



## ESTABILIDADE E GALGAMENTO DE QUEBRA-MARES DE TALUDE INFLUÊNCIA DO MODO E DENSIDADE DE COLOCAÇÃO DE BLOCOS CÚBICOS

Maria da Graça Neves<sup>(a)</sup>, Luís Gabriel Silva<sup>(a)</sup> e Sabine Reither

<sup>(a)</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

### SUMÁRIO

O objectivo deste trabalho é contribuir para o estudo da influência da densidade e do modo de colocação de cubos Antifer no comportamento do perfil-corrente de um quebra-mar de talude, concretamente na sua estabilidade e nos galgamentos admitidos. Para tal, foi realizada uma série de ensaios com uma secção transversal tipo de um quebra-mar de talude, cujo manto resistente era composto por cubos Antifer. Os ensaios realizaram-se no canal de ondas irregulares do LNEC, para dois modos de colocação de blocos, regular e irregular, com o mesmo número de blocos por unidade de área de talude a proteger. No caso de colocação regular, foram ensaiadas três densidades de colocação de blocos diferentes e, para cada uma delas, foram ensaiadas nove condições distintas de agitação incidente. Embora os resultados obtidos permitam ter uma noção qualitativa e quantitativa sobre a influência do modo e da densidade de colocação de cubos Antifer no talude exterior de um quebra-mar de talude, a influência destes parâmetros no comportamento da obra não está completamente definida, sendo necessários mais estudos para o devido aprofundamento deste tema.

### 1. INTRODUÇÃO

Em virtude da dificuldade de obter blocos de enrocamento de grandes dimensões para utilizar no manto resistente de quebra-mares de talude, recorre-se à utilização de blocos artificiais de betão, dentre os quais se salientam os tetrápodos e os cubos Antifer, por serem de utilização mais frequente na costa portuguesa.

A selecção do tipo de bloco artificial a utilizar em determinada obra é uma parte importante do dimensionamento estrutural. Esta selecção é normalmente feita em função dos requisitos em termos de estabilidade e em termos do galgamento admitido e da experiência do projectista.

No caso específico da utilização de blocos do tipo cubo Antifer e dada a forma regular que o bloco apresenta, têm, circunstancialmente, surgido dúvidas quanto à influência do modo e densidade de colocação dos blocos no talude. Admite-se, todavia, que, tanto em termos de estabilidade, como em termos do galgamento, a eficácia de um quebra-mar depende da forma de colocação deste tipo de bloco, já que, ao fazer variar a rugosidade e a porosidade do talude se altera, quer a força necessária para extrair os blocos do manto, quer o espraçamento.

De forma a contribuir para a clarificação destas dúvidas, foi realizada uma série de ensaios com uma secção transversal tipo de um quebra-mar de talude, cujo manto resistente era composto por cubos Antifer. Os ensaios realizaram-se no canal de ondas irregulares do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, para dois modos de colocação de blocos, regular e irregular, com o mesmo número de blocos por unidade de área de talude a proteger. No caso de colocação regular, foram ensaiadas três densidades de colocação de blocos e, para cada uma delas, foram ensaiadas nove condições distintas de agitação incidente. A estabilidade do perfil foi avaliada em termos do número de blocos com movimentos e removidos, ao passo que, em relação aos galgamentos, se procedeu à medição do volume de água que transpôs o coroamento do perfil em cada ensaio.

As instalações experimentais utilizadas e as condições de realização dos ensaios são apresentadas no ponto 2. No ponto 3 descrevem-se os resultados obtidos em termos de estabilidade e galgamentos, para cada condição de ensaio. Finalmente, no ponto 4 apresentam-se as conclusões do estudo.

## 2. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

### 2.1. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Os ensaios foram realizados num canal de ondas irregulares do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. O canal tem 49.4 m de comprimento, 1.60 m de largura e 1.20 m de altura. As ondas são geradas por um batedor de pistão (Figura 1).



Figura 1: Canal de ondas irregulares do LNEC/NPP

O perfil-tipo do quebra-mar foi construído a aproximadamente 40 m do batedor, sobre uma plataforma situada 0.345 m acima do fundo do canal. Os fundos em frente ao perfil foram representados por uma rampa de inclinação constante e igual a 4.5% que se prolongava por uma extensão de 7.665 m até atingir o fundo do canal. A altura de água foi mantida constante ao longo dos ensaios e igual a 0.52 m, que corresponde a uma altura de água no pé da estrutura de 0.175 m.

A estrutura testada corresponde a um quebra-mar de talude com um talude exterior com uma inclinação de 2:3, composto por um núcleo de TOT, um filtro de enrocamento de 2 a 4 gr e um manto resistente de cubos Antifer de 70 g com um peso específico de  $24 \text{ kN/m}^3$  (Figura 2).

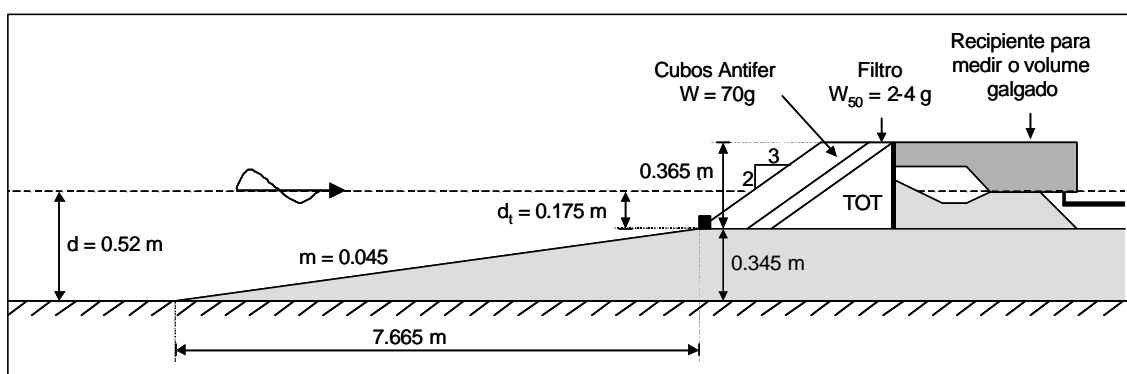


Figura 2: Estrutura utilizada nos testes.

Os cubos Antifer foram colocados de dois modos diferentes: regular e irregular (Figura 3). O modo regular consiste na colocação de duas camadas de blocos. O modo irregular consiste, não numa colocação aleatória, mas sim num modo de colocação em que a primeira camada é colocada de forma regular com um certo espaçamento entre blocos nas duas direcções. Os

blocos da camada seguinte são colocados com um canto para baixo nos intervalos deixados entre os blocos da primeira camada e os blocos da terceira camada são colocados nos intervalos entre blocos da segunda camada, tal como se mostra na Figura 3 B.

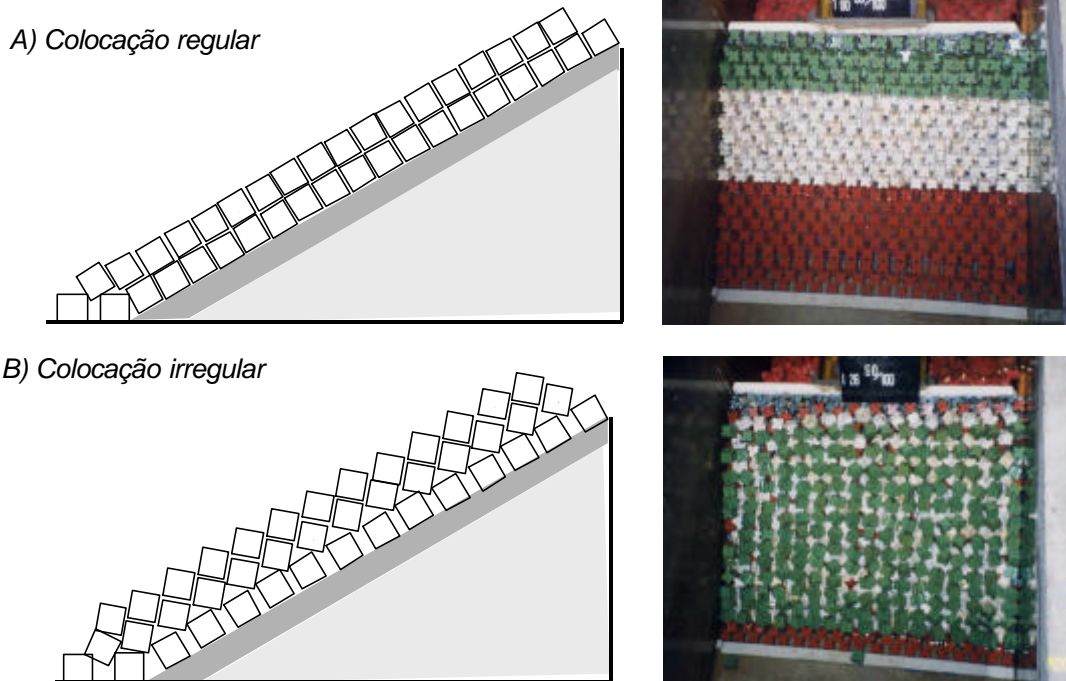


Figura 3: Modo de colocação dos blocos nos ensaios realizados.

Para o modo regular, consideraram-se as seguintes três densidades de colocação, em blocos/dm<sup>2</sup>: 11.0, 13.2 (corresponde à densidade de colocação da forma irregular) e 15.3 (Figura 4). Enquanto que as densidades mais altas correspondem a valores frequentemente utilizados em protótipo, a densidade de colocação de 11.0 blocos/dm<sup>2</sup> foi escolhida por se tratar de um valor considerado limite, tendo em conta a forma e a dimensão dos blocos.

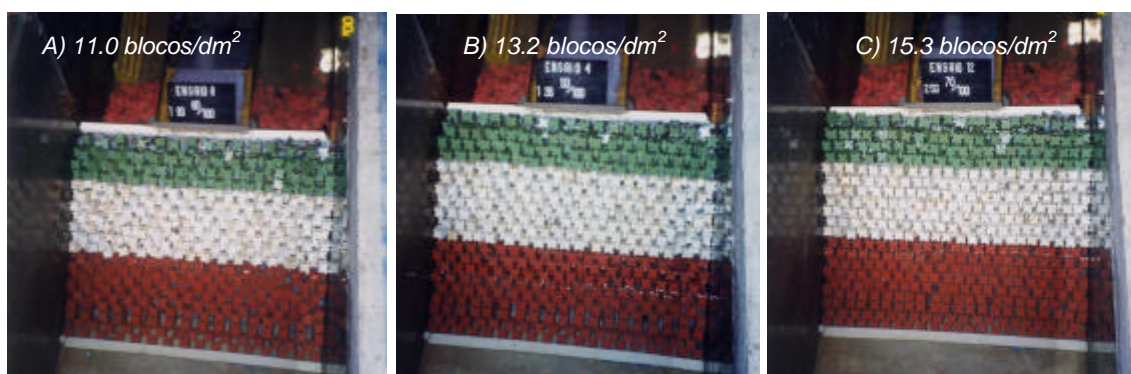


Figura 4: Densidade de colocação dos blocos nos ensaios realizados com modo regular.

Os resultados apresentados referem-se a valores do modelo. No entanto, para que os mesmos se possam tornar mais familiares a técnicos essencialmente ligados ao projecto e construção de obras marítimas, foram seleccionadas as escalas 1:30, 1:40 e 1:50 e determinados os respectivos valores de profundidade,  $d$ , profundidade ao pé do talude,  $d_t$ , e peso do cubo,  $W_{cub}$ , tal como se apresenta no Quadro 1.

Quadro 1- Valores dos parâmetros no protótipo, para diferentes escalas

Parâmetros	Modelo	Escala		
		1:30	1:40	1:50
$d$ [m]	0.52	15.60	20.80	26.00
$d_t$ [m]	0.18	5.25	7.00	8.75
$W_{ca}$ [tf]	0.07	2	5	9

## 2.2. CONDIÇÕES DOS ENSAIOS

As condições dos ensaios foram escolhidas tendo em conta as condições de ondulação típicas da costa portuguesa e as escalas acima consideradas (vide Quadro 1). Assim, determinaram-se os valores da profundidade,  $d$  (ver figura 2) e as condições de agitação (tipo de espectro a utilizar, períodos de pico,  $T_p$ , e alturas de onda significativa,  $H_s$ ). A duração de actuação de cada valor de  $H_s$  foi seleccionada de acordo com o nível de estragos atingido no cômputo geral dos ensaios realizados.

O valor da profundidade foi mantido constante e igual a 0.52 m em todos os ensaios. Este valor permitia que a maioria das ondas não rebentasse antes de atingir a obra. No Quadro 2 apresentam-se as condições limites de teste (valores de  $H_s$  e  $T_p$ ) e os correspondentes valores no protótipo para as escalas consideradas no Quadro 1. A configuração espectral utilizada foi a de JONSWAP.

Quadro 2- Condições de ensaio e correspondentes valores no protótipo

Parâmetros	Modelo	Escala		
		1:30	1:40	1:50
$H_s$ [m]	0.05	1.5	2.0	2.5
	0.10	3.0	4.0	5.0
$T_p$ [s]	1.26	6.9	8.0	8.9
	1.90	10.4	12.0	13.4
	2.53	13.9	16.0	17.9

Apresenta-se no Quadro 3 um resumo de todas as condições testadas. Além dos ensaios com modo regular e irregular, fizeram-se ainda ensaios com uma rampa lisa impermeável a cobrir o manto resistente, de forma a obter valores limites de galgamento.

Durante cada ensaio, foram observados os movimentos e as quedas dos blocos que compunham o manto resistente. O volume de água galgado era recolhido num recipiente colocado a jusante da estrutura, cobrindo 30 cm da secção transversal, e era medido no final de cada ensaio. Para cada período testado, o valor da altura de onda ia aumentando e, no final do ensaio, o manto era reconstruído.

Quadro 3- Condições dos ensaios realizados

Modo de colocação	Densidade de colocação (blocos/dm <sup>2</sup> )	$T_p$ (s)	$H_s$ (cm)		
irregular	13.2	1.26	6.6	8.2	9.7
		1.90	6.8	8.1	9.2
		2.53	5.6	6.3	7.0
regular	11.0	1.26	6.6	8.2	9.7
		1.90	6.8	8.1	9.2
		2.53	5.6	6.3	7.0
	13.2	1.26	6.6	8.2	9.7
		1.90	6.8	8.1	9.2
		2.53	5.6	6.3	7.0
	15.3	1.26	6.6	8.2	9.7
		1.90	6.8	8.1	9.2
		2.53	5.6	6.3	7.0
Rampa lisa e impermeável		1.26	6.6	8.2	9.7
		1.90	6.8	8.1	9.2
		2.53	5.6	6.3	7.0

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. NOTA PRÉVIA

Como já foi referido, o objectivo dos ensaios foi o de investigar a influência do modo e da densidade de colocação dos cubos Antifer do manto resistente na estabilidade e no galgamento da estrutura. Observou-se que a estabilidade do quebra-mar diminui (aumenta o número de movimentos e/ou quedas) com o aumento da altura de onda. Apesar de este resultado ser expectável, deve notar-se que o aumento da altura de onda pode levar à ocorrência de outros fenómenos, tais como o galgamento, que levam a que a dissipação de energia sobre o manto diminua, com a contrapartida em termos de estabilidade.

Apresentam-se em seguida os resultados obtidos nos ensaios realizados neste estudo, primeiro no que respeita à estabilidade (análise dos movimentos e quedas dos blocos) e depois no que respeita aos galgamentos.

#### 3.2. ESTABILIDADE

Nos Quadros 4 e 5, apresentam-se os resultados obtidos, em termos de movimentos e de quedas dos blocos do manto resistente, respectivamente. Os valores percentuais constantes nos quadros referem-se ao número total de blocos colocados no modelo. As Figuras 5 e 6 correspondem à representação gráfica dos Quadros 4 e 5, respectivamente.

Quadro 4- Movimentos dos blocos do manto resistente para os diferentes modos e densidades de colocação dos blocos

Modo de colocação		Irregular		Regular					
Densidade de colocação (blocos/dm <sup>2</sup> )		13.2		11.0		13.2		15.3	
$T_p$ (s)	$H_s$ (cm)	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%
1.26	6.6	10-12	1.6	15-20	3.0	2	0.3	5	0.6
	8.2	20-25	3.1	30-35	5.5	5	0.7	6-8	0.9
	9.7	25-30	3.9	40-50	7.6	6	0.9	10-12	1.3
1.90	6.8	15-20	2.5	15-20	3.0	4	0.6	6-8	0.9
	8.1	20-25	3.2	20-25	3.8	8-10	1.3	12-14	1.6
	9.2	30-35	4.6	30-35	5.5	15-20	2.5	15-20	2.1
2.53	5.6	15-20	2.5	20-25	3.8	12-14	1.9	8-10	1.1
	6.3	25-30	3.2	30-35	5.5	20-25	3.2	12-14	1.6
	7.0	40-50	6.4	50-60	9.3	30-35	4.6	15-20	2.1

Quadro 5- Quedas dos blocos do manto resistente para os diferentes modos e densidades de colocação dos blocos

Modo de colocação		Irregular		Regular					
Densidade de colocação (blocos/dm <sup>2</sup> )		13.2		11.0		13.2		15.3	
$T_p$ (s)	$H_s$ (cm)	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%
1.26	6.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	8.2	1	0.1	8	1.4	0	0.0	0	0.0
	9.7	2	0.3	14	2.4	0	0.0	0	0.0
1.90	6.8	3	0.4	1	0.2	0	0.0	0	0.0
	8.1	6	0.9	2	0.3	0	0.0	0	0.0
	9.2	8	1.1	4	0.7	0	0.0	0	0.0
2.53	5.6	3	0.4	7	1.2	2	0.3	0	0.0
	6.3	8	0.7	14	2.4	7	1.0	0	0.0
	7.0	25	3.5	28	4.8	15	2.1	1	0.1

Da observação do Quadro 4 e da Figura 5 pode-se concluir que a forma de colocação regular é mais estável que a irregular no que se refere a movimentos, para as mesmas condições de agitação e mesma densidade de colocação. Para o período mais elevado ( $T_p = 2.53$  s), a influência da densidade de colocação é bastante mais forte que a do modo de colocação.

Os resultados da análise das quedas de blocos apresentam uma tendência semelhante à observada nos movimentos dos blocos: a estabilidade é menor para menores valores de densidade de colocação dos blocos e para o modo de colocação irregular, tendo como referência os ensaios em que foi utilizada a mesma densidade de colocação de blocos.

Na Figura 7, apresentam-se fotografias tiradas no início e no final dos ensaios, para  $T_p = 2.53$  s e  $H_s = 7.0$  m e para duas densidades de colocação de blocos (15.3 e 11.0 blocos/dm<sup>2</sup>). Da análise destas fotografias, pode-se verificar a diferente resposta da estrutura: o ensaio com maior densidade de colocação é mais estável que o de menor densidade, o que é visível no número de bloco caídos no final do ensaio. Na Figura 8, apresentam-se fotografias tiradas no início e no final dos ensaios para  $T_p = 2.53$  s e  $H_s = 6.3$  m, quer para o modo regular (a) quer para o irregular (b), com a mesma densidade de colocação de blocos.

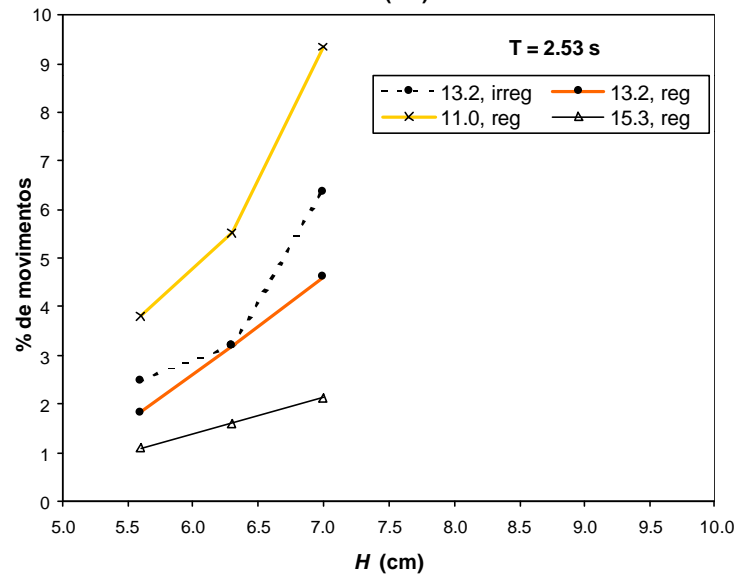
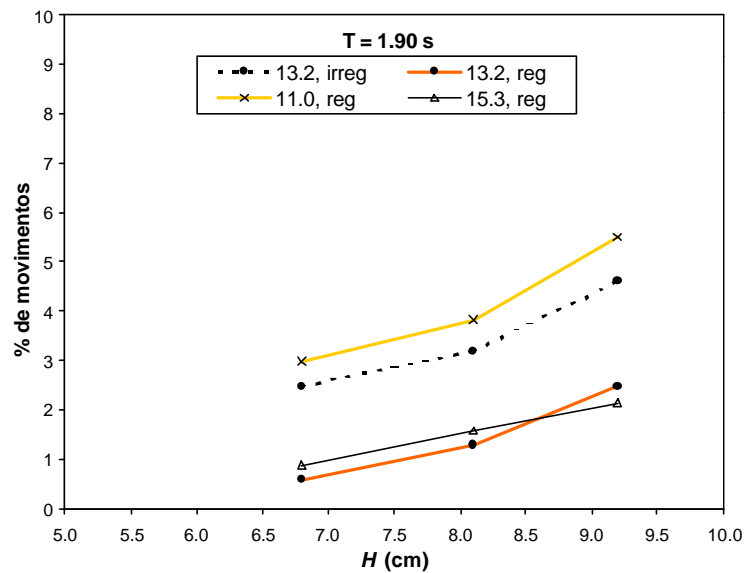
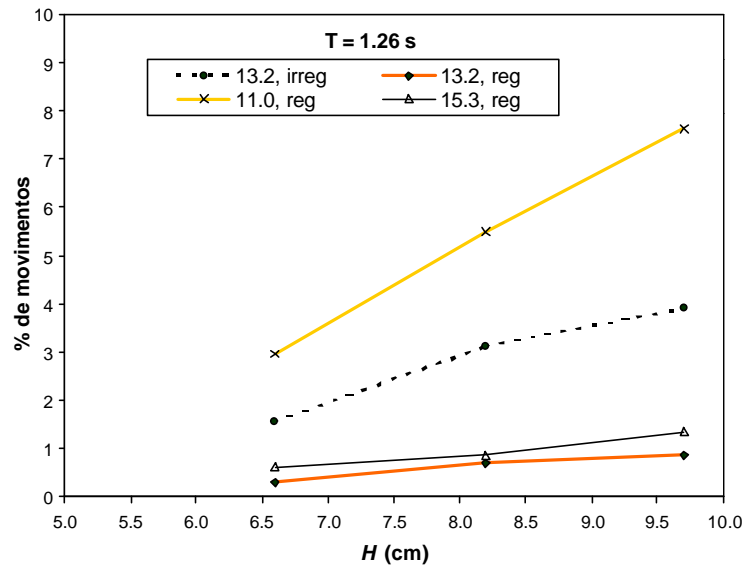


Figura 5 - Variação da percentagem de movimentos dos blocos do manto resistente com a altura de onda.

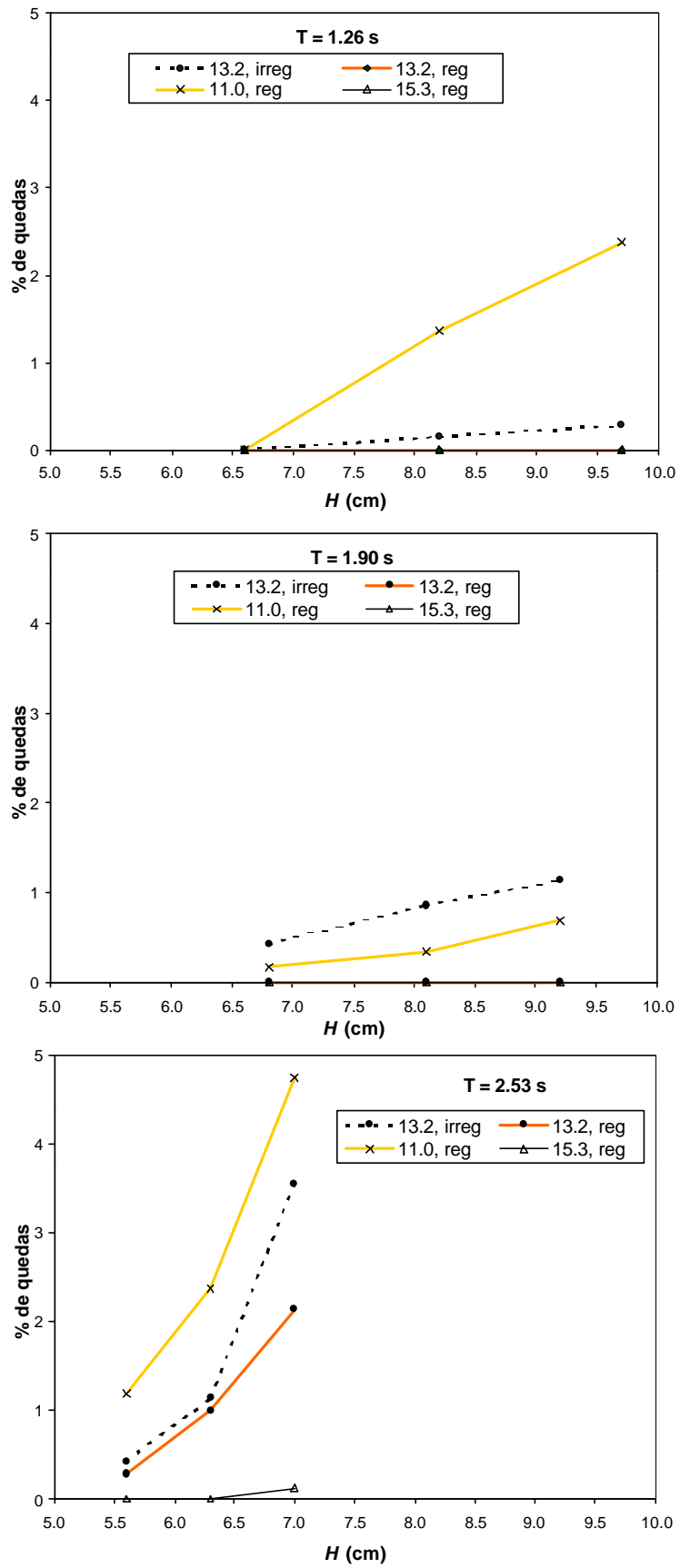


Figura 6 - Variação da percentagem de quedas dos blocos do manto resistente com a altura de onda.



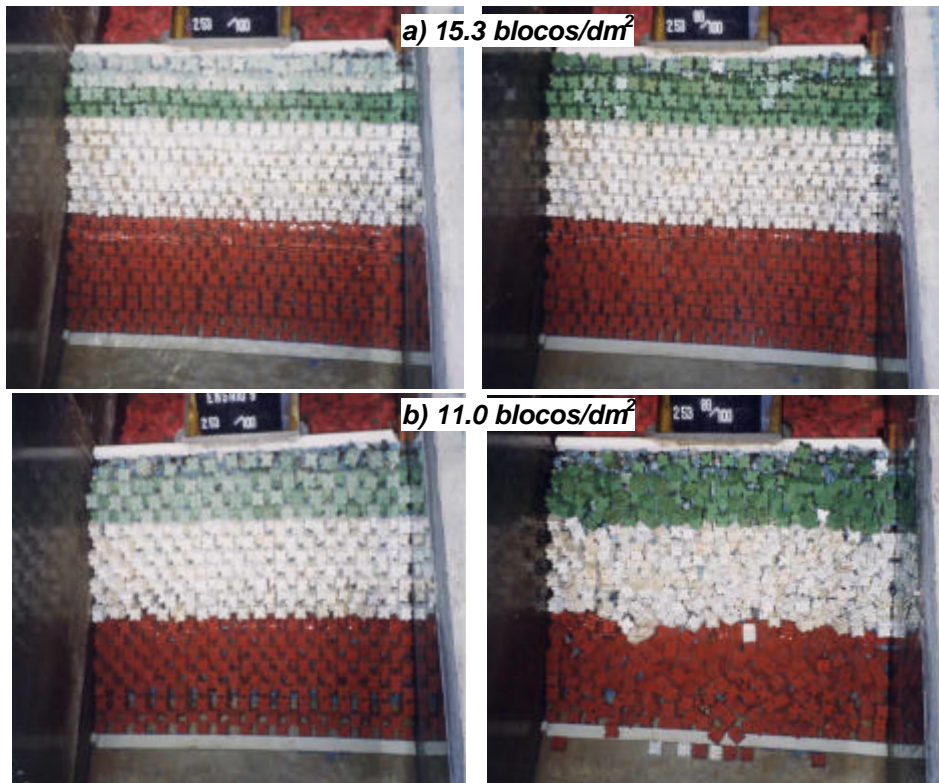


Figura 7- Aspecto no início (esquerda) e no final (direita) dos ensaios para  $T_p = 2.53$  s e  $H_s = 7.0$  cm, para duas densidades de colocação: 15.3 blocos/dm<sup>2</sup> (a) e 11.0 blocos/dm<sup>2</sup> (b).

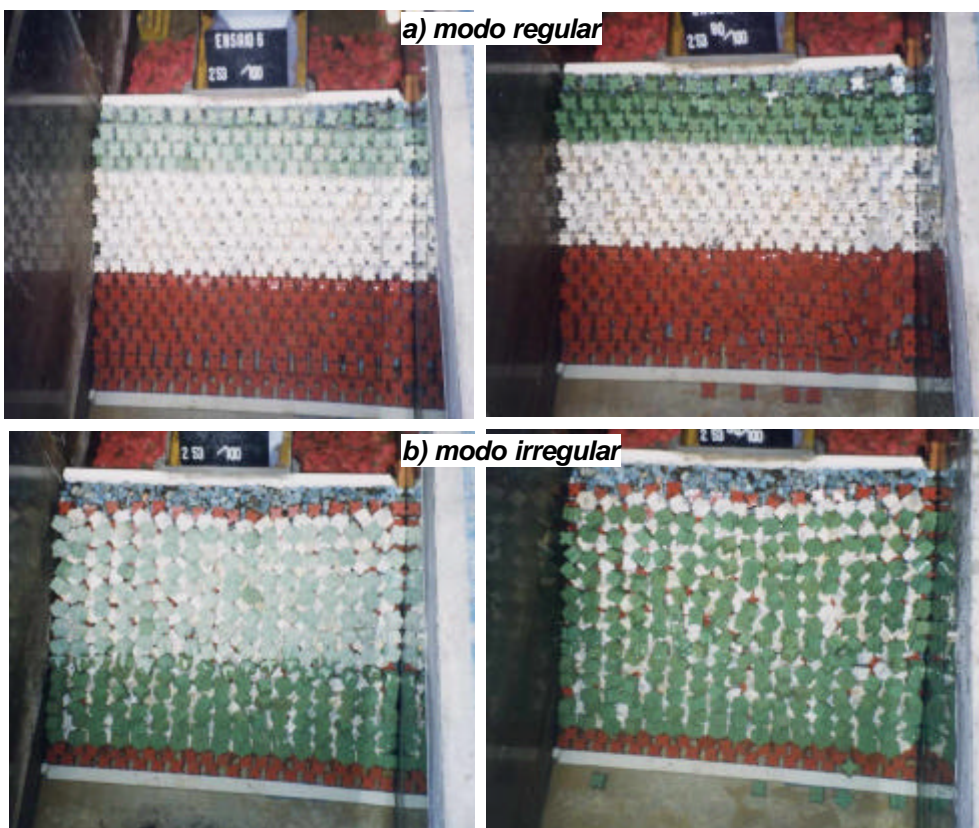


Figura 8 - Aspecto no início (esquerda) e no final (direita) dos ensaios para  $T_p = 2.53$  s e  $H_s = 6.3$  cm e para o modo regular (a) e modo irregular (b) de colocação de blocos.

### 3.2. GALGAMENTOS

Durante os ensaios realizados, foram efectuadas medições de volumes galgados para os diferentes modos e densidades de colocação de blocos. De forma a obter os valores limites para comparação, realizaram-se ainda alguns ensaios adicionais com uma placa lisa impermeável sobre o talude. Na Figura 9, apresentam-se duas fotografias que reflectem a forma como foram feitas as medições nos ensaios realizados.

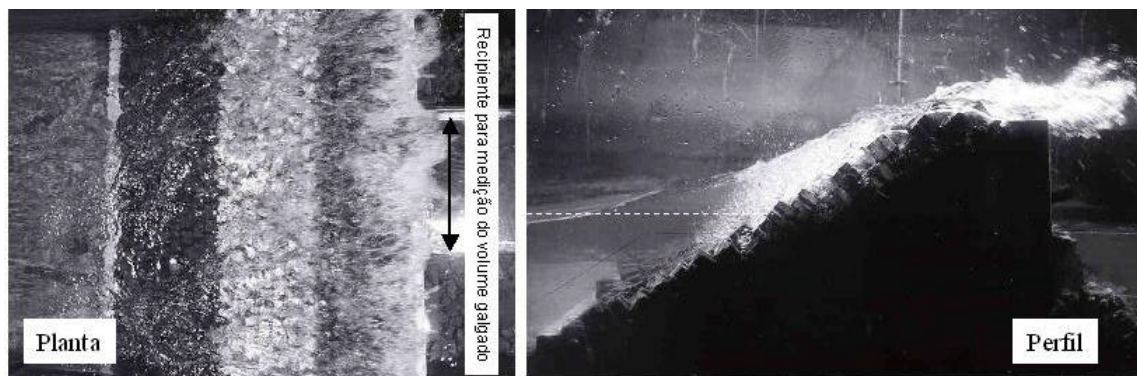


Figura 9 - Medição de volume galgado durante os ensaios.

No quadro 6, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios no que respeita a volumes galgados,  $V_g$ , para os diferentes modos e densidades de colocação de blocos e para o caso limite de placa lisa impermeável.

Quadro 6 - Volume galgado para os diferentes modos e densidades de colocação dos blocos

Modo de colocação		Irregular	Regular			Placa lisa impermeável
Densidade de colocação (blocos/dm <sup>2</sup> )		13.2	11.0	13.2	15.3	
T (s)	H (cm)	$V_g$ (l/min*dm)				
1.26	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
	8.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.5
	9.7	0.1	0.1	0.2	0.3	1.0
1.90	6.8	0.1	0.1	0.2	0.2	1.0
	8.1	0.3	0.2	0.4	0.6	1.4
	9.2	0.5	0.5	0.6	1.1	2.2
2.53	5.6	0.2	0.3	0.4	0.4	0.9
	6.3	0.3	0.4	0.5	0.6	1.7
	7.0	0.5	0.6	0.7	0.9	2.3

Ao analisar os resultados é necessário ter em conta que, para a mesma densidade de colocação de blocos, a rugosidade e a porosidade são maiores para o modo de colocação irregular do que para o regular. No modo regular, a rugosidade e a porosidade aumentam com a diminuição da densidade de colocação de blocos.

Na Figura 10, apresenta-se a variação do volume galgado com a altura de onda, para as várias condições testadas. Não se apresentam nesta figura os resultados obtidos com a placa impermeável, dada a diferente escala de valores obtidos para esta condição.

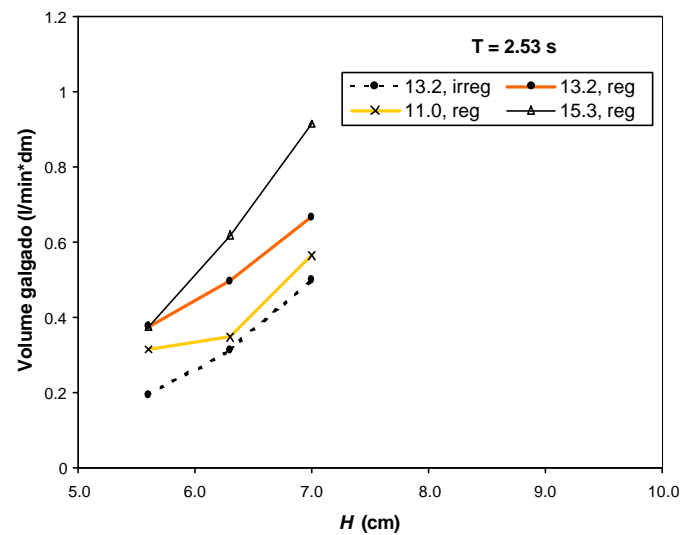
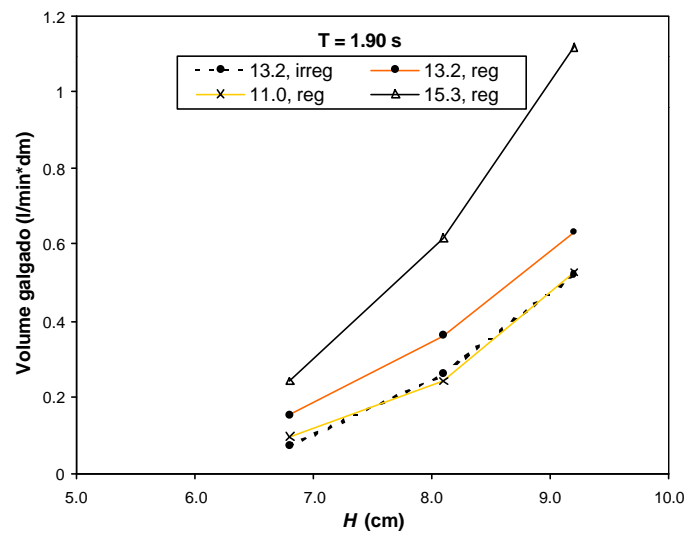
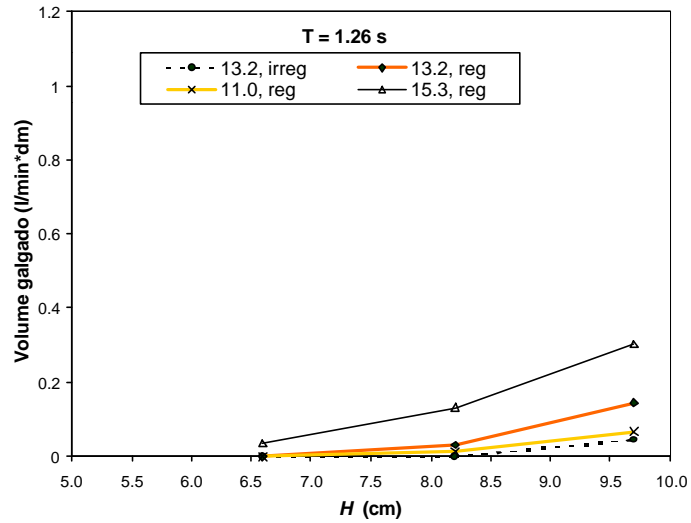


Figura 10 - Variação do volume galgado com a altura de onda.

Da análise dos resultados obtidos, pode concluir-se que o galgamento aumenta com o aumento da altura de onda.

No que respeita ao modo de colocação de blocos, o galgamento para o modo regular é superior ao obtido para o modo irregular, para todas as densidades ensaiadas. No entanto, quando a densidade de colocação é baixa, os resultados obtidos com o modo regular aproximam-se dos do irregular.

Quanto à influência da densidade de colocação de blocos, verifica-se que o volume do galgamento aumenta com a diminuição da rugosidade e da porosidade do perfil, isto é, com o aumento do número de blocos por unidade de área, para o mesmo modo de colocação. Este resultado é claro quando se observam os resultados obtidos com a placa impermeável lisa, que apresenta valores de galgamentos muito superiores aos obtidos com a estrutura ensaiada.

Assim, no que respeita aos galgamentos, pode concluir-se que o comportamento de um manto com colocação de blocos regular e irregular é semelhante apenas se o número de blocos por unidade de área diminuir consideravelmente, com as respectivas consequências, no que se refere à estabilidade, tal como se viu no ponto anterior.

#### **4. NOTA FINAL E RECOMENDAÇÕES**

Com o objectivo de contribuir para o esclarecimento da influência do modo e densidade de colocação de blocos cúbicos na estabilidade e galgamento de quebra-mares de talude, apresentam-se neste artigo os resultados dos ensaios realizados no canal de ondas irregulares do LNEC, para um perfil-tipo de um quebra-mar de talude com um manto resistente constituído por cubos Antifer.

Foram analisados dois modos de colocação (regular e irregular) e, para o modo regular, foram ensaiadas três densidades de colocação diferentes, uma delas correspondente à do modo irregular. Para cada caso, foram ensaiadas nove condições de agitação incidente. Com base nos resultados dos ensaios, foi analisada a resposta da estrutura, quer em termos de estabilidade quer em termos de galgamentos.

Embora se reconheça que conclusões mais precisas e abrangentes carecem da realização de um estudo exaustivo sobre esta matéria, os ensaios realizados no âmbito deste estudo permitem a apresentação de algumas tendências. Assim, e centrado a atenção apenas na diferença de comportamento evidenciado pelo modelo com o manto resistente disposto regularmente e disposto de modo irregular, as tendências mais salientes são as seguintes;

- Para iguais condições de densidade de colocação de blocos, o modo de colocação irregular é mais instável que o modo de colocação regular;
- Para o caso estudado, a estabilidade evidenciada pelo manto resistente com blocos colocados de modo irregular, é conseguida, com o modo de colocação regular, com uma densidade de colocação de blocos 10-15% inferior (percentagem sujeita a confirmação em posteriores estudos sobre esta matéria);
- Ainda em termos da estabilidade do manto resistente e tendo em conta os ensaios realizados, verificou-se que, à medida que o período da agitação marítima aumenta, menor é a dependência do modo de colocação dos blocos, passando a ser mais relevante a sua densidade de colocação (tendência sujeita a confirmação em posteriores estudos sobre a matéria);
- Do ponto de vista dos galgamentos e para condições semelhantes de densidade de colocação de blocos, o modo de colocação irregular é bastante mais eficaz que o regular;
- De acordo com os resultados obtidos, só à custa de uma drástica redução da densidade de colocação de blocos com disposição regular se consegue uma eficácia contra os galgamentos semelhante à evidenciada pela disposição irregular. Nalguns casos, inclusivamente, a redução teria de ser tão drástica

quanto irrealista, não só pelas graves consequências em termos da estabilidade do manto, como ainda pela própria forma e dimensão dos blocos.

Na medida em que os ensaios não foram prolongados até à rotura do modelo, não é possível tirar qualquer conclusão sobre o tipo de rotura associado a cada um dos modos de colocação considerados. No entanto, a experiência acumulada no LNEC em termos de exploração de modelos hidráulicos reduzidos, nomeadamente com os dois modos de colocação em causa, leva a crer que o processo de rotura associado ao modo irregular seja mais rápido do que no caso em que os blocos se encontram dispostos regularmente. Na realidade, enquanto que, com o modo de colocação regular, a camada inferior de cubos apresenta uma resistência muito semelhante à camada superior e dificulta a extracção de blocos do filtro ou do núcleo, os blocos da camada inferior do modo de colocação irregular, para além do espaçamento entre eles poder permitir com mais facilidade a saída de blocos com dimensões mais reduzidas, não se encontram apoiados noutros em nenhuma das duas direcções do plano do talude, levando a que funcionem somente pela acção do seu peso próprio, após terem sido afectadas as duas camadas exteriores.

Centrando agora a atenção apenas nos ensaios em que os blocos foram colocados no manto resistente de modo regular, importa referir que os resultados obtidos vieram confirmar o que sobre o assunto se sabe, ou seja, que:

- A resistência do manto resistente de um quebra-mar decresce à medida que se diminui a densidade de colocação dos blocos, embora de uma forma não linear, principalmente para períodos da agitação marítima inferiores;
- À medida que se diminui a densidade de colocação de blocos no manto resistente, aumenta-se o índice de vazios do manto e a rugosidade do seu plano superior, aspectos que conduzem a uma redução dos galgamentos.

Na medida em que os ensaios realizados vieram de alguma forma confirmar a ideia que tem sido defendida pelo LNEC sobre o assunto (embora se reconheça que, no que se refere à estabilidade, a diferença entre o comportamento dos dois modos de colocação tenha ficado um pouco aquém do que era expectável), recomenda-se que o modo regular seja adoptado quando a estabilidade for o factor crítico, dando especial atenção à densidade de colocação a considerar.

O modo irregular pode ser a solução mais recomendada quando se quiser a todo o custo reduzir os galgamentos, devendo, neste caso, dar-se uma atenção acrescida ao levantamento de eventuais estragos ocorridos durante as maiores tempestades, em virtude de se acreditar que a velocidade do processo de rotura é, com este modo de colocação, maior.

Dado que, em geral, a cabeça dos quebra-mares é uma zona onde o factor crítico é a estabilidade, não deverá, em qualquer caso, ser encarada a hipótese de utilização do modo irregular ao longo do seu perfil de rotação.

Como última recomendação, seria de todo o interesse a realização de um significativo número de ensaios com uma gama mais alargada de condições de agitação marítima e de condições físicas do modelo, de forma a confirmar as tendências que se observaram neste estudo.