



ESTUDO EM MODELO FÍSICO DE UM SISTEMA DE QUEBRAMARES DESTACADOS PARA A MELHORIA DAS CONDIÇÕES NA PRAIA DO CARNEIRO, PORTO

Francisco Taveira-Pinto ^{a,b}; Paulo Rosa-Santos ^{a,b}; João Chambel ^{a,b}; Francisco V.C. Taveira Pinto ^{a,b};
Hugo Guedes Lopes ^c; Carlos Abecassis ^d

^a FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal;

^b CIIMAR - Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental - Universidade do Porto, Terminal de Cruzeiros do Porto de Leixões, Avenida General Norton de Matos s/n, 4450-208 Matosinhos, Portugal;

^c Direção de Obras e Equipamentos, Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo SA, Avenida da Liberdade, 4451-851 Leça da Palmeira, Portugal

^d CONSULMAR, Projetistas e Consultores, Lda., Avenida António Augusto de Aguiar 19, 1050-110 Lisboa
fpinto@fe.up.pt, pjrsantos@fe.up.pt, jrschambel@gmail.com; ftaveirapinto@fe.up.pt; hugo.lopes@apdl.pt; c.abecassis@consulmar.pt

Resumo

Para a melhoria das condições na Praia do Carneiro, Porto, foi realizado no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da SHRHA-DEC-FEUP, um estudo em modelo físico, com fundos móveis, à escala 1/60, de uma solução de proteção costeira constituída por cinco quebramares destacados. Essa solução apresentou um desempenho satisfatório na melhoria das condições de tranquilidade a sotamar, embora os quebramares de taludes tenham sofrido danos superiores ao esperado para as condições de agitação marítima mais energéticas e os níveis de água mais elevados (preia-mar de águas vivas combinada com uma sobrelevação do nível médio da água do mar devido aos efeitos da maré meteorologia e alterações climáticas). A elevada mobilidade dos sedimentos explica, em parte, os resultados obtidos. Com base nesses resultados, foram propostas algumas recomendações a ter em consideração na próxima fase do estudo e desenvolvimento da solução.

1. Introdução

As praias da frente marítima do Porto imediatamente a norte do Molhe de Felgueiras apresentam boas características para a prática balnear, estando, contudo, muito expostas à agitação marítima, Figura 1. Na praia do Carneiro, em situações de temporal, ocorre uma movimentação excessiva de areias, com a sua deposição ao largo e em terra, por galgamento do muro da Avenida D. Carlos, junto ao enraizamento do Molhe de Felgueiras. Estes eventos tenderão a agravar-se com a ocorrência mais frequente de fenómenos climáticos extremos, como consequência das alterações climáticas.



Figura 1 – Localização da Praia do Carneiro na frente urbana do Porto (fonte: APDL).

A Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo (APDL) pretende estabilizar o areal da Praia do Carneiro numa largura que, por um lado, promova a sua utilização balnear, e, por outro, impeça a ocorrência dos fenómenos de galgamento e ação das ondas anteriormente referidos. Para o efeito, a *CONSULMAR – Consultores de Engenharia* projetou uma intervenção de proteção costeira constituída por 5 quebramares destacados.

De forma a estudar este problema, foi construído um modelo físico que abrangeu os 400 m de areal que se estendem, para Norte, desde o Molhe de Felgueiras até ao segundo conjunto de afloramentos rochosos que emergem na areia, ou seja, que inclui a Praia do Carneiro, localizada imediatamente a Norte desse molhe, e também a Praia do Ourigo.

Os principais objetivos do estudo em modelo físico da solução proposta para a melhoria das condições atuais da Praia do Carneiro são:

- A análise da eficácia dos quebramares destacados propostos para promover a rebentação das ondas incidentes e consequente diminuição da energia que atinge a Praia do Carneiro;
- A verificação da estabilidade da estrutura dos três quebramares de taludes.

2. Intervenção Proposta

A solução de proteção projetada pela *CONSULMAR* para a Praia do Carneiro é constituída por cinco quebramares destacados, com coroamento a cota baixa e que aproveitam a presença de afloramentos rochosos no local para a sua fundação. Estas condições locais, não só melhoram as condições de estabilidade das estruturas, como também possibilitam a construção de obras de menor volumetria, o que é favorável em termos de impactos e de custo (*Consulmar*, 2019). A Figura 2 apresenta a localização e o *layout* de implantação dessa solução.

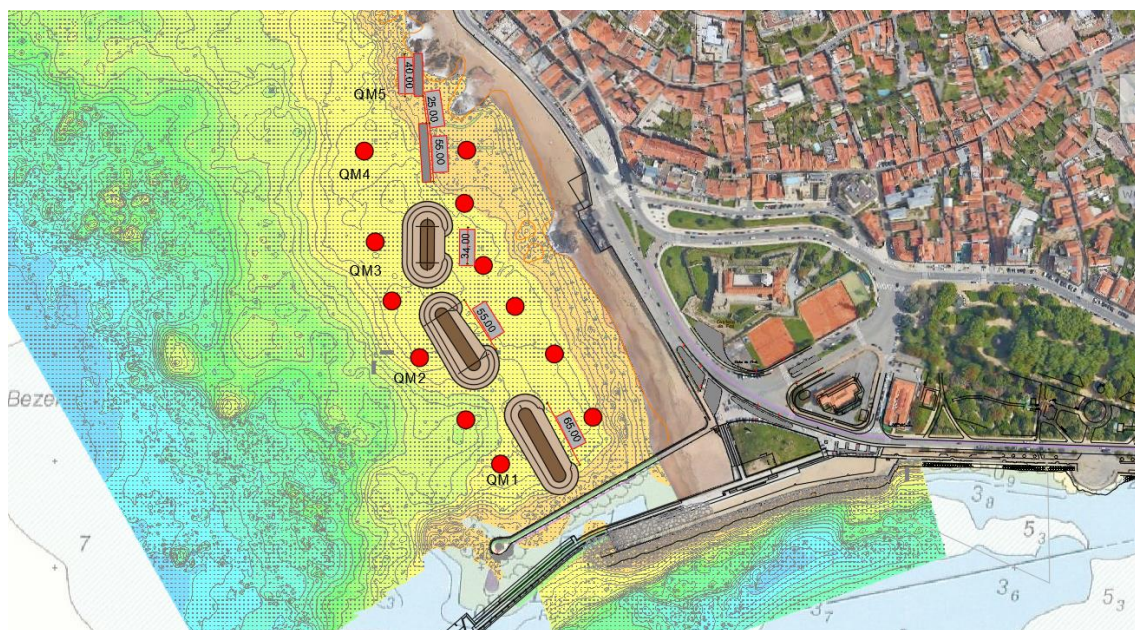


Figura 2 – Implantação da solução proposta para a reabilitação e a melhoria das condições da Praia do Carneiro (*Consulmar*, 2019).

O manto resistente do quebramar 1 (QB1) é constituído por duas camadas de blocos Antifer de 60 kN (betão de densidade normal, 24 kN/m³), colocados, nos taludes, de forma irregular. Os taludes frontal e posterior têm uma inclinação de 3/2. No coroamento é colocada apenas uma camada de blocos, arrumados, ficando este com uma cota aproximada de +4.05 m ZH. No pé do talude do lado exterior é aberta uma vala com cerca de 0.70 m de profundidade e 3.50 m de

largura, suficiente para acomodar dois blocos Antifer que ficam assim parcialmente “enterrados”. É também executada uma berma com uma largura de aproximadamente 3.50 m (correspondente a 3 blocos) e uma altura de cerca de 3.00 m (medidos a partir da base da vala).

Os quebramares QB2 e QB3 são estruturas de secção trapezoidal em enrocamento, fundadas sobre o fundo rochoso, Figura 2. O manto resistente do QB2 é constituído por duas camadas de enrocamento de 80 a 100 kN nos taludes e uma camada no coroamento, ficando esta com uma cota aproximada de +4.20 m ZH. O talude frontal tem inclinação de 2H:1V e o posterior de 3H:2V. A transição entre essas inclinações é feita na parte posterior das cabeças, no remate contra o talude interior. No pé do talude frontal é constituída uma berma com cerca de 5.00 m de largura, sendo aberta uma vala de fundação com cerca de 1.00 m de profundidade e 3.00 m de largura, para proporcionar melhor estabilização do enrocamento.

O quebramar 3 (QB3) tem um perfil quase idêntico ao do QB2, mas o seu manto resistente é constituído por enrocamento de 60 a 90 kN, ficando o coroamento com uma cota aproximada de +4.20 m ZH.

Nos três quebramares de taludes (QB1 a 3), o sub-manto é constituído por enrocamento de 5 a 10 kN. O núcleo dessas estruturas é em enrocamento ToT, tem o coroamento à cota +2.00 m ZH, largura de 3.00 m, e taludes exterior a 2H:1V e interior a 3H:2V.

Os quebramares QB4 e QB5 são estruturas maciças em betão, betonado *in-situ* contra o fundo rochoso, aproveitando os afloramentos rochosos existentes no local de implantação, Figura 3.



Figura 3 – Imagem aérea da Praia do Carneiro evidenciando a localização dos afloramentos rochosos (fonte: APDL): 9 de maio de 2013.

O intuito de se ter considerado dois perfis diferentes para os QB1 e 2 é apenas possibilitar, num mesmo teste, a análise de duas alternativas estruturais distintas. No projeto final, estes dois quebramares devem ter uma estrutura idêntica, sendo escolhida aquela que se considerar mais adequada, em função dos resultados dos ensaios, mas também levando em conta outros aspetos (económicos, ambientais, etc.).

O objetivo dos quebramares destacados propostos é, assim, provocar a rebentação das ondas de maior altura que atualmente incidem na Praia do Carneiro, de modo a que o galgamento do seu muro limite, pelas ondas e pelas areias, seja eliminado ou significativamente reduzido. Por outro lado, a diminuição da energia da agitação incidente sobre a praia deverá conduzir a uma nova situação de equilíbrio natural deste, com uma cota da sua berma superior menos elevada do que a atual, promovendo a sua utilização balnear.



3. Estudo experimental

3.1. Introdução

As especificações para o estudo em modelo físico foram definidas pela CONSULMAR tendo em atenção os seguintes objetivos:

- Análise da eficácia dos cinco quebra-mares destacados propostos, através da análise das diferenças introduzidas pela presença dessas obras;
- Verificar a eficácia dessa solução na configuração da praia, o que pressupõe a reprodução no modelo da praia, mas apenas de forma simplificada, pois não se trata verdadeiramente da modelação da evolução do perfil da praia (ou de um modelo de “fundo móvel”);
- Análise da estabilidade dos quebra-mares de proteção, particularmente das três estruturas de taludes;
- Avaliação qualitativa da eficácia da solução proposta na diminuição dos galgamentos do muro de separação entre a praia e a marginal.

O plano de trabalhos definido contemplou uma primeira fase de testes para a situação atual, sem os quebra-mares de proteção, que serviu de referência à análise dos resultados obtidos após a construção dos mesmos.

Para além das condições definidas nas especificações do estudo experimental, foram realizados ensaios suplementares, para um nível de água mais elevado que o relativo à preia-mar de águas vivas proposta (combinação de preia-mar de águas vivas com maré meteorológica máxima em conjunto com uma sobrelevação do nível médio do mar).

Os requisitos estabelecidos para o estudo implicaram a reprodução de um comprimento ao longo da costa de cerca de 600 m, e de 600 m na perpendicular a esta (em protótipo). Tendo em conta as dimensões do tanque de ondas da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da FEUP, bem como as dimensões e cotas do protótipo, e ponderando a questão da minimização dos efeitos de escala, neste estudo adotou-se a escala geométrica não distorcida de 1/60.

O estudo experimental contempla a análise de três direções diferentes de incidência das ondas. Neste artigo são apresentados apenas os resultados relativos aos testes realizados para ondas provenientes do quadrante WNW. A Figura 4 apresenta o esquema de implantação do modelo físico no tanque de ondas. Embora as especificações técnicas para o estudo apenas fizessem referência à necessidade de reproduzir corretamente o paramento norte do molhe Norte, optou-se por reproduzir fielmente toda a estrutura, para melhor representar a realidade. Considerou-se também importante reproduzir a Praia das Pastoras, situada entre o molhe Norte e o molhe de Felgueiras.

3.2. Modelo Físico

A reprodução da batimetria dos fundos no modelo físico foi realizada com base no levantamento da Praia do Carneiro e área envolvente de fevereiro de 2018, disponibilizado pela APDL, sendo o mesmo completado, na medida das necessidades, com outros levantamentos disponíveis para o local e com a Carta Hidrográfica N°26402 do Instituto Hidrográfico. Dado que as condições de agitação que o sistema de geração de ondas pode reproduzir dependem da profundidade de água local, optou-se por reproduzir a batimetria dos fundos até à cota -13.00 m ZH, embora de forma simplificada abaixo da cota -10.00 m ZH.

O modelo físico testado na primeira série de testes reproduziu apenas a situação atual, sem os cinco quebra-mares destacados, sendo estes introduzidos posteriormente. De referir que essas estruturas se situam numa zona com fundos relativamente planos, entre a batimétrica dos -1.00 e dos 0.00 m (ZH).

Como não se pretendia modelar a evolução do perfil da praia ao longo do tempo, os sedimentos a utilizar na materialização da mesma não teriam de reproduzir fielmente os sedimentos reais, não existindo por isso as dificuldades inerentes à minimização dos efeitos de escala. Deste modo, no modelo físico foi usada areia calibrada de sílica com uma baridade de 1037 kg/m³ e um diâmetro médio de 0.273 mm.

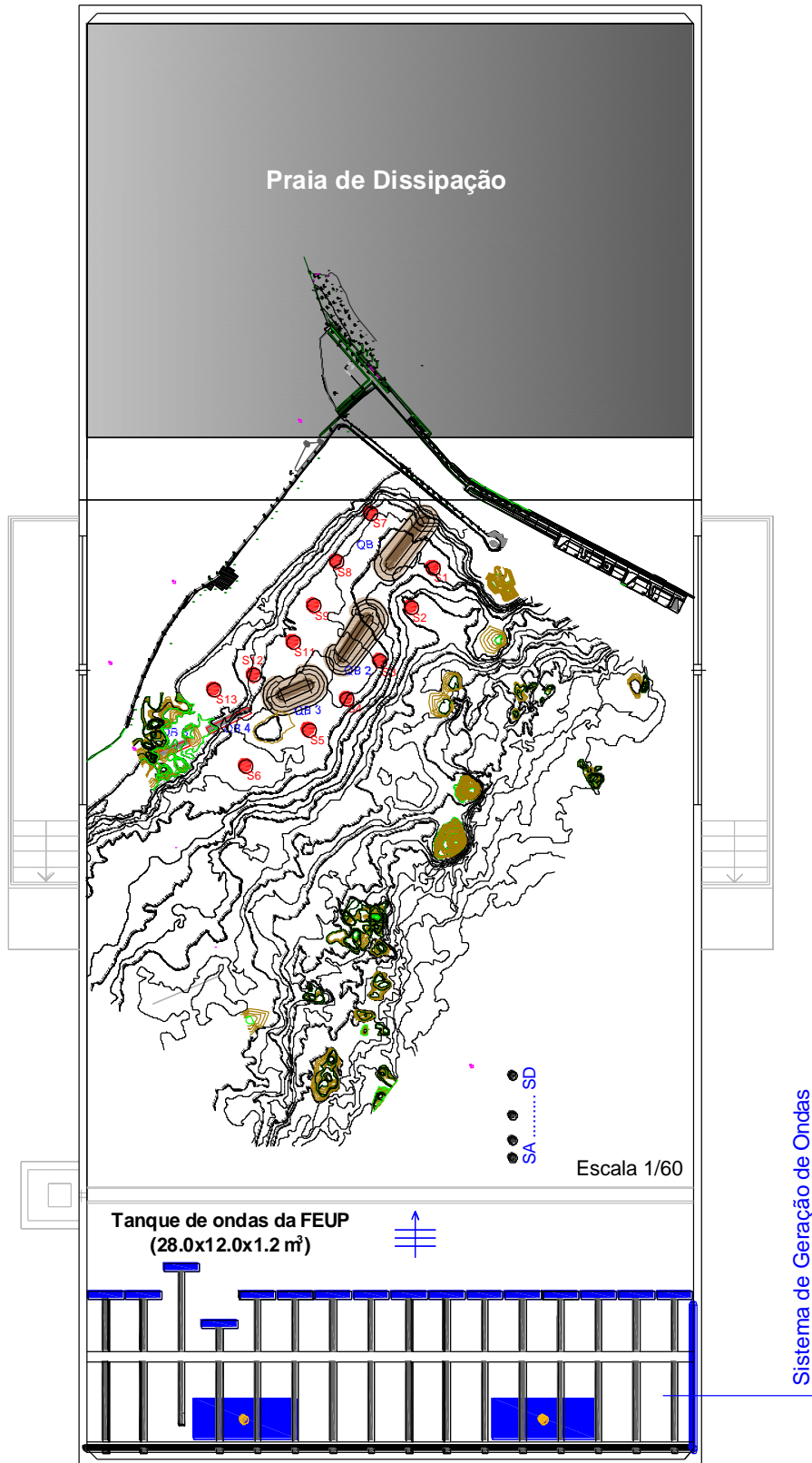


Figura 4 – Implantação do modelo físico no tanque de ondas da SHRHA da FEUP.

A reprodução dos afloramentos rochosos teve por base uma imagem aérea obtida aquando da ocorrência de uma muito baixa baixa-mar, em que é possível ver a existência de uma vasta área com afloramentos rochosos, Figura 3, que apresentam, portanto, uma posição fixa, sendo, por isso, um pormenor que é importante representar no modelo.

O modelo físico foi construído respeitando a semelhança de *Froude* já que neste estudo as ações gravíticas são as mais relevantes em termos relativos. A Figura 5 apresenta o perfil-tipo dos três quebramares de taludes propostos para a melhoria das condições atuais na Praia do Carneiro, reproduzidos no estudo experimental (valores do modelo físico).

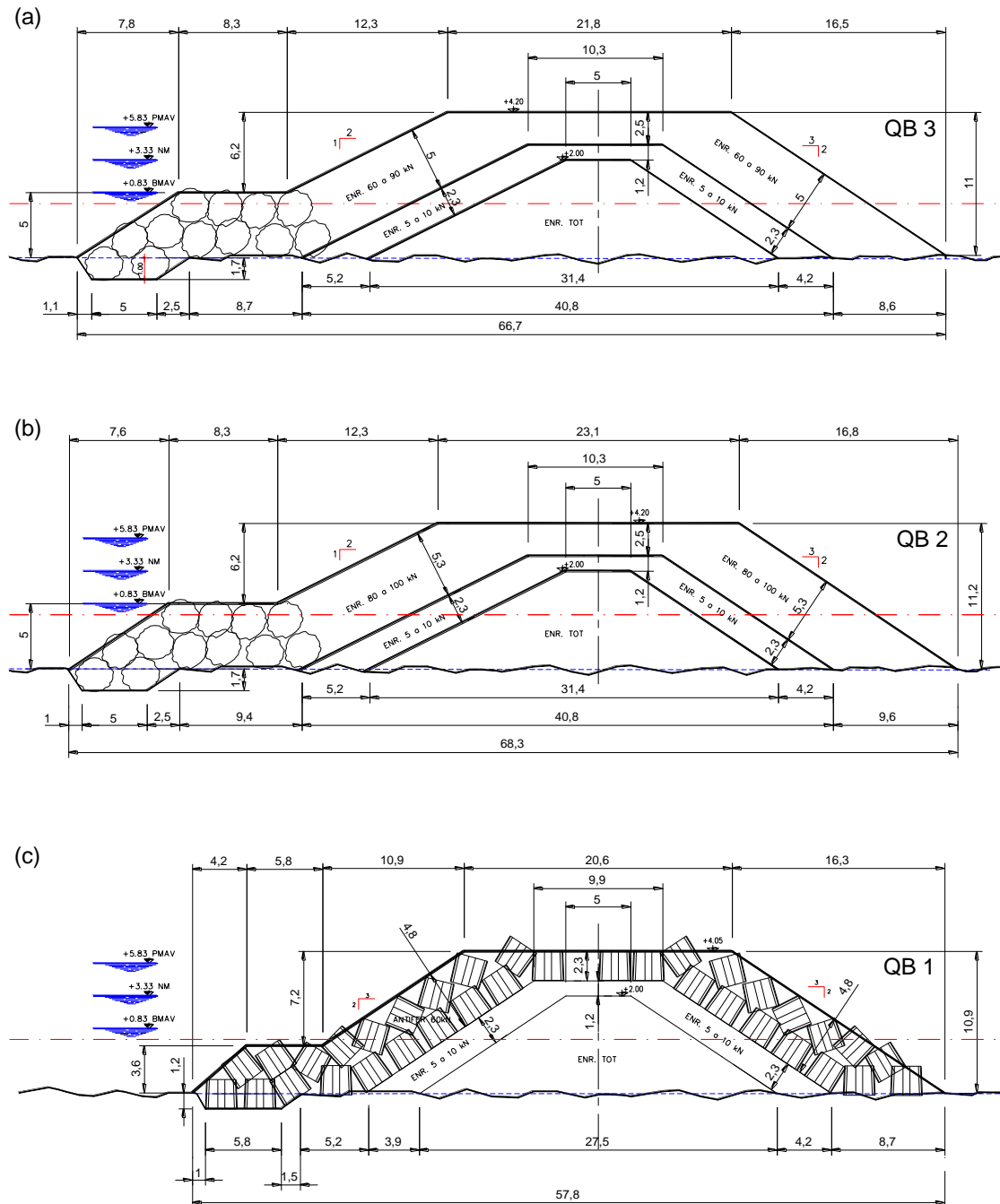


Figura 5 – Perfil-tipo dos quebramares de taludes propostos para a melhoria das condições na Praia do Carneiro (dimensões em cm no modelo físico): (a) QB3, (b) QB2 e (c) QB1.

De forma a facilitar a análise dos estragos nos dois quebramares de taludes em enrocamento, as diferentes britas usadas na constituição dos mantos resistentes foram pintadas com três cores diferentes: vermelho, branco e azul. Para o quebramar com manto resistente em blocos cúbicos Antifer foram fabricados cerca de 3000 cubos utilizando moldes impressos com impressora 3D. Após a descofragem, esses blocos foram também pintados com as três cores já usadas para os quebramares em enrocamento. A Figura 6 apresenta a construção desses três quebramares. De referir que todos os quebramares de taludes testados apresentam risberma.

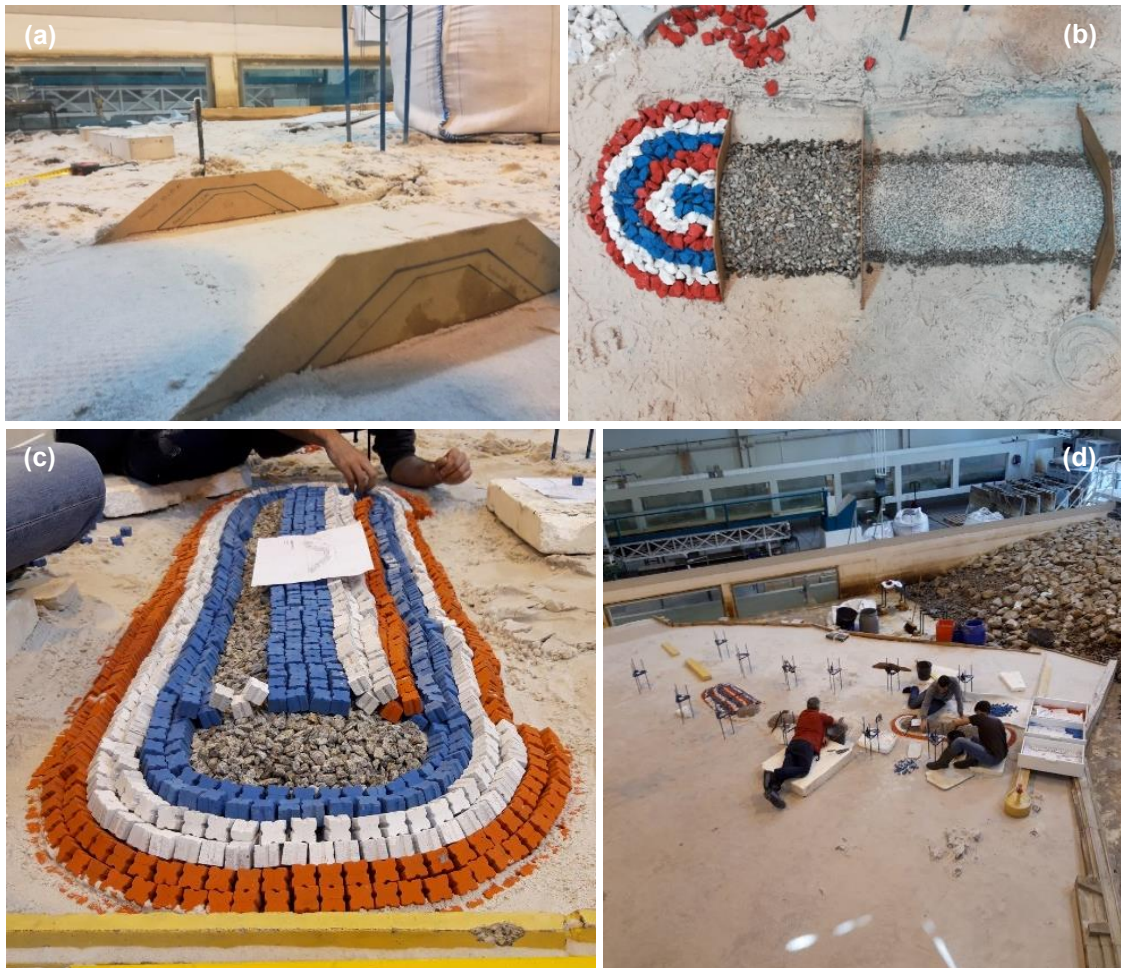


Figura 6 – Construção dos quebramares de taludes: (a) guias com o perfil dos quebramares para auxílio à sua construção, (b) fases relativas à colocação das três camadas dos quebramares de taludes – núcleo, subcamada e manto resistente; (c) construção do quebramar QB1 com o manto resistente constituído por blocos cúbicos Antifer; e (d) perspetiva global dos trabalhos em curso.

Os dois quebramares verticais, QB4 e QB5 (Figura 2), foram construídos em betão simples, e apresentam as seguintes dimensões no modelo físico:

- QB4, com 0.133 m de largura, 0.917 m de desenvolvimento e o coroamento à cota + 0.083 m (ZH);
- QB5, com 0.133 m de largura, 0.667 m de desenvolvimento e o coroamento à cota + 0.083 m (ZH).

A Figura 7 apresenta o modelo físico da Praia do Carneiro com os quebramares já construídos, para o nível de baixa-mar (+0.50 m ZH).

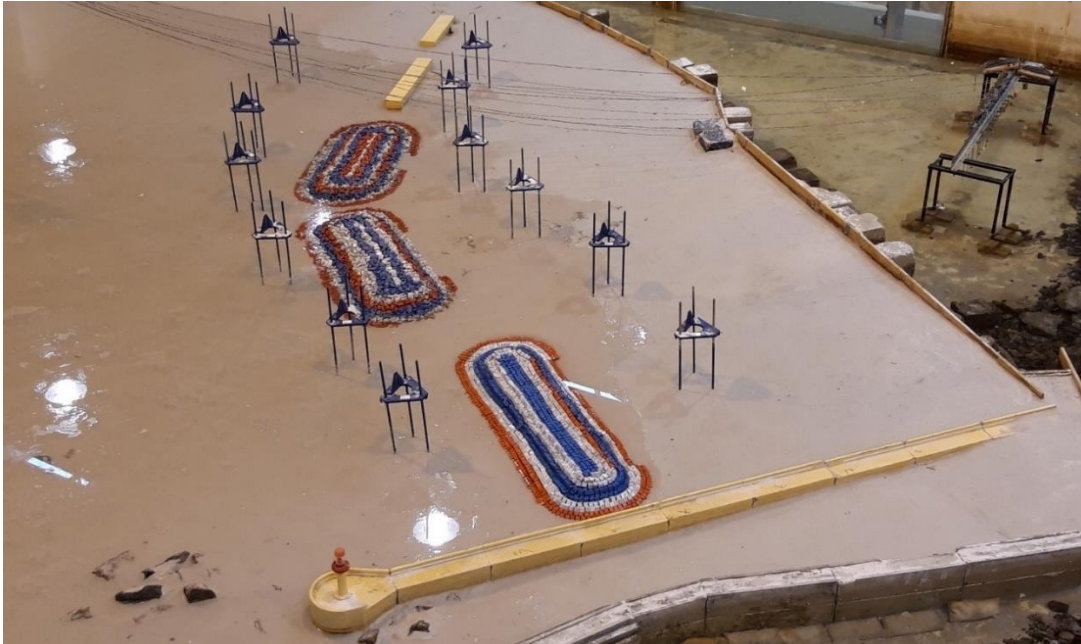


Figura 7 – Modelo físico com os quebramares destacados, nível de água +0.50 m ZH (BMAV).

3.3. Equipamentos

Os testes experimentais foram realizados no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da SHRHA da FEUP, que tem 28 m de comprimento, 12 m de largura e 1.2 m de altura. O sistema de geração de agitação marítima (*HR Wallingford, UK*) permite a reprodução de ondas irregulares de crista longa (2D) e de crista curta (3D), estados de mar bidirecionais e ondas regulares. O sistema consiste em 2 módulos, com 8 pás independentes com 0.75 m de largura, acionadas por motores elétricos, podendo operar com profundidades de água até 1.00 m. O sistema de geração está também dotado de um módulo de absorção ativa de reflexões.

O sistema de aquisição de agitação marítima permite registar a elevação da superfície livre da água em qualquer ponto do tanque de ondas, sendo composto por sondas hidrodinâmicas e por um *software* de aquisição de dados, o HR DAQ. Essas sondas são do tipo resistivo e constituídas por duas hastes de aço instaladas em tripés. A calibração dos equipamentos é fundamental para garantir a qualidade dos resultados, tendo sido realizada diariamente ou sempre que houve uma alteração no nível de água no tanque de ondas.

Para além das sondas de níveis hidrodinâmicos e do sistema de geração de ondas, foi utilizada uma câmara de vídeo para gravação dos testes, bem como uma máquina fotográfica para registo da evolução do dano nos quebramares ao longo dos testes.

3.4. Setup experimental

A Figura 4 apresenta o esquema de implantação do modelo físico no tanque de ondas para o rumo WNW e para o cenário que considera a construção dos cinco quebramares destacados. As características da agitação marítima foram medidas nos seguintes locais:

- À saída do batedor;
- Na zona frontal às estruturas;
- Na zona posterior às estruturas.

Para os registos na zona frontal e posterior às estruturas foram consideradas 12 sondas (6 + 6 sondas) com a disposição apresentada na Figura 4. O objetivo destes dois conjuntos de sondas é o de permitir a avaliação da eficácia das obras de proteção projetadas para a Praia do Carneiro. Por esse motivo, os registos foram realizados nos ensaios com e sem os cinco quebramares.

Para a calibração das condições de agitação marítima (*i.e.*, ajuste da altura de onda incidente no modelo físico), foram usadas 4 sondas alinhadas, colocadas em suporte próprio, a cerca de 3.5 m do sistema de geração de ondas. Esta calibração visa ajustar o ganho do sistema de geração de forma a garantir que este gera ondas com a altura pretendida no local especificado. A Figura 8 apresenta o modelo físico construído no tanque de ondas, bem como a localização das sondas de níveis hidrodinâmicos.



Figura 8 – Implantação do modelo físico no tanque de ondas – direção WNW. Localização das sondas de níveis hidrodinâmicos.

3.5. Programa dos ensaios

De forma a avaliar a eficácia e a estabilidade das estruturas de proteção projetadas para a Praia do Carneiro foi definido um plano de testes que considerou:

- Níveis de água: baixa-mar (BMAV = + 0.50 m ZH), nível médio (NM = + 2.00 ZH), preia-mar (PMAV = + 3.50 m ZH) e um nível de água extremo, associado à combinação de uma preia-mar de águas vivas com uma maré meteorológica e uma sobrelevação futura do nível médio da água do mar (PMAV+SS = + 4.75 m ZH);
- Períodos de onda de pico (T_P): 10, 14 e 16 s;
- Alturas de onda significativa (H_S): partindo de um valor fixo igual a 2 m na primeira linha de sondas colocadas na praia, na zona frontal ao local de implantação dos cinco quebramares destacados, a altura de onda significativa foi aumentada sucessivamente até se obter a máxima altura de onda fisicamente possível nesse local.

A inclusão do nível extremo, não previsto inicialmente, foi considerado pois: (i) poderá ocorrer durante a vida útil da intervenção de proteção costeira, (ii) afeta de uma forma significativa a eficácia e a estabilidade das estruturas destacadas, quer seja pelo facto de ondas de maior altura poderem chegar ao local da sua implantação (devido à maior profundidade de água), quer seja porque o grau de submersão dos quebramares se modifica.

No estudo experimental foram considerados dois tipos de ensaios:

- *Ensaio de estabilidade*, para avaliar a estabilidade das estruturas em condições extremas (de nível da água e/ou de agitação marítima);
- *Ensaio de eficácia*, para avaliar a eficácia dos quebramares na sua função de induzir a rebentação das ondas e assegurar as condições de proteção da Praia do Carneiro.

Importa frisar que, para cada nível de água, os últimos ensaios foram realizados com as alturas de onda máximas que se conseguiram obter, para cada período de onda definido, na zona frontal ao local de implantação dos quebramares destacados. Estas alturas de onda estão limitadas pela ocorrência de rebentação, que depende da profundidade de água no local.

A calibração das condições de agitação marítima no tanque de ondas foi realizada para garantir que a altura de onda gerada era igual à pretendida. Para tal, foram colocadas 4 sondas de níveis hidrodinâmicos alinhadas numa posição frontal ao sistema de geração de ondas. O espaçamento

entre as sondas foi definido criteriosamente por forma a cobrir toda a gama de frequências de relevo para o estudo. Através de uma rotina baseada no método proposto por Mansard e Funke (1980), para a separação da agitação incidente da refletida, e a partir dos registos simultâneos da elevação da superfície livre da água medidos pelas 4 sondas, foi possível realizar uma análise da reflexão e determinar a altura de onda incidente. Este processo foi repetido, ajustando-se o fator de ganho até se obter a altura de onda pretendida.

Os estados de agitação irregular de crista longa foram definidos tendo por base o espectro de JONSWAP, considerando um fator de forma, γ , igual a 3.3. Os testes foram realizados com uma sequência aleatória de aproximadamente 1200 ondas.

As sondas de níveis hidrodinâmicos foram posicionadas para que existisse pelo menos uma sonda a barlamar e outra a sotamar de cada um dos quebramares, existindo ainda uma sonda a barlamar e outra a sotamar das aberturas entre os quebramares destacados (QB1, QB2 e QB3). A Figura 9 mostra em maior detalhe o posicionamento das sondas.

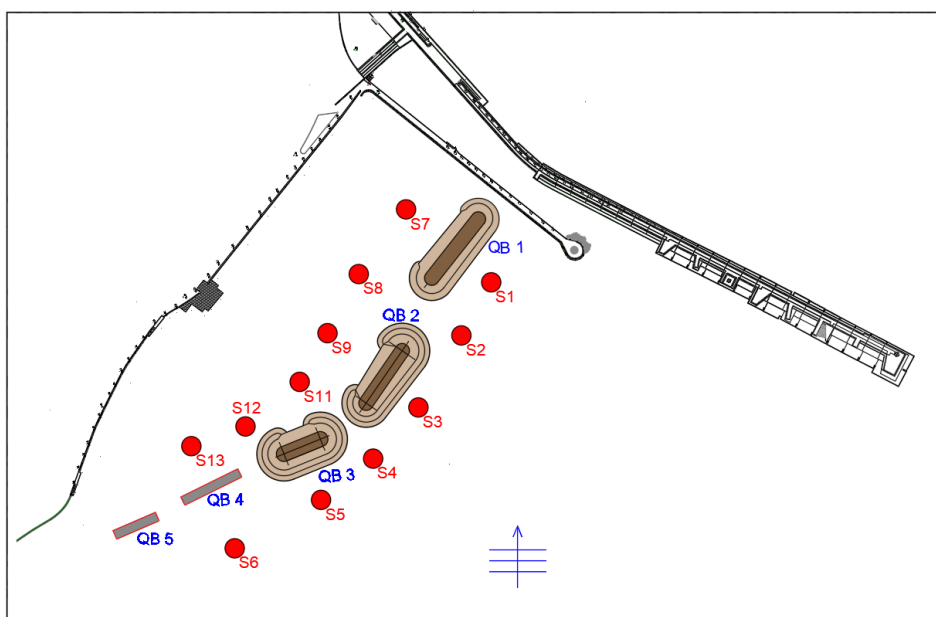


Figura 9 – Localização das sondas de níveis hidrodinâmicos no modelo físico testado.

4. Análise de Resultados

O estudo experimental compreendeu 3 fases de testes: a primeira fase correspondeu aos testes sem a presença dos quebramares, a segunda fase aos testes com os quebramares destacados já implantados e a terceira fase à repetição dos testes da segunda fase, para comprovação dos resultados obtidos. No total foram realizados 206 testes para o rumo WNW, que permitem assim avaliar a influência da construção dos quebramares destacados nas condições locais, bem como a sua estabilidade.

A análise da eficácia dos cinco quebramares destacados foi realizada através do coeficiente de transmissão (C_T) e de um coeficiente de redução da altura de onda (C_{Red}). O C_T considera os valores da altura de onda significativa a barlamar e a sotamar dessas estruturas, sendo definido através de,

$$C_T = \frac{H_{s,sot}}{H_{s,bar}} \quad (1)$$

em que $H_{s,sot}$ corresponde à altura de onda significativa estimada a sotamar dos quebramares e $H_{s,bar}$ à altura de onda significativa estimada a barlamar. A análise foi realizada para os pares de sondas: S1/S7, S2/S8, S3/S9, S4/S11, S5/S12, Figura 9.

O C_{Red} permite compreender melhor a influência das estruturas na hidrodinâmica local, tendo sido calculado para a posição de cada sonda através de,

$$C_{Red} = \frac{H_{Si} - H_{Sf}}{H_{Si}} \quad (2)$$

em que H_{Si} e H_{Sf} representam a altura de onda significativa no local de uma dada sonda na fase de testes sem estruturas e após a construção dos cinco quebramares, respetivamente.

4.1. Condições de tranquilidade

A comparação da altura de onda significativa para diferentes condições de agitação marítima ao largo, num determinado local, para as situações antes e após a construção dos 5 quebramares destacados, permitiu concluir que essas estruturas têm maior eficácia quando o nível de água e o período de onda de pico são menores. Para essas condições podem obter-se coeficientes de redução da ordem de 50% nos locais mais abrigados, a sotamar da linha de quebramares. De referir que foram obtidos valores de C_{Red} próximos de 100%, mas que resultam essencialmente da acumulação de sedimentos a sotamar das estruturas de proteção (sonda S1 e S13). Os níveis de agitação diminuem para valores inferiores a 20% (e em alguns casos para valores negativos) com o aumento do nível de água para o nível extremo e com o aumento do período de onda.

Nas posições a barlar da linha de cinco quebramares destacados verificou-se um aumento da altura de onda que, em algumas situações, chegou aos 30% (a barlar do quebramar de taludes QB1 e do quebramar vertical QB4), devido à reflexão das ondas provocada por essas estruturas que aumenta os níveis de agitação no local.

Apesar de os quebramares destacados terem apresentado eficácia na dissipação da energia das ondas para os níveis de água mais correntes (*i.e.*, baixa mar e nível médio), o seu efeito positivo diminuiu significativamente para o nível de água extremo.

A intensa acumulação de sedimentos em algumas zonas a sotamar das estruturas de proteção conduziu a reduções dos níveis de agitação na ordem dos 20 a 60%, sendo que no caso da sonda S1 e S13 se registaram reduções significativas (perto dos 100%) que, embora pouco prováveis podem também acontecer na realidade, se as acumulações de sedimentos ocorridas no modelo físico se verificarem.



Figura 10 – Modelo físico na fase inicial dos testes para o nível de água +3.50 m ZH (PMAV).

Como era de esperar, o coeficiente de transmissão, C_T , tende a aumentar com o nível de água, ficando, em geral e para a baixa-mar, abaixo de 30% na zona de sombra do quebramar QB2 e

abaixo dos 2% na zona de sombra dos quebramares QB1 e QB3. Em zonas mais expostas são atingidos coeficientes de transmissão abaixo dos 7%, na zona da abertura entre os quebramares QB1 e QB2, ou abaixo dos 30%, na zona de abertura entre os quebramares QB2 e QB3. Porém, são atingidos valores acima dos 60% para os níveis de água mais elevados. Nas zonas menos abrigadas, esse coeficiente toma valores mais elevados, podendo atingir valores na ordem dos 100%. Estes resultados podem ser explicados pelo grau de proteção proporcionado pelos quebramares destacados, bem como pela evolução morfodinâmica da Praia do Carneiro durante os testes.

Verificou-se a ocorrência de galgamentos nos testes para o nível de água extremo (+4.75 m ZH). Os galgamentos ocorreram na Praia do Carneiro e na Praia das Pastoras (praia entre os molhes Norte e de Felgueiras), com tendência para o seu agravamento com o aumento da altura e período de onda testados. Sob o ponto de vista da mitigação do risco de galgamento, as estruturas não tiveram o efeito desejado, embora atrasem a ocorrência dos mesmos se se comparar o período de tempo e o nível de água em que estes ocorreram nas diferentes fases de ensaios (incluindo a fase de determinação dos fatores de ganho).

A variação da batimetria dos fundos durante os testes permitiu justificar alguns dos resultados obtidos, nomeadamente entre locais com condições de exposição à agitação marítima similares. De referir que, no modelo físico, as condições de agitação num dado local estão dependentes da profundidade de água. Os quebramares destacados promoveram acreção de sedimentos na sua envolvente, mais acentuada para os níveis de água menores, tanto a barlar das estruturas como a sotamar, sendo mais acentuada a sotamar, Figura 11.



Figura 11 – Assoreamento na periferia dos quebramares de taludes para o nível de água de +0.5 m ZH (BMAV).

4.2. Estabilidade

Os quebramares verticais mantiveram-se estáveis durante os testes. A análise da estabilidade foi assim limitada aos quebramares de taludes e teve como base o registo fotográfico ortogonal da situação dessas estruturas após cada ensaio de estabilidade. Esta análise permite a deteção de danos e posterior determinação das condições de teste em que estes ocorrem. Por outro lado, foi ainda possível analisar a evolução da envolvente do quebramar, pois sendo este um modelo de fundos móveis, é natural que exista acreção e erosão, que são aspetos importantes para a avaliação da eficácia dessas estruturas. Em relação aos ensaios para verificação da estabilidade dos quebramares, que foram repetidos, não foram observadas alterações que justificassem uma terceira ronda de ensaios.

O quebramar QB1 foi a estrutura que começou a apresentar danos mais cedo. Porém, devido ao peso, volumetria e tipo de blocos utilizado (blocos Antifer), no final foi o que registou um menor número de danos no final dos ensaios. A rotura do quebramar ocorreu apenas no final dos testes para o nível de água extremo (+4.75 m ZH).

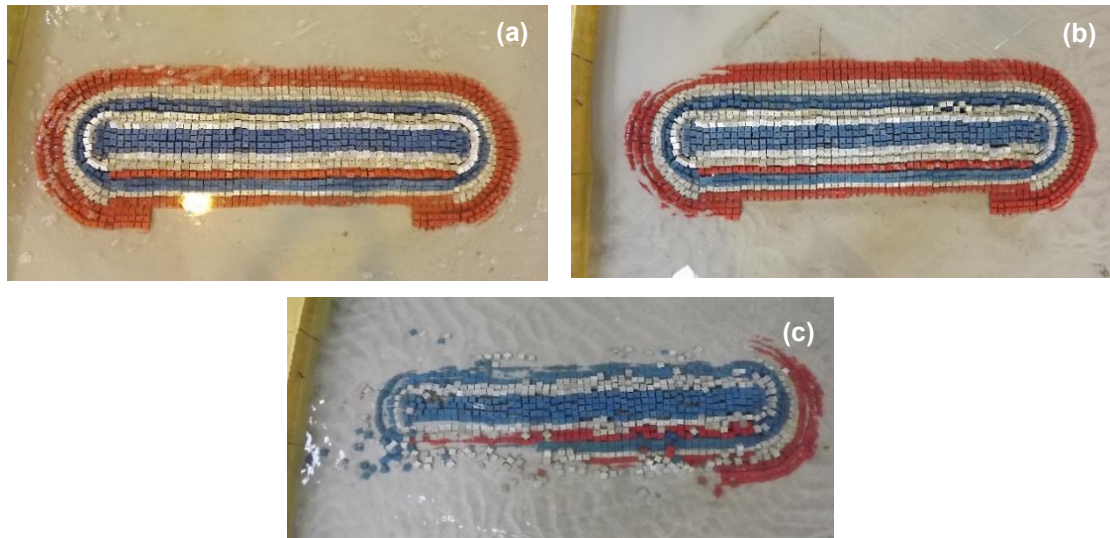


Figura 12 – Quebramar QB1: a) situação inicial; b) início dos danos no manto resistente para o nível de BMAV; c) situação após testes para o nível de água extremo (+4.75 m).

Os quebramares QB2 e QB3, com secções transversais aproximadamente iguais, e onde foram utilizados blocos de enrocamento (embora com um peso e volumetria distintos), apresentaram um comportamento estrutural satisfatório mais tempo que o quebramar QB1, mas posteriormente acabaram por evidenciar danos relevantes a um ritmo superior. No final da série de testes para o nível de preia-mar considerou-se que ambos tinham atingido a rotura. Considerou-se que estas duas estruturas não seriam capazes de resistir a condições de agitação extremas para níveis de água elevados.

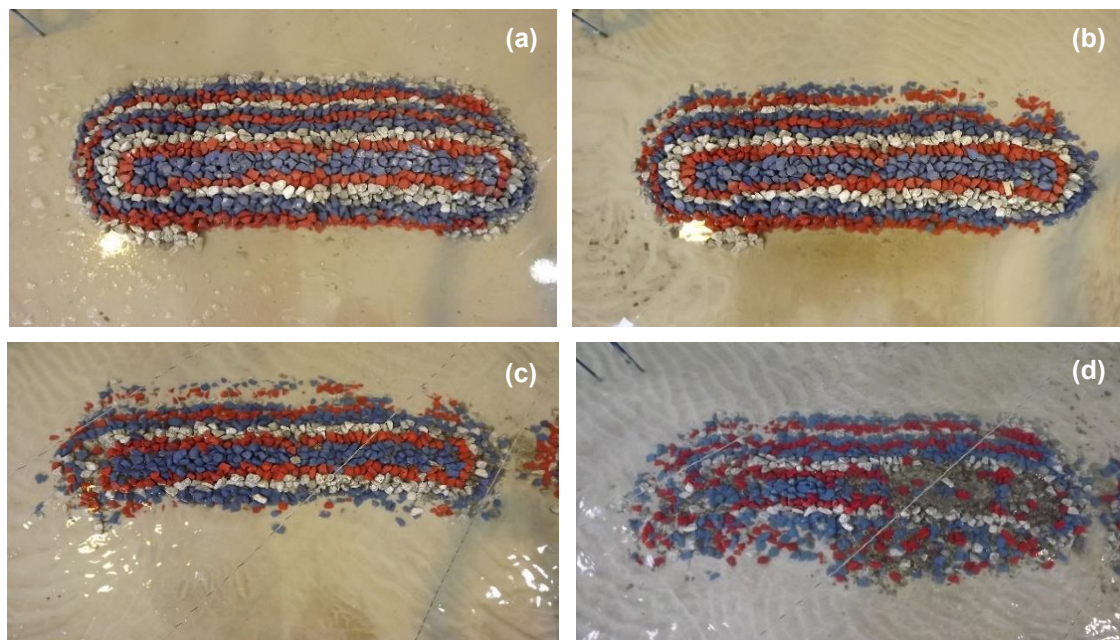


Figura 13 – Quebramar QB2: a) situação inicial, b) início dos danos para o nível NM, c) situação após os testes para o nível PMAV, e d) após testes para o nível extremo.

A volumetria, o peso e o tipo dos blocos de enrocamento utilizados no manto resistente não se revelaram adequados às condições de exposição dos quebramares QB2 e QB3. A variação local dos fundos e o aumento do nível de água estão entre as causas prováveis da ocorrência de



danos superior à inicialmente estimada. Esta observação é também válida para os blocos Antifer do quebramar QB1.

Tendo em conta a incerteza e natureza estocástica do dano e da sua evolução em estruturas de taludes, potenciadas pela existência de fundos móveis neste modelo físico, considerou-se que a evolução do dano nos quebramares QB1, QB2 e QB3 foi, em geral, equivalente, nos testes realizados nas Fase 2.2 e 2.3.

5. Conclusões

O estudo experimental visou avaliar a eficácia e a estabilidade de uma nova solução de proteção costeira para a Praia do Carneiro, constituída por cinco quebramares destacados, três de taludes e dois verticais, para agitação marítima do quadrante WNW. Pôde concluir-se que, em geral, o sistema de cinco quebramares destacados apresentou um desempenho satisfatório na melhoria das condições de tranquilidade a sotamar. A eficácia destas estruturas foi maior para os menores níveis de água. Foi também nessas condições que se verificou maior retenção de sedimentos a sotamar.

Os resultados apresentados neste artigo fazem parte de um estudo que inclui também a análise da eficácia do sistema de cinco quebramares destacados para agitação marítima proveniente do quadrante W e NW. Para o rumo WNW, comparativamente ao rumo W, verificou-se que a eficácia da solução proposta na proteção da costa era maior, devido ao ângulo de incidência da agitação.

Quanto aos galgamentos que atingem a Avenida D. Carlos, junto ao enraizamento do molhe de Felgueiras, aquando da ocorrência de fenómenos climáticos extremos, os quebramares levaram a uma minimização dos mesmos, quer em termos de frequência de ocorrência, quer em volume. Não obstante, o problema não foi completamente mitigado, como seria desejado.

Portanto, pode concluir-se que um dos objetivos principais da solução proposta, que se prendia com a diminuição da energia da agitação marítima que atinge a praia do Carneiro, foi, pelo menos em parte, atingido.

Em termos de estabilidade, os quebramares de taludes sofreram danos significativos, superiores aos considerados aceitáveis, para as condições de agitação marítima mais energéticas e para os níveis de água mais elevados (preia-mar de águas vivas combinada com uma sobrelevação do nível médio da água do mar devido aos efeitos da maré meteorologia e alterações climáticas). O quebramar QB1, por apresentar um manto resistente constituído por blocos Antifer, foi o que teve um comportamento globalmente mais satisfatório.

A dinâmica dos fundos contribuiu, naturalmente, para os resultados obtidos, na medida em que o aparecimento de profundidades de água maiores junto às estruturas permite que ondas de maior altura as possam atingir. Por outro lado, a ocorrência de assoreamento local, afeta o modo de interação da onda com o quebramar, em particular as correntes que se desenvolvem sobre o seu coroamento, a cota baixa. De referir ainda que neste estudo se reproduziram os afloramentos rochosos que são visíveis durante a baixa-mar. Embora seja provável que esses afloramentos se prolonguem para as zonas com cobertura arenosa, como não se conhece a espessura dessa camada de areia, o posicionamento desses maciços rochosos não foi reproduzido (opção mais conservativa).

O estudo experimental permitiu, assim, confirmar a eficácia da solução proposta para a melhoria das condições atuais da praia do Carneiro, bem como obter informação para afinar essa solução de forma a que a mesma resista mais favoravelmente às condições extremas que, embora pouco prováveis, poderão ocorrer no local durante a vida útil da obra. Essa afinação poderá passar, por exemplo, pela modificação do peso dos blocos usados no manto resistente dos quebramares de taludes.

Referências Bibliográficas

Consulmar (2018). "Projeto de reabilitação e melhoria das condições na Praia do Carneiro: especificações para ensaios em modelo reduzido", junho de 2018, incluindo peças desenhadas.



Consulmar (2019). “Projeto de reabilitação e melhoria das condições na Praia do Carneiro: especificações para ensaios em modelo reduzido”, junho de 2018, incluindo peças desenhadas.

Mansard, E., Funke, E. (1980). “The measurement of incident and reflected wave spectra using a least squares method”. Proc. of the 17th International Conference on Coastal Engineering (ASCE), New York, USA, Vol.1, pp.154-172.