ANÁLISE EM MODELO FÍSICO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE UM MANTO RESISTENTE CONSTITUÍDO POR UMA CAMADA DE BLOCOS CÚBICOS Physical Modeling of the Hydraulic Behaviour of an Armour Layer with a Single Layer of Cubic Blocks

LILIANA ALMEIDA (1), FRANCISCO TAVEIRA-PINTO (2) e LUCÍLIA LUÍS (3)

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia Civil, FEUP, Rua do Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal, liliana_almeida9@hotmail.com ⁽²⁾ Professor Catedrático, FEUP, Rua do Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal, fpinto@fe.up.pt ⁽³⁾ Consulmar, Av. António Augusto de Aguiar, 19-2° Esq., 1050 – 012 Lisboa, Portugal, lucilia.luis@consulmar.pt

Resumo

O presente trabalho visa a análise do comportamento de quebramares de taludes com mantos resistentes constituídos por uma única camada de blocos cúbicos. Pretendeu-se, através de um conjunto de testes com um modelo avaliar a estabilidade do manto resistente, como também adquirir conhecimentos que permitam, após esta fase preliminar desenvolver outros estudos mais avançados.

Deste modo, foi analisado não só o comportamento geral do manto, bem como a influência da densidade de colocação dos blocos, a dimensão do material do filtro, a declividade das ondas e a profundidade da água junto ao pé da estrutura. Neste artigo serão apresentados e discutidos alguns resultados do estudo em modelo físico permitindo compreender melhor a evolução dos danos no manto resistente de camada única de cubos e qual a sua origem

Palavras-chave: Quebramares de taludes, camada única, cubos.

Abstract

This work intends to analyze the behavior of rubble mound breakwaters with an armour layer with a single layer of cubic blocks. It was intended, through a series of model tests, to evaluate the stability of the armour layer, as well as acquire knowledge which will later, enabling the development of more advanced studies.

Thus it was analyzed not only the general behavior, but the influence of the density of placement of the blocks, the size of the filter material, the wave steepness and the water depth at the toe of the structure as well. This paper will present and discuss some results of the study on the physical model allowing a better understanding on the damage evolution armour layer with a single layer of cubes and its origin.

Keywords: Rubble mound breakwaters, single layer, blocks.

1. Introdução

Os quebramares são estruturas de proteção que, tal como qualquer outra estrutura, têm limites de resistência, não sendo projetados para resistirem sem estragos a todas as ações, às quais estão sujeitos ao longo da vida útil.

Um quebramar que resistisse a todas as ações previstas ao longo do seu período de vida útil sem quaisquer estragos teria dimensões e custos incomportáveis.

A redução dos custos relativamente ao esquema tradicional de camada dupla tem sido o foco do interesse pelo estudo de quebramares de taludes de mantos resistentes de camada única.

As vantagens dos mantos de proteção de camada única quer económicas, quer técnicas, têm contribuído para a prática comum deste tipo de mantos. Essa redução de custos pode ser também conseguida através da utilização de blocos mais simples, como os cubos. Assim sendo, o presente trabalho pretende, com base em testes realizados com mantos resistentes com cubos, estudar o seu comportamento geral, nomeadamente no que concerne à influência da densidade de colocação dos blocos, à dimensão do material do filtro, à declividade da onda e à profundidade da água junto ao pé da estrutura.

Pretendia-se também reproduzir e validar os ensaios realizados por Van Gent (1998) e, de certa forma, avaliar o comportamento do quebramar, principalmente o desempenho do manto resistente (Van Gent *et al.*, 1998).

2. Instalação Experimental

O trabalho experimental realizou-se no Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O tanque de ondas tem 28.0 m de comprimento, por 12.0 m de largura, e 1.2 m de profundidade. O sistema de geração de ondas é composto por 16 módulos individuais com batedores do tipo pistão, modelo HR Wallingford, permitindo gerar agitação regular e irregular.

O modelo físico foi construído num canal com cerca de 75 cm de largura, correspondendo também à largura de uma das pás do sistema de geração.

O modelo do quebramar foi construído à escala 1:30, tendo em consideração a dimensão do tanque de ondas e as limitações do equipamento de geração. A Figura 1 apresenta a secção transversal considerada do modelo usado no canal cujo perfil longitudinal se apresenta na Figura 2.



Figura 1. Secção transversal do modelo, à escala 1:30.

As batimétricas do modelo foram construídas com uma altura máxima de 0.318 m junto ao pé da estrutura, estendendo-se ao longo de 9.55 m de comprimento com uma inclinação de 1:30, terminando a 1.80 m dos batedores. Os fundos foram materializados com brita de dimensões entre os 10 e os 20 mm.

Os taludes do quebramar foram construídos com uma inclinação de 2:3, e a profundidade da água considerada variava entre d=0.6 m e d=0.8 m.

As Figuras 3 e 4 representam, respetivamente, o enchimento da primeira e segunda camada do modelo e a regularização dos fundos.



Figura 3. Enchimento da primeira e segunda camada (núcleo e submanto/filtro).



Figura 4. Regularização dos fundos com uma camada fina de argamassa, de forma a diminuir o atrito de fundo (esquerda) e colocação dos cubos (direita).

3. Equipamento de Medição

Para controlo e medição das condições de ensaio foram utilizados dois tipos de equipamentos, sondas hidrodinâmicas e câmaras de vídeo, Figura 5. Para controlo das condições de agitação foram colocadas 6 sondas hidrodinâmicas a barlamar da estrutura para registo da agitação incidente e determinação dos coeficientes de reflexão. As sondas foram colocadas na proximidade do batedor, a meia distância entre o batedor e a estrutura, próximo da estrutura junto ao pé da mesma e no meio do tanque de ondas para efetuar medições da agitação na ausência da estrutura.



Legenda:

So - Posição da sonda junto ao pé da estrutura; S1 - Quarta sonda para a análise a reflexão; S2 - Terceira sonda para a analise a reflexão; S3 - Segunda sonda para a analise a reflexão; S4 - Primeira sonda para a análise a reflexão (localiza-se a meio do canal); S5 - Posição da sonda, proxima dos batedores e no inicio dos fundos do modelo

Figura 2. Planta (superior) e secção longitudinal (inferior) do canal com a localização do modelo e das sondas utilizadas.



Figura 5. Sondas hidrodinâmicas (esquerda) e câmaras de vídeo (direita).

De referir que as quatro sondas colocadas a meia distância foram utilizadas para determinar o coeficiente de reflexão. O espaçamento considerado entre as mesmas está indicado no Quadro 1.

Quadro 1. Espaçamento recomendado entra as quatro sondas necessárias para a análise da reflexão.

Distância à primeira	1ª	2ª	3ª	4ª	
sonda (m)	Sonda	Sonda	Sonda	Sonda	
Valores no modelo	0	0.283	0.553	1.9	

Foi utilizada uma câmara GigE ethernet (UI 5220 µeye – 0.8 Megapixéis - Mpx) com capacidade de registo até 90 fotogramas por segundo (fps), para analisar o escoamento durante os ensaios e registar o movimento das partículas para a aplicação do PIV (*Particle Image Velocimetry*).

Em sistemas tradicionais de PIV (*Particle Image Velocimetry*) e PTV (*Particle Tracking Velocimetry*) é utilizada uma fonte de luz para iluminação da área de interesse.

Nestes ensaios foi testada uma abordagem distinta recorrendo a focos de halogéneo convencionais, mais económicos e com um número reduzido de pré-requisitos.

Quadro 2. Programa de ensaios previsto e ensaiado (Van Gent, 1998).

4. Características do Modelo e Programa de Ensaios

4.1. Materiais

As principais características do modelo 2D são: Manto em cubos com D(aresta do cubo)=0,036 m, M=0.110 kg, ρ_{betao} =2433 kg/m³ e densidade relativa, Δ =1.43, densidade (n) de colocação de acordo com o indicado no Quadro 2, submanto com peso proporcional ao do manto, de acordo com o indicado no Quadro 3, com D_{n50}=0.019 m; 0.015 e 0.010 m e relações de D_{n85}/D_{n15}=1.77, 1.86 e 2.1, respetivamente, núcleo em material fino com D_{n50}=0.01m, inclinação dos taludes de 2:3.

4.2. Instalação de ensaio

As principais características dos ensaios são: escala geométrica de 1:30, distância do batedor à estrutura igual a 20 m, profundidade de água junto ao batedor h_0 = 0,6 m e h=0,8 m, profundidade junto ao pé da estrutura h_{toe} =0.3 m, 0.43 e 0.5 m, espectro de Jonswap, colocação de sondas na proximidade do batedor, a meia distância entre o batedor e a estrutura, próximo da estrutura e no pé da estrutura para os ensaios de agitação feitos na ausência desta. Os resultados dos testes são apresentados com base nas alturas de onda medidas no pé da estrutura, mas obtidas na ausência desta.

4.3. Condições de ensaio

As alturas de onda foram gradualmente incrementadas até ocorrerem estragos. Os períodos foram alterados de forma a manter a declividade constante, de acordo com o indicado no Quadro 2. Para cada condição de ensaio o modelo foi ensaiado com 1000 ondas. Se não se registassem estragos, a altura de onda era aumentada e eram aplicadas +1000 e assim sucessivamente. Quando se começassem a registar estragos após cada série de 1000 ondas, o teste continuava até às 3000.

Programa de Ensaios								
Séries	Porosidade (n)	Filtro	Declividade (Som)	Nível de Água (h _{pé da estrutura}) (m)	Bordo Livre Adimensional (R₄/D)			
А	0,25	1/10 - 1/5	0,05	0,30	5,2			
В	0,30	1/10 - 1/5	0,03; 0,05; 0,06	0,30	5,2			
С	0,40	1/10 - 1/5	0,03; 0,05	0,30	5,2			
D	0,25	1/20 - 1/10	0,05	0,30	5,2			
Е	0,3	1/20 - 1/10	0,05	0,30	5,2			
F	0,25	1/50	0,05	0,30	5,2			
G	0,3	1/50	0,05	0,30	5,2			
Н	0,25	1/20 - 1/10	0,05	0,43	2,1			
I	0,3	1/20 - 1/10	0,03; 0,05; 0,06	0,30	11,1			
J	0,25	1/20 - 1/10	0,05	0,50	5,2			
К	0,3	1/20 - 1/10	0,03; 0,05; 0,06	0,50	5,2			
Legenda:	Ensaio eliminado	Ensaio realizado	Ensaio alterado					

L. Almeida, F. Taveira Pinto e L. Luís

Dimensões do Material								
	Filtro	1/10 - 1/5	1/20 - 1/10	1/50				
Pretendido	D _{n50} (m) 0,019		0,015	0,01				
	D _{n85} / D _{n15}	1,77	1,86	2,1				
	Agregado utilizado	Agregado 16-22	Agregado 5-16	Brita 6-14				
	D_{n50} (m)	0,0198	0,0136	0,0100				
Utilizado	D _{n85} / D _{n15}	1,3	1,66	1,59				
	$D_{n15}(m)$	0,0160	0,0096	0,0079				
	D _{n85} (m)	0,0223	0,0159	0,0126				

4.4. Objetivos dos ensaios

Com os ensaios previstos, Quadro 2, pretendia-se perceber a influência: da densidade de colocação dos blocos; da dimensão do filtro/submanto; da declividade da onda; da profundidade junto ao pé da estrutura e da cota do coroamento. No entanto, no programa de ensaios inicialmente previsto, nem todos os ensaios foram realizados devido a limitações de tempo e de instalações.

Para uma melhor análise da estabilidade do manto resistente, pintaram-se metade dos cubos necessários, para que, depois de colocados em fiadas intercalares, fosse possível ter uma melhor perceção do deslocamento dos mesmos com a rebentação das ondas no talude.

De acordo com os testes previstos (Van Gent, 1998) as densidades de colocação a utilizar seriam de n=0.25; 0.3 e 0.4. De referir que na construção do manto resistente do modelo, para a porosidade de 0.4 havia alguma dificuldade em apoiar os cubos no filtro de D_n =0.019 m.

Deste modo, e, face ao tempo limitado, eliminaram-se do programa de ensaios todas as séries de testes para a porosidade n=0.4 e filtro D_n =0.019 m.

O facto de existir uma certa dificuldade na colocação dos blocos levou a crer que provavelmente o manto resistente para estas condições de ensaio não estaria estável. Inicialmente seriam utilizados três filtros diferentes com pesos proporcionais ao manto de 1/10-1/5; 1/20-1/10 e 1/50 com $D_{n50}=0.019$ m; 0.015 m e 0.010 m e relações de $D_{n85}/D_{n15}=1.77$; 1.86 e 2.1, respetivamente.

No entanto como já foi referido, os testes com o filtro com D_{n50} =0.019 m não foram realizados pelas razões já citadas. Além disso, não foi possível encontrar materiais com as características exatas pretendidas. Assim sendo, foram utilizados agregados com D_{n50} =0.020m; 0.014m e 0.010m e relações de $D_{n85}/Dn15$ =1.39; 1.66 e 1.59 (Quadro 3). O núcleo foi materializado com o mesmo material do filtro, ou seja com D_{n50} =0.010 m.

Durante a série de testes, o período e a altura da onda foram alterados em função das profundidades de água, mantendo a declividade da onda constante. As profundidades de água utilizadas durante os ensaios foram de d=0.8m e d=0.6m. Segundo o programa de testes estava previsto considerar também a profundidade de água de 0.73 m, no entanto, por falta de tempo, tal não foi possível. Contudo, para as profundidades de água em estudo foi possível realizar ensaios para as três declividades de onda (som=0.03; 0.05 e 0.06). As alturas e os períodos de onda foram definidos tendo em conta os limites de rebentação das ondas e o potencial do sistema de geração, bem como o facto de ser necessário manter a declividade das ondas constante. Foram atribuídas várias alturas de onda e vários períodos de modo a cumprir todas as limitações acima descritas e obter as declividades pretendidas. O período da onda no modelo foi determinado de acordo com a semelhança de Froude e a escala dos tempos que resulta em

$$T_{\rm p} = T_{\rm m} \sqrt{N_{\rm l}}$$
^[1]

em que T_p representa o período no protótipo, T_m o período no modelo e N_1 a escala geométrica.

Cada série de testes foi realizada para alturas de onda crescentes até que ocorressem estragos, como foi anteriormente referido.

5. Critérios de Avaliação dos Resultados

5.1. Análise da reflexão

De forma a analisar a reflexão, o *software* de aquisição e análise dos registos dos dados da agitação marítima (*HR DAQ*) necessita que sejam utilizadas quatro sondas de níveis hidrodinâmicos. Ou seja, o método utilizado pelo *software* acima referido possibilita uma análise da reflexão através do conhecimento de registos da elevação da superfície livre, obtidos em quatro sondas.

Desta forma, a localização das sondas é essencial, sendo que o *software* em questão impõe que estas se localizem a profundidades constantes (isto é, fundos horizontais), fora da zona de rebentação e ainda afastadas da estrutura refletora de uma certa distância. O espaçamento entre sondas é definido tendo por base as condições de agitação a testar, já referidas no Quadro 1. O módulo de análise da reflexão é constituído por duas rotinas, uma destinada à determinação do espaçamento entre as quatro sondas de níveis hidrodinâmicos e a outra à análise das condições de reflexão.

A primeira permite definir o espaçamento entre sondas, que consiste em determinar o intervalo de frequências válidas para uma dada configuração do conjunto, através de um processo iterativo, em que são testados sucessivos espaçamentos entre as quatro sondas até se encontrar o intervalo de frequências válidas pretendido (Santos, 2010). Ou seja, para cada um dos estados de agitação irregular que se pretendem reproduzir no modelo, foram determinados os espaçamentos para as 4 sondas, que permitiam garantir que, para cada um deles, os respetivos limites espectrais (0.5 f_p e 2.0 f_p) estavam dentro das frequências válidas.

No entanto, ainda no que diz respeito à localização das quatro sondas, não existem referências objetivas relativamente à distância entre a sonda que se encontra mais próxima da estrutura e a mesma, existindo apenas certas referências na bibliografia de que devem estar afastadas de fronteiras refletoras e da zona de rebentação. Ou seja, aconselha-se a colocar a primeira sonda a uma distância de um comprimento de onda da estrutura.

Os resultados da aplicação da rotina de análise da reflexão são os espectros de variância da agitação incidente e refletida, e o coeficiente de reflexão para as frequências compreendidas no intervalo de frequências válidas. É também determinado o coeficiente de reflexão global, que resulta do quociente entre a altura de onda significativa refletida e incidente (Santos, 2010).

Na análise à reflexão há que ter em conta que o coeficiente de reflexão depende das características do quebramar e da agitação incidente.

Em regra, a capacidade refletora depende da porosidade da superfície de incidência, da inclinação e da rugosidade. Quanto menor a capacidade de dissipação e de transmissão de energia da onda maior a refletividade do quebramar, logo maior o coeficiente de reflexão. A declividade da onda também é um fator determinante para o grau de reflexão.

5.2. Análise da estabilidade

- deslocamento /movimento dos cubos

Nos mantos resistentes de camada única podem ocorrer dois modos de rotura: movimento de um ou mais blocos do manto resistente e rotura do manto resistente.

Os blocos danificados podem perder a sua função devido à redução da força gravitacional e o possível efeito de bloqueio ou imbricamento. Os blocos deslocados, com o impacto das ondas podem servir de projeteis e danificar os blocos vizinhos.

O deslocamento/movimento dos blocos pode ser dividido em: nenhum movimento, balanço (movimento acidental; movimento regular; movimento contínuo), deslocamento dos blocos de camada única a partir da posição inicial, entre 0.5D e 1.0D, deslocamentos superiores a 1.0D (o bloco é considerado como removido do manto resistente), deslizamento de vários blocos com assentamento de todo ou parte do manto resistente (Bucharth, 1993, referido por Consultants, 2010). Nestes testes foram usadas as seguintes definições para caracterizar os danos: balanço - movimento contínuo e regular dos blocos do manto resistente; início de danos deslocamento de um bloco do manto resistente (uma unidade de proteção removida); rotura - deslocamento de mais de 5 blocos do manto resistente.

O deslocamento de um bloco de proteção é caracterizado como início de dano. Em torno do espaço deixado pelos blocos deslocados ocorrem assentamentos e não ocorrem danos adicionais nesses locais. No entanto esses assentamentos levam a uma fratura do manto resistente na transição do talude para o coroamento. Existem duas maneiras de apresentar o número de blocos de proteção deslocados, para número de danos N_d e N_{od}. N_d representa o número de unidades deslocadas em percentagem do número total de unidades dentro de uma área de referência. Van der Meer (1993) usa uma definição diferente de dano, N_{od}, considerando que o dano é o número de unidades deslocadas para fora do manto resistente dentro de uma faixa com uma largura igual ao diâmetro nominal, ou seja,

$$N_{\rm od} = \frac{N \acute{u}mero\ de\ blocos\ deslocados}{Largura\ do\ manto\ resistente/D_n}$$
[2]

Importa referir que o número de unidades deslocadas para fora do manto foi o critério considerado no presente trabalho. CIRIA C683 (2006), tal como Van der Meer (1993), caracteriza o número de danos, N_{od} , como sendo o número de unidades deslocadas dentro de uma faixa com largura igual ao diâmetro nominal, não especificando a grandeza do deslocamento do bloco. Deste modo, torna-se difícil perceber quando é que um bloco é considerado como removido. Contudo, existem outras referências, CEM (2006), Burcharth (1993), entre outras, que especificam que um bloco é considerado removido quando o mesmo se desloca da sua posição inicial uma distância mínima determinada, por exemplo D_n ou h, em que h representa o comprimento (altura) da unidade.

Assim, e dadas as dificuldades na análise do deslocamento dos blocos, uma vez que não se possuía equipamento especifico capaz de detetar e contabilizar os deslocamentos dos mesmos, considerou-se que um bloco seria considerado como removido se o mesmo atingisse o pé do talude. No presente trabalho, esses blocos serão representados através do número de blocos removido "N_{or}", ou seja,

$$N_{\rm or} = \frac{N \acute{u}mero\ de\ blocos\ removidos}{Largura\ do\ manto\ resistente/D_{\rm n}}$$
[3]

Em contrapartida, todos os deslocamentos relativos entre blocos no talude do modelo seriam considerados como blocos que, de alguma forma, sofreram movimento/deslocamento, mas que, no entanto, não foram removidos do manto resistente.

Por isso esses movimentos serão representados pelo número de blocos deslocados " N_{od} " (equação 2) sendo a largura do canal de ondas utilizada como a largura do manto resistente.

O dano após cada ensaio é determinado através de fotografias obtidas através de uma posição fixa. Foi também utilizada uma câmara de vídeo para acompanhar os testes.

6. Análise dos Resultados

6.1. Desempenho do manto resistente

A análise do desempenho do manto resistente foi efetuada com base nos deslocamentos dos blocos no talude do quebramar.

De referir que os testes foram realizados de modo a simularem uma tempestade, ou seja, os danos dentro da mesma série de ensaios são cumulativos.

Os resultados foram apresentados através de curvas de dano que mostravam o comportamento do manto resistente com a altura de onda.

Em cada gráfico está indicado qual o ensaio para o qual se verificou o início do dano (pelo menos um bloco é removido do manto resistente) e a rotura da estrutura (pelo menos 5 blocos são removidos do manto resistente).

A título de exemplo, na Figura 6 estão representadas as curvas de danos para a análise da influência do material do filtro no quebramar de taludes com as seguintes características (s_{om} =0.05, n=0.3, R_c/D =5.2, $h_{pé}$ da estrutura=0.3 m).



Figura 6. Influência do material do filtro (som=0.05, n=0.3, R_c/D =5.2, h_{pc} da estrutura=0.3 m).

No presente trabalho através de fotografias foi analisado como variavam os danos ao longo dos ensaios, tendo sido possível visualizar a "rotura completa/destruição" do quebramar.

A título de exemplo as Figuras 7 e 8 mostram a evolução dos danos para as condições de ensaio da Série D, na qual se visualizou a "rotura completa/destruição" do quebramar.



Figura 7. Imagens de danos verificados para as condições de teste da série D (n=0.3; filtro 1/50; s_{om} = 0.05; $h_{pé da estrutura}$ = 0.3 m), para H_s=3m, esquerda, e H_s=3,5m, direita.



Figura 8. Imagens de danos verificados para as condições de teste da série D (n=0.3; filtro 1/50; s_{om} = 0.05; $h_{pé \ da \ estrutura} = 0.3 m$), para H_s=4,5m, esquerda, e H_s=6m, direita.

De referir que o facto da rotura/destruição do quebramar se ter verificado junto ao vidro da janela de visualização, pode também estar associada às características do mesmo, uma vez que a rugosidade do vidro é praticamente nula, o que juntamente com as forças de arrastamento, impulsos verticais e pressões negativas sobre o revestimento do talude geradas pelo refluxo e espraiamento levam a uma maior instabilidade dos blocos e por conseguinte maiores deslocamentos dos mesmos pois não existe atrito com os blocos adjacentes.

6.1.1. Desempenho dos cubos no coroamento

6.1.1.1. Blocos deslocados

No coroamento observou-se que os blocos, por ação das forças associadas aos galgamentos, tendiam a movimentarse na direção de propagação das ondas. Os blocos eram solicitados por forças que variavam em grandeza mas não em direção. Observaram-se alguns movimentos dos blocos no coroamento do quebramar até que os mesmos encontrassem uma posição mais estável. De referir que os movimentos dos blocos no coroamento ocorreram com blocos que tinham alguma liberdade para se movimentar na direção de propagação da onda. Durante o galgamento os blocos têm a tendência para se movimentar na direção da onda até que o seu movimento é limitado por elementos adjacentes. Quando a onda que origina o galgamento sofre a ação do refluxo os blocos voltam à sua posição inicial. A maior parte dos blocos que sofrem maiores movimentos devido à força das ondas encontravam-se nas filas exteriores do coroamento. A força exercida sobre os blocos nestas filas aumenta com o galgamento, e portanto o derrube dos mesmos também.

No caso do modelo do quebramar mais submergido (série F com h=0.8m), as unidades que inicialmente estavam estática e dinamicamente estáveis ao longo dos ensaios iam-se movimentando, pois existia sempre um fluxo de água oscilante. Neste caso os blocos não conseguiam encontrar uma posição estável, em função da carga oscilante.

O movimento dos blocos estava principalmente concentrado nas linhas que faziam a ligação entre o coroamento e o talude, uma vez que era nesta zona que o fluxo de água em direção ao largo sobre o coroamento é máximo. Além disso devido aos assentamentos a densidade de colocação dos blocos aumenta, existe a perda de imbricamento entre blocos e deste modo um aumento dos deslocamentos entre os mesmos, principalmente na transição entre o coroamento e o talude. O deslocamento dos blocos é observado muito antes de ocorrer o início de danos e a rotura. No momento da rotura, no caso do quebramar mais submergido, para a máxima altura de onda, todos os blocos sofreram deslocamentos, chegando a ser removidos do manto resistente.

6.1.1.2. Blocos removidos

O número de blocos removidos do coroamento foi analisado para alturas de onda significativas em protótipo de 6 m para declividades de onda de 0.05. Só se verificaram remoções de blocos do coroamento em dois testes (um da série D, Figura 8, e outro da série F). Os blocos foram removidos para profundidades de água diferentes e para quebramares com constituições diferentes. No entanto, para ambos, foi removido um número significativo de blocos (12 para profundidades de água menores e 70 para profundidades de água maiores). Os blocos removidos encontravam-se na transição entre o coroamento e o talude para o caso de menores profundidades de água. Para maiores profundidades de água, o coroamento foi completamente removido, no entanto, tal como no caso anterior o início da remoção dos blocos teve origem na zona de transição entre o coroamento e o quebramar. Como consequência de assentamentos verificados na fila de transição entre o coroamento e o talude, a estabilidade do coroamento diminui, pois essa zona fica mais exposta ao ataque das ondas. Além disso, o aumento do espaçamento entre blocos conduz a uma diminuição do imbricamento entre blocos e, deste modo, aumenta a instabilidade dos mesmos.

No teste realizado para pequenas profundidades de água, a remoção de blocos do coroamento foi provocada pela remoção dos blocos do talude, que com a força das ondas arrastaram os blocos adjacentes. No caso do teste para maiores profundidades de água a progressão do dano foi rápida e com algumas ondas de altura máxima, grande parte do coroamento foi removido. Por vezes, um bloco é removido da sua posição inicial por ação da rebentação de ondas incidentes e pelas forças de arrastamento que atuam sobre os blocos devido ao fluxo de água sobre o coroamento.

6.1.2. Desempenho dos cubos no talude

6.1.2.1 Blocos deslocados

De um modo geral, observa-se deslocamento de blocos para cada série de testes, a partir de alturas de onda significativas de 4.5m. No entanto em alguns testes o início dos deslocamentos só se verificou para alturas de onda iguais ou superiores a 3 m e a 5.5 m. A maior parte dos deslocamentos dos blocos é observado para as filas superiores do talude, sendo as 5 primeiras filas da parte superior do talude as mais afetadas. Além disso, ondas com declividades de 0.05 apresentam mais deslocamentos de blocos em filas inferiores às 5 primeiras já referidas, do que ondas com declividades de 0.03 e 0.06. À medida que se aumenta a altura de onda, o numero de blocos deslocados também aumenta. No momento do deslocamento de vários blocos do manto resistente, os blocos que se encontram nas filas superiores do talude deslocam-se de forma continua e são parcialmente levantados com a rebentação de ondas com alturas máximas ou próximas desta.

Devido às diferentes velocidades do fluxo de água, no caso do talude do quebramar se encontrar "submerso", o número de blocos deslocados no talude é diferente do observado para um talude "não submerso". Esta diferença deve-se, em parte, ao fato do manto resistente abaixo do nível médio da água se tornar mais compacto do que acima do mesmo. O facto da energia das ondas estar concentrada em torno do nível da água, conduz a um maior número de deslocamentos de blocos nessa zona do talude (zona ativa), no caso de quebramares não submersos ou em zonas do coroamento, no caso de quebramares submersos (Figura 9).



Figura 9. Deslocamentos dos blocos num quebramar "não submerso" (esquerda) e num quebramar "submerso" (direita).

6.1.2.2. Blocos removidos

Apenas em algumas séries de testes é que se verifica a remoção de alguns blocos do manto resistente. A remoção dos primeiros blocos ocorre para alturas de onda significativas de 6 m e para declividades de onda de 0.05 (teste 004 das série B, D e F). Para as restantes declividades de onda não foram removidos blocos do manto resistente. A rotura parcial e total do quebramar ocorreram para as séries de teste D e F. De referir que enquanto que a rotura na série D teve origem no talude do quebramar, na série F teve origem no coroamento. Isto acontece para diferentes profundidades de água. A maioria dos blocos removidos encontrava-se posicionada em zonas de maior ataque das ondas.

Após os primeiros blocos serem removidos, os blocos adjacentes começam a mover-se mais facilmente e também acabam por ser removidos. Na série F, o deslocamento dos blocos do talude estava correlacionado com o deslocamento dos blocos do coroamento. Se alguns dos blocos do coroamento fossem removidos, os blocos das filas superiores do talude eram mais facilmente removidos e vice-versa.

A estabilidade hidráulica dos blocos posicionados no talude do quebramar diminuiu devido aos assentamentos em combinação com a ação das ondas. No momento em que os blocos se encontram em movimento continuo, a incidência de uma onda em combinação com um posicionamento desfavorável do bloco, leva à remoção do bloco do manto resistente. O mesmo acontece no caso do deslocamento de blocos do coroamento, onde a ação das forças de impacto e de arrastamento sobre blocos mal posicionados conduz à remoção dos mesmos. De um modo geral quando as ondas incidem e rebentam no talude de uma estrutura, a massa de água que cai sobre o talude induz subpressões dentro do mesmo e reduz o peso efetivo dos blocos, criando-se assim determinados mecanismos que através do caracter aleatório e dinâmico das ações das ondas conduzem a estrutura à rotura.

Deste modo, durante os ensaios observaram-se três dos mecanismos de rotura propostos por Burcharth, ou seja observou-se o rolamento e consequente deslocamento dos blocos no talude durante o refluxo e o espraiamento, bem como o deslizamento de vários blocos durante o refluxo.

6.1.3. Análise dos blocos deslocados e removidos do manto resistente

O desempenho dos cubos no manto resistente é descrito com base no balanço dos cubos, ou seja, deslocamentos relativos entre blocos no manto resistente: Início do dano, pelo menos um bloco é removido do manto resistente; Rotura, mais de 5 blocos são removidos do manto resistente.

Para todos os testes indicados no programa de ensaios, foram analisados gráficos para cada um dos objetivos em análise, que representam o número de blocos que balançaram dentro do manto em função do número de estabilidade.

O balanço das unidades de proteção leva a uma diminuição significativa das capacidades de bloqueio entre blocos e consequentemente à rotura do manto resistente. Balançar nestes testes é definido como o movimento contínuo e regular de uma ou mais unidades.

É considerada como uma forma de instabilidade pois as unidades não são dinamicamente estáveis, deslocam-se da sua posição inicial. Quanto maior o número de cubos que se deslocam da posição inicial (balanço), menos estável é o manto resistente.

Para a quantificação do número de elementos que sofreram balanço, é usado o mesmo princípio que para a quantificação de elementos deslocados/removidos.

Cada unidade de proteção movida da sua posição inicial é registada visivelmente até perfazer um total de cerca de 20 unidades, embora registos mais elevados também estejam presentes.

O dano é o número de unidades de proteção que se moveram da posição inicial no manto resistente numa faixa com a largura do diâmetro nominal (D_n). Isto significa que um balanço de uma unidade de proteção origina o mesmo número de N_{od} para o quebramar total. Através de gráficos com os resultados dos testes para as diferentes séries de testes foi possível comparar o índice de danos para as diferentes condições de teste. Nesses gráficos é referido o número de unidades removidas para enfatizar que o balanço/deslocamento entre cubos é um mecanismo que atua antes de ocorrer o início do dano e a rotura.

No presente trabalho os gráficos apresentados retratam os resultados obtidos para cerca de 20 unidades deslocadas da sua posição inicial, de modo a facilitar a comparação com os resultados obtidos por Van Gent (1998). No entanto, foi realizada uma análise geral de todos os resultados obtidos.

6.1.4. Comparação dos resultados com os de Van Gent (1998)

Comparando os resultados aqui apresentados com os testes realizados por Van Gent (1998) verifica-se que existem algumas diferenças.

Os resultados de Van Gent ilustravam que a rotura do manto acontecia para números de estabilidade entre 3 a 3.5 enquanto que no presente trabalho esses valores variavam entre 3.5 a 4.

Estas diferenças indicam que os testes realizados neste trabalho levaram o manto resistente à rotura para alturas de onda maiores do que as testadas por Van Gent. Estas podem estar relacionadas com a construção do modelo (materiais utilizados, geometria dos cubos, maior rigor na densidade de colocação dos cubos), bem como nos testes realizados para cada série de testes (as alturas de onda e períodos utilizados neste trabalho podem ter sido diferentes).

Embora os resultados em termos de N_{od}/N_{or} e N_s tenham sido um pouco diferentes dos obtidos por Van Gent, no que respeita ao comportamento do manto influenciado pela densidade de colocação dos blocos, dimensão do filtro, declividade da onda e profundidade da água junto ao pé da estrutura, este comporta-se de um modo semelhante.

Os níveis de dano foram alcançados para N_{or} superiores a 0.2 o que correspondia a N_{od} superiores a 4. Na maioria dos testes é visível um claro mecanismo de rotura súbita em vez de gradual.

Apesar dos deslocamentos dos blocos ao longo dos ensaios acontecerem de forma gradual, tal não se verifica após o início de danos uma vez que se atinge a rotura da estrutura repentinamente.

Isto foi bem visível nos ensaios com um nível de água mais elevado, onde repentinamente os danos passaram de N_{or} =0 para N_{or} =6.48 para um número de estabilidade de N_s =3.9.

As conclusões finais são semelhantes às obtidas por Van Gent com a diferença de que o número de danos inaceitáveis acontece mais tarde e de forma repentina.

6.2. Análise dos dados da reflexão

A análise de reflexão é efetuada através da medição de séries temporais de elevação da superfície livre em quatro sondas com espaçamentos conhecidos.

Como já foi referido, esse espaçamento entre sondas é determinado com base num intervalo de frequências válidas. Ou seja, para cada estado de agitação irregular que se pretenda reproduzir, os espaçamentos entre sondas devem garantir que os respetivos limites espectrais (0.5 f_p e 2.0 f_p) se encontram dentro das mesmas.

Das três análises realizadas através da rotina HRDAQ e Baldock, conclui-se que a segunda análise realizada com a rotina Baldock foi a que originou melhores resultados. Isto porque, apesar de na primeira análise com a rotina Baldock os resultados apresentarem as mesmas tendências que os da segunda, os valores dos coeficientes de reflexão eram muito elevados quando comparados com os da segunda análise. No entanto, tal como os resultados obtidos pela primeira análise através da rotina Baldock, também os obtidos com a rotina HRDAQ apresentaram coeficientes de reflexão muito elevados, não tendo portanto, qualquer enquadramento físico.

Deste modo, a segunda análise com base na rotina Baldock foi considerada a mais fiável.

No que diz respeito à eficiência hidraúlica do manto resistente (Quadro 4), verificou-se, através da análise da reflexão que as configurações do quebramar na série de testes F foi a que apresentou melhor eficiência hidraúlica com coeficientes de reflexão entre 0.14 e 0.19, seguindo-se a série E (s_{om} =0.06) com coefientes de reflexão entre 0.3 e 0.38. Há que referir que foi precisamente para os testes da série F que se verificou um maior número de blocos deslocados, ou seja maior número de danos.

Quadro 4. Numeração das séries para cada teste em estudo por ordem decrescente de eficiência hidráulica.

	Teste 002		Te	ste 003	Teste 004		
	Coeficientes de Reflexão Mínimos	oeficientes de Séries Reflexão Correspondentes Mínimos		Coeficientes de Séries Reflexão Correspondentes Mínimos		Séries Correspondentes	
1°	0,14	F	0,18	F	0,19	F	
2°	0,30	$E(s_{om} = 0,06)$	0,33	$E(s_{om}=0,06)$	0,38	$E(s_{om}=0,06)$	
3°	0,32	А	0,36	В	0,38	В	
4°	0,33	В	0,37	А	0,39	А	
5°	0,33	D	0,37	D	0,39	D	
6°	0,33	С	0,37	С	0,40	С	
7°	0,42	$E(s_{om} = 0,03)$	0,44	$E(s_{om} = 0,03)$	0,45	$E(s_{om} = 0,03)$	

Quadro 5. Comparação entre o número de danos e o coeficiente de reflexão obtidos pelo método de Baldock (análise 2).

	Teste 002				Teste 003				Teste 004	
	N.º de Blocos Deslocados	N.º de Danos (N _{od})	Coeficientes de Reflexão Mínimos	N.º de Blocos Deslocados	N.º de Danos (N _{od})	Coeficientes de Reflexão Mínimos	N.º de Blocos Deslocados	N.º de Danos (N₀d)	Coeficientes de Reflexão Mínimos	
A°	0	0,00	0,32	7	0,34	0,18	49	2,35	0,39	
B°	0	0,00	0,33	4	0,19	0,33	50	2,40	0, 38	
C°	0	0,00	0,33	7	0,34	0,36	46	2,21	0, 40	
D	0	0,00	0,33	20	0,96	0,37	85	4,08	0,39	
$E(s_{om}=0,03)$	2	0,10	0,42	9	0,40	0,37	68	3,30	0,45	
$E(s_{om}=0,03)^{\circ}$	0	0,00	0,30	1	0,05	0,37	10	0,48	0,38	
F	15	0,72	0,14	38	1,82		249	11,95	0,19	

Da análise comparativa entre a eficiência hidraúlica e o número de danos associado pode verificar-se que normalmente para cada série de teste o aumento do número de danos corresponde a um aumento do coeficiente de reflexão. Há que ter em atenção que dentro da mesma série os ensaios são realizados para alturas de onda e períodos crescentes.

No entanto, se analisarmos as várias séries de teste para as mesmas condições de ensaio (mesma altura e periodo de onda) verifica-se que na maioria dos casos o aumento do número de danos está associado a uma diminuição do coeficiente de reflexão. Esta diminuição da reflexão pode estar associada ao aumento da porosidade entre os blocos, pois o aumento dos deslocamentos dos mesmos leva a um aumento dos espaços vazios e consequentemente uma diminuição da reflexão. Em suma:

- O coeficiente de reflexão diminuiu com o aumento da profundidade da água;
- As diferentes porosidades pouco afetaram os coeficientes de reflexão;
- A presença de filtros de dimensões diferentes praticamente não afeta o coeficiente de reflexão;
- O coeficiente de reflexão apresenta valores mais elevados para declividades de onda de 0.03 e menores para declividades de 0.06;
- Existe uma clara tendência para o aumento dos coeficientes de reflexão com o aumento dos períodos de pico e das alturas de onda.

6.3. Estabilidade da Risberma

Relativamente à risberma verificou-se que a mesma apresentou alguma instabilidade ao longo dos ensaios, no entanto a risberma não deixou de desempenhar a sua função de suportar o manto, mesmo ocorrendo alguns danos considerados aceitáveis.

Segundo a maioria dos métodos de dimensionamento da risberma, a mesma não se encontrava estável devendo portanto ser dimensionada para profundidades maiores ou considerar enrocamentos de maiores dimensões.

No entanto, a situação testada, dimensionada de acordo com o método CUR/CIRIA, corresponde a uma relação entre a ação das ondas e os danos na risberma de 3 a 10% de danos aceitáveis. Estes danos moderados na risberma não têm grande influência na estabilidade do manto resistente, sendo portanto considerados aceitáveis.

No entanto há que salientar que que os métodos de dimensionamento da risberma foram testados para possíveis períodos de pico e alturas de onda de projeto, uma vez que não se teve acesso a essa informação. Assim sendo a avaliação da estabilidade da risberma por estes métodos pode não estar bem enquadrada.

7. Conclusões e Desenvolvimentos futuros

O desempenho dos cubos em camada única mostrou ser uma alternativa atrativa relativamente a outros tipos de blocos. A construção dos cubos pode ser mais barata do que para outro tipo de blocos, sendo também a estabilidade do manto relativamente boa quando comparada com o dos tradicionais mantos de duas camadas.

De acordo com os ensaios verificou-se que:

- filtros com D_n entre os 40 e 45 % do D_n do cubo apresentam um desempenho relativamente bom;
- filtros com dimensões maiores aumentam a rugosidade da superfície, o que é desfavorável para os blocos do manto;
- filtros com menores dimensões levam à erosão do próprio filtro;
- densidades de colocação de 25-30% garantem estabilidade;
- densidades de colocação de 40% o manto resistente sofre demasiados assentamentos;
- densidades de colocação dos blocos de 30% conduzem a aberturas relativamente grandes perto do coroamento da estrutura após condições severas de tempestade;
- a rotura verificada em algumas destas condições de teste foi influenciada pela forma de colocação dos cubos e por falta de atrito junto ao vidro de visualização;
- a manutenção após tempestades significativas deve ser considerada com a colocação de cubos adicionais nas aberturas se necessário;
- menores profundidades de água junto ao pé da estrutura originam mantos consideravelmente mais estáveis do que para as mesmas condições de teste (mesma altura de onda e período) para maiores profundidades de água junto ao pé da estrutura;
- para menores profundidades de água, o mecanismo de rotura é muito mais repentino do que progressivo, quando comparado com o verificado para maiores profundidades de água.

Verifica-se, portanto, que mantos de camada única de cubos apresentam um bom desempenho, sendo portanto recomendada a sua utilização em quebramares de taludes dimensionados para alturas de onda significativas até 4.5 m, em que o tamanho do bloco seja o que foi aqui apresentado, bem com as condições de ensaio.

Seria interessante reproduzir os ensaios para um maior número de condições de teste. A realização de um maior número de testes, de modo a ser possível observar o início de danos em todas as séries de testes teria todo o interesse, pois poderiam conduzir a novas conclusões relativamente à estabilidade do manto resistente.

Poderia ser também importante estudar diferentes tipos de disposições dos cubos no manto resistente facilitando a sua colocação no manto.

A disposição dos blocos testada no presente trabalho, apresentava alguma dificuldade na sua colocação, uma vez que não era fácil colocá-los numa posição estável e ao mesmo tempo garantir o espaçamento pretendido de acordo com a porosidade em estudo. Além disso, o estudo do coroamento com blocos de dimensões maiores que os do manto resistente de taludes seria também um aspeto a analisar, uma vez que a estabilidade de uma única camada de blocos com as mesmas dimensões dos utilizados no manto do talude revelou ser muito fraca. Outro aspeto importante que merece ser investigado diz respeito aos possíveis efeitos de escala.

Referências

- Almeida, L. (2013). Avaliação Experimental do Comportamento de Quebramares de Taludes com Mantos Resistentes Constituídos por uma Única Camada de Blocos Cúbicos. FEUP, Porto.
- Burcharth, H. F. (1992). Rehability Evaluation of Struturares at Sea - The design of breakwaters. Proc. of the Short Course on Design and Reability of Coastal Structures, Tecnoprint Bologna, Venice, Italy.
- CEM Coastal Engineering Manual Part VI Chapter 2 -Types and Functions of Coastal Structures; Chapter 5 -Fundamentals of Design, 1 Jun 06. http://chl.erdc.usace.army.mil.
- CIRIA; CUR; CETMEF (2006). The Rock Manual The use of rock in hydraulic engineering. Second Edition, C683, CIRIA, London.

- Consultants, Delta Marine. (2010). *Stability of single layer armour units on low-crested structures*. Master of Science Thesis, Delf University of Technology , Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Section Hydraulic Engineering, October.
- Grue, L. Liu, P.L.F Pedersen, G.K. (2004). PIV and Water Waves. *Advances in coastal and ocean engineering*, vol. 9.
- Lopes, H.G Taveira-Pinto, F. Veloso-Gomes, F. Cabral, J.P. Sanchéz, R.M. Neves, M.G. Reis, M.T. (2011). Análise bidimensional do comportamento hidrodinâmico de estruturas costeiras através de ferramentas de processamento de imagem. 7^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária. Porto, 6 e 7 de Outubro de 2011
- Raffel, M.; Willert, C.; Wereley, S.; Kompenhans, J. (2007). Particle Image Velocimetry: A Practical Guide. Springer-Verlag. ISBN 3-540-72307-2.
- Santos, P.J.R (2010). Análise da interação de navios com dispositivos de acostagem e amarração. Estudo em modelo físico do posto "A" do terminal de petroleiros do porto de Leixões. Dissertação de Doutoramento em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Van Der Meer J.W. (1993). *Conceptual Design of Rubble Mound Breakwaters*. Delft Hydraulics Publication number 483.
- Van Gent, M.R.A e Sppan, G.B.H (1998), Single-layer rubble mound breakwaters. Coastal Structures'99, Lousada (ed) Balkema, Rotterdam.