

ENSAIOS EM MODELO FÍSICO TRIDIMENSIONAL DE ESTABILIDADE E GALGAMENTO DA 3.^a FASE DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR LESTE DO PORTO DE SINES

Rute Lemos¹, Conceição Juana Fortes¹, Maria da Graça Neves¹, Lucília Luís³
Idalino Sabido², Luís Aparício²

¹ LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

² APS - Administração dos Portos de Sines e do Algarve, S.A.

³ CONSULMAR, Projectistas e Consultores, Lda.

RESUMO

Com vista à verificação da estabilidade da solução estrutural para a 3^a fase do prolongamento do molhe leste do porto de Sines, foram realizados no LNEC ensaios em modelo físico reduzido tridimensional para verificação da estabilidade e galgamento da solução projetada.

Nesta comunicação descrevem-se os ensaios realizados no LNEC, onde se procedeu à otimização do projeto, quer no que diz respeito ao modo de colocação dos blocos do manto resistente quer das diferentes densidades de colocação dos blocos, as quais foram sendo adaptadas às diferentes zonas do quebra-mar, consoante a sua solicitação por parte da agitação marítima. Aborda-se ainda a metodologia para a escolha da escala e a sua dependência da tipologia dos blocos adensados a adotar.

1 - INTRODUÇÃO

O porto de Sines está situado na costa Sul de Portugal Continental, e nele se situa a bacia do Terminal de Contentores, (Figura 1 a). A bacia portuária do Terminal de Contentores, vulgarmente designado por Terminal XXI é abrigada por um molhe, (Figura 1b), que é atualmente constituído por 2 troços: o troço 1 com aproximadamente de 1100 m e o troço 2 com cerca de 400 m, correspondentes à 1^a e 2^a fase de construção do terminal, respetivamente. Junto à cabeça do molhe, as profundidades variam aproximadamente entre as cotas -18.0 m(ZH) e -20 m(ZH). A bacia abrigada por este molhe tem profundidades que variam entre 1 e 21 m, aproximadamente. No interior da bacia, encontra-se o cais acostável do Terminal de Contentores com um comprimento de cais de 946m+200m.

No âmbito do Plano de Expansão do porto de Sines, entre outras ações, está previsto que o quebra-mar leste do porto de Sines, venha a ser prolongado em mais cerca de 500 m na 3.^a fase de expansão (passando a totalizar 2000 m) e mais cerca de 500 m na 4.^a Fase, (passando a totalizar 2500 m).

À semelhança do quebra-mar existente, que consiste numa estrutura de taludes, protegida por um manto de camada dupla de blocos Antifer na cabeça e no extradorso em camada única no intradorso, a nova extensão apresentará aproximadamente as mesmas características geométricas (largura e cota de coroamento, inclinação dos taludes, etc.), dando continuidade ao existente.

O conceito que esteve na base do dimensionamento dos mantos resistentes foi o da utilização de blocos com as mesmas dimensões, mas de peso diferente, adaptado a cada zona do molhe onde são aplicados (cabeça, extradorso ou intradorso do tronco e respetivas proteções do pé de talude) e as ações a que ficam sujeitos (ação direta da onda incidente – espraiamento e refluxo ou por via do galgamento), tirando partido de betões adensados.

A estimativa das alturas e períodos das ondas de projeto, do troço correspondente à 3.^a Fase, veio a revelar valores ligeiramente superiores aos estimados para os troços anteriores e, conseqüentemente, a necessidade de mantos resistentes compostos por blocos também mais

pesados, e à necessidade de verificar a estabilidade dos mesmos através de ensaios físicos tridimensionais.

Assim, na presente comunicação serão abordadas as dificuldades construtivas, nomeadamente dos blocos adensados e do próprio modelo devido à sua dimensão, bem como as alternativas de colocação ensaiadas (ex: mantos com colocação regular e irregular). Será ainda abordado o programa de ensaios realizado bem como a análise dos resultados obtidos, focando-se especialmente na estabilidade dos mantos resistentes do extradorso e do intradorso (este último especialmente solicitado pelos fortes galgamentos). Será dado principal destaque ao comportamento da berma de proteção do pé de talude (solicitada pelo forte refluxo) e setores da cabeça (afetados pelos vórtices gerados pela difração da onda sobre a cabeça e pelo galgamento).



Figura 1 – Porto de Sines. a) Terminal XXI; b) Molhe leste

2 – OBJETIVOS DO ESTUDO

O objetivo dos estudos em modelo reduzido tridimensional foi a verificação da estabilidade e galgamento da cabeça e do tronco adjacente da futura extensão do molhe (cerca de 500 m) leste do Porto de Sines. A Figura 2 apresenta a zona de estudo, isto é, a planta do porto considerando o prolongamento do molhe leste e a expansão do Terminal XXI.

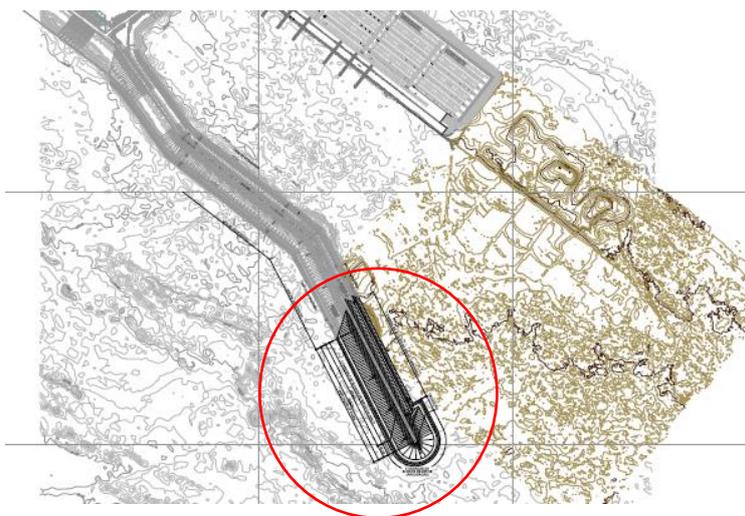


Figura 2 – Porto de Sines. Planta do porto considerando o prolongamento do molhe leste e a expansão do Terminal XXI (CONSULMAR, 2017) bem como a batimetria

No que diz respeito à estrutura a ensaiar, na Figura 3 apresenta-se com maior detalhe os 500 m do prolongamento do molhe leste do porto de Sines e a indicação dos perfis-tipo, P1 a P11.

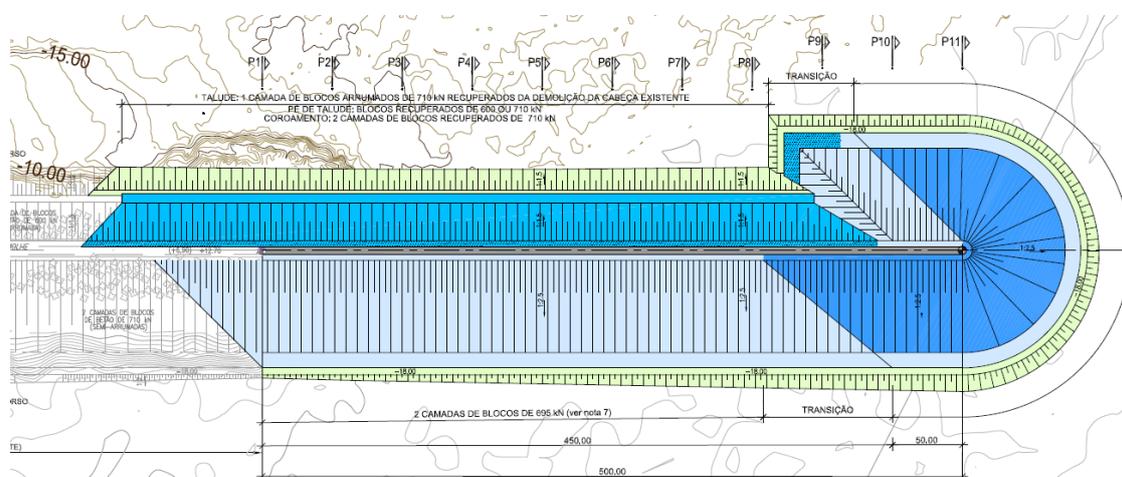


Figura 3 – Planta do prolongamento e zona de transição reproduzidos no modelo

O perfil-tipo do tronco do prolongamento do quebra-mar encontra-se fundado a uma cota próxima da -20.0 m (ZH), Figura 4 a), enquanto a zona correspondente à cabeça, Figura 4b, se encontra fundada aproximadamente à -24.0 m (ZH). As principais características dos perfis são:

- O coroamento, à cota +12.7 m (ZH), apresenta uma superestrutura betonada “in situ” delimitada por cubos Antifer com cerca 14.1 m de largura;
- No caso do perfil de rotação da cabeça, o talude exterior, simétrico ao talude interior, desenvolve-se sensivelmente entre as cotas +14.1 m (ZH) e -18.0 m (ZH) com uma inclinação de 2.5H:1.0V, sendo o manto resistente constituído por duas camadas de blocos cúbicos Antifer de 825 kN colocados de modo arrumado. Assentando num tapete de enrocamento com cerca de 5.0 m de largura, constituído por enrocamento de 30-60 kN;
- Os filtros do talude exterior são constituídos por duas camadas de enrocamento de 30-60 kN assente sobre uma camada de regularização de 0.5-5 kN;
- No que diz respeito ao tronco do prolongamento, o talude exterior possui características em tudo semelhantes às da cabeça, sendo, contudo, revestido por cubos Antifer de 695 kN. O talude interior desenvolve-se entre sensivelmente entre as cotas +12.7 m (ZH) e -9.75 m (ZH) com uma inclinação de 1.5H:1.0V, sendo o manto resistente constituído por blocos cúbicos Antifer de 695 kN colocados de modo arrumado em camada única. O manto de cubos Antifer assenta sobre uma banquetta de enrocamento com cerca de 10.32 m de largura, constituída por enrocamento de 30-60 kN.

As condições de agitação marítima especificadas pela CONSULMAR compreendem a reprodução de agitação irregular com direções de agitação incidente provenientes de SW e de W cada uma delas associada a 2 períodos de pico de onda (12 s e 20 s). Os ensaios realizados com cada período de pico compreenderam a atuação de um conjunto de alturas de onda significativa crescentes entre 6 m e 14 m. Os níveis de maré a considerar são de 0.0 m (ZH) e +4.0 m (ZH), correspondentes a baixa-mar mínimo e Preia-mar máxima, respetivamente.

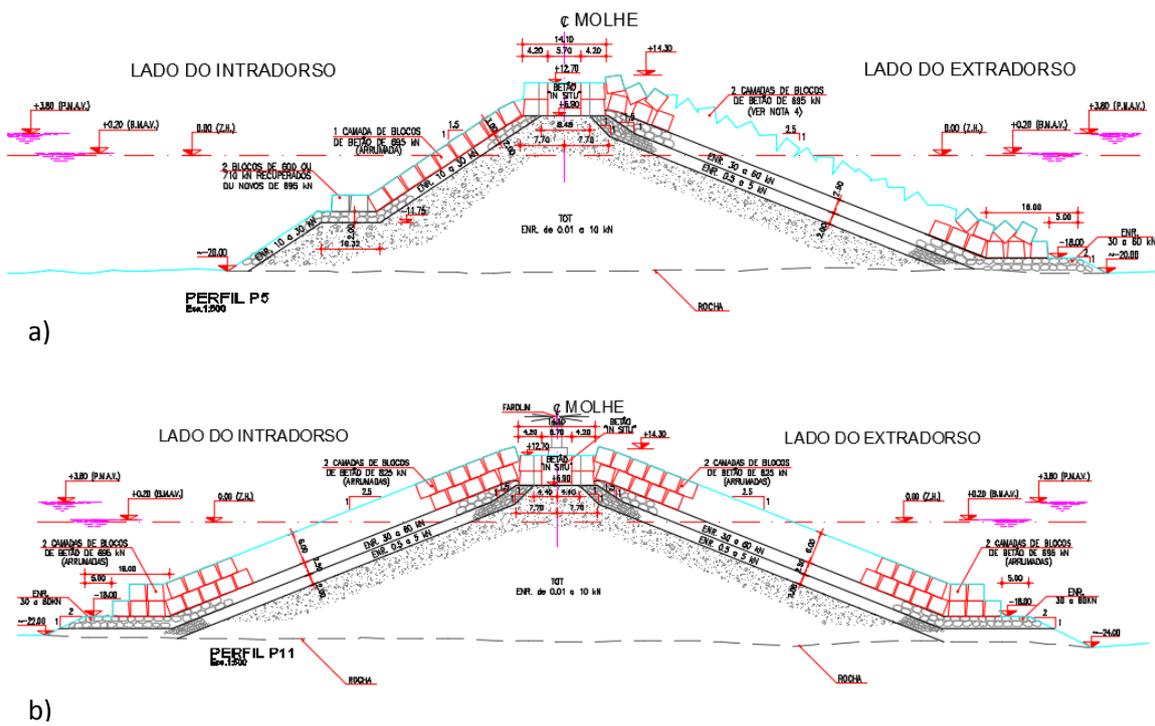


Figura 4 – Perfis-tipo do tronco (a) e da cabeça (b)

3 – O MODELO FÍSICO

3.1. Instalações experimentais

O modelo reduzido tridimensional foi construído nas instalações experimentais do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do LNEC, num tanque de ondas do Pavilhão de Hidráulica Marítima com 30.0 x 19.6 m², equipado com 2 geradores móveis de ondas irregulares, para profundidades de água até 0.75 m (Figura 5).



Figura 5 – Aspeto das instalações experimentais do PHM do LNEC.

A construção e exploração do modelo reduzido foram realizadas de acordo com a lei de semelhança de Froude, tendo sido utilizada a escala geométrica de 1:56.3. Esta escala foi selecionada, de maneira a garantir que, para as condições de agitação marítima incidentes sobre a batimétrica -27.5 m (ZH):

- Os principais aspetos da interação onda-estrutura (reflexão, dissipação e transmissão, especialmente por galgamento) eram bem reproduzidos no modelo;
- Eram evitados efeitos de escala significativos, especialmente no que se refere à reprodução da rebentação e do escoamento nos mantos da estrutura;
- As condições de ensaio definidas podiam ser reproduzidas na instalação de ensaio (tanque) com os recursos disponíveis.

A construção do modelo (Lemos et.al, 2017) implicou a reprodução dos seguintes elementos:

- Fundo fixo até entre as cotas -20 m (ZH) e -27.5 m (ZH) nas faixas de interesse, tendo em conta as direções da agitação marítima previstas reproduzir;
- Extensão de 500 m do prolongamento do molhe leste do porto de Sines;
- Cerca de 100 m da zona de transição entre cabeça do molhe existente e o tronco do prolongamento a construir.

As principais etapas para a construção do modelo físico da cabeça e tronco adjacente do prolongamento do molhe leste do Porto de Sines foram:

- Construção dos fundos do modelo (Figura 6);
- Fabrico de cerca de 6500 cubos Antifer correspondentes aos blocos adensados destinados colocação no tronco e na transição da cabeça do quebra-mar, para os quais não foi encontrada correspondência no stock existente no LNEC (Figura 7).
- Implantação no modelo da estrutura a ensaiar: construção da cabeça e tronco adjacente da extensão do molhe leste do Porto de Sines (Figura 8 e Figura 9).

Dada a grande dimensão do modelo (cerca de 10.5 m de comprimento, 3.5 m de largura e 0.7 m de altura), as duas últimas etapas da construção - fabrico dos cubos Antifer e a sua colocação no modelo - foram as que se revelaram mais complexas e mais morosas.

O fabrico de 6500 blocos adensados em tempo útil exigiu a colaboração do Núcleo de Betões Pedra e Cerâmicos (NPBC) do Departamento de Materiais do LNEC para a formulação da argamassa de presa rápida e com a densidade pretendida (cerca de 2600 kg/m^3). Esta tarefa exigiu o recurso a inertes de alta densidade como o Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (ASIC) o qual é um subproduto do aço, o qual foi fornecido pela Siderurgia Nacional, a aceleradores de presa e ainda a plastificantes, de modo a obter cubos Antifer com o mínimo de irregularidades possível. Os cubos foram fabricados no NPBC dada a necessidade de recorrer à secagem dos cubos com recurso a uma estufa, a qual permitiu a sua desmoldagem dos moldes de silicone ao fim de 1:30 horas.

A colocação dos blocos no modelo exigiu a mobilização de uma equipa de cerca de 7 técnicos do LNEC, tendo sido concluída num dia (Figura 8).

Na Figura 9 apresenta-se o aspeto final do modelo físico após a construção do prolongamento do quebra-mar bem como o modelo já preparado para a exploração.

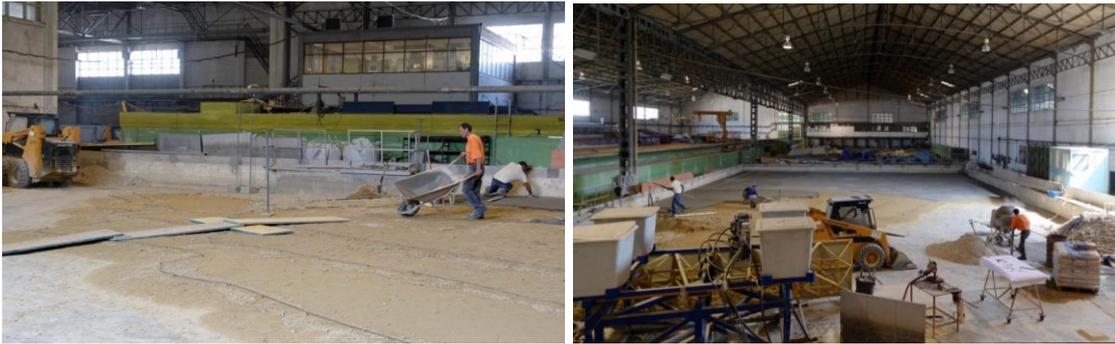


Figura 6 – Aspeto da construção dos fundos do modelo. Enchimento com areia (esquerda) e colocação de argamassa (direita).



Figura 7 – Desmoldagem e colocação no modelo dos cubos Antifer dos blocos adensados correspondentes a um peso de 695 kN.



Figura 8 – Aspeto da construção do modelo. Colocação de cubos Antifer.



Figura 9 – Aspeto final do modelo físico após construção

3.2. A escolha da escala

A semelhança entre o modelo físico reduzido e o protótipo pode ser traduzida através, nomeadamente, de semelhanças geométrica, cinemática e dinâmica de todas as solicitações atuantes no protótipo (à escala real) e no modelo. Em modelos de hidráulica marítima, podem considerar-se como forças dominantes as de gravidade e de pressão, sendo que, tanto a viscosidade do fluido (água) como a tensão superficial podem ser consideradas desprezáveis face às anteriores. Por isso, neste tipo de modelos, é comumente utilizada a lei de semelhança de Froude.

No presente caso, o modelo foi, portanto, construído e explorado de acordo com a lei de semelhança de Froude, tendo sido utilizada a escala geométrica de 1:56.3.

Assumindo esta lei, é assegurado desde que o número de estabilidade, N_s , é o mesmo no modelo e no protótipo. As diferenças da massa volúmica da água (água salgada no protótipo e água doce no modelo) e da massa volúmica das unidades do manto de proteção são tidas em conta neste parâmetro. O número de estabilidade é definido como:

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} \quad (\text{A.1})$$

onde:

- H_s = altura significativa de onda (m)
- Δ = massa volúmica relativa = $(\rho_a - \rho_w) / \rho_w$ (-)
- ρ_a = massa volúmica dos blocos de proteção (kg/m³)
- ρ_w = massa volúmica da água (kg/m³)
- D_n = diâmetro nominal dos blocos de proteção $(=\sqrt[3]{M/\rho_a})$ (m)
- M = massa do bloco (Kg)

A estabilidade dos blocos de proteção é modelada corretamente quando o valor de N_s no

modelo e no protótipo é o mesmo. A eq. (A.1) pode ser resolvida para determinar a escala do modelo usando aquela relação. A escala do modelo (λ) é determinada pelo quociente entre a altura de onda no protótipo e a altura de onda no modelo. Quando a massa e a massa volúmica dos blocos de proteção são conhecidas, a escala do modelo pode ser determinada a partir de:

$$\lambda = \frac{H_{s,p}}{H_{s,m}} = \frac{\Delta_p}{\Delta_m} \cdot \left(\frac{M_p}{M_m} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\rho_{a,m}}{\rho_{a,p}} \right)^{1/3} \quad (\text{A.2})$$

Os índices m e p referem-se aos valores do modelo e do protótipo, respetivamente.

Para os parâmetros mais relevantes usados no modelo físico, os fatores de escala são os seguintes:

- Comprimento (m): λ
- Volume (m³): λ^3
- Tempo (s): $\lambda^{0.5}$
- Massa (kg): λ^3
- Galgamento (l/s/m): $\lambda^{1.5}$

Para a determinação da escala a partir da aplicação da fórmula A.2, tomou-se como ponto de partida as características do stock de blocos existentes no LNEC fabricados aquando da realização de estudos anteriores para o porto de Sines (Silva, 1997a, Silva, 1997b e Silva, 1999), os quais possuem cerca de 420 g e uma massa volúmica ($\rho_{abb,m} = 3058 \text{ kg/m}^3$) semelhante à sua massa volúmica no protótipo ($\rho_{abb,p} = 3058 \text{ kg/m}^3$). É também conhecida a massa volúmica da água no modelo ($\rho_{w,m} = 1000 \text{ kg/m}^3$) a qual é ligeiramente inferior à da água salgada do protótipo ($\rho_{w,p} = 1025 \text{ kg/m}^3$).

Assim, pela fórmula A.2, a maior escala possível seria 56.3. Desta forma, o LNEC garantia que, para os blocos com maior massa volúmica em stock no LNEC se consegue a menor escala possível.

Dada a inexistência do tipo de blocos correspondentes a 695 kN com uma massa volúmica correspondente a 2650 kg/m^3 (26 kN/m^3) no protótipo, tornou-se necessário o fabrico deste tipo de blocos adensados.

Desta forma admite-se que ambos os tipos de blocos de betão no modelo possuem a mesma massa volúmica que no protótipo ($\rho_{abb,m} = \rho_{abb,p} = 2650 \text{ kg/m}^3$ e $\rho_{abb,m} = \rho_{abb,p} = 3058 \text{ kg/m}^3$) e a massa volúmica da água no modelo ($\rho_{w,m} = 1000 \text{ kg/m}^3$) é ligeiramente inferior à da água salgada ($\rho_{w,p} = 1025 \text{ kg/m}^3$).

Resolvendo a fórmula A.2 em ordem a M_m é possível determinar que aos blocos com uma massa no protótipo (M_p) de 695 kN (7846 kg) e $\rho_{abb} = 2650 \text{ kg/m}^3$ correspondem blocos com uma massa no modelo (M_m) de cerca de 352 g.

Por sua vez, quando aplicada a fórmula aos blocos de 825 kN (84097 kg) e $\rho_{abb} = 3058 \text{ kg/m}^3$ corresponderão blocos com uma massa no modelo (M_m) de cerca de 422 g, confirmando-se assim que o peso dos blocos já existentes no LNEC se adequa à escala escolhida.

Ambos os tipos de blocos possuem um diâmetro nominal (D_n) no modelo, de cerca de 0.051 m.

De modo a assegurar que o escoamento nas camadas do manto de proteção é turbulento no modelo (tal como no protótipo, sob as condições de projeto), para a escala escolhida deverá ser cumprido o seguinte critério relativo ao número de Reynolds:

$$R_e = \frac{\sqrt{gH_s} \cdot D_n}{\nu} > 3 \cdot 10^4 \quad (\text{A.4})$$

onde:

$$\begin{aligned} g &= \text{aceleração da gravidade} && (\text{m/s}^2) \\ \nu &= \text{viscosidade cinemática da água } (= 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}) && (\text{m}^2/\text{s}) \end{aligned}$$

Os efeitos da viscosidade no modelo são negligenciáveis se este critério for cumprido.

Tendo por base os valores de altura de onda ensaiados (entre 5.5 m e 14 m) e o D_n dos blocos no modelo (0.051 m), constata-se os troços protegidos com cubos de 695 kN e 825 kN, cumprem o critério atrás enunciado.

3.3. Equipamento experimental

O equipamento experimental que foi colocado no modelo consistiu basicamente nos geradores de onda para a geração da agitação marítima incidente no quebra-mar, sondas resistivas e sistemas de geração e aquisição da agitação para a geração e medição da agitação marítima em redor do quebra-mar e máquinas fotográficas para avaliação dos estragos causados no manto e na cabeça do quebra-mar.

Os ensaios foram realizados com duas direções da agitação marítima, tendo sido reproduzidos os rumos de W e de SW. Em ambos os rumos e de forma a poder abarcar-se a totalidade da extensão de obra em estudo, foram utilizados dois geradores de ondas irregulares de 6.0 m de comprimento e 1.30 m de altura que proporcionavam uma frente de onda com 12.0 m de comprimento.

Para a caracterização da agitação marítima gerada e incidente na obra foram utilizadas sondas de condutância. Nos ensaios, com ambos os rumos, procedeu-se ao registo da agitação marítima em dois pontos à saída dos geradores de ondas irregulares, em três pontos ao longo do molhe (um dos quais na vizinhança da cabeça) e em um ponto distanciado cerca de 200 m (valor de protótipo medidos ao nível do coroamento) do eixo de rotação da cabeça, segundo o alinhamento do molhe. Foi ainda medida a agitação em dois pontos localizados na zona abrigada do molhe, colocadas perpendicularmente ao molhe e distanciadas deste de 200 m e 400 m, de modo a avaliar a influência do galgamento na tranquilidade na entrada do porto.

A Figura 10 ilustra a posição dessas sondas, onde S1 e S2 estão colocadas à saída dos geradores de ondas irregulares; S3 distanciado cerca de 200 m (valor de protótipo medidos ao nível do coroamento) do eixo de rotação da cabeça, segundo o alinhamento do molhe com vista à medição da agitação na posição da cabeça de um eventual prolongamento de 700 m e ainda em três sondas, S4 a S6, colocadas ao longo do extradorso do molhe. A medição da agitação nas sondas S7 e S8 teve como objetivo avaliar a influência do galgamento na tranquilidade do canal de acesso ao porto.

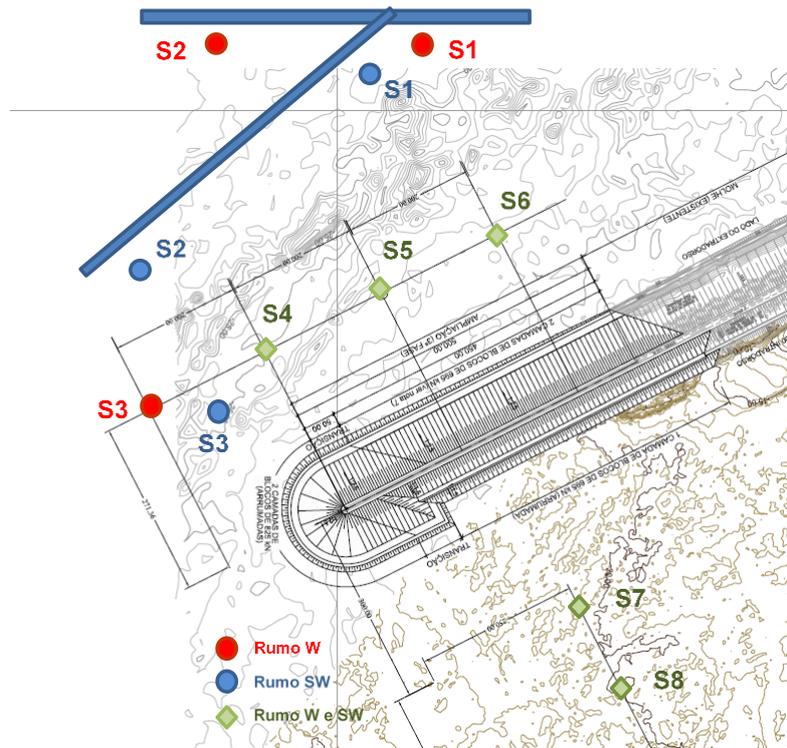


Figura 10 – Identificação dos locais de medição da agitação marítima no decurso dos ensaios.

De modo a realizar a cobertura fotográfica de todo o modelo, foram instaladas 3 câmaras fotográficas disparadas remotamente através de um portátil ou de controlo remoto, as quais fotografaram, respetivamente, a zona exterior da cabeça e trecho do tronco a ela adjacente, a vista frontal da cabeça e a zona exterior da cabeça e intradorso do tronco a ela adjacente. Os restantes trechos do tronco (exterior e interior) foram fotografados com uma câmara fotográfica móvel com zoom fixo. A Figura 11 ilustra a disposição do equipamento fotográfico no tanque de ensaios.

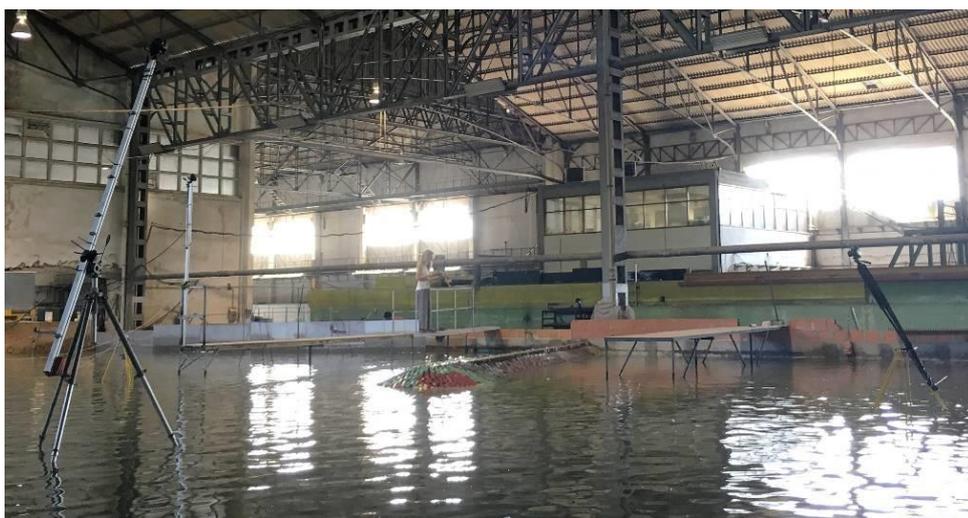


Figura 11 – Disposição do equipamento fotográfico no tanque de ensaios.

3.4. Níveis de maré e agitação marítima

As condições de agitação marítima reproduzidas correspondem a agitação marítima irregular de acordo com uma configuração espectral empírica do tipo JONSWAP (fator de pico, $\gamma=3.3$) e contemplando-se a reprodução de grupos de ondas segundo o método utilizado usualmente no LNEC.

Foram reproduzidas as direções correspondentes a W e SW (sobre a cota -35.0 m (ZH)), às quais se associou a reprodução de 2 valores de período de pico do espectro (T_p) de 12 s e de 20 s e valores de altura de onda significativa (H_s) compreendidas entre 6 m e 14 m (Quadro 1). Cada um dos valores de H_s atuou no modelo durante um período correspondente a 3 horas no protótipo (aproximadamente 24 minutos no modelo).

Os ensaios foram realizados com dois níveis de maré constantes: 0.0 m (ZH) e +4.0 m (ZH), correspondentes a Baixa-Mar mínimo e Preia-Mar máxima, respetivamente.

Como valores de altura de onda significativa nominais de ensaio foram considerados os resultantes dos registos efetuados à saída dos geradores de ondas, ou seja, sobre a plataforma à cota -35.0 m (ZH), durante os ensaios de calibração (antes da construção do modelo do molhe). Dado que a calibração foi realizada com dois geradores de ondas, os valores nominais de ensaio foram considerados como a média dos registos efetuados em duas sondas, cada uma delas colocada em frente ao respetivo gerador.

De modo a obter uma melhor informação acerca da evolução dos estragos nas zonas mais vulneráveis da estrutura, durante os ensaios de repetição, o modelo foi sujeito a uma sequência de estados de agitação marítima com uma duração total superior aos primeiros ensaios. Para isso a estrutura foi sujeita à atuação de alturas de onda crescentes em escalões mais restritos (1 m no caso do rumo W e 0.5 m no caso do rumo SW).

A altura de onda de projeto foi 8 m para a agitação proveniente de SW e 12 m para a agitação proveniente de W. Foram ensaiadas alturas de onda superiores de modo a salvaguardar alguma margem de segurança.

Quadro 1 – Condições de agitação utilizadas nos ensaios e nos ensaios de repetição.

Hs (m)	Rumo W				Rumo SW			
	Ensaio		Repetições		Ensaio		Repetições	
	$T_p=12$ s	$T_p=20$ s						
5.5							x	x
6.0	x	x	x	x	x	x	x	x
6.5							x	x
7.0			x	x			x	x
7.5							x	x
8.0	x	x	x	x	x	x	x	x
8.5							x	x
9.0			x	x			x	x
9.5							x	x
10.0	x	x	x	x	x	x	x	x
11.0			x	x				
12.0	x	x	x	x	x	x		
13.0			x					
14.0	x		x		x			

Devido ao reduzido período de tempo disponível para realizar a totalidade do programa de ensaios especificado, optou-se inicialmente por realizar os ensaios preliminares com alturas de onda com escalões de 2 m e posteriormente, já depois de realizadas várias alterações ao modelo para otimização da sua estabilidade, especialmente das zonas mais vulneráveis efetuaram-se os ensaios de repetição de acordo com o programa integral de ensaios especificado pela Consulmar, para confirmação da configuração final.

3.5. Metodologia geral dos ensaios

A metodologia utilizada na realização dos ensaios foi:

Durante os ensaios:

- Registo das condições de agitação à cota -35 m (ZH) e nos pontos em redor do modelo;
- Observação dos movimentos e quedas dos blocos do manto resistente e do tardez;
- Qualificação do grau de galgamento, segundo o critério de classificação do LNEC;
- Reportagem vídeo do galgamento através de câmaras de vídeo.

No final de cada ensaio:

- Registo fotográfico;
- Anotação do número de movimentos e quedas dos blocos;
- Registo dos filmes e de todos os dados obtidos durante o ensaio.

O modelo foi reconstruído no final de cada série de ensaios, correspondente a cada um dos períodos de pico. Todos os ensaios foram repetidos para confirmação dos resultados.

A avaliação das quedas e movimentos do manto e do pé do talude foi feita através do cálculo da percentagem de quedas e de movimentos a que corresponde um grau dos respetivos critérios de classificação em vigor no LNEC,.

Para efeitos de observação do modelo da obra e caracterização dos estragos ocorridos no decurso dos ensaios, procedeu-se ao seccionamento do modelo do molhe em 9 troços: A, B, C, D, E, F e G/H (cabeça) e I (Transição de duas para uma camada no talude interior), de acordo com o esquema apresentado na Figura 12.



Figura 12 – Divisão do modelo em troços.

4 – ENSAIOS DE ESTABILIDADE E GALGAMENTOS

O programa de ensaios decorreu em três fases:

- 1ª fase: Ensaios da configuração inicial: Colocação dos cubos de modo semi-arrumado nos troços D e E e arrumado nos restantes troços. Apenas se efetuaram ensaios com o rumo W, para o nível de +0.0 m (ZH) com período de pico de 12 s e 20 s e para o nível de +4.0 m (ZH) com período de pico de 20 s. Foram ensaiadas alturas significativas entre 6 e 14 m, crescentes em escalões de 2 m;
- 2ª fase: Ensaios da configuração otimizada: Aumento da densidade de colocação quer no setor interior da cabeça quer no manto do extradorso do troço F; Colocação arrumada dos cubos nos troços D e E; Substituição dos blocos do pé do talude nos troços D, E e F por blocos de 825 kN; Alteração do modo de colocação do remate do intradorso. Efetuaram-se ensaios com os rumos W e SW, dois níveis de maré e dois períodos de pico e alturas significativas entre 6 e 14 m, crescentes em escalões de 2 m;
- 3ª fase: Repetições da configuração otimizada. Nesta fase, foi ainda aumentada ligeiramente a densidade de colocação dos blocos na zona de camada única. Efetuaram-se ensaios com os rumos W e SW, dois níveis de maré e períodos de pico de 12 e 20 s. As alturas de onda significativas estavam compreendidas entre 6 m e 14 m, crescentes em escalões de 1 m para o rumo W e compreendidas entre 5,5 m e 10 m crescentes em escalões de 0.5 m para o rumo SW.

4.1 - Configuração Inicial

Os ensaios iniciaram-se com a solução constante nas especificações (CONSULMAR, 2017) e de acordo com os perfis apresentados anteriormente na Figura 4. Contudo, com a finalidade de testar diferentes tipos de colocação de blocos, foi testada uma secção do extradorso do tronco do quebra-mar, com cerca de 200 m, adjacente à transição dos blocos de 825 kN para os blocos de 695 kN onde os blocos Antifer foram colocados em duas camadas semi-arrumadas (Figura 13).

A Figura 14 ilustra a configuração inicial, em termos de pesos e densidades de colocação, com que foram levadas a cabo as primeiras séries de ensaios.



Figura 13 – Trecho do modelo onde os blocos foram colocados de modo semi-arrumado.

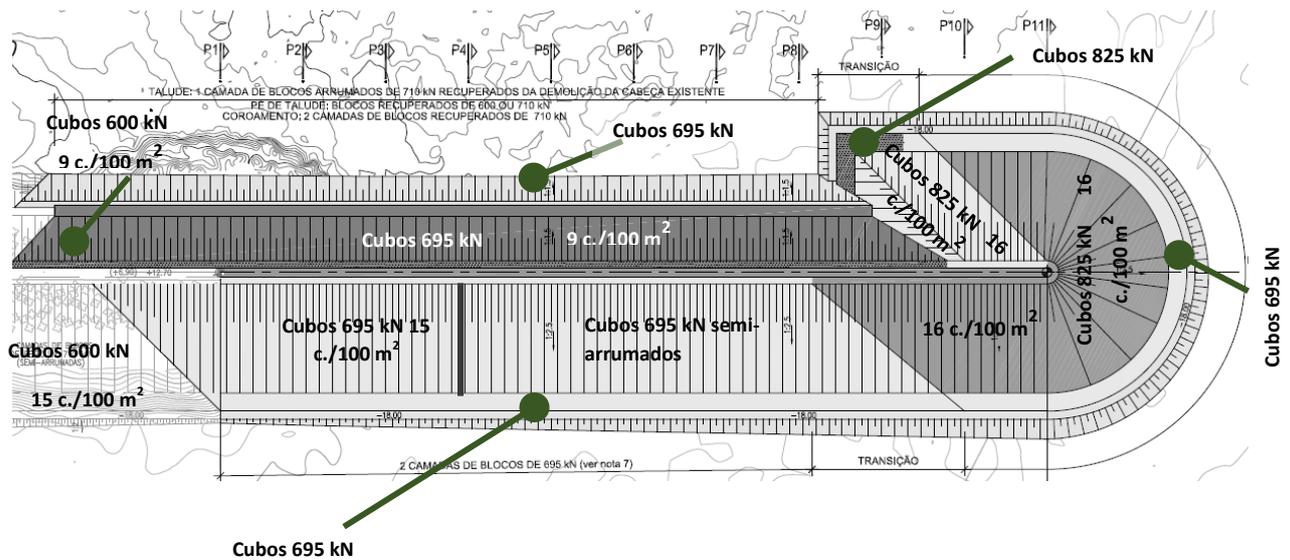


Figura 14 – Configuração inicial em termos de pesos e densidades de colocação (em blocos/m²).

Os resultados obtidos com a configuração inicial revelaram a existência de alguns pontos de maior vulnerabilidade, nomeadamente o talude do setor interior da cabeça (troço H) devido ao fenómeno de difração. Também o pé deste mesmo setor revelou alguma vulnerabilidade com os ensaios realizados com o nível de baixa-mar.

Apesar de não terem ocorrido quedas, também o talude exterior da zona adjacente à cabeça, revelou um considerável número de movimentos. Assim sendo, após a análise dos resultados obtidos durante esta primeira fase de ensaios, com vista à melhoria da estabilidade de algumas zonas do quebra-mar, foram sugeridas pela CONSULMAR algumas alterações ao modelo, nomeadamente:

- Alteração do modo de colocação dos cubos nos troços D e E de modo semi-arrumado para arrumado no tronco do manto exterior (Figura 16);
- Ligeiro aumento da densidade de colocação nas zonas de maior ocorrência de movimentos/reajustes de posição dos blocos quer no setor interior da cabeça quer no tronco do manto exterior, troço F (Figura 17 e Figura 18);
- Substituição de blocos de 695 kN do pé do talude, por blocos de 825 kN, especialmente nas zonas mais solicitadas, tais como o setor interior da cabeça. Atendendo ao já reduzido número deste tipo de blocos disponíveis, estes apenas foram colocados no talude exterior das zonas D, E, F e ainda nos setores exterior e interior da cabeça e remate (Figura 17 e Figura 18);
- Melhoria do modo de colocação do remate do intradorso, correspondente à passagem de duas para uma camada de cubos Antifer, com aumento da sua densidade de colocação (Figura 19).

A Figura 15 ilustra a configuração otimizada do modelo, em termos de pesos e densidades de colocação, com que foram realizados os ensaios com a configuração otimizada.

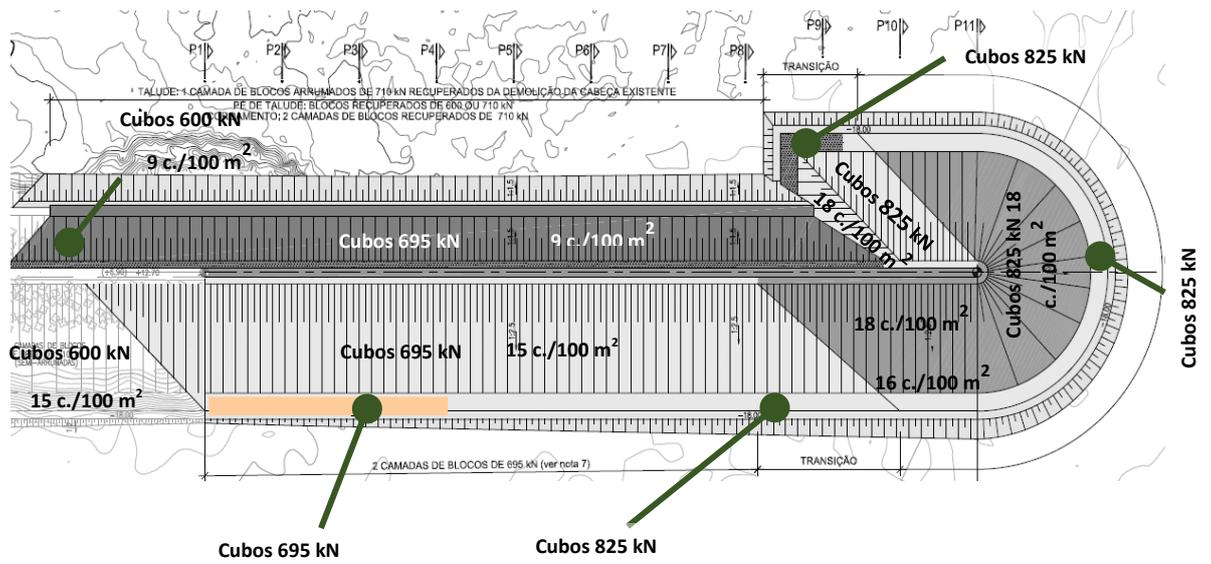


Figura 15 - Configuração final, em termos de pesos e densidades de colocação (em cubos/m²) após as alterações implementadas no modelo.

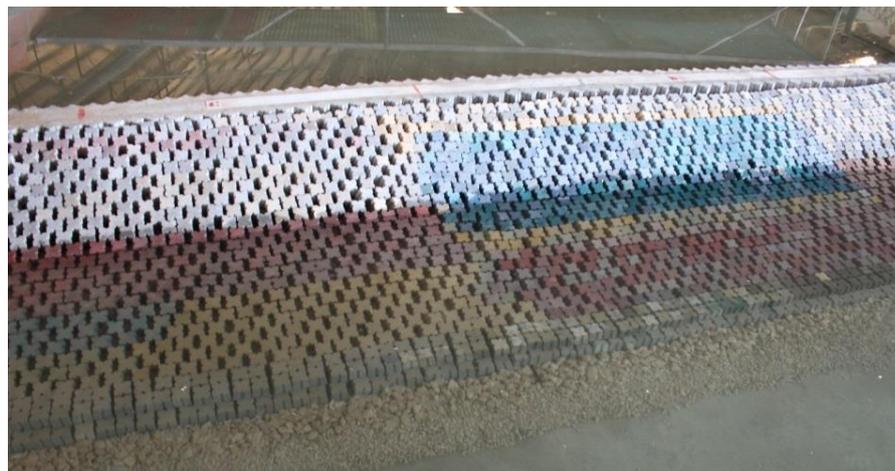


Figura 16 – Troços D e E. Colocação do manto em duas camadas arrumadas.



Figura 17 – Troço F. Aumento da densidade de colocação na zona de maior ocorrência de movimentos e aumento do peso dos blocos do pé do talude.



Figura 18 - Troços G, H e I. Aumento da densidade de colocação nas zonas de maior ocorrência de movimentos e aumento do peso dos blocos do pé do talude.

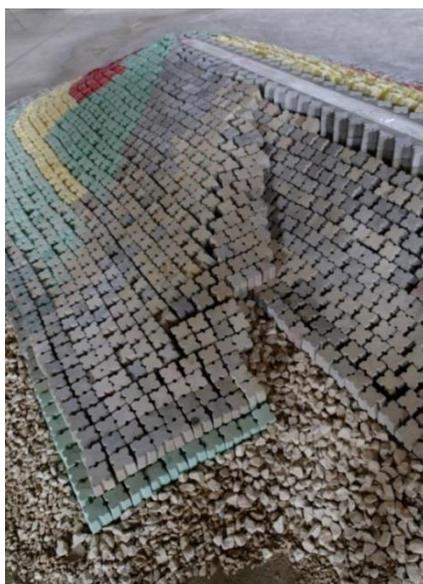


Figura 19 – Alteração do modo de colocação do remate do intradorso, correspondente à passagem de duas para uma camada de cubos Antifer.

4.2 - Configuração otimizada

No que diz respeito ao talude exterior a colocação de modo arrumado revelou-se bastante mais estável do que com o modo desarrumado. O remate do intradorso com a camada única revelou-se também bastante estável com a agitação proveniente de W. Apenas o pé do talude do setor interior da cabeça, apesar do aumento do peso dos blocos, sofreu ainda um número considerável de quedas (11 blocos) para os ensaios realizados com o nível de baixa-mar, especialmente com o período de pico do espetro (T_p) de 20 s (Quadro 3).

No que diz respeito aos ensaios realizados com a agitação proveniente de SW, a obliquidade da agitação proveniente deste rumo (Figura 20) e os fenómenos de espraiamento a ela associados, levaram à passagem mais precoce de lâminas de água, revelando-se este rumo mais propício à ocorrência de movimentos do manto do que com a agitação proveniente de W. No que diz respeito às quedas do pé do setor interior da cabeça (Troço H), para H_s inferiores ou iguais a 8 m, o rumo SW revelou-se mais desfavorável do que o rumo W.



Figura 20 - Aspecto dos galgamentos e do espraiamento e refluxo observados durante um ensaio com rumo SW, nível de maré de 0.0 m (ZH), $T_p = 20$ s e $H_s = 10$ m

O remate do intradorso com a camada única foi, de maneira geral, mais afetado com o rumo SW do que com o rumo W, em especial com o nível de maré de Preia-mar associado a $T_p=20$ s. Contudo, apesar da ocorrência de alguns movimentos no final de $H_s=8$ m, apenas se verificou uma queda na zona do remate (Figura 21 e Quadro 2).



Figura 21 – Aspecto do remate após os ensaios com rumo SW, PM, $T_p=20$ s e $H_s=8$ m

O número de quedas do pé do talude exterior adjacente à cabeça (Troço F) foi, de modo geral, maior com a atuação do rumo W do que com o rumo SW. Para este último rumo ocorreu um ligeiro assentamento de grupo na zona do intradorso adjacente ao remate, durante o ensaio de Baixa-mar associado a $T_p=20s$. Esse assentamento foi devido ao vórtice formado nessa zona, acompanhado de galgamento associado à diminuição da almofada de água nos ensaios com o nível de maré de Baixa-mar. Estes fenómenos contribuíram, assim, para a instabilização da zona do encontro da camada dupla com a camada única.

Para ambos os rumos e dado o caráter galgável da obra, especialmente com o nível de maré de Preia-mar, também a camada única do intradorso sofreu alguns movimentos.

Durante a fase correspondente aos ensaios de repetição, a densidade de colocação da camada única foi ligeiramente aumentada de modo a diminuir a percentagem de movimentos.

Durante a fase de repetições dos ensaios a reconstrução do remate do intradorso com a camada única foi alvo de especial cuidado, de modo a minimizar as faces expostas à agitação e a manter a densidade de colocação necessária à manutenção da estabilidade desta parte da estrutura. Esta construção revelou-se bastante morosa.

No Quadro 2 e no Quadro 3 é apresentado o número total de quedas ocorridas no pé do talude durante os ensaios com os rumos SW e W respetivamente, não se tendo observado quedas no talude.

Quadro 2 – Rumo SW. Número total de quedas contabilizado no pé do talude exterior durante os ensaios

	Hs (m)	Duração acumulada (horas protótipo)	Tronco						Cabeça			Remate	Intradorso
			A	B	C	D	E	F	G	H	I		
BM12	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Estável	Estável
	6.5	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	7	9	0	0	0	0	0	1	0	0	0		
	7.5	12	0	0	0	0	0	3	0	0	0		
	8	15	0	0	0	0	0	4	0	0	0		
BM20	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Estável	Estável, mas com um início de escorregamento em grupo na zona adjacente à cabeça
	6.5	6	0	0	0	0	0	1	0	0	0		
	7	9	0	1	0	0	0	1	0	3	0		
	7.5	12	1	1	0	0	0	3	0	4	0		
	8	15	1	1	0	0	0	4	0	5	1		
PM20	6	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	Estável
	6.5	6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	
	7	9	0	0	1	0	0	2	0	0	0	1	
	7.5	12	0	0	1	0	0	3	0	0	0	1	
	8	15	0	0	1	0	0	3	0	0	0	1	
PM12	Não ocorreram quedas para Hs até Hs = 8 m												

Quadro 3 – Rumo W. Número total de quedas contabilizado no pé do talude exterior durante os ensaios

	Hs (m)	Duração acumulada (horas protótipo)	Tronco						Cabeça			Remate	Intradorso
			A	B	C	D	E	F	G	H	I		
BM12	6	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	Estável	Estável
	7	6	0	0	0	0	0	2	0	0	0		
	8	9	0	0	0	0	0	3	0	0	0		
	9	12	0	0	0	0	0	3	0	0	0		
	10	15	0	0	0	1	0	3	0	0	0		
	11	18	0	0	0	1	0	5	0	0	0		
BM20	6	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	Estável	Estável
	7	6	0	0	0	0	0	5	0	0	0		
	8	9	0	0	0	0	0	9	0	0	0		
	9	12	0	0	0	0	0	11	0	0	0		
	10	15	1	0	0	0	0	11	0	0	0		
	11	18	1	0	0	0	0	11	0	6	0		
PM12	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Estável	Estável
	7	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	8	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	9	12	0	0	0	0	0	1	0	0	0		
	10	15	0	0	0	0	0	1	0	0	0		
	11	18	0	0	0	0	0	1	0	0	0		
PM20	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Estável	Estável
	7	6	0	0	0	0	2	0	0	0	0		
	8	9	0	0	0	0	2	0	0	0	0		
	9	12	0	0	0	0	2	1	0	0	0		
	10	15	1	0	0	0	2	1	0	0	0		
	11	18	1	0	0	0	2	1	0	0	0		
12	21	1	0	0	0	4	2	0	0	0			

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Do ponto de vista da estabilidade da estrutura, os 500 m terminais do molhe apresentaram um comportamento globalmente estável para as alturas de onda com mais probabilidade de ocorrência ($H_s < 8\text{m}$ para o rumo SW e $H_s < 10\text{m}$ para o rumo W) apresentando, contudo, alguns locais de maior vulnerabilidade à ocorrência de estragos, especialmente aquando da atuação das condições de agitação, para ambos os rumos, associadas ao período de pico de 20 s. Estes estragos tornam-se mais relevantes para H_s superiores às ondas de projeto.

A obliquidade da agitação proveniente de SW e os fenómenos de espraiamento e de refluxo a ele associado, levou à ocorrência mais precoce de passagem de lâminas de água, revelando-se este rumo mais propício à ocorrência de movimentos do manto do que com a agitação proveniente de W.

No que diz respeito à estabilidade do pé do talude do setor interior da cabeça para as condições de ensaio mais adversas (nível de maré de 0.0 m (ZH) associada a $T_p=20\text{s}$) e para H_s menor ou igual a 8 m, o número de quedas foi ligeiramente superior com o rumo SW do que com o rumo W. O remate do intradorso com a camada única também foi, de maneira geral, mais afetado com o rumo SW do que com o rumo W. O número de quedas do pé do talude exterior adjacente à cabeça, foi de modo geral maior com a atuação do rumo W do que com o rumo SW.

Os locais de maior vulnerabilidade, para ambos os rumos de agitação marítima são:

- Pé do talude do setor interior da cabeça e da zona a ela adjacente, quando associado ao nível de 0.0 m (ZH);
- Zona ativa dos taludes do setor interior da cabeça bem como do troço do extradorso adjacente à cabeça;
- Remate da transição para a camada única do intradorso, especialmente com a atuação da agitação proveniente de SW, para ambos os níveis de maré, quando associados a $T_p=20$ s.

Salienta-se que a solução construtiva adotada para o remate da transição para a camada única do intradorso revelou ser de execução bastante morosa, tendo a sua construção no modelo sido revestida de especial complexidade, de modo a evitar existência de faces dos blocos expostas à agitação. A alta densidade de colocação dos blocos deste elemento, bem como o correto travamento do remate na zona de encontro com a camada única do intradorso, são condições de suprema importância para o sucesso desta solução construtiva.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos elementos da equipa de ensaios André Ramos, Joana Simão, Jan Hilário, Pedro Guerreiro, Matteo Miglietta, Leonor Branco e Rosa Emília Soares a colaboração nos ensaios realizados. Agradecem ainda ao Eng^o Rui Capitão pela reportagem fotográfica realizada ao longo da construção e exploração do modelo. Agradecem também o trabalho desenvolvido pelo Núcleo de Betões Pedra e Cerâmicos do LNEC na conceção, e construção dos blocos adensados. Finalmente agradecem à Siderurgia Nacional, através do grupo MEGASA, o fornecimento gratuito do material ASIC com que foram fabricados os blocos adensados colocados no modelo.

Referências bibliográficas

- CONSULMAR, 2017 – Projeto de execução da 3ª fase de ampliação do molhe leste do porto de Sines. Ensaios em modelo físico reduzido. Especificações Preliminares, janeiro de 2017.
- Silva, L.G. (1997a) – Molhe de proteção do terminal definitivo de carga geral do porto de Sines. Ensaios bidimensionais de estabilidade e galgamentos. LNEC, Rel 232/97-NPP
- Silva, L.G. (1997b) – Molhe de proteção do terminal definitivo de carga geral do porto de Sines. Ensaios tridimensionais de estabilidade e galgamentos. LNEC, Rel 241/97-NPP
- Silva, L.G. (1999) – Molhe de proteção do terminal definitivo de carga geral do porto de Sines. Ensaios adicionais tridimensionais de estabilidade e galgamentos. LNEC, Rel 99/99-NPP
- Lemos, R; Neves, M.G., Fortes, C.J. (2017). “3ª fase de ampliação do molhe leste do porto de Sines – ensaios em modelo reduzido tridimensional. Relatório 1 - Construção do modelo físico”. Relatório 136/2017 – DHA/NPE