do Software de comparação dos perfis levantados com o perfil original	Alguma	Troca dos nomes de ficheiros a comparar.	Utilização de nomenclatura clara para definir os perfis a comparar Ex ^o P1L2 significaria Perfil 1 do Levantamento 2.

3.7 Considerações finais

Para a elaboração desta dissertação, foram realizadas cinco séries de ensaios, de longa duração, em modelo físico bidimensional de um quebra-mar de taludes, os quais foram realizados nas instalações experimentais do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do LNEC num dos seus canais de ondas irregulares (COI1).

Por ensaio entende-se a actuação de um estado de agitação caracterizado por uma altura de onda significativa e por um período de pico associados a um nível de água.

O modelo foi ensaiado para dois níveis de água, dois períodos de pico e seis alturas de onda.

Após a construção do modelo, e após terem sido criados os ficheiros de controlo do ganho do gerador de ondas irregulares, foram feitos ensaios de calibração de modo a aferir a agitação medida na sonda mais próxima da estrutura, dado que será a agitação medida nessa sonda que será utilizada para a previsão da evolução do dano. O enrocamento utilizado na zona intermédia do talude do modelo (potencialmente a zona mais solicitada da estrutura), foi pintado de uma cor diferente de modo a facilitar a identificação das quedas.

Antes de cada série de ensaios foi feita a verificação do nível de água a ensaiar, seguida da calibração das cinco sondas, com vista à obtenção das respectivas constantes de calibração.

Foram feitos registos de agitação da totalidade dos ensaios, de modo a permitir a determinação dos valores das alturas de onda e períodos de pico, bem como a separação da agitação incidente e reflectida nas imediações da estrutura.

O passo seguinte foi a calibração dos parâmetros das câmaras a utilizar nos levantamentos fotogramétricos, processo esse que, tal como foi referido no ponto anterior, era necessário repetir no início de cada sessão de ensaios desde que as câmaras fotográficas tivessem sido removidas do local.

Feitas as calibrações, dava-se início à sessão de ensaios. Ao longo de cada uma das cinco séries de ensaios constantes do Quadro 3.6, foi feito um levantamento no início da série de ensaios de modo a obter o perfil de referência (ainda não danificado) designado por L0.

Durante a totalidade dos ensaios foi levantada a envolvente da estrutura de duas em duas actuações, ou seja, de 30 em 30 minutos. Cada levantamento consistia num disparo fotográfico das duas câmaras em simultâneo (através de um comando), com o alvo a flutuar nas proximidades do talude de modo a referenciar o plano de água. Face à necessidade de manter o alvo numa posição estática, este era colocado entre 3 pequenos varões que limitavam o movimento do alvo nas duas direcções do plano horizontal. Os movimentos verticais eram evitados tirando as fotografias apenas quando já não fosse visível a oscilação da superfície livre no canal, sendo, assim, forçada a fixação do referencial.

O modelo foi fotografado no início de cada série de ensaios e também de dois em dois ensaios. Foram ainda realizados alguns levantamentos com o modelo sem água para controlo da qualidade da correcção da refração proporcionada pelo software.

Fazendo uso do software de reconstrução, foi realizada a reconstrução estereofotogramétrica. A partir dos ficheiros resultantes da reconstrução, os quais não são mais do que matrizes com cada uma das coordenadas dos pixels das imagens, procedeu-se à extracção dos perfis fazendo uso do software existente no pacote. Para isso era necessário seleccionar manualmente os pontos coordenados (x, y) iniciais e finais das partes emersas e submersas dos cenários reconstruídos, mantendo sempre a mesma coordenada y, guardando-os de seguida sob a forma de ficheiros de coordenadas (x,y,z).

Manipulando a matriz de reconstrução com um programa elaborado em MatLab™ e que permite extrair pontos dessa matriz, é também possível, com o auxílio do Golden Software Surfer, gerar grelhas e obter superfícies da envolvente do quebra-mar.

Este processo revelou-se extremamente moroso, atendendo a que apenas do tratamento dos dados de uma das menores séries (série C) resultou a extracção de uma totalidade de 126 perfis. Optou-se, pois, por elaborar um pequeno programa em MatLab™, de modo a automatizar a extracção dos 7 perfis para cada um dos levantamentos a partir da matriz dos levantamentos.

Assim sendo, foi aplicado este novo procedimento às séries de ensaios A e B das quais foram obtidos, na totalidade, 399 e 119 perfis, respectivamente.

O conceito de quantificação do dano utilizado neste trabalho, baseia-se na área erodida medida em cada um dos perfis. Partindo dos perfis levantados, foi calculada a área erodida em cada levantamento, permitindo a comparação dos perfis levantados com o perfil do início do ensaio (não danificado), calculando-se, assim, os valores experimentais do dano em cada um dos levantamentos.

Seguidamente foi aplicada a formulação de previsão do dano de Melby para cada um dos levantamentos, permitindo assim a comparação destes valores previstos com os valores de dano obtidos experimentalmente.

Durante a utilização de um modo sistemático da técnica de levantamento, baseada na fotogrametria foram anotadas as limitações e as adversidades sentidas.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

4.1 Caracterização da agitação

Com recurso ao software SAM foi feito o registo das séries temporais da elevação da superfície livre para a totalidade dos ensaios. No Anexo 1 podem consultar-se os resultados da análise espectral dos dados adquiridos em cada uma das cinco sondas, para cada um dos estados de agitação actuates.

Tal como foi referido no ponto 3.4, 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 (Figura 4.1) 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.



Figura 4.1 - Série de ensaios A. Aspecto da rebentação sobre o talude do quebra-mar

4.2 Determinação do nível de dano e parâmetros do perfil erodido

No final de cada série de ensaios, todos os pares de fotografias correspondentes aos diversos levantamentos foram sujeitos à fase da reconstrução fotogramétrica, derivando de cada uma dessas reconstruções, um ficheiro a partir do qual foi possível extrair coordenadas (x,y,z).

A partir de cada um desses ficheiros foram extraídos os perfis necessários à avaliação do dano em cada levantamento. De modo a corrigir algumas irregularidades das séries de pontos correspondentes aos perfis levantados, estas foram alvo de um alisamento, aplicando uma média móvel com 20 pontos de intervalo e da qual resultou uma melhor aproximação ao real andamento do perfil.

Na posse dos ficheiros com todos os perfis levantados procedeu-se à sua comparação, um a um, com o perfil do levantamento de referência.

Dado que as diferenças entre o perfil erodido e o perfil inicial são calculadas subtraindo as cotas dos pontos do perfil final às do perfil inicial, medidas perpendicularmente ao talude, houve que transpor as coordenadas dos perfis extraídos, para o plano horizontal (Figura 4.2).

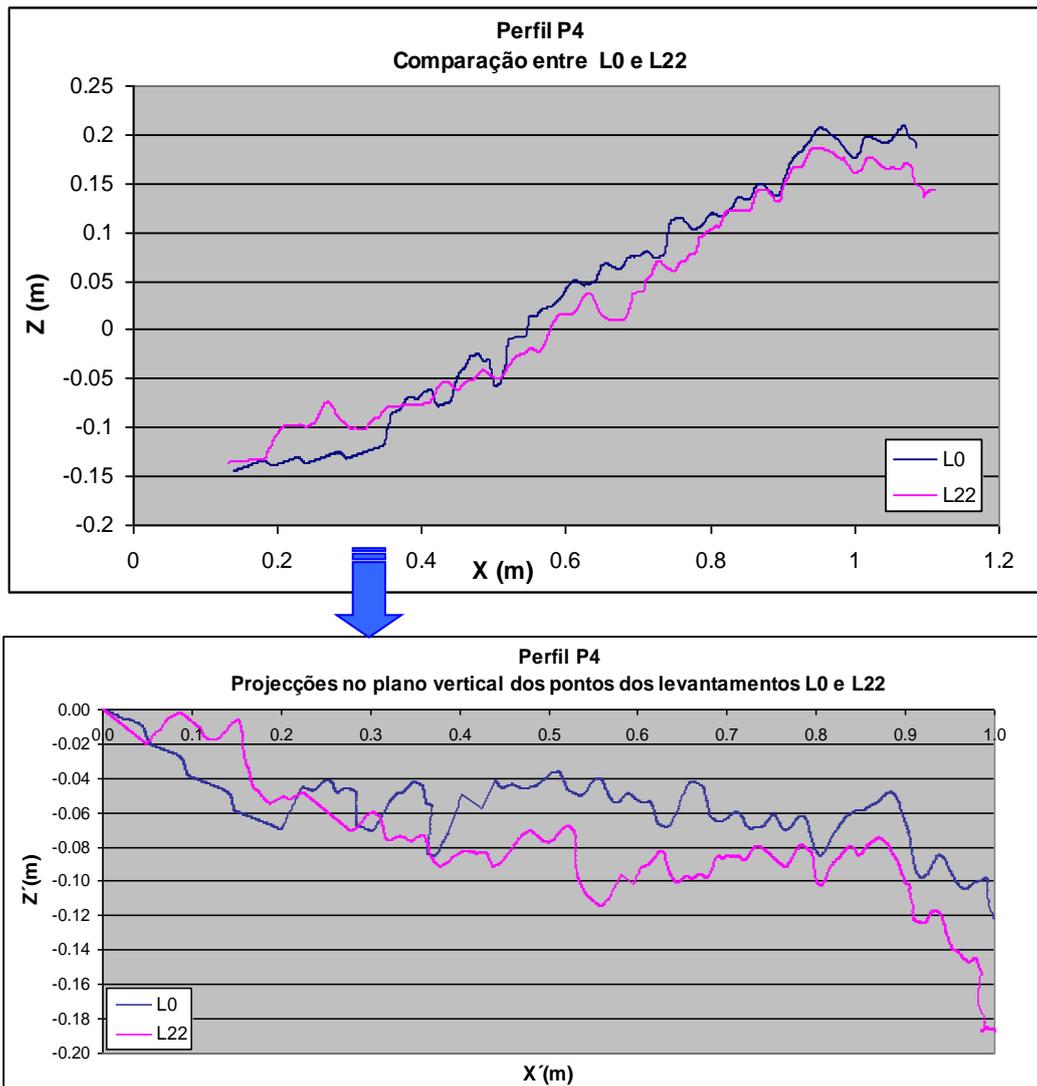


Figura 4.2 - Transposição das coordenadas dos perfis para o plano horizontal

Recorrendo a um programa elaborado em Visual Fortran™, que usa como dados de entrada a série de pontos do perfil inicial e a do perfil a comparar, é possível calcular a área erodida (A_e), a largura erodida (l_e) e a profundidade erodida (d_e), tal como é ilustrado na Figura 4.3.

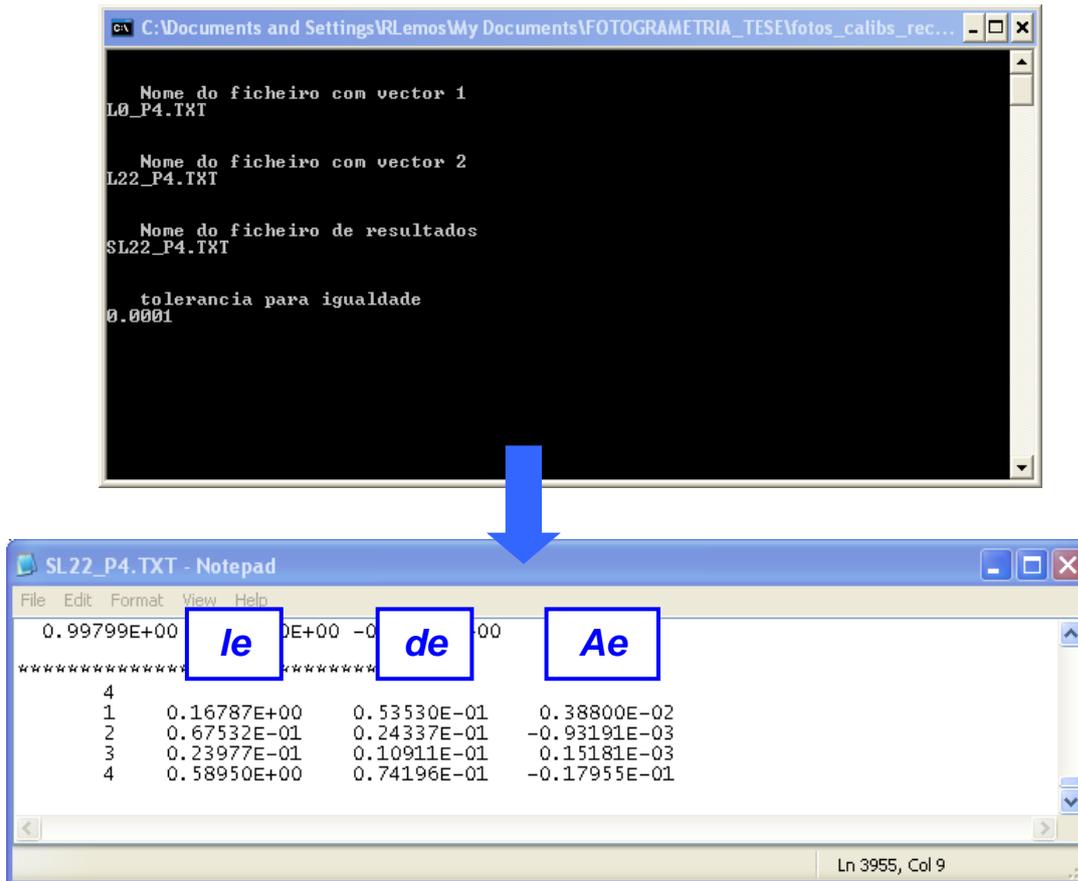


Figura 4.3 - Procedimento de cálculo dos parâmetros caracterizadores do dano: le , de e A_e .

Para a determinação do dano médio medido, em cada um dos perfis levantados foi considerada a maior área erodida de cada um dos perfis.

Usando os dois ficheiros de entrada, o programa lê os pontos existentes nos dois ficheiros e cria a correspondência entre as coordenadas x existentes num dos ficheiros que não tenha correspondência no outro. A tolerância para a igualdade define a precisão com a qual se pretende fazer essa correspondência. Seguidamente, o programa encontra os pontos de intersecção entre as duas linhas e calcula a maior distância entre pontos de intersecção (le), a maior distância entre as duas linhas, medida na perpendicular ao talude (de) e calcula posteriormente as áreas erodidas e de aterro.

No caso concreto deste trabalho, o parâmetro necessário ao cálculo do dano médio era a área erodida (A_e). Assim, destes quatro parâmetros apenas a A_e foi objecto de tratamento para a determinação do dano. l_e e d_e são, no entanto, dados valiosos para estabelecer uma relação entre as características geométricas da zona erodida e a evolução do dano (S).

No Anexo 2 são apresentados alguns gráficos exemplificativos da evolução dos perfis levantados nos ensaios A, B e C.

Na Figura 4.4 apresenta-se um gráfico relativo a um levantamento realizado no final da série de ensaios A, com e sem água no canal. Estes 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.

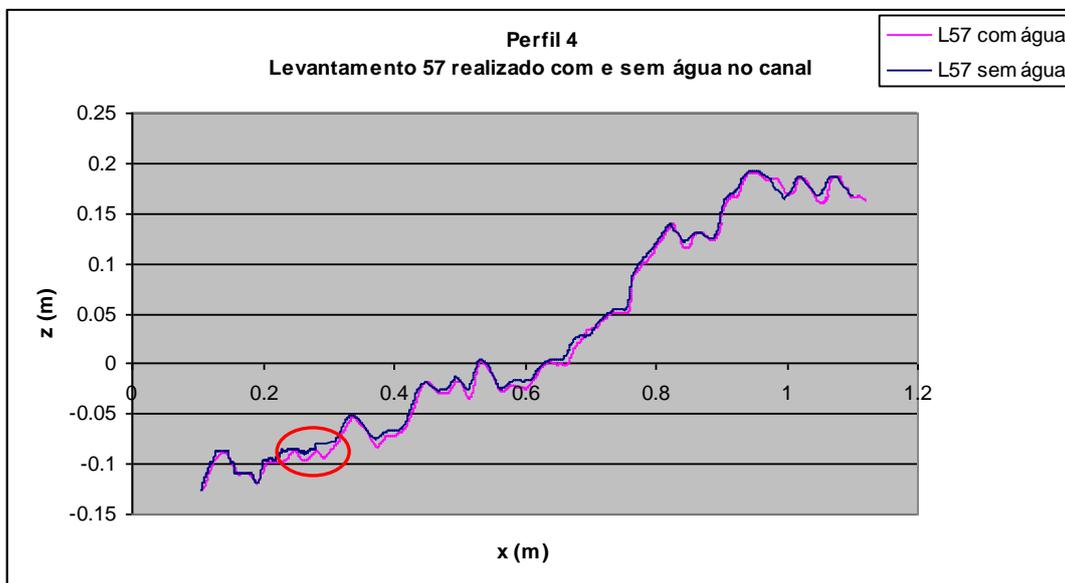


Figura 4.4 - Série de ensaios A. Perfil P4. Levantamentos comparativos do talude realizados com e sem água no canal.

No Anexo 3 são apresentados os danos medidos em cada um dos perfis (P1 a P7) ao longo das séries de ensaios A, B e C, usados no cálculo do dano médio medido.

No Anexo 4 é ilustrado o aspecto do talude do quebra-mar ao longo de cada uma das três séries de ensaios.

Os Quadros 4.1 a 4.3 resumem o dano médio medido em cada levantamento das séries A, B e C, respectivamente.

No que diz respeito às séries de ensaios A e B, é possível observar a progressão gradual do dano, verificando-se o aparecimento do tradicional perfil em “S”.

Com o objectivo de, em estudos futuros, minimizar o tempo dispendido no pós-processamento dos dados resultantes dos levantamentos dos perfis, na série de ensaios A foi comparado o dano obtido nos ensaios utilizando apenas um perfil localizado na zona central do talude do quebra-mar (Perfil P4), com o dano médio calculado a partir dos danos obtidos nos sete perfis, de modo a estimar o erro resultante desta simplificação.

Verificou-se, porém, uma sobre estimacão considerável do dano, observável na Figura 4.5, quando contabilizado apenas a partir do perfil P4. Esta sobre estimacão resultou, possivelmente, de o perfil P4 se encontrar numa zona do talude do quebra-mar onde se verificaram mais estragos.

Considerou-se, por isso, prudente utilizar a média dos danos medidos na totalidade dos sete perfis, aquando da sua comparacão com o dano médio previsto.

Na série de ensaios C, entre os levantamentos L3 e L4 verificou-se um aumento abrupto do dano médio medido (Figura 4.6) 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 calibracão das câmaras no segundo dia ter sofrido alguma distorcão, originando parâmetros diferentes, o que terá causado alguma distorcão no referencial. Tal poderá ter sido causado por erros

durante a calibração dos parâmetros da câmara, por exemplo a focagem das duas máquinas não ter sido igual (esquecimento de colocar ambas as máquinas em focagem manual).

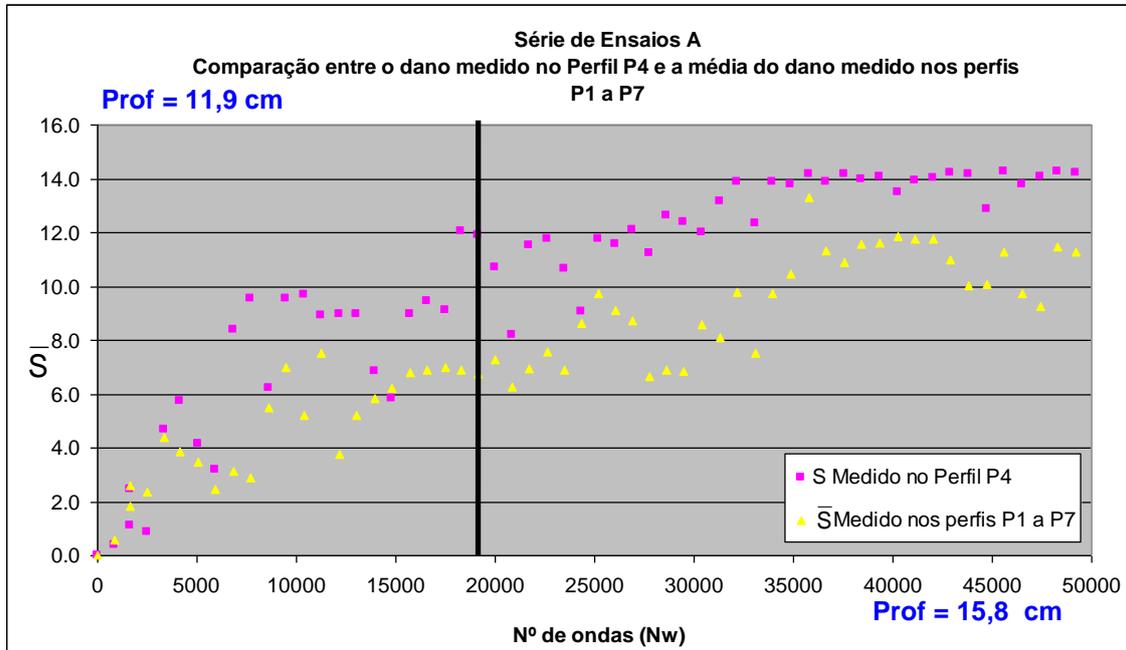


Figura 4.5 - Comparação entre o dano medido no perfil P4 e a média do dano obtido nos perfis P1 a P7, durante a série de ensaios A

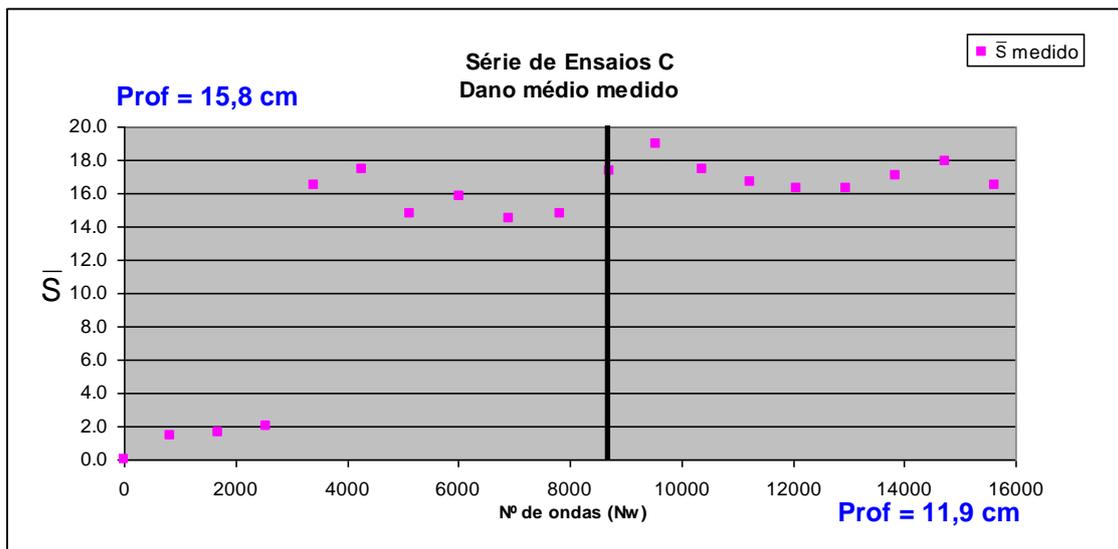


Figura 4.6 - Dano médio medido durante a série de ensaios C

Quadro 4.1 - Dano médio (\bar{S}) medido durante a série de ensaios A

Ensaio	Lev	Tempo decorrido (min)	T_m (s)	H_{m0} (cm)	N_{m0}	T_p (s)	h_t (cm)	S em P4	\bar{S}
1	Lev 0	0						0	0
	Lev 1	30	2,18	7,32	1,22	2,37	11,9	1,11	0,56
	Lev 2	60	2,18	7,32	1,22	2,37	11,9	0,87	1,83
	Lev 3	90	2,18	7,32	1,22	2,37	11,9	5,74	2,61
2	Lev 4	120	2,14	8,20	1,37	2,37	11,9	3,18	2,37
	Lev 5	150	2,14	8,20	1,37	2,37	11,9	9,54	4,40
	Lev 6	180	2,14	8,20	1,37	2,37	11,9	9,54	3,85
3	Lev 7	210	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	8,91	3,46
	Lev 8	240	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	8,95	2,45
	Lev 9	270	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	5,82	3,15
	Lev 10	300	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	9,44	2,90
	Lev 11	330	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	12,03	5,51
	Lev 12	360	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	10,68	6,97
	Lev 13	390	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	11,50	5,21
	Lev 14	420	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	10,64	7,51
	Lev 15	450	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	11,77	3,75
	Lev 16	480	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	12,11	5,22
4	Lev 17	510	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	12,61	5,85
	Lev 18	540	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	12,01	6,22
	Lev 19	570	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	13,89	6,81
	Lev 20	600	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	13,88	6,91
	Lev 21	630	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	14,16	7,00
	Lev 22	660	2,14	6,28	1,05	2,50	15,8	14,17	6,90
	Lev 23	690	2,14	6,28	1,05	2,50	15,8	14,07	6,72
	Lev 24	720	2,09	7,73	1,29	2,50	15,8	13,93	7,27
	Lev 25	750	2,09	7,73	1,29	2,50	15,8	14,20	6,27
	Lev 26	780	2,09	7,73	1,29	2,50	15,8	12,87	6,95
5	Lev 27	810	2,09	7,73	1,29	2,50	15,8	13,79	7,58
	Lev 28	840	2,09	7,73	1,29	2,50	15,8	14,29	6,90
	Lev 29	870	2,09	7,73	1,29	2,50	15,8	0,38	8,64
	Lev 30	900	2,09	7,73	1,29	2,50	15,8	2,44	9,75
	Lev 31	930	2,09	7,73	1,29	2,50	15,8	4,70	9,10
	Lev 32	960	2,09	7,73	1,29	2,50	15,8	4,15	8,70
	Lev 33	990	2,09	7,73	1,29	2,50	15,8	8,41	6,66
	Lev 34	1020	2,09	7,73	1,29	2,50	15,8	6,24	6,91
	Lev 35	1050	2,09	7,73	1,29	2,50	15,8	9,70	6,84
	6	Lev 36	1080	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	8,94
Lev 37		1110	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	6,83	8,09
Lev 38		1140	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	8,94	9,79
Lev 39		1170	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	9,09	7,51
Lev 40		1200	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	11,93	9,72
Lev 41		1230	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	8,20	10,45
Lev 42		1260	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	11,76	13,32
Lev 43		1290	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	9,06	11,34
Lev 44		1320	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	11,57	10,89
Lev 45		1350	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	11,25	11,55
Lev 46		1380	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	12,40	11,61
Lev 47		1410	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	13,14	11,83
Lev 48		1440	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	12,33	11,76
Lev 49	1470	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	13,77	11,77	
Lev 50	1500	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	13,90	11,00	
Lev 51	1530	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	13,96	10,04	
Lev 52	1560	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	13,52	10,06	
Lev 53	1590	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	14,00	11,28	
Lev 54	1620	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	14,18	9,73	
Lev 55	1650	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	14,25	9,26	
Lev 56	1680	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	14,06	11,46	
Lev 57	1710	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	14,21	11,28	

Quadro 4.2 - Dano médio (\bar{S}) medido durante a série de ensaios B

Ensaio	Lev	Tempo decorrido (min)	T_m (s)	H_{m0} (cm)	N_{m0}	T_p (s)	h_t (cm)	\bar{S}
1	Lev 0	0						0
	Lev 1	30	2,18	7,32	1,22	2,37	11,9	0,82
2	Lev 2	60	2,18	7,32	1,22	2,37	11,9	0,72
	Lev 3	90	2,14	8,20	1,37	2,37	11,9	0,70
	Lev 4	120	2,14	8,20	1,37	2,37	11,9	1,33
	Lev 5	150	2,14	8,20	1,37	2,37	11,9	1,02
3	Lev 6	180	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	1,33
	Lev 7	210	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	1,25
	Lev 8	240	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	1,02
5	Lev 9	270	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	0,99
	Lev 10	300	2,09	7,73	1,29	2,50	15,8	1,94
	Lev 11	330	2,09	7,73	1,29	2,50	15,8	1,23
	Lev 12	360	2,09	7,73	1,29	2,50	15,8	1,80
6	Lev 13	390	2,09	7,73	1,29	2,50	15,8	1,89
	Lev 14	420	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	1,76
	Lev 15	450	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	1,66
	Lev 16	480	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	1,66
	Lev 17	510	2,01	8,62	1,44	2,50	15,8	2,56

Quadro 4.3 - Dano médio (\bar{S}) medido durante a série de ensaios C

Ensaio	Lev	Tempo decorrido (min)	T_m (s)	H_{m0} (cm)	N_{m0}	T_p (s)	h_t (cm)	\bar{S}
4	Lev 0	0						0
	Lev 1	30	2,14	6,28	1,05	2,50	15,8	1,43
	Lev 2	60	2,14	6,28	1,05	2,50	15,8	1,61
5	Lev 3	90	2,09	7,73	1,29	2,50	15,8	1,96
	Lev 5	120	2,09	7,73	1,29	2,50	15,8	16,51
	Lev 5	150	2,09	7,73	1,29	2,50	15,8	17,43
6	Lev 6	180	2,09	7,73	1,29	2,50	15,8	14,72
	Lev 7	210	2,01	8,62	1,44	2,37	11,9	15,76
	Lev 8	240	2,01	8,62	1,44	2,37	11,9	14,51
	Lev 9	270	2,01	8,62	1,44	2,37	11,9	14,72
2	Lev 10	300	2,01	8,62	1,44	2,37	11,9	17,31
	Lev 11	330	2,14	8,20	1,37	2,37	11,9	18,93
	Lev 12	360	2,14	8,20	1,37	2,37	11,9	17,43
	Lev 13	390	2,14	8,20	1,37	2,37	11,9	16,64
	Lev 14	420	2,14	8,20	1,37	2,37	11,9	16,25
3	Lev 15	450	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	16,26
	Lev 16	480	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	17,08
	Lev 17	510	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	17,92
	Lev 18	540	2,03	8,54	1,42	2,37	11,9	16,48

5 COMPARAÇÃO DOS VALORES PREVISTOS COM OS VALORES EXPERIMENTAIS

Nos Quadros 5.1 e 5.2 apresentam-se as médias dos danos medidos nos sete perfis (\bar{S} medido), para cada um dos levantamentos das séries de ensaios A e B, bem como os valores do dano médio previsto (\bar{S} previsto) através da aplicação da Eq. 2.18 apresentada por Melby.

No que diz respeito à série de ensaios C, dado não se terem obtido resultados fiáveis do cálculo do dano médio, estes valores não serão alvo de comparação com os valores médios previstos.

Quadro 5.1 - Série de ensaios A. Comparação entre o dano médio medido e o dano médio previsto

<i>Ensaio</i>	<i>Lev</i>	\bar{S} <i>medido</i>	\bar{S} <i>previsto</i>
1	Lev 0	0	0
	Lev 1	0,56	0,29
	Lev 2	1,83	0,34
	Lev 3	2,61	0,38
2	Lev 4	2,37	0,43
	Lev 5	4,40	0,47
	Lev 6	3,85	0,50
	Lev 7	3,46	0,54
3	Lev 8	2,45	0,58
	Lev 9	3,15	0,61
	Lev 10	2,90	0,64
	Lev 11	5,51	0,66
	Lev 12	6,97	0,69
	Lev 13	5,21	0,71
	Lev 14	7,51	0,73
	Lev 15	3,75	0,75
	Lev 16	5,22	0,77
	Lev 17	5,85	0,79
	Lev 18	6,22	0,81
4	Lev 19	6,81	0,83
	Lev 20	6,91	0,84
	Lev 21	7,00	0,86
	Lev 22	6,90	0,86
5	Lev 23	6,72	0,87
	Lev 24	7,27	0,88
	Lev 25	6,27	0,88
	Lev 26	6,95	0,89
	Lev 27	7,58	0,90
	Lev 28	6,90	0,91
	Lev 29	8,64	0,92
	Lev 30	9,75	0,92
	Lev 31	9,10	0,93
	Lev 32	8,70	0,94
	Lev 33	6,66	0,94
6	Lev 34	6,91	0,95
	Lev 35	6,84	0,96
	Lev 36	8,59	0,97
	Lev 37	8,09	0,98
	Lev 38	9,79	0,99
	Lev 39	7,51	1,00
	Lev 40	9,72	1,01
	Lev 41	10,45	1,02
	Lev 42	13,32	1,03
	Lev 43	11,34	1,04
	Lev 44	10,89	1,05
	Lev 45	11,55	1,06
	Lev 46	11,61	1,07
	Lev 47	11,83	1,08
	Lev 48	11,76	1,09
Lev 49	11,77	1,09	
Lev 50	11,00	1,10	
Lev 51	10,04	1,11	
Lev 52	10,06	1,12	
Lev 53	11,28	1,13	
Lev 54	9,73	1,14	
Lev 55	9,26	1,14	
Lev 56	11,46	1,15	
Lev 57	11,28	1,16	

Quadro 5.2 - Série de ensaios B. Comparação entre o dano médio medido e o dano médio previsto

Ensaio	Lev	\bar{S} medido	\bar{S} previsto
1	Lev 0	0,00	0,00
	Lev 1	0,82	0,29
2	Lev 2	0,72	0,38
	Lev 3	0,70	0,45
	Lev 4	1,33	0,50
	Lev 5	1,02	0,54
3	Lev 6	1,33	0,58
	Lev 7	1,25	0,62
	Lev 8	1,02	0,65
5	Lev 9	0,99	0,68
	Lev 10	1,94	0,70
	Lev 11	1,23	0,72
	Lev 12	1,80	0,73
6	Lev 13	1,89	0,75
	Lev 14	1,76	0,77
	Lev 15	1,66	0,79
	Lev 16	1,66	0,81
	Lev 17	2,56	0,83

As Figuras 5.1 e 5.2 traduzem a comparação entre os danos medidos nos levantamentos e os previstos pela fórmula de Melby para os ensaios A e B respectivamente.

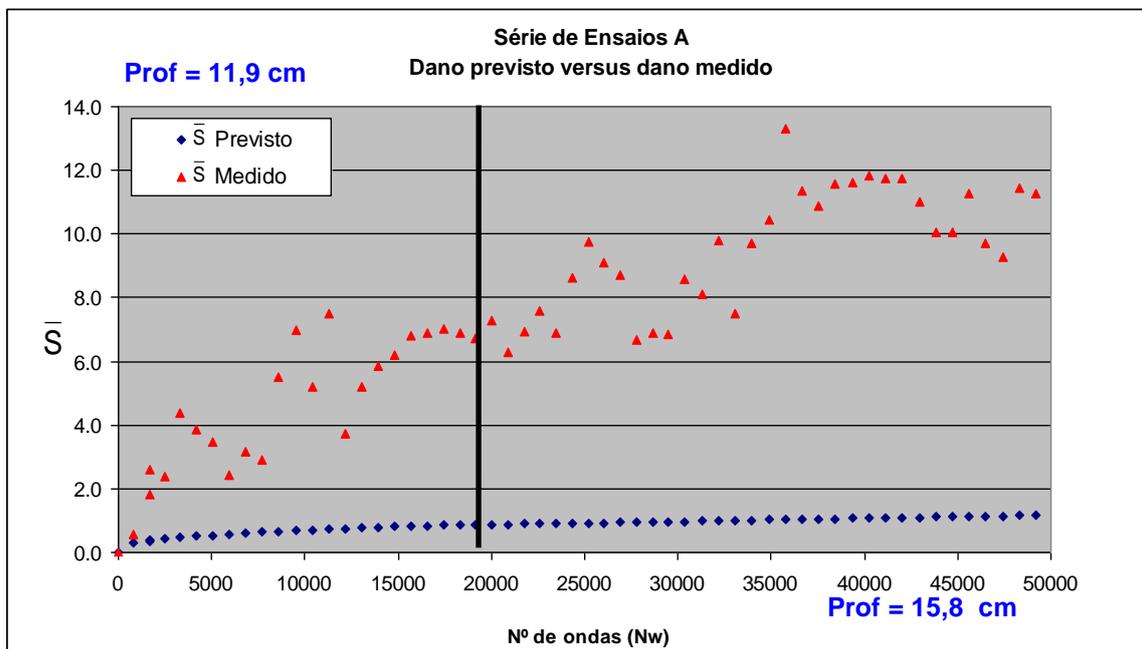


Figura 5.1 - Série de ensaios A. Comparação entre o dano médio previsto e o dano médio medido

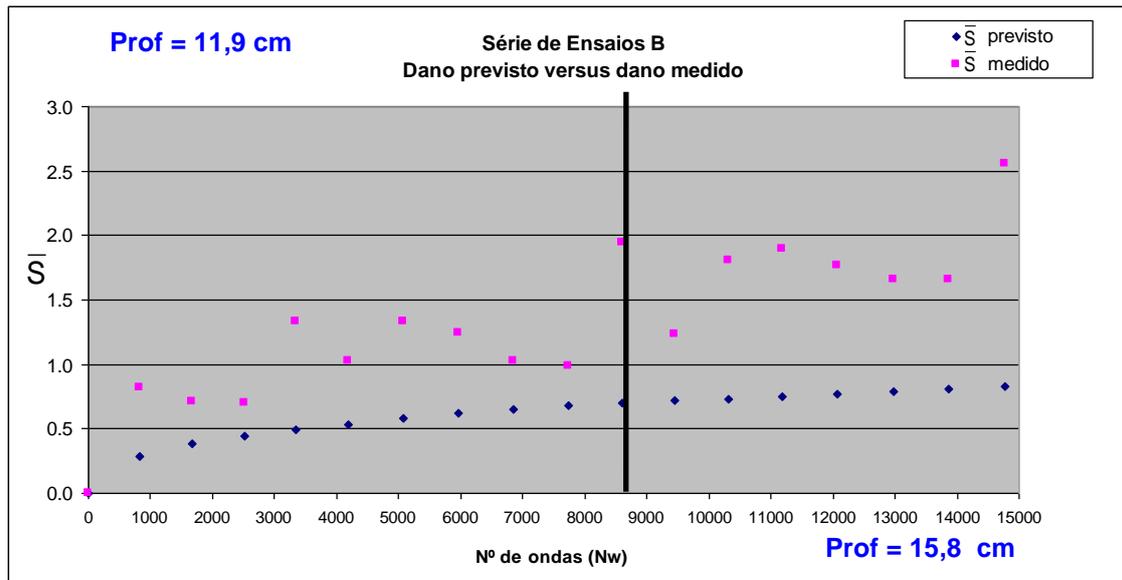


Figura 5.2 - Série de ensaios B. Comparação entre o dano médio previsto e o dano médio medido

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. 2.18 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.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta dissertação teve dois objectivos principais: aplicar as fórmulas propostas por Melby para evolução da erosão em taludes de quebra-mares de enrocamento através da realização de ensaios com modelos físicos reduzidos de longa duração e testar a viabilidade da utilização de um método para levantamento da envolvente de taludes de quebra-mares baseado em estereofotogrametria.

No Capítulo 2 foi feito o enquadramento do presente trabalho na temática da avaliação do dano em quebra-mares de taludes, foram apresentadas generalidades sobre quebra-mares de taludes e feitas algumas considerações sobre a importância da modelação física no dimensionamento dos quebra-mares. Foi ainda feita referência a algumas fórmulas empíricas de previsão da evolução do dano.

No Capítulo 3 descreveu-se todo o trabalho experimental realizado em modelo físico bidimensional, incluindo condições e técnicas de ensaio e medições utilizadas. Nesta fase do estudo foram encontradas algumas adversidades no que diz respeito ao rigor necessário na calibração dos parâmetros das câmaras e a sombras e reflexos no plano da água.

No Capítulo 4 apresentaram-se e analisaram-se os resultados experimentais, tendo sido feita a caracterização da agitação e a determinação do nível de dano e parâmetros do perfil erodido.

No Capítulo 5 foi descrita a aplicação da formulação proposta por Melby (1999), seguida da comparação do dano previsto pela fórmula com o dano obtido experimentalmente.

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.

É um método que 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.

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.

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.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Afonso, M.C. (2008). *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. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

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.

Burcharth, H. F. (1993). *The design of breakwaters*. Department of Civil Engineering, Aalborg University, Denmark.

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

Davies, M. H., Mansard, E. P. D. e Cornett, A. M. (1994). Damage analysis for rubble mound breakwaters. *Proc. 24th ICCE, ASCE, Vol. 1.* (pp.1001-1015).

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. *Proc. 1st CoastLab 2006 - International Conference on the application of physical modelling to port and coastal protection*. Porto, Portugal. (pp.107-116).

Goda, Y. e Suzuki, Y. (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. *Proc. 17th ICCE, ASCE, Vol. 1.* (pp. 201-220).

Hedar, P. A. (1960). *Stability of rock-fill breakwaters*. PhD. dissertation. University of Goteborg, Sweden.

Hudson, R.Y. (1959). Laboratory investigations of rubble mound breakwaters. *Proc. ASCE, Vol. 85, Nr. WW 3, New York, USA.*

Hughes, S.A (1993). *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*. Advanced Series on Ocean Engineering ,Vol. 7.

Iribarren, R. (1938). Una formula para el calculo de los diques en escoller (A formula for the calculation of rock-fill dikes). *Revista de Obras Publicas*, Madrid, Spain. Translated by D. Heinrich, Tech. Rep. HE-116-295, Fluid Mech. Lab., Univ. of Calif., Berkeley, CA, 1948.

Kobayashi, N., Cox, D. T. e Wurjanto, A. (1990). Irregular wave reflection and runup on rough impermeable slopes. *Journal of Wtrwy. Port, Coast. and Oc. Engrg.* ASCE.116 (6): (pp. 708-726).

Mansard, E.P.D. e E.R. Funke (1980). The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. *Proc. 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.

Melby, J.A. e Kobayashi, N. (1999). Damage Progression and variability on breakwaters trunks. *Proc. Coastal Structures '99*. Santander, Spain. (pp. 309-315).

Owen, M. W., e Allsop, N. W. (1983). Hydraulic modelling of rubble mound breakwaters. *Proc. Breakwaters: Design and Construction*, ICE. London, U. K. (pp. 71-78).

Pita, C. (1984). *Dimensionamento de quebra-mares e dos seus elementos constitutivos. Emprego de blocos de betão no perfil-corrente de quebra-mares de taludes*. Tese apresentada para obtenção do grau de especialista e acesso à categoria de Investigador Auxiliar do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Silva, L.G. (1995). *Observação Sistemática de Obras Marítimas. Acção de Formação de Observadores de Obras Marítimas*. LNEC, Relatório 203/95-NPP.

Sousa, I. e Santos, J.A (2006). New tools for Risk Assessment of Rubble-Mound Breakwaters. *Proc. ICCE2006*, ASCE. San Diego, California, USA. (pp. 5254-5266).

Sousa, I. (2007). *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. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

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

U. S. Army Corps of Engineers (1984). *Shore Protection Manual*. Coastal Engineering Research Center. Department of the Army. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers. PO Box 631. Vicksburg, Mississippi 39180, Washington, D.C 20314. (2 volumes).

U. S. Army Corps of Engineers (2006). *Coastal engineering manual*. Engineer Manual 1110-2-1100, U. S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (6 volumes).

Van der Meer, J. W. (1988). *Rock slopes and gravel beaches under wave attack*. *Ph.D. thesis*, Delft University of Technology, The Netherlands; Also Delft Hydraulics Publ. 396.

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

Winkelman, J. (1998). *Rubble mound damage measurement*. M.S. thesis, Dept. of Civ. Engrg. Univ. of Rhode Island, Kingston, R.I.

ANEXO 1
ESPECTROS CORRESPONDENTES AOS SEIS ESTADOS DE MAR,
REGISTADOS NAS CINCO SONDAS

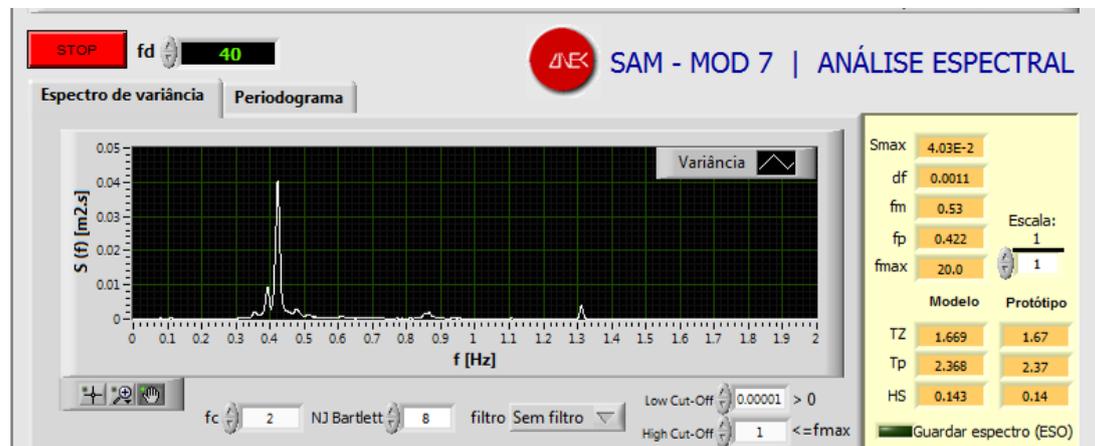
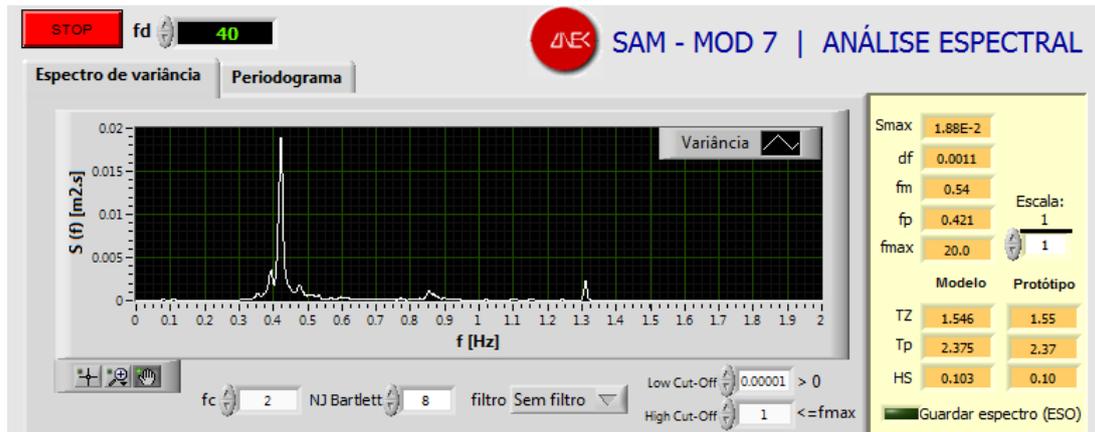


Figura A1.1 – Estado de agitação 1. Espectros registados nas duas sondas junto ao gerador

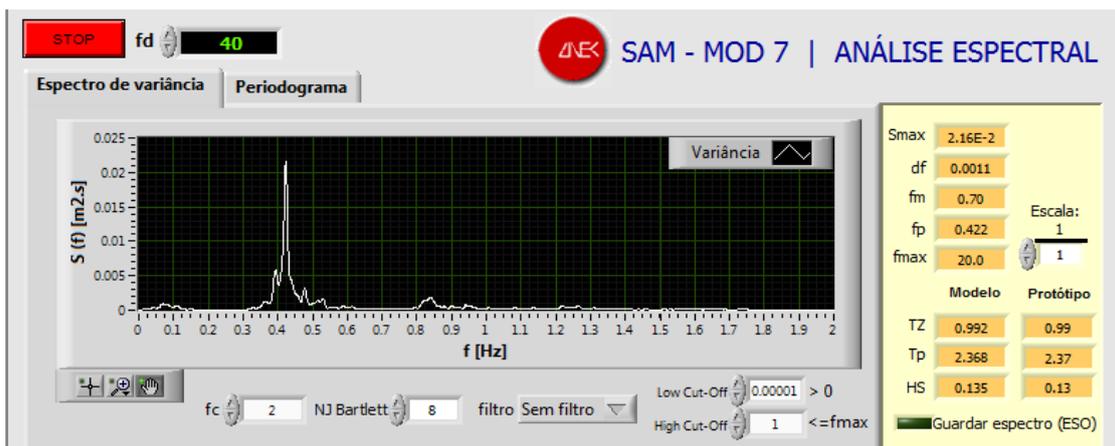
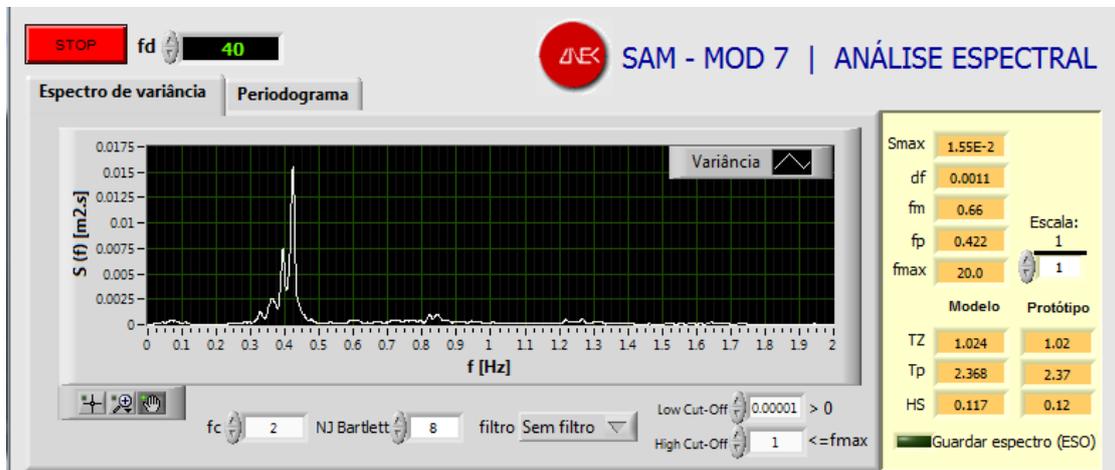
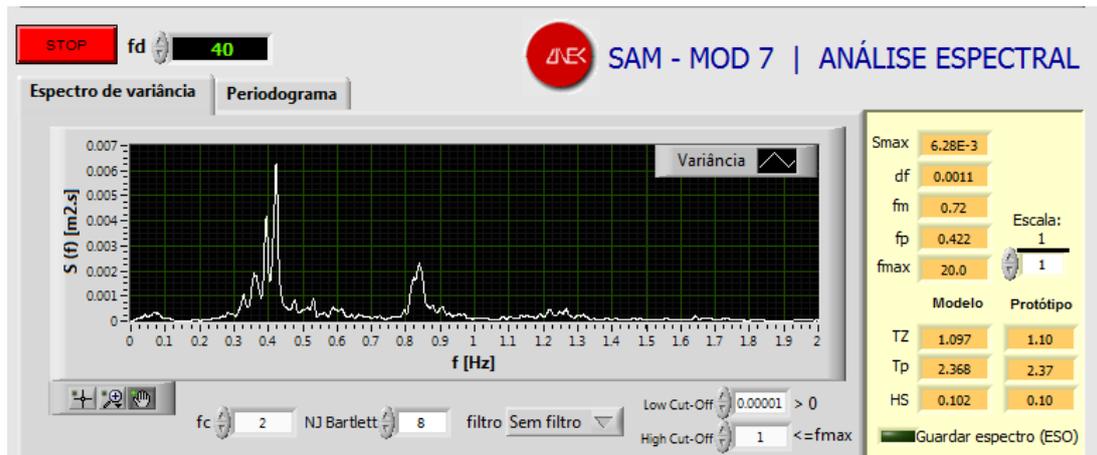


Figura A1.2 – Estado de agitação 1. Espectros registados nas três sondas junto à estrutura

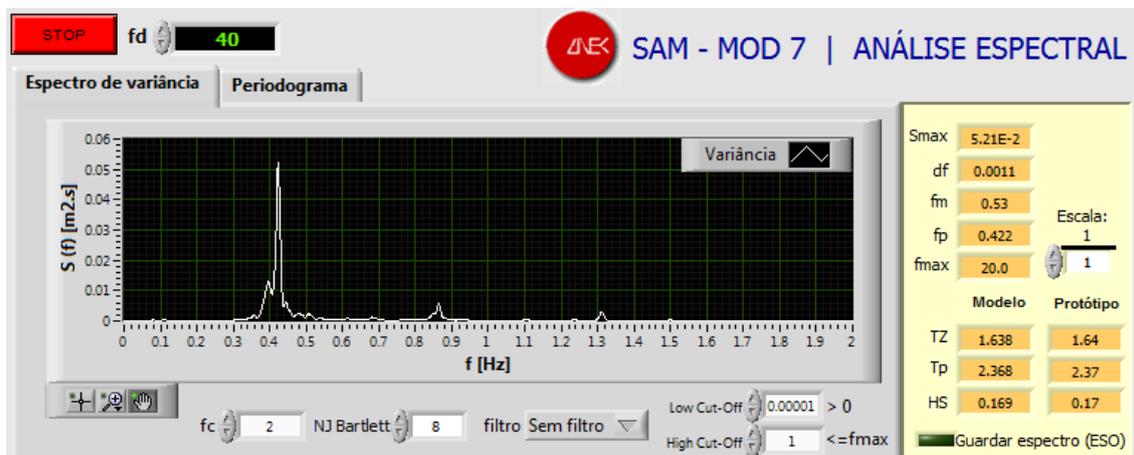
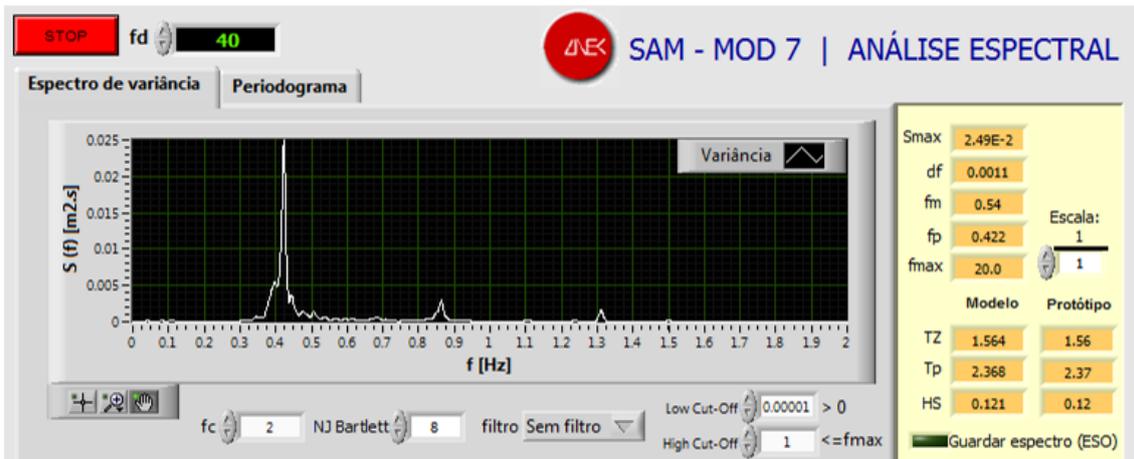


Figura A1.3 – Estado de agitação 2. Espectros registados nas duas sondas junto ao gerador

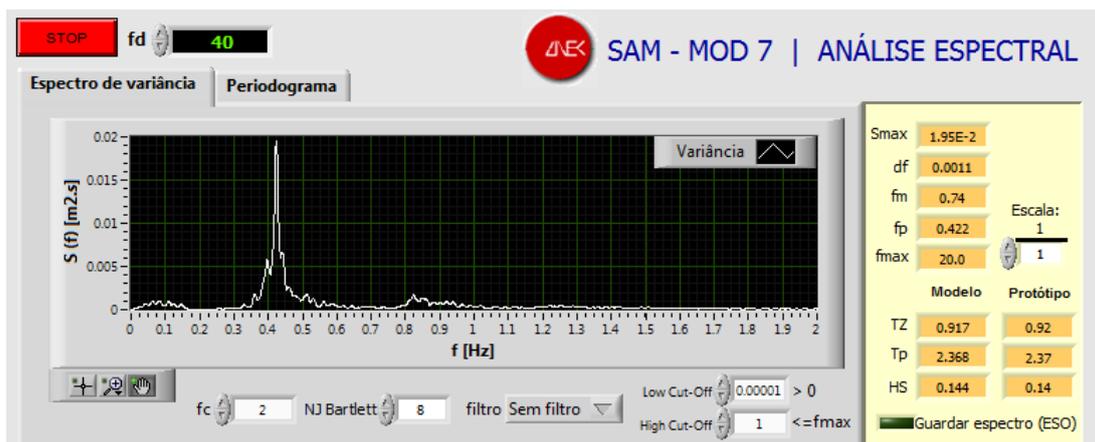
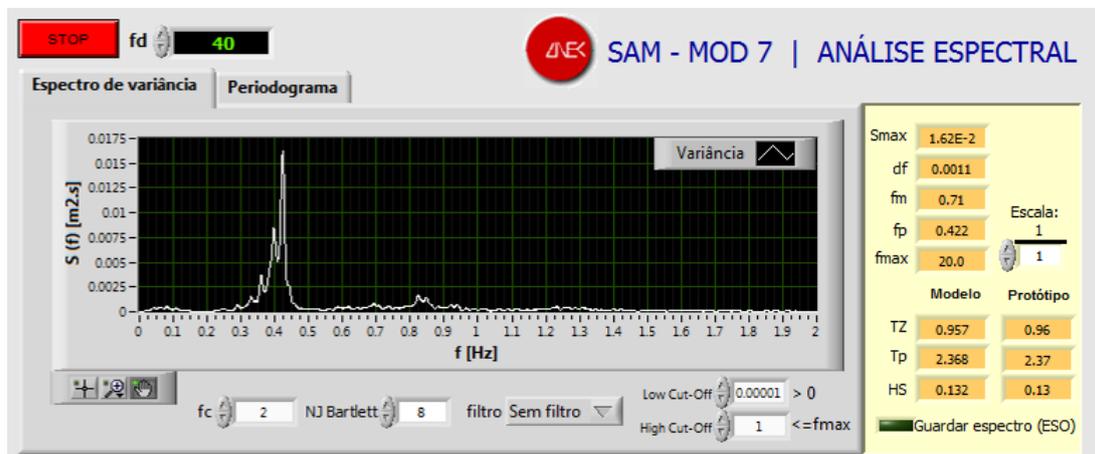
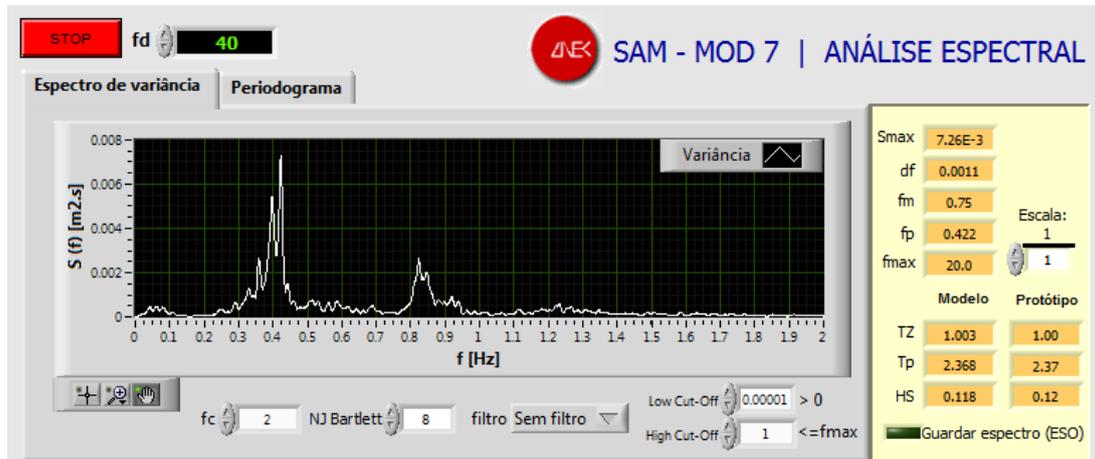


Figura A1.4 – Estado de agitação 2. Espectros registados nas três sondas junto à estrutura

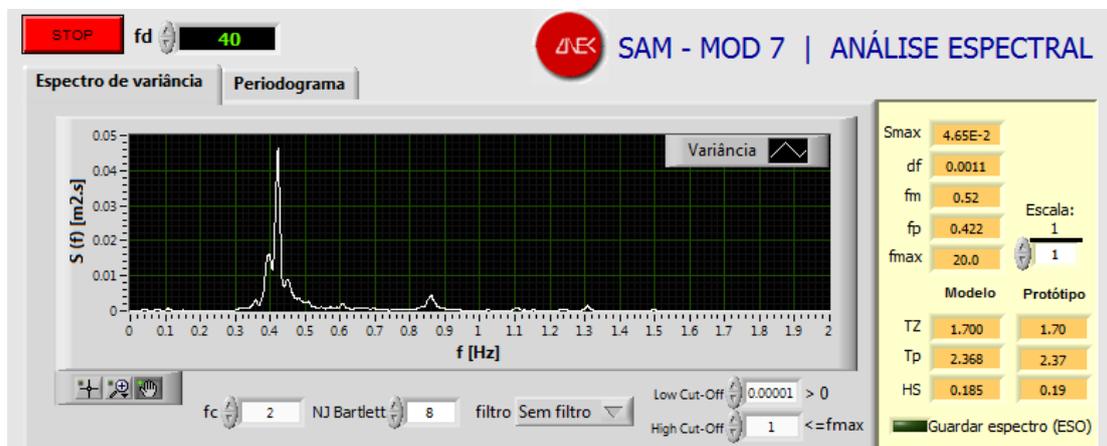
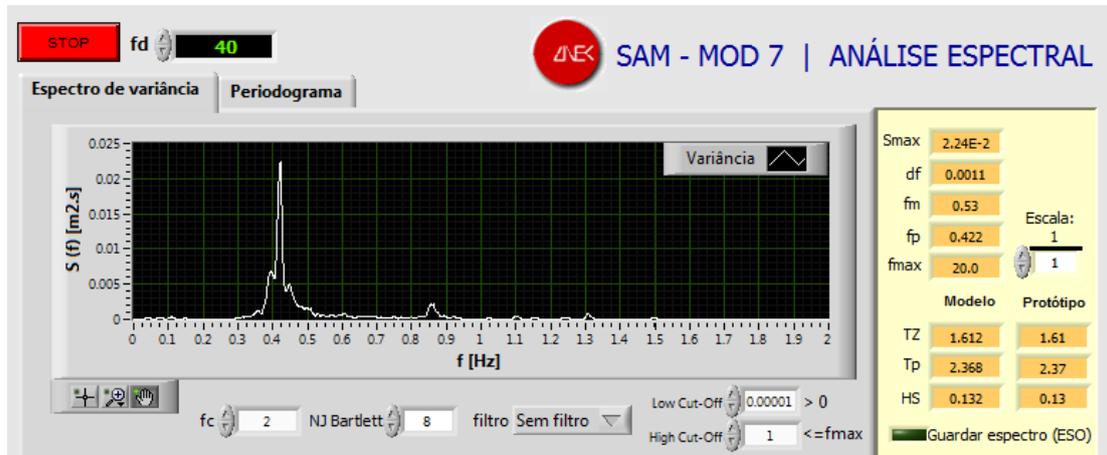


Figura A1.5 – Estado de agitação 3. Espectros registados nas duas sondas junto ao gerador

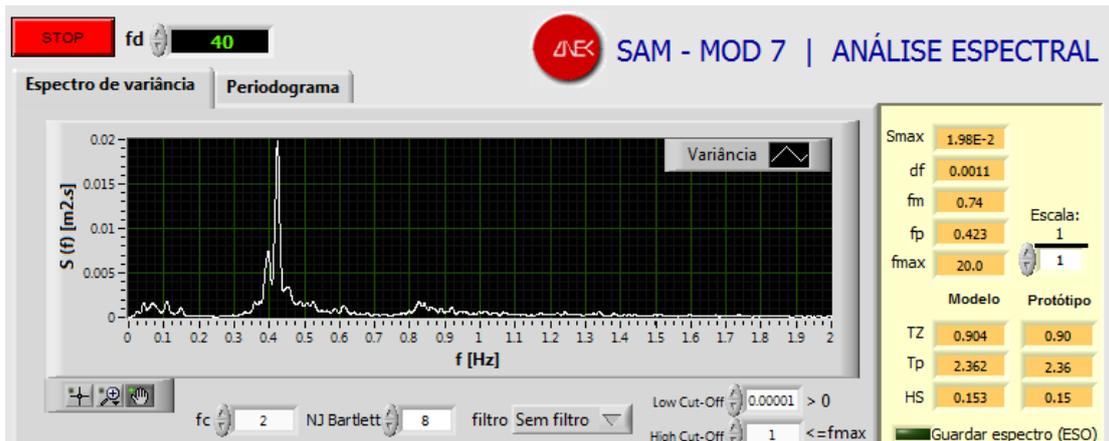
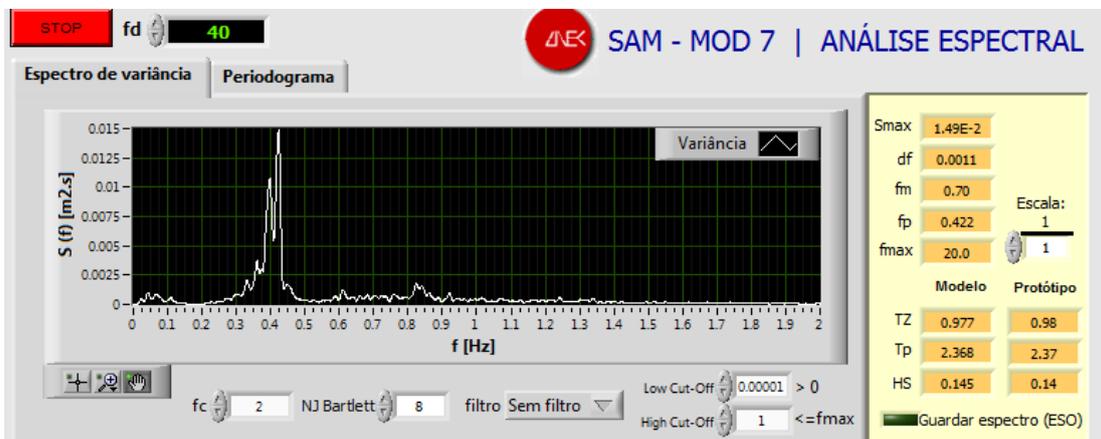
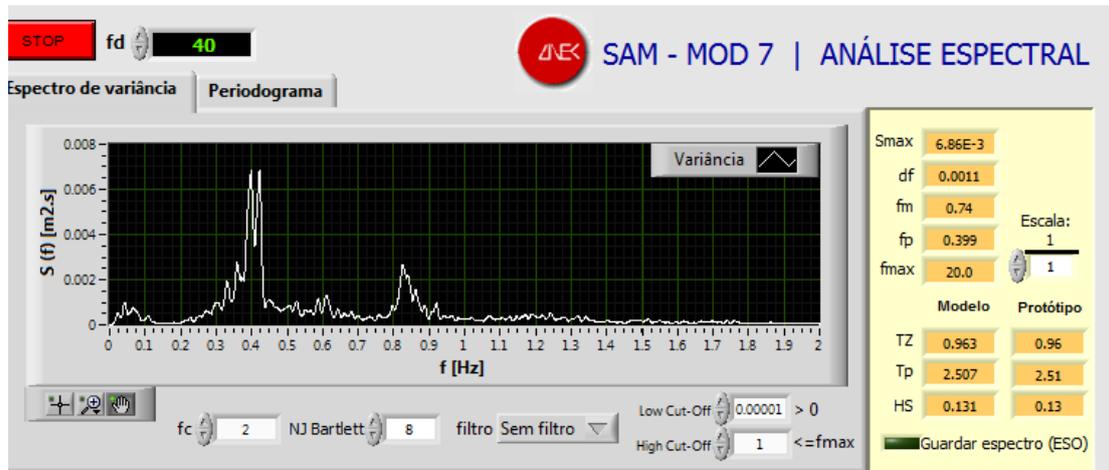


Figura A1.6 – Estado de agitação 3. Espectros registrados nas três sondas junto à estrutura

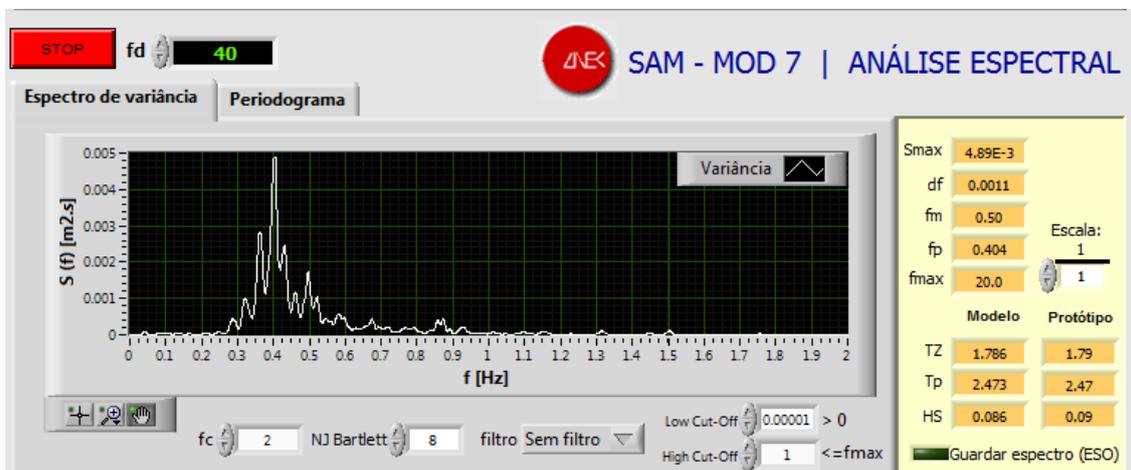
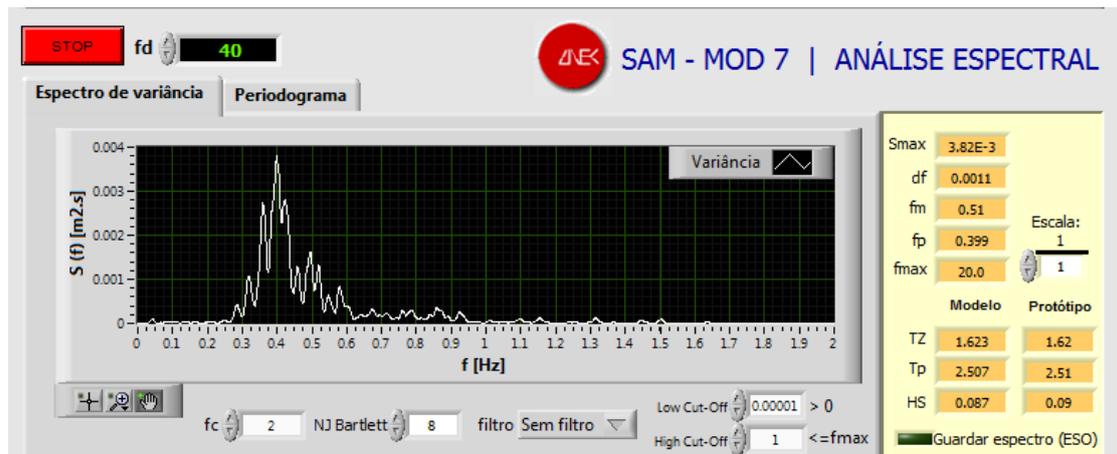


Figura A1.7 – Estado de agitação 4. Espectros registados nas duas sondas junto ao gerador

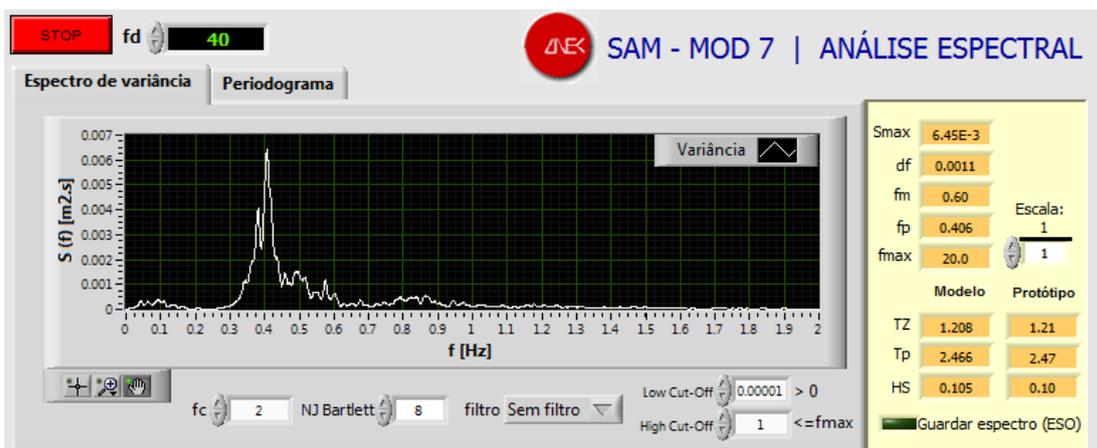
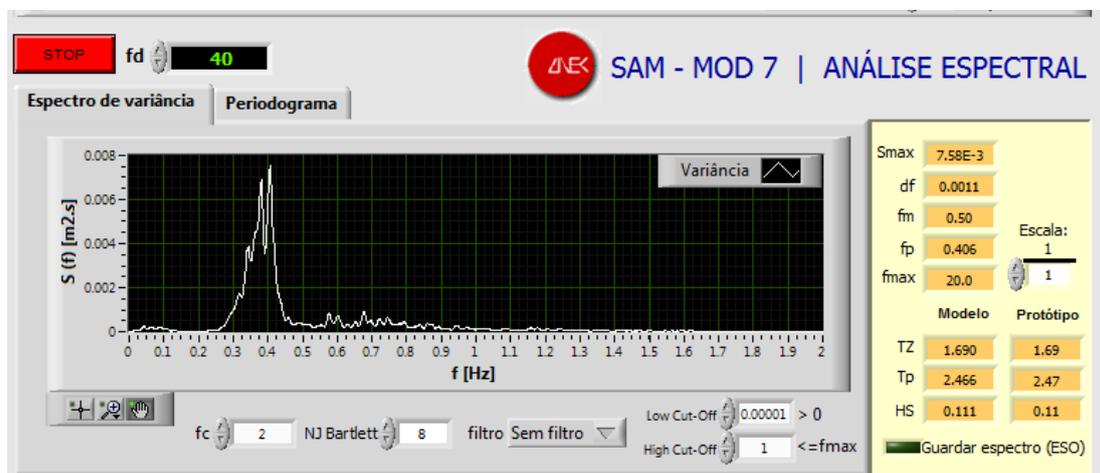
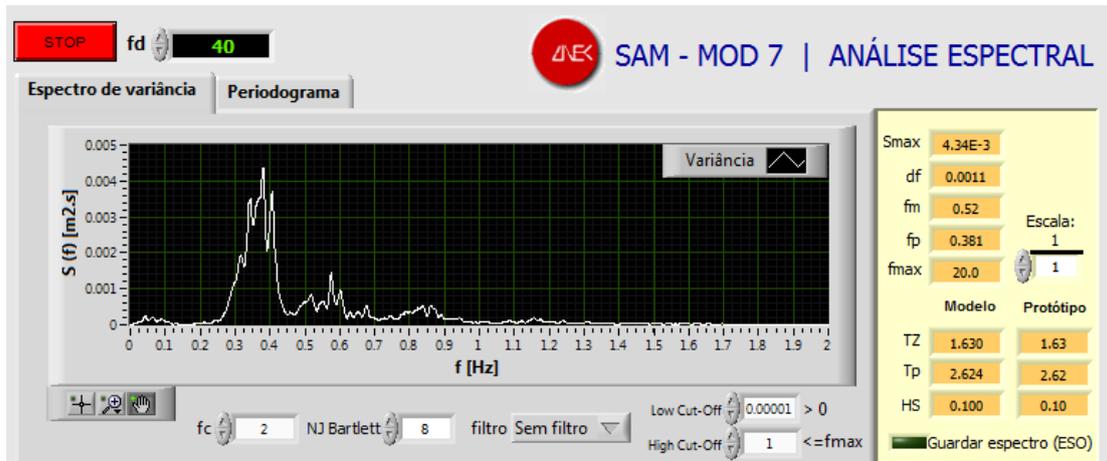


Figura A1.8 – Estado de agitação 4. Espectros registados nas três sondas junto à estrutura

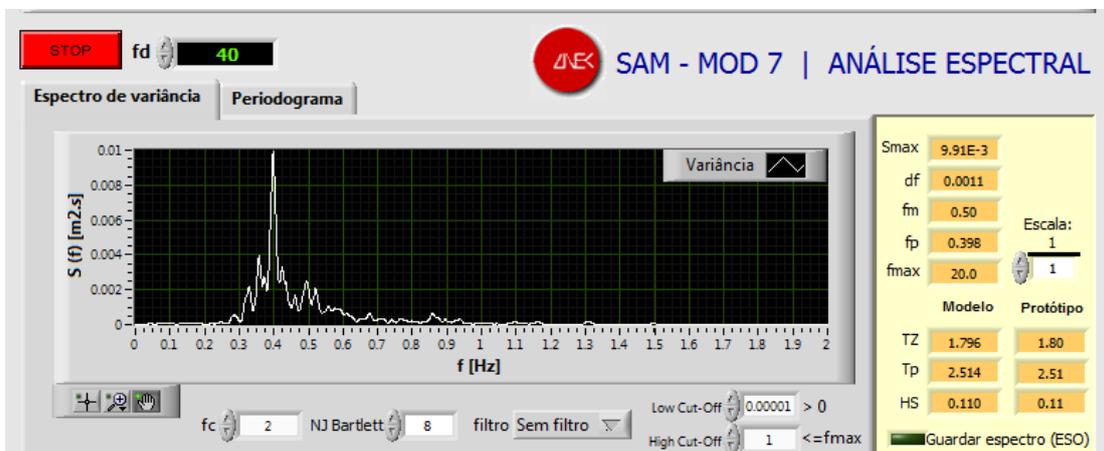
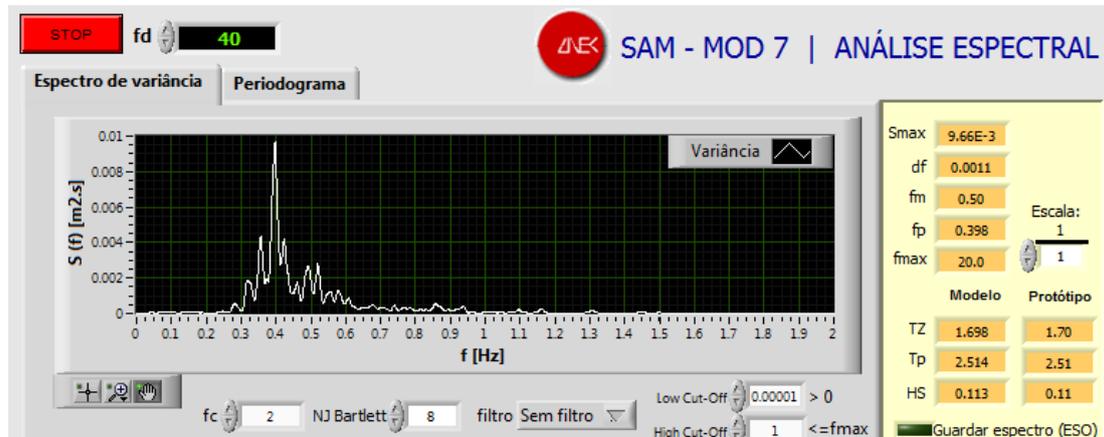


Figura A1.9 – Estado de agitação 5. Espectros registados nas duas sondas junto ao gerador

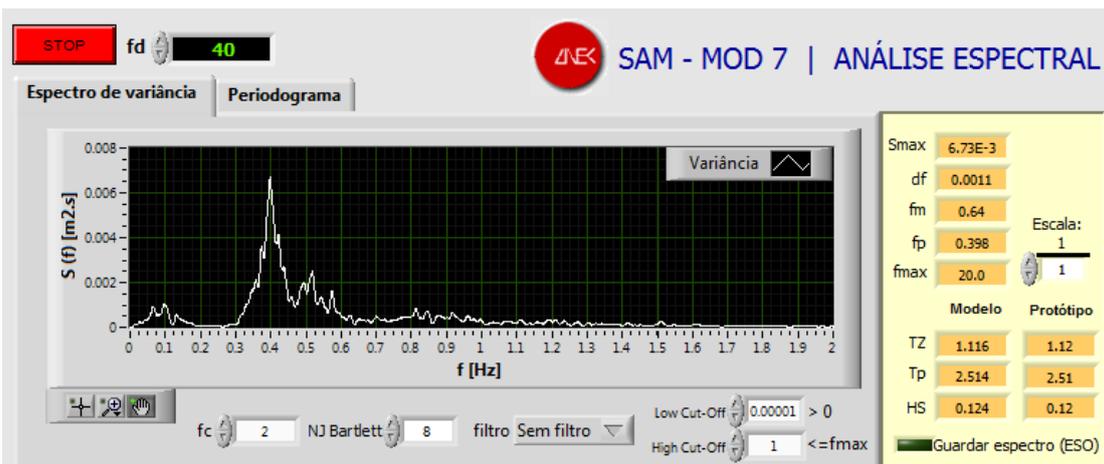
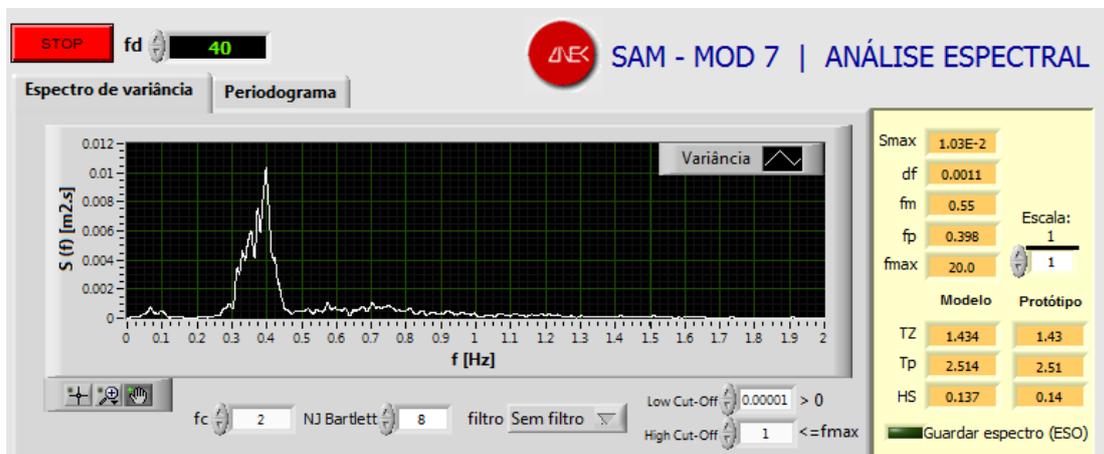
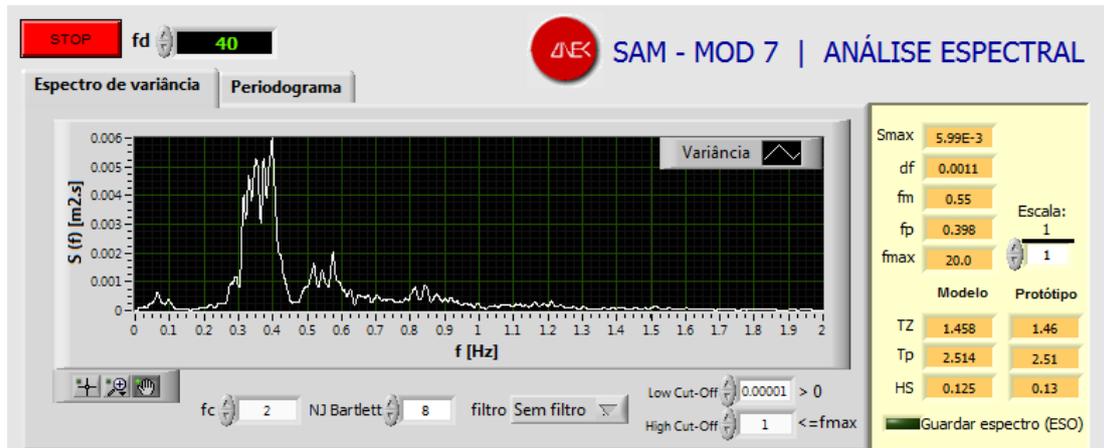


Figura A1.10 – Estado de agitação 5. Espectros registados nas três sondas junto à estrutura

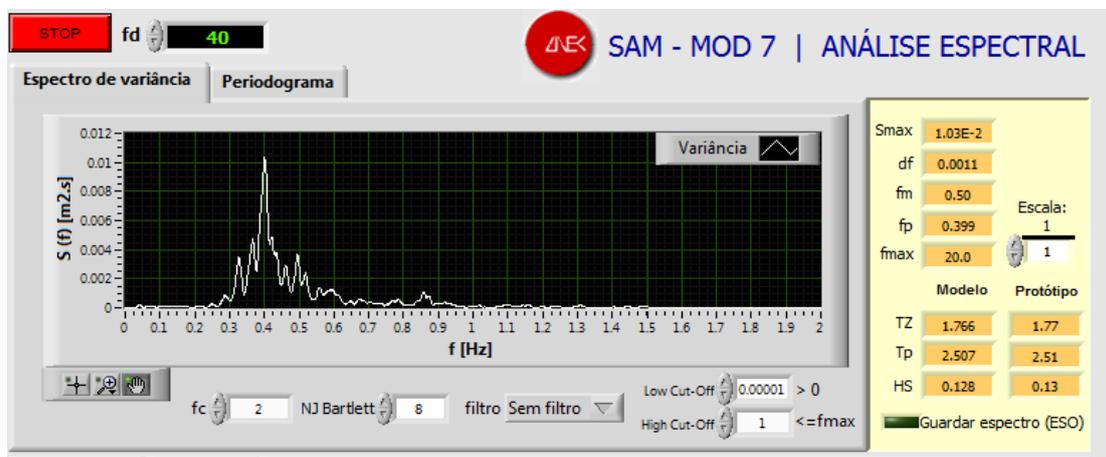
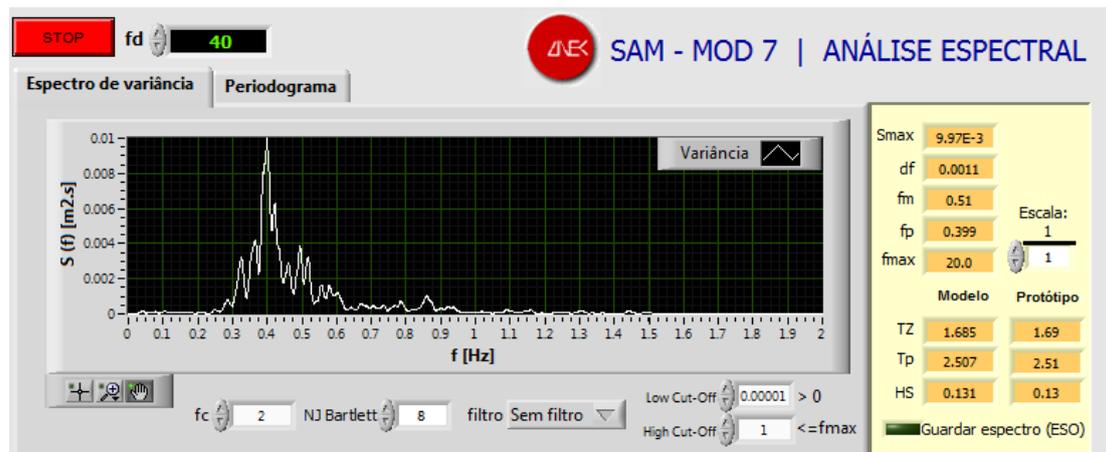


Figura A1.11 – Estado de agitação 6. Espectros registados nas duas sondas junto ao gerador

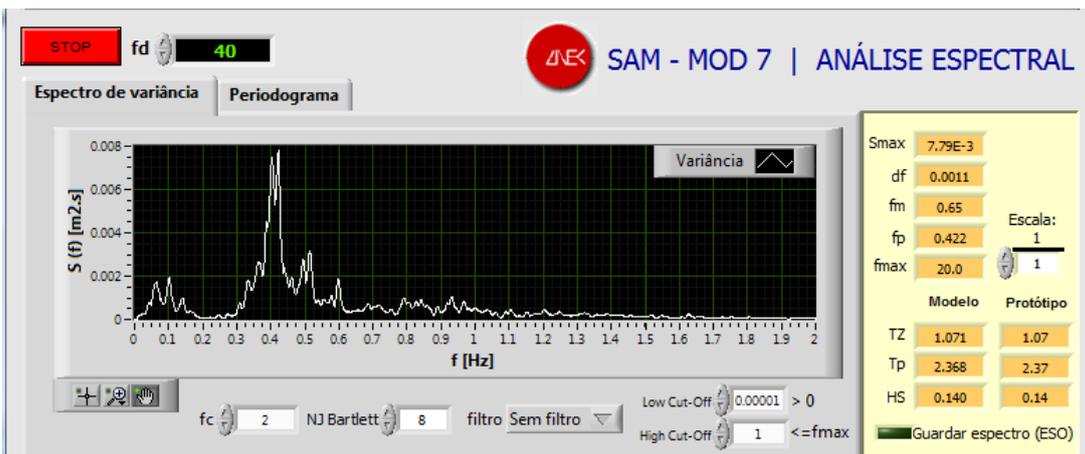
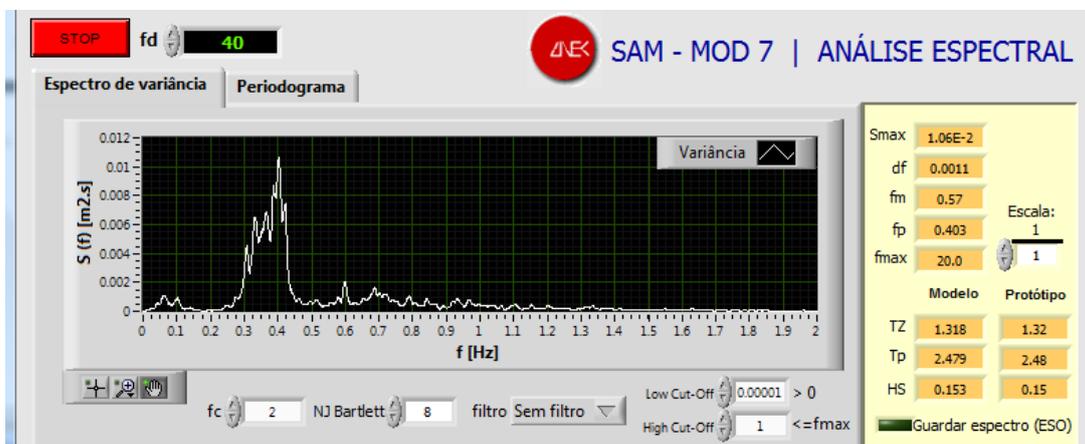
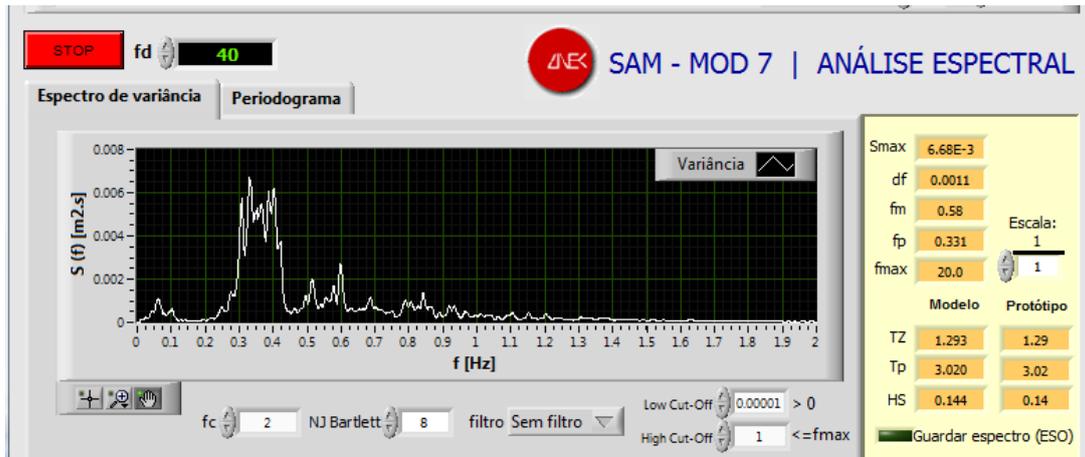


Figura A1.12 – Estado de agitação 6. Espectros registados nas três sondas junto à estrutura

ANEXO 2
PERFIS RESULTANTES DOS LEVANTAMENTOS

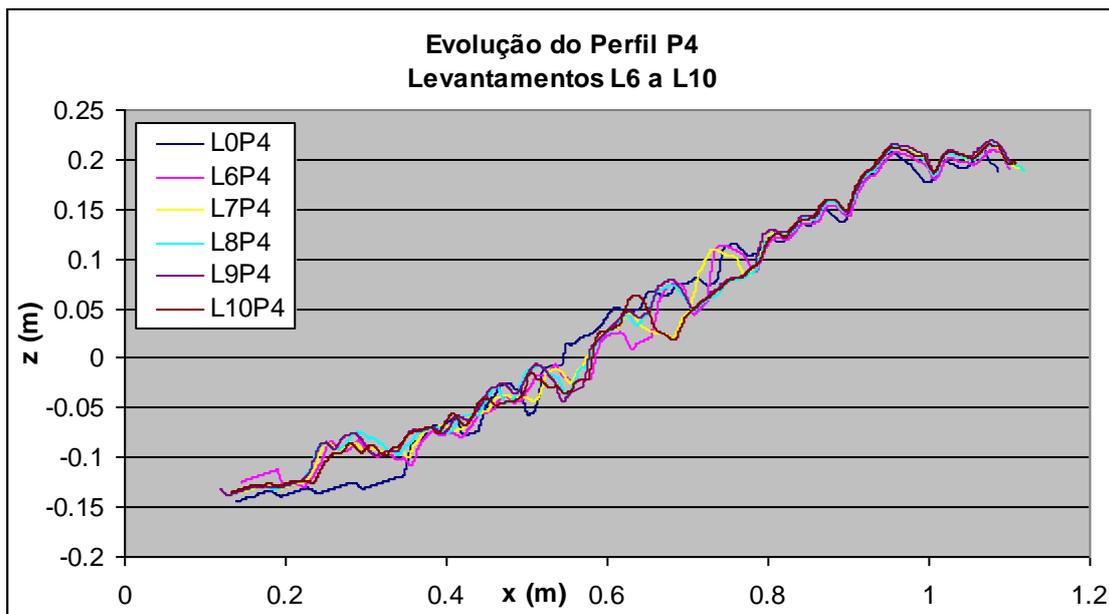
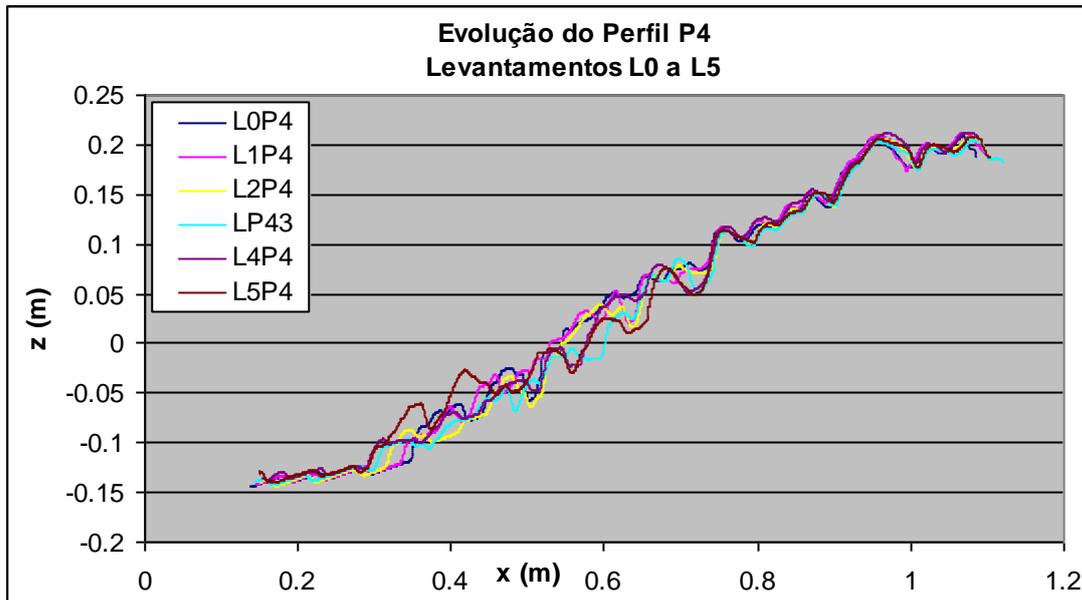


Figura A2.1 - Série de ensaios A. Evolução do Perfil P4. Levantamentos L0 a L10

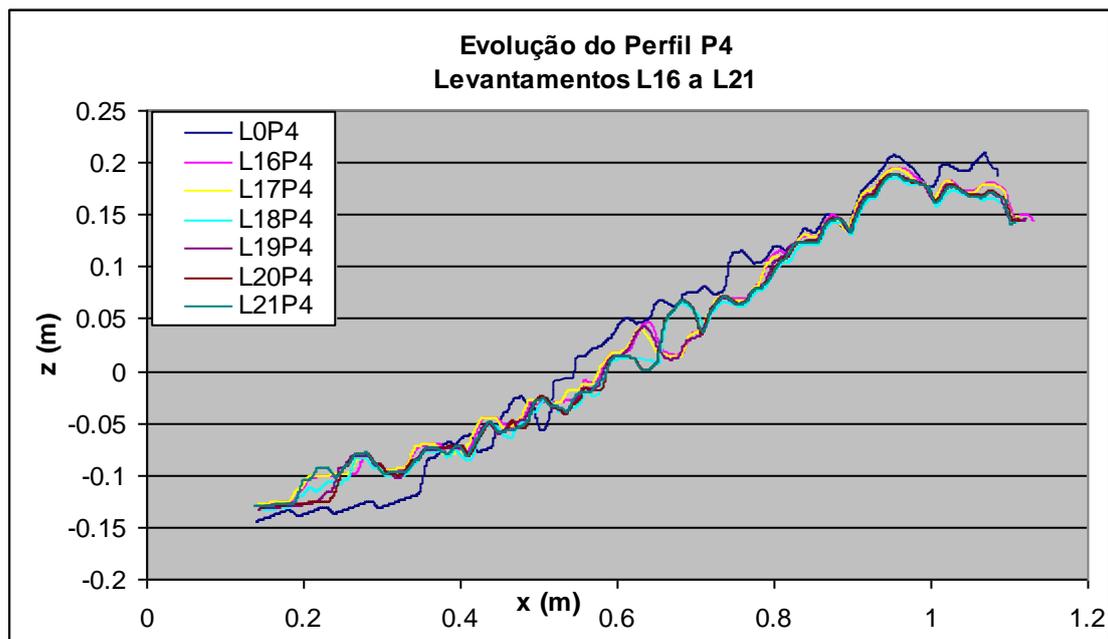
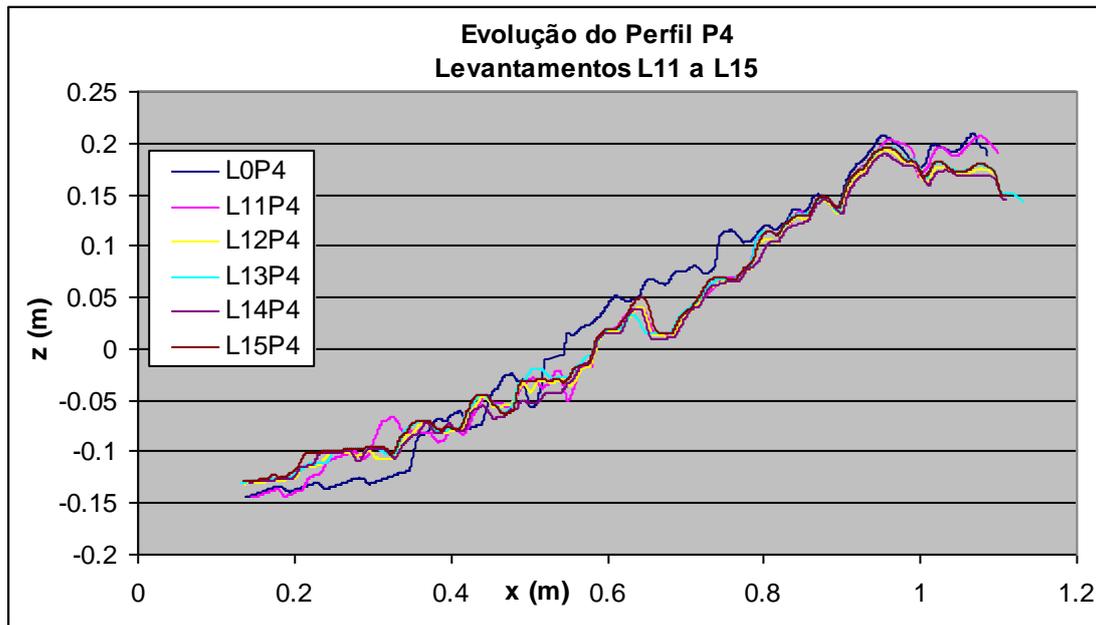


Figura A2.2 - Série de ensaios A. Evolução do Perfil P4. Levantamentos L11 a L21

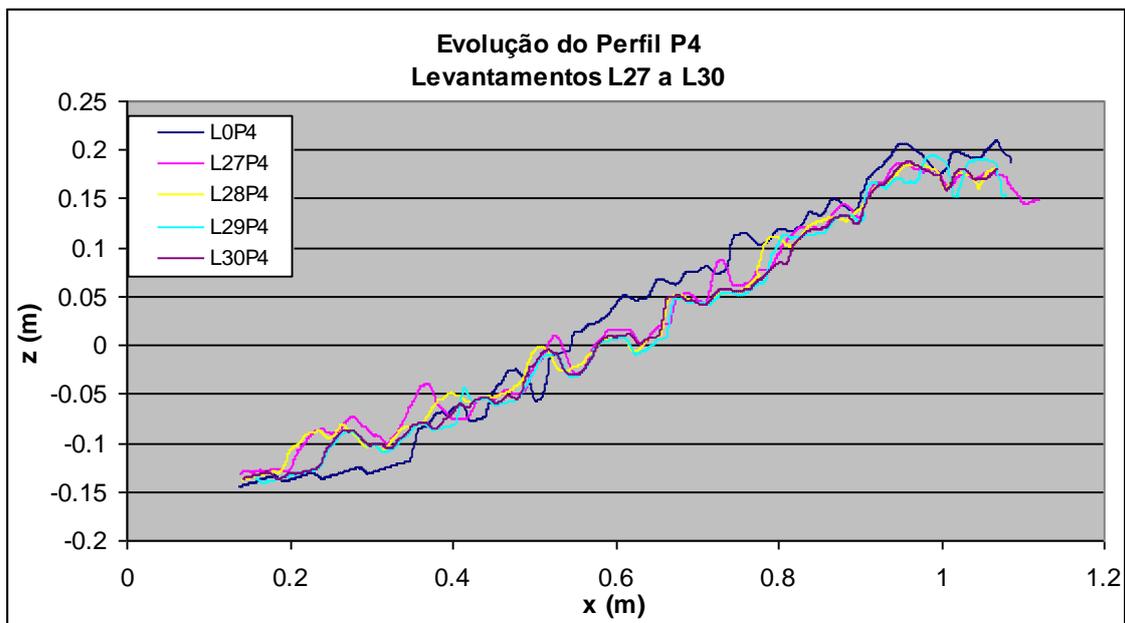
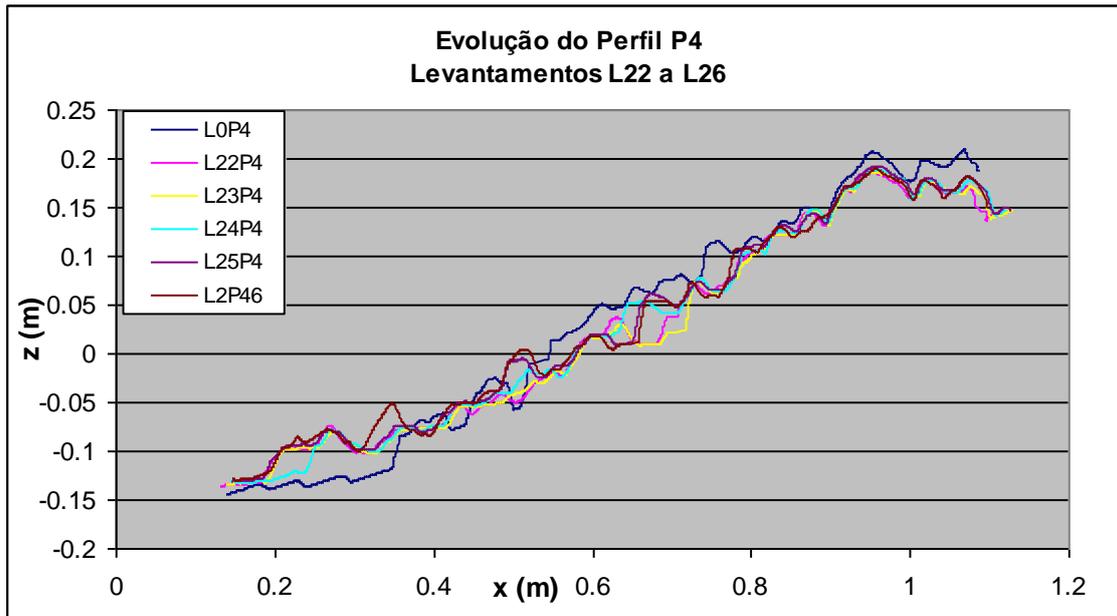


Figura A2.3 - Série de ensaios A. Evolução do Perfil P4. Levantamentos L22 a L30

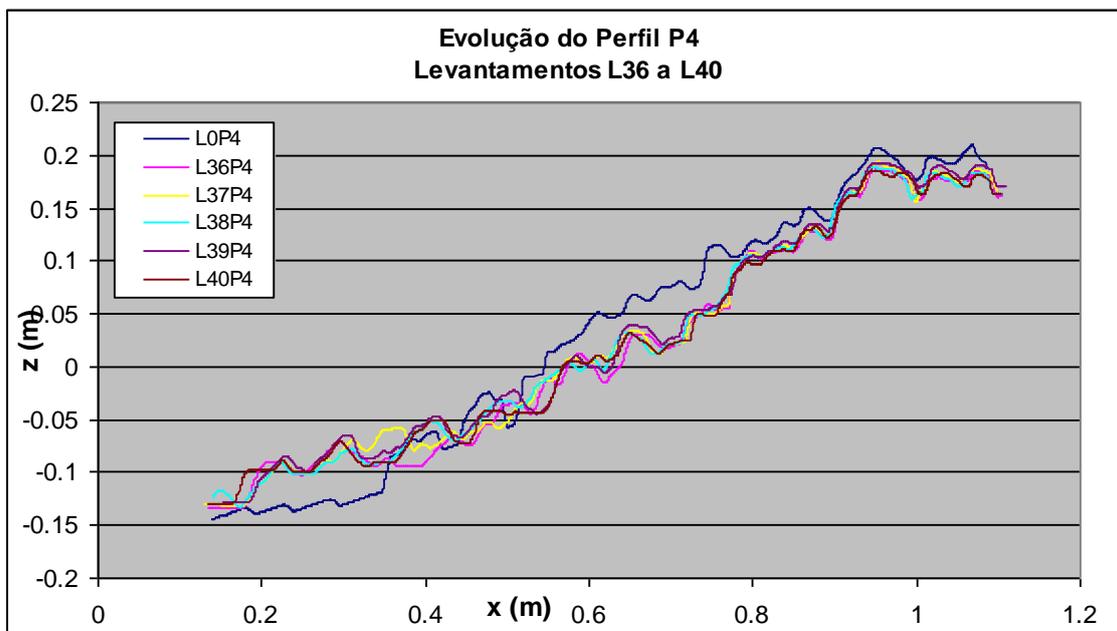
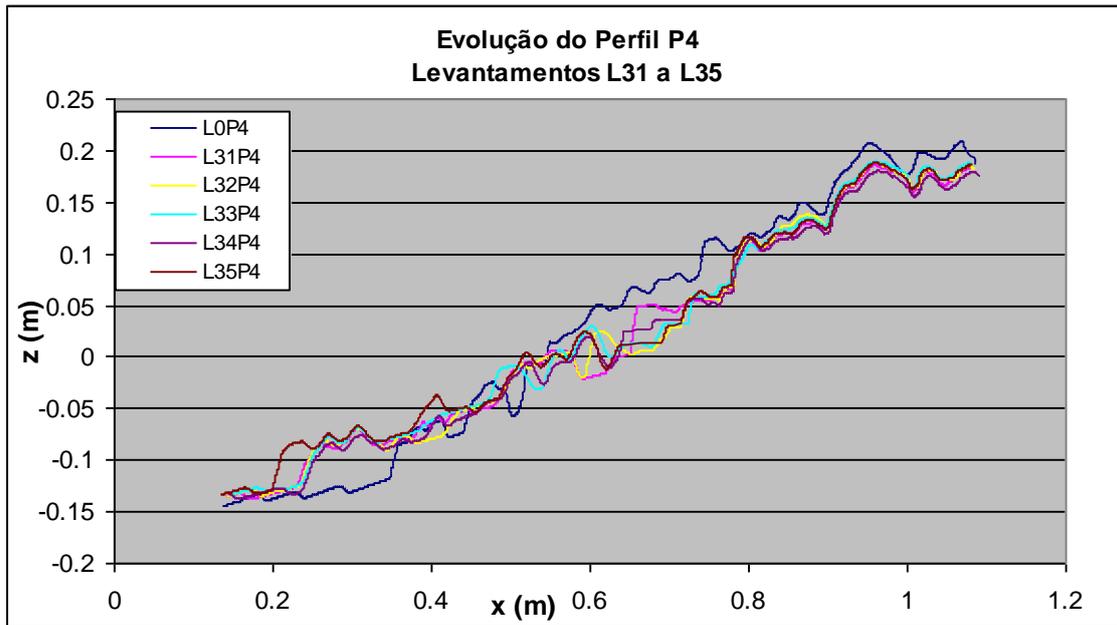


Figura A2.4 - Série de ensaios A. Evolução do Perfil P4. Levantamentos L31 a L40

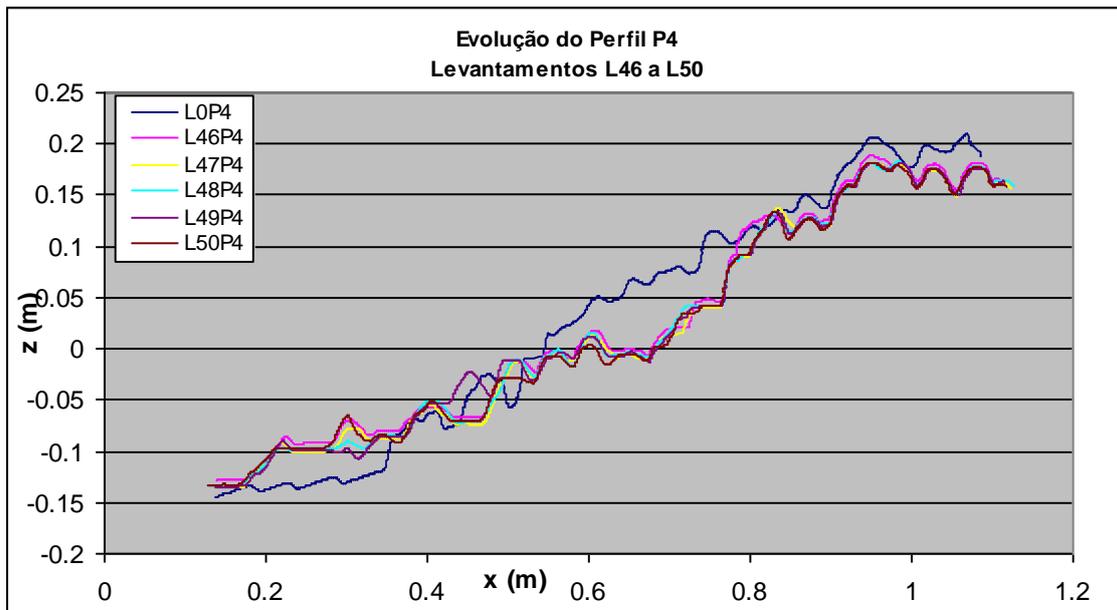
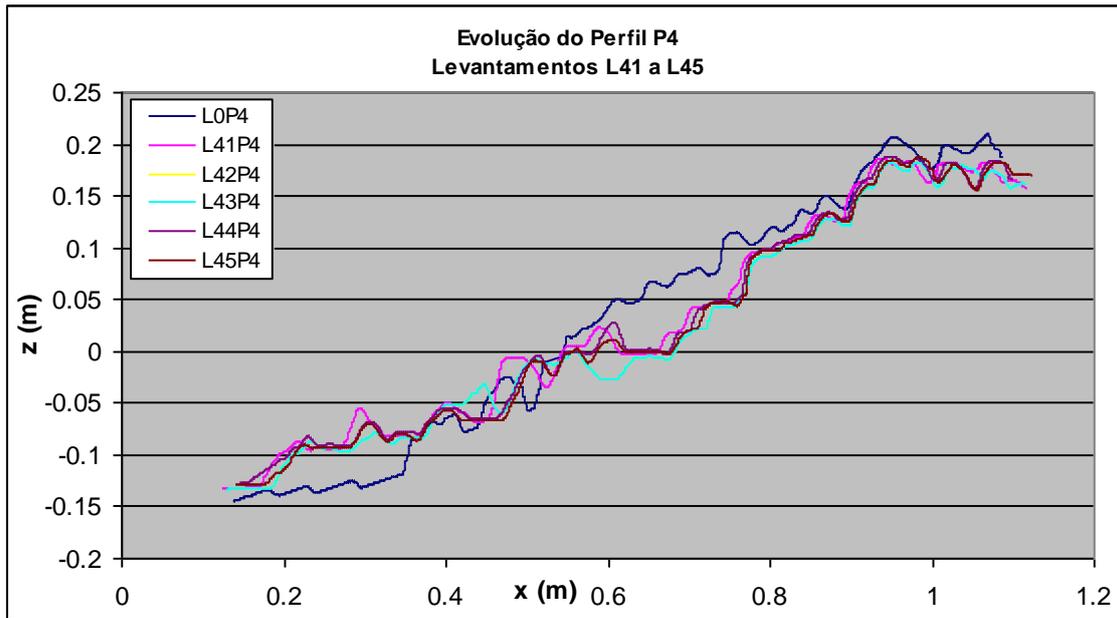


Figura A2.5 - Série de ensaios A. Evolução do Perfil P4. Levantamentos L41 a L50

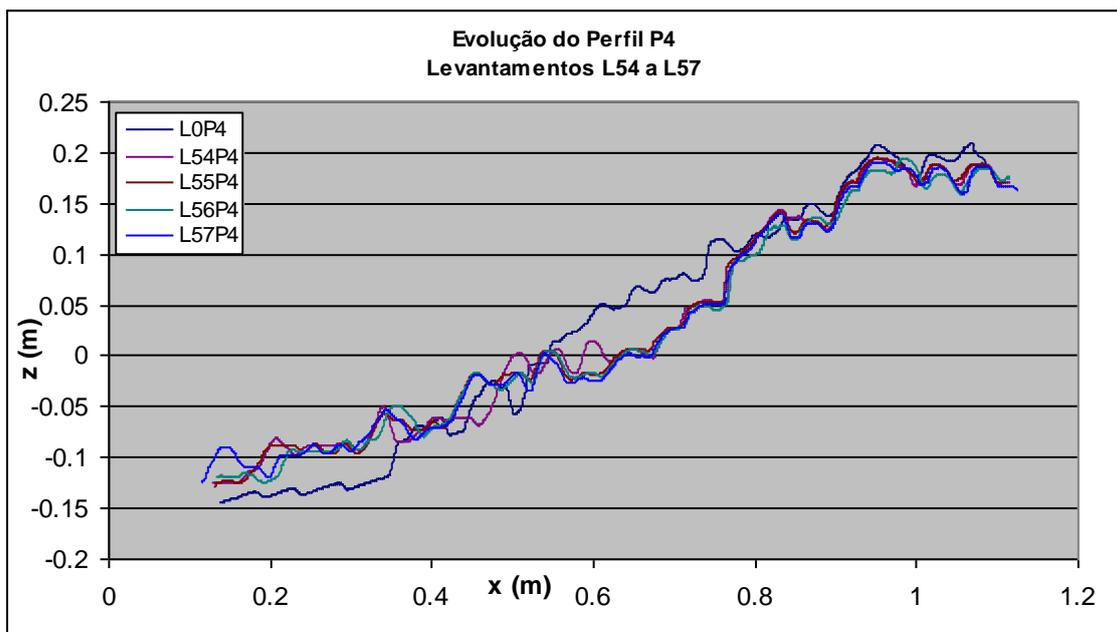
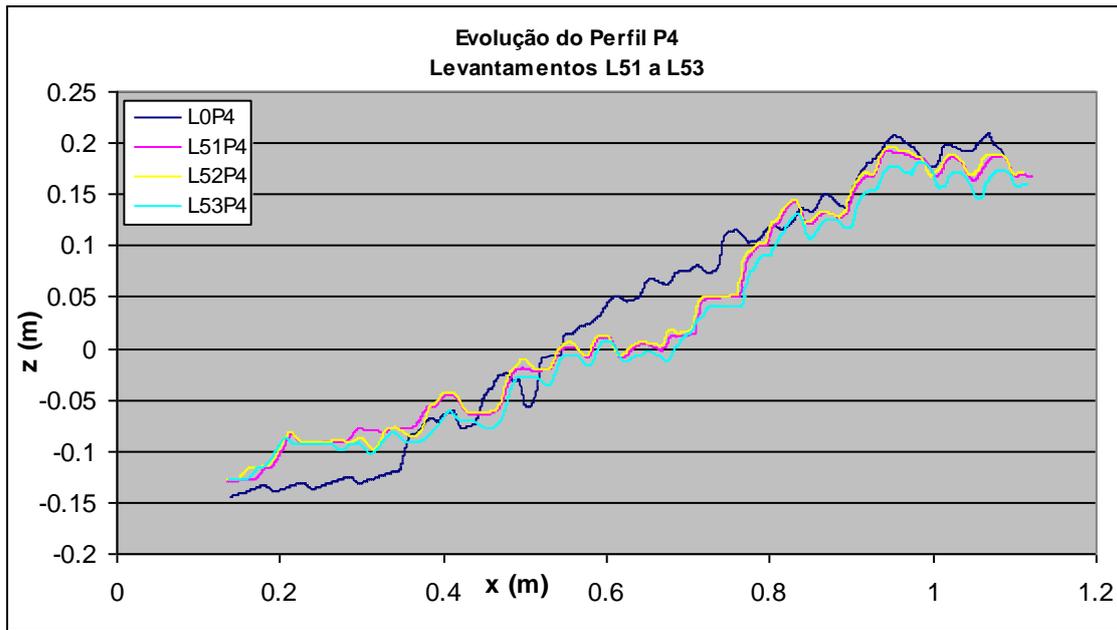


Figura A2.6 - Série de ensaios A. Evolução do Perfil P4.
Levantamentos L51 a L57

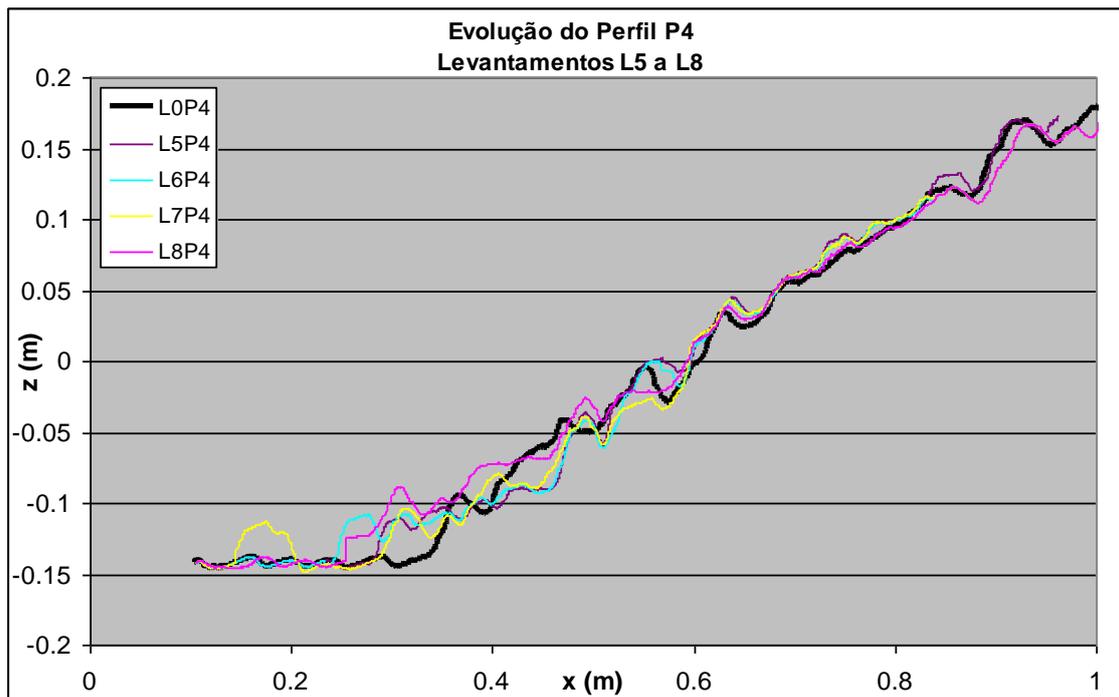
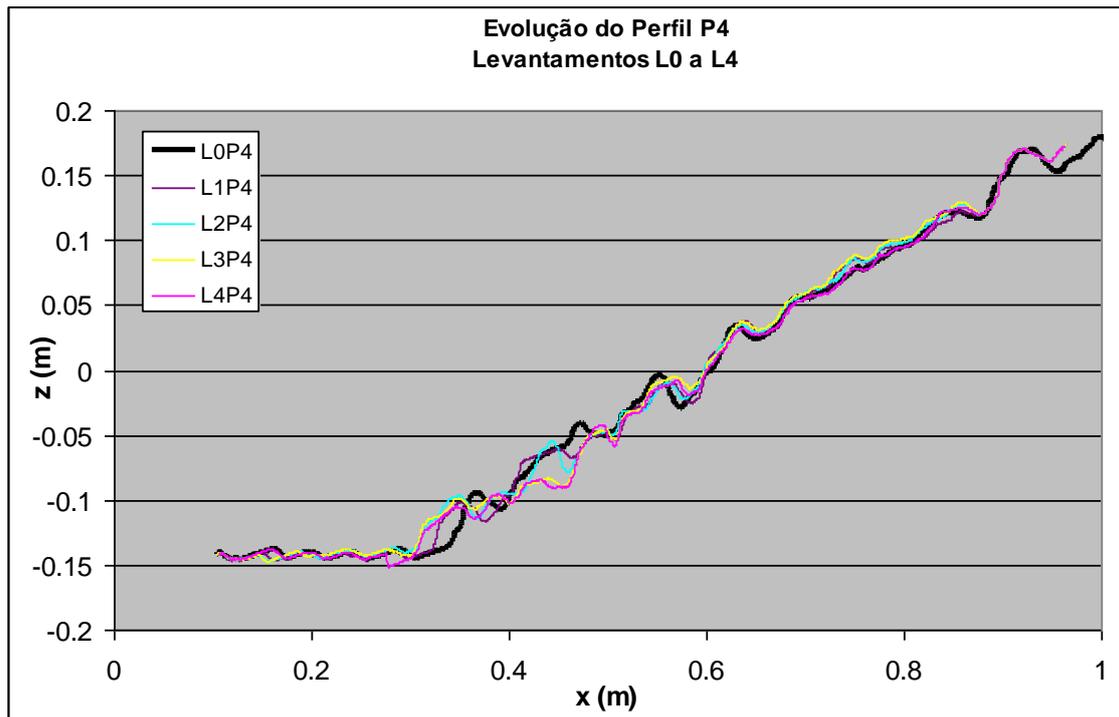


Figura A2.7 - Série de ensaios B. Evolução do Perfil P4. Levantamentos L0 a L8

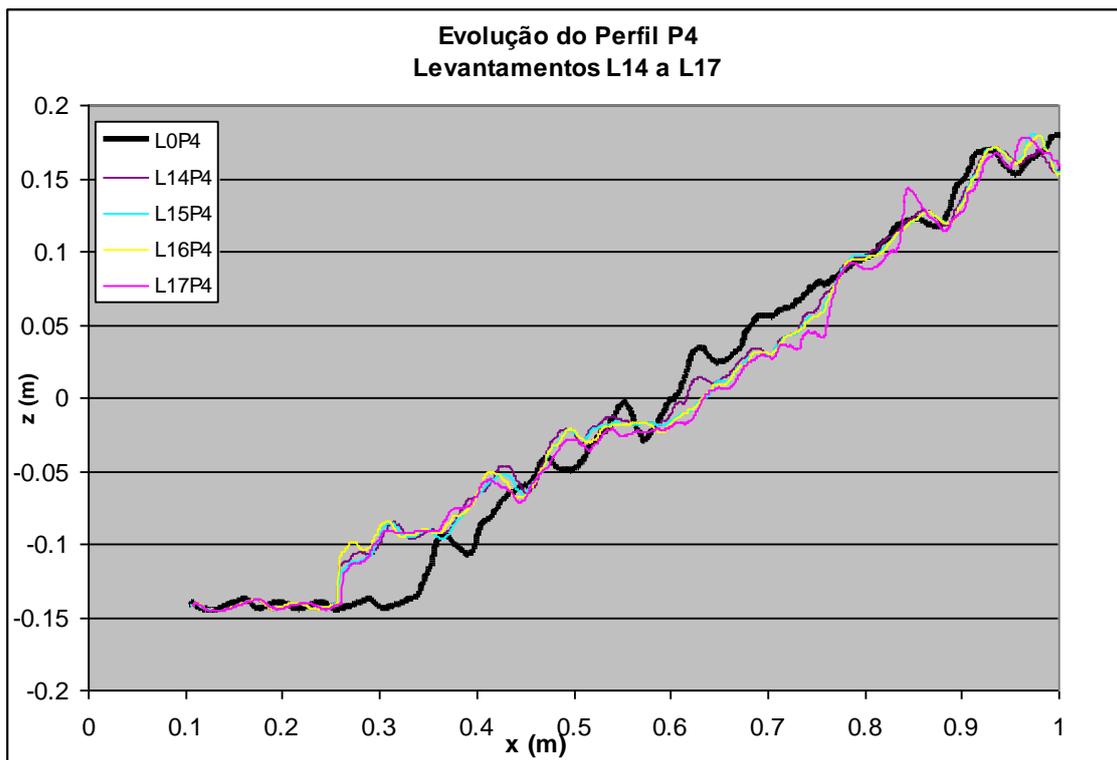
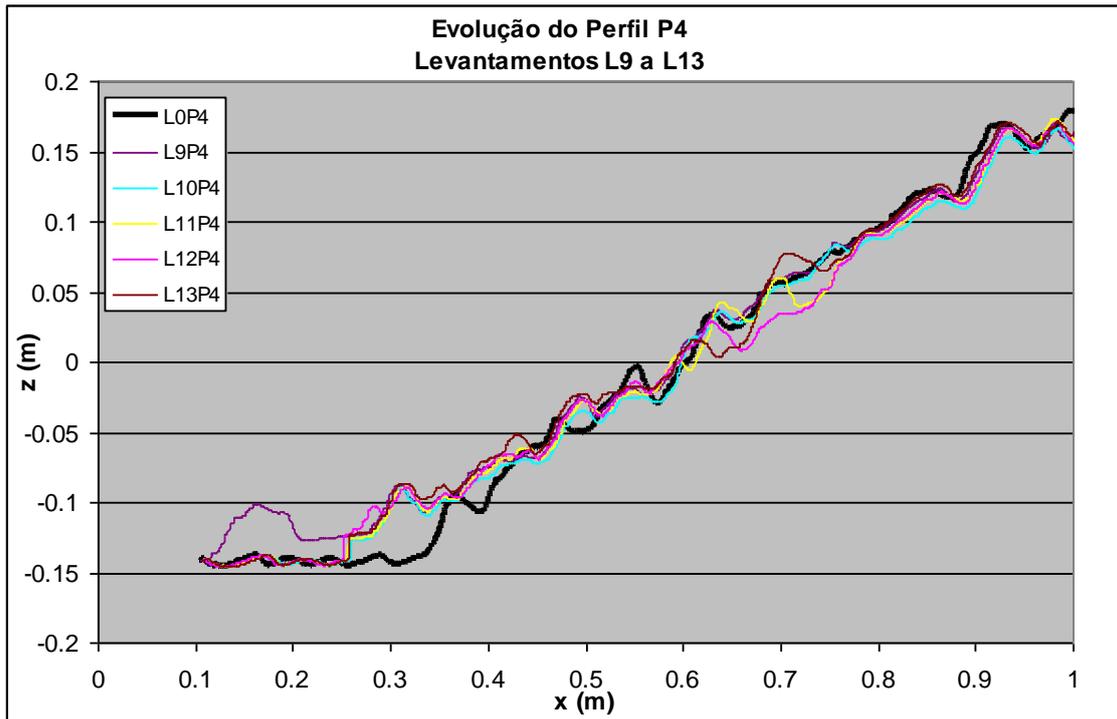


Figura A2.8 - Série de ensaios B. Evolução do Perfil P4. Levantamentos L9 a L17

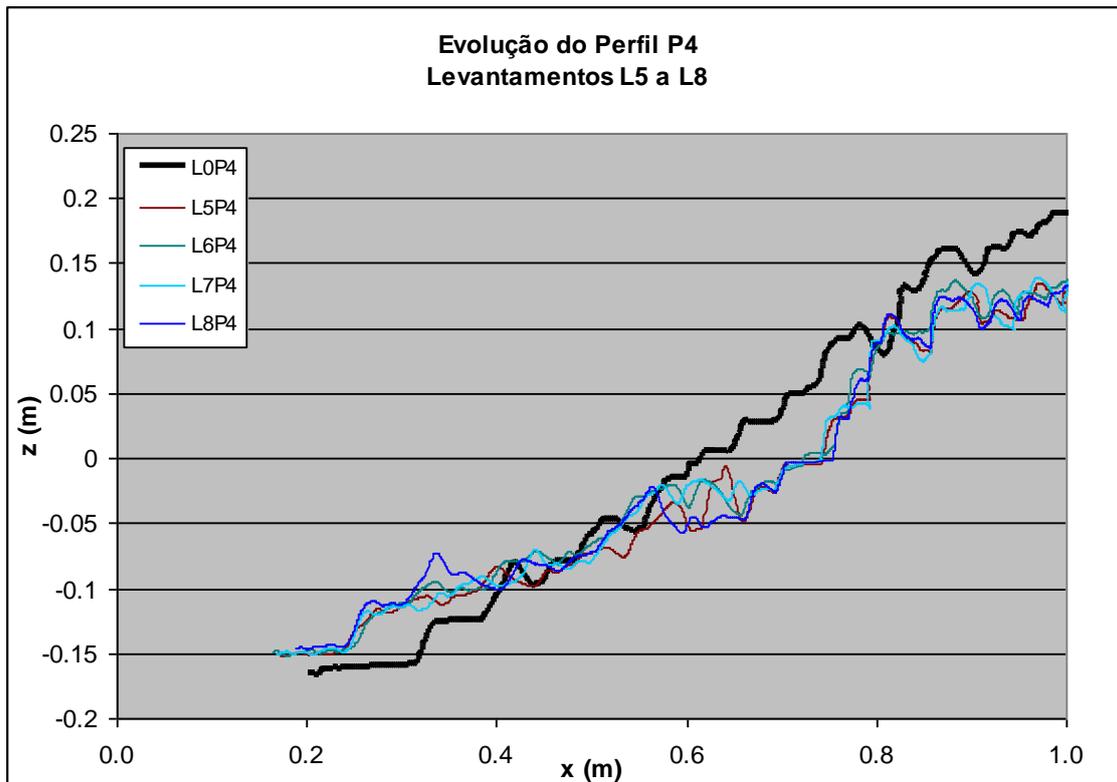
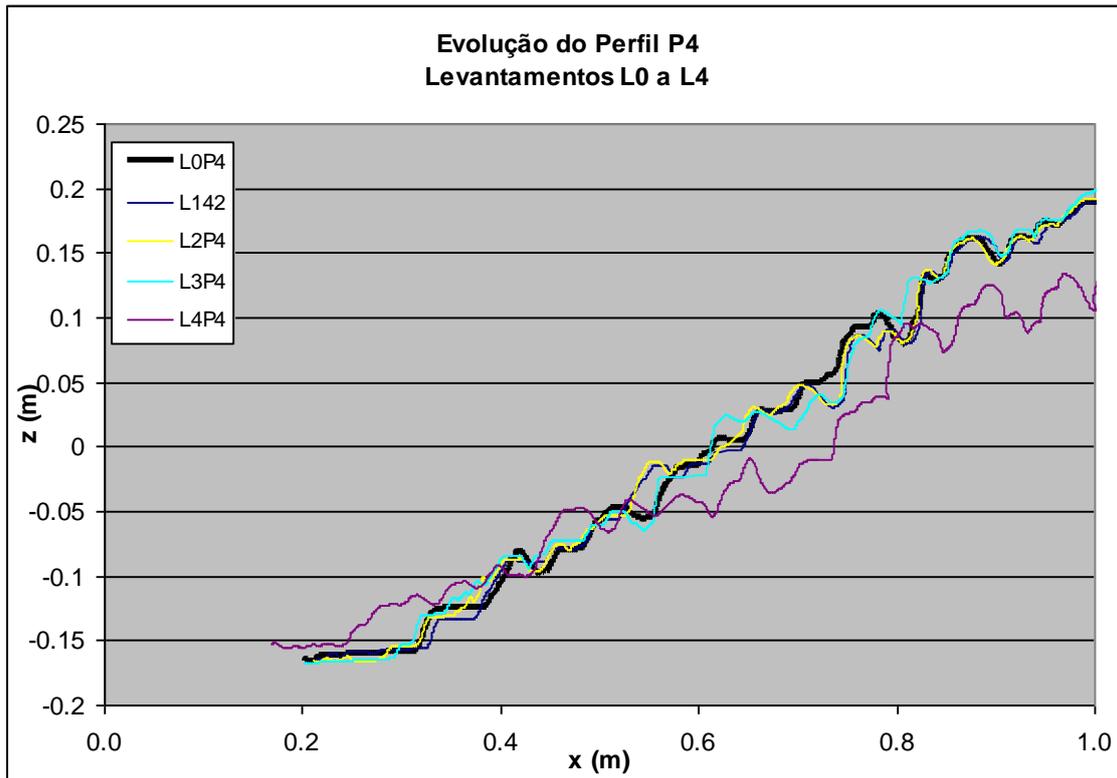


Figura A2.9 - Série de ensaios C. Evolução do Perfil P4. Levantamentos L1 a L8

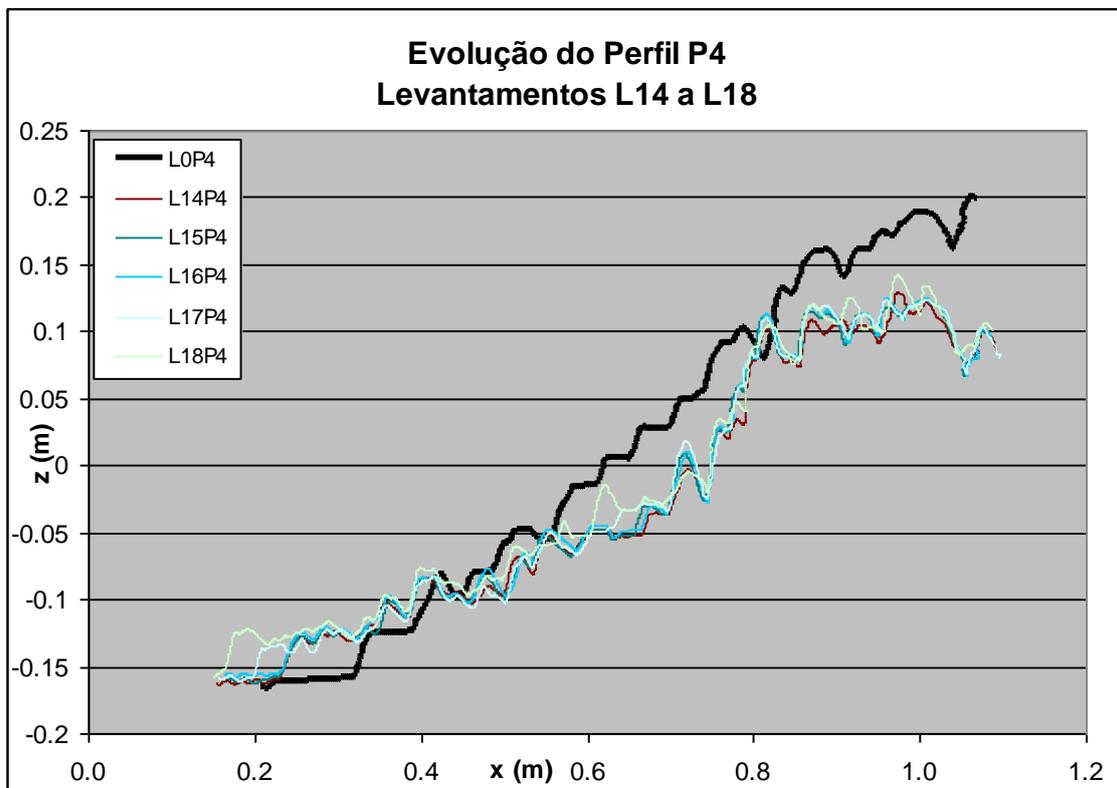
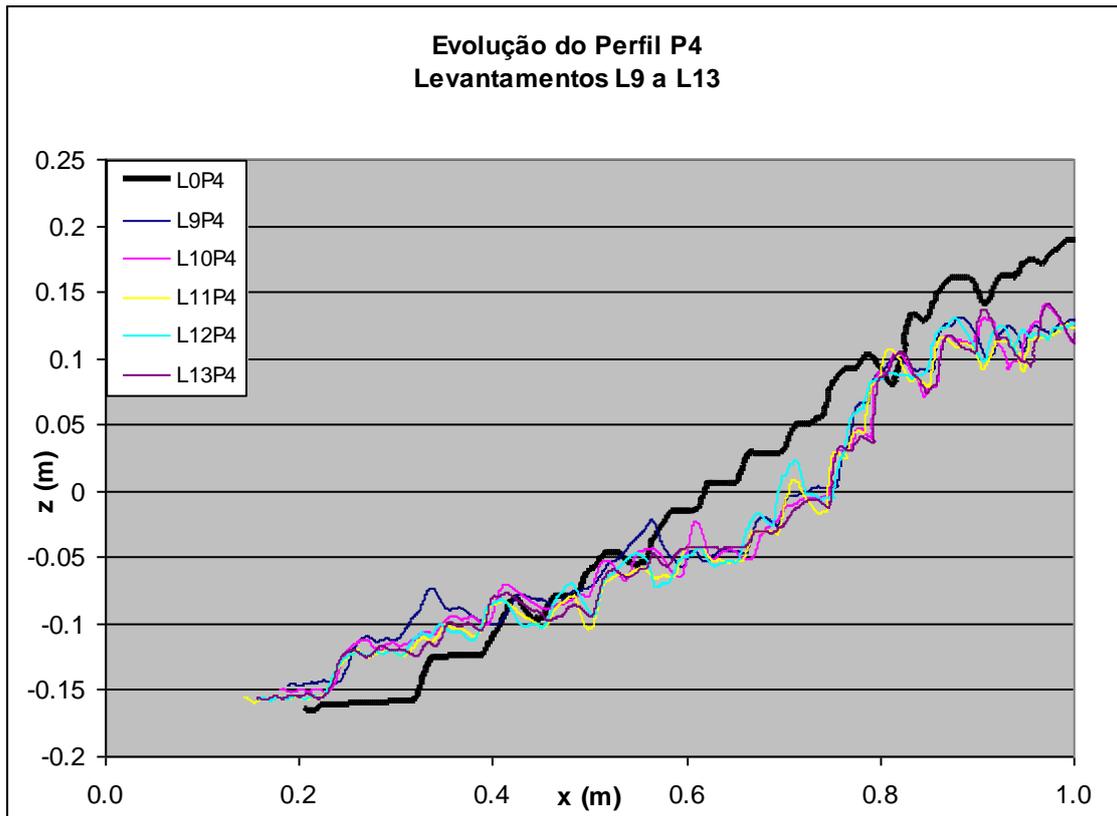


Figura A2.10 - Série de ensaios C. Evolução do Perfil P4. Levantamentos L9 a L18

ANEXO 3
DANO MÉDIO MEDIDO AO LONGO DAS
SÉRIES DE ENSAIOS

Quadro A3.1 - Dano médio (\bar{S}) medido ao longo da série de ensaios A

Levantamento	Dano (S)							\bar{S}
	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	
L1	0,01	1,59	0,38	0,38	0,81	0,31	0,43	0,56
L2	1,20	2,45	0,75	1,11	3,12	0,36	3,83	1,83
L3	0,13	6,04	0,98	2,44	4,12	0,43	4,16	2,61
L4	0,14	2,56	1,02	0,87	2,08	1,93	8,00	2,37
L5	0,09	5,55	6,07	4,70	2,08	1,76	10,56	4,40
L6	6,00	1,31	4,69	5,74	0,82	1,71	6,70	3,85
L7	0,10	3,15	3,41	4,15	1,22	1,56	10,66	3,46
L8	0,04	1,40	3,50	3,18	0,32	2,11	6,59	2,45
L9	0,37	1,55	4,21	8,41	2,68	1,77	3,04	3,15
L10	0,42	1,44	4,12	9,54	2,54	1,93	0,32	2,90
L11	0,44	6,72	17,21	6,24	2,94	3,81	1,20	5,51
L12	0,02	1,71	16,79	9,54	7,39	6,14	7,17	6,97
L13	0,02	0,88	2,63	9,70	4,28	7,75	11,18	5,21
L14	0,38	3,06	3,17	8,91	8,09	9,32	19,65	7,51
L15	0,07	1,29	5,31	8,94	2,55	5,72	2,35	3,75
L16	0,51	1,27	4,65	8,95	3,94	5,50	11,72	5,22
L17	0,10	1,45	4,85	6,83	3,49	6,75	17,51	5,85
L18	1,22	2,95	7,13	5,82	4,71	9,18	12,51	6,22
L19	0,74	1,41	5,66	8,94	4,30	7,60	19,05	6,81
L20	0,98	2,54	6,22	9,44	3,89	5,56	19,73	6,91
L21	1,80	2,70	6,22	9,09	4,33	5,25	19,63	7,00
L22	1,40	4,79	7,43	12,03	2,96	5,25	14,43	6,90
L23	0,54	6,89	3,39	11,93	4,39	7,03	12,90	6,72
L24	1,23	1,27	9,47	10,68	7,19	7,38	13,65	7,27
L25	2,06	0,95	8,54	8,20	3,72	9,17	11,27	6,27
L26	1,56	4,86	7,44	11,50	3,92	7,83	11,57	6,95
L27	1,63	1,40	10,66	11,76	5,18	8,08	14,33	7,58
L28	2,23	6,72	3,61	10,64	4,88	7,76	12,46	6,90
L29	8,44	6,04	3,58	9,06	5,74	12,22	15,41	8,64
L30	3,30	5,26	11,49	11,77	6,36	10,34	19,73	9,75
L31	2,45	7,12	14,22	11,57	3,55	11,11	13,68	9,10
L32	3,34	4,03	10,65	12,11	8,31	10,95	11,49	8,70
L33	2,84	1,73	3,82	11,25	6,74	9,48	10,75	6,66
L34	2,99	0,39	3,82	12,61	7,38	10,53	10,65	6,91
L35	2,29	1,07	4,84	12,40	7,37	9,27	10,65	6,84
L36	4,53	1,87	9,76	12,01	10,12	13,47	8,41	8,59
L37	0,37	1,32	10,58	13,14	12,12	12,31	6,78	8,09
L38	1,16	9,94	12,79	13,89	12,70	11,76	6,32	9,79
L39	3,65	5,40	2,82	12,33	10,31	12,40	5,70	7,51
L40	3,30	0,45	14,15	13,88	14,19	14,74	7,35	9,72
L41	4,17	10,94	14,90	13,77	9,98	12,85	6,52	10,45
L42	9,20	12,51	17,28	14,16	14,48	13,61	12,00	13,32

Quadro A3.1 (Cont.) - Dano médio (\bar{S}) medido ao longo da série de ensaios A

Levantamento	Dano (S)							\bar{S}
	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	
L43	3,75	4,20	17,63	13,90	13,68	14,25	12,00	11,34
L44	3,96	8,19	13,56	14,17	10,84	12,33	13,17	10,89
L45	4,74	7,92	15,89	13,96	12,65	13,34	12,37	11,55
L46	4,89	8,30	16,03	14,07	11,86	13,31	12,85	11,61
L47	5,71	9,06	10,62	13,52	14,55	13,85	15,52	11,83
L48	5,40	7,92	11,16	13,93	14,23	15,32	14,38	11,76
L49	6,01	6,04	11,03	14,00	14,91	15,04	15,33	11,77
L50	6,36	3,02	11,30	14,20	14,41	15,15	12,58	11,00
L51	6,42	2,64	14,14	14,18	10,55	12,30	10,04	10,04
L52	7,49	7,62	12,16	14,26	9,38	10,64	8,88	10,06
L53	5,57	5,55	11,59	14,25	8,64	16,24	17,10	11,28
L54	6,87	6,87	14,16	13,79	9,68	7,66	9,04	9,73
L55	7,02	7,96	13,21	14,06	8,57	6,67	7,35	9,26
L56	7,68	12,09	14,74	14,29	10,99	7,93	12,50	11,46
L57	8,66	8,52	16,55	14,21	10,65	8,41	11,93	11,28

Quadro A3.2 - Dano médio (\bar{S}) medido ao longo da série de ensaios B

Levantamento	Dano (S)							\bar{S}
	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	
L1	0,00	0,74	1,58	0,26	1,15	0,85	0,33	0,82
L2	0,00	0,23	0,79	0,37	2,29	0,36	0,24	0,72
L3	0,00	0,39	0,95	0,19	2,09	0,35	0,21	0,70
L4	0,00	0,49	-0,80	1,12	2,53	1,80	2,87	1,33
L5	0,00	0,48	1,09	1,27	1,81	1,02	0,46	1,02
L6	0,00	2,37	1,46	1,13	1,56	1,04	0,43	1,33
L7	0,00	2,25	1,22	0,88	1,64	1,02	0,46	1,25
L8	1,16	2,27	0,37	0,51	1,14	0,97	0,72	1,02
L9	1,17	2,26	0,37	0,39	1,20	0,75	0,77	0,99
L10	1,11	1,67	2,42	1,48	2,26	2,36	2,27	1,94
L11	0,33	1,26	2,17	0,79	1,49	1,22	1,36	1,23
L12	0,33	1,78	3,15	1,91	1,34	3,18	0,93	1,80
L13	0,34	3,84	2,77	0,66	1,78	3,02	0,85	1,89
L14	1,47	2,74	0,76	1,78	1,66	2,98	0,96	1,76
L15	0,31	2,53	1,28	2,52	1,43	2,40	1,12	1,66
L16	0,31	2,35	1,57	2,52	1,25	2,49	1,11	1,66
L17	1,22	3,53	3,05	3,28	1,44	3,31	2,06	2,56

Quadro A3.3 - Dano médio (\bar{S}) medido ao longo da série de ensaios C

Levantamento	Dano (S)							\bar{S}
	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	
L1	0,97	1,07	1,75	0,47	1,85	2,60	1,27	1,43
L2	0,81	0,63	0,81	0,38	1,63	3,39	3,64	1,61
L3	0,80	4,12	1,53	1,13	0,84	1,91	3,37	1,96
L4	20,00	28,18	17,92	14,16	14,52	9,00	11,79	16,51
L5	18,22	29,11	17,50	14,12	15,10	15,02	12,96	17,43
L6	18,74	21,68	17,97	13,08	11,66	7,55	12,32	14,72
L7	20,08	19,07	20,17	12,57	13,96	11,25	13,24	15,76
L8	18,65	15,79	15,68	9,61	17,54	9,27	15,01	14,51
L9	15,74	15,53	14,65	13,85	16,53	13,30	13,43	14,72
L10	21,77	15,85	18,24	14,97	17,62	14,41	18,32	17,31
L11	23,64	20,62	21,66	19,75	17,30	11,06	18,51	18,93
L12	21,31	20,62	18,17	15,28	14,75	15,53	16,37	17,43
L13	18,57	15,77	20,79	15,49	13,07	14,83	17,96	16,64
L14	18,81	18,72	22,21	16,29	11,68	11,10	14,92	16,25
L15	20,46	17,13	19,60	14,96	14,82	9,95	16,89	16,26
L16	19,95	18,82	20,61	16,35	14,28	13,57	15,99	17,08
L17	20,40	20,27	21,50	16,57	18,38	12,54	15,74	17,92
L18	18,73	17,65	21,77	14,80	15,55	11,43	15,40	16,48

ANEXO 4
FOTOGRAFIAS

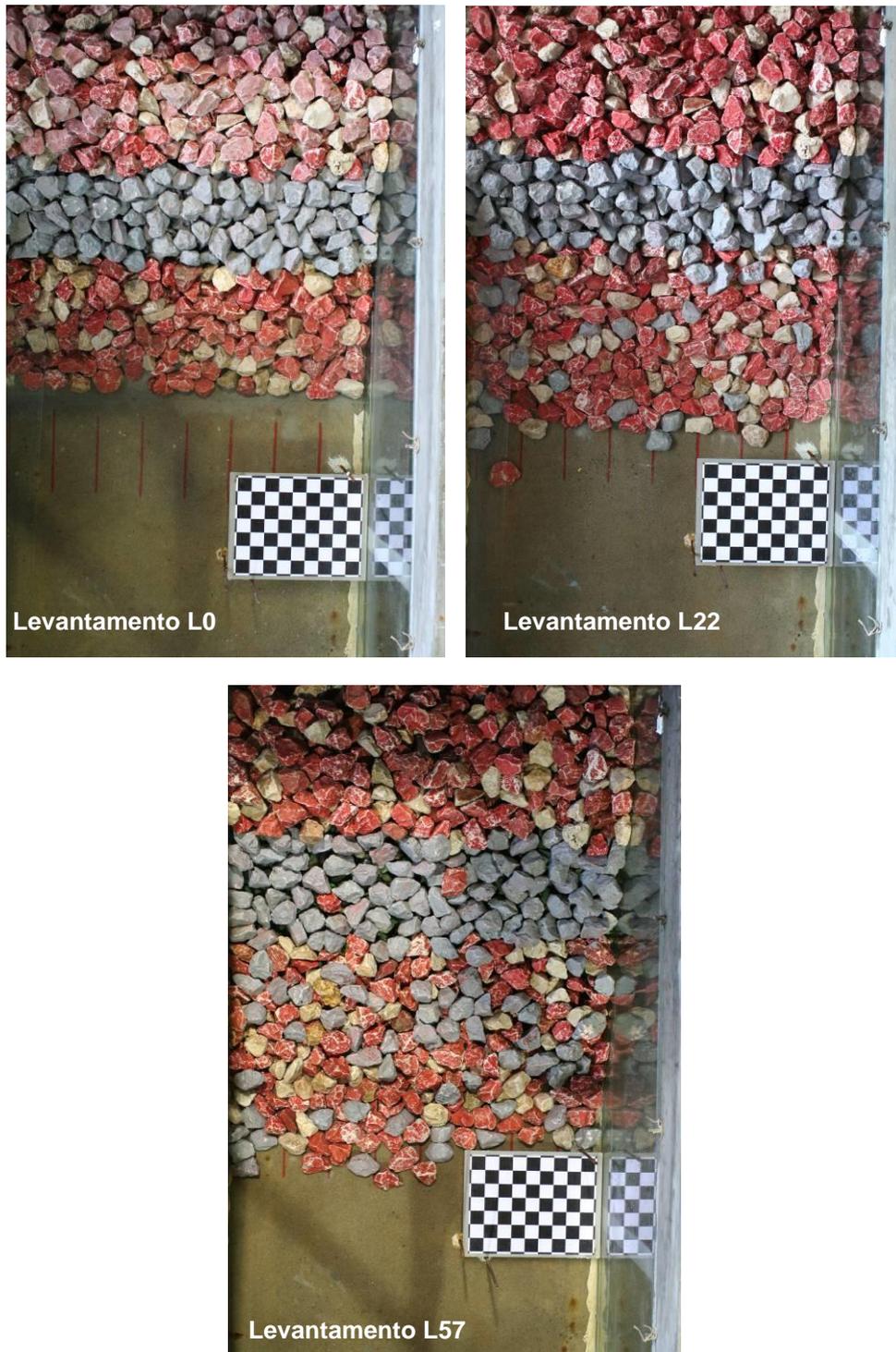


Figura A4.1 - Série de ensaios A. Aspecto do talude do quebra-mar no início, a meio e no final da série de ensaios respectivamente



Figura A4.2 - Série de ensaios B. Aspecto do talude do quebra-mar no início e no final da série de ensaios respectivamente



Figura A4.3 - Série de ensaios C. Aspecto do talude do quebra-mar no início e no final da série de ensaios respectivamente