



3.^a e 4.^a FASES DE AMPLIAÇÃO DO MOLHE LESTE DO PORTO DE SINES

Lucília Luís; Sofia Freire; João Barros; Rute Lemos; Gabriel Silva; Juana Fortes; Graça Neves, Idalino Sabido José; Luís Aparício

CONSULMAR – Projetistas e Consultores, Lda.; Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC;
Administração dos Portos de Sines e do Algarve – APS

lucilia.luis@consulmar.pt, sofia.freire@consulmar.pt, joao.barros@consulmar.pt, rlemos@lnec.pt,
lgsilva@lnec.pt, jfortes@lnec.pt, gneves@lnec.pt, idalino.jose@apsinesalgarve.pt,
aparicio.fernandes@apsinesalgarve.pt.

Resumo

Encontra-se em curso a empreitada da 3.^a Fase de Ampliação do Molhe Leste do Porto de Sines em 750 m, a qual irá conferir a esta estrutura um comprimento total de 2250 m.

A solução adotada consiste num quebra-mar de taludes convencional galgável, replicando conceptualmente a solução já existente, com coroamento à cota +12,55 m (ZH). Esta solução é caracterizada por mantos resistentes compostos por blocos de betão artificiais do tipo Antifer de 27,5 m³ em betão de alta densidade, variando-se a densidade do betão para obter blocos de maior peso – 695 kN, 712 kN, 843 kN e 847 kN. Os blocos são aplicados em camada dupla no extradorso do tronco e na totalidade da cabeça e em camada única no intradorso do tronco.

O pré-dimensionamento da nova extensão do molhe leste para um período de retorno de 100 anos foi baseada na realização de um estudo de agitação, onde se combinou a utilização quer de métodos empíricos como de modelação matemática. Para a sua validação, a solução proposta foi sujeita a dois conjuntos de ensaios distintos em modelo físico reduzido 3D, o primeiro dos quais em 2017 e o segundo em 2021, tendo ambos sido elaborados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

1. Introdução

Encontra-se presentemente em curso a empreitada da 3.^a Fase de Ampliação do Molhe Leste do Porto de Sines em 750 m, a qual irá conferir a esta estrutura um comprimento total de 2250 m após a sua conclusão.

Esta empreitada tem por intuito permitir alargar a bacia portuária abrigada que se encontra dedicada ao Terminal de Contentores de Sines (Terminal XXI), de molde a permitir (i) garantir condições adequadas de abrigo à agitação marítima dos novos postos de acostagem do Terminal ainda não construídos, (ii) proporcionar melhores condições de manobras de acesso e rotação dos navios de maiores dimensões, (iii) incrementar a operacionalidade do posto já existente, cujas taxas de utilização têm vindo a crescer, e (iv) não condicionar a expansão do porto para sul.

O envolvimento da CONSULMAR – Projetistas e Consultores, Lda. neste projeto surge originalmente através da revisão do projeto de execução da 3.^a Fase de Ampliação do Molhe Leste do Porto de Sines no final de 2016, o qual foi realizado internamente pela Administração dos Portos de Sines e do Algarve (APS). O projeto em questão previa à data a execução do prolongamento do Molhe Leste em 500 m, encontrando igualmente associada a realização de ensaios tridimensionais em modelo físico no Laboratório Nacional de Engenharia (LNEC) para este comprimento.

Durante o processo de revisão, a APS indicou à CONSULMAR a intenção de antecipar parcialmente a execução da 4.^a Fase de ampliação nesta empreitada, o que originou a elaboração de um novo estudo prévio focado na otimização do comprimento adicional, resultando na opção pela parte APS no prolongamento do molhe Leste num comprimento total de 750 m.

Encontrando-se definido o novo comprimento para o prolongamento do molhe Leste do Porto de Sines, procedeu-se à realização de um novo projeto de execução, cujo desenvolvimento



pressupunha o respeito pelas características fundamentais da solução originalmente definida pela APS no projeto de execução original, procedendo-se à adequação do dimensionamento dos mantos resistentes à revisão das condições de agitação realizada e aos resultados dos ensaios tridimensionais em modelo físico, os quais foram complementados por um segundo conjunto de ensaios realizado em 2021.

2. Condições naturais

2.1 Topo-hidrografia e natureza geológica dos fundos

A extensão de implantação do prolongamento do molhe leste desenvolve-se em fundos muito uniformes, situados entre as batimétricas -18,0 e -25,0 m (ZH), encontrando-se o prolongamento sensivelmente a cotas na ordem do -20,0 m (ZH) e a cabeça a -25,0 m (ZH). A área de implantação das obras apresenta fundos xistosos, com configuração irregular e algumas bolsas de areia.

2.2 Níveis de maré

De acordo com as previsões do Instituto Hidrográfico para o Porto de Sines (Tabelas de Marés), admitiram-se os seguintes níveis de maré, aos quais o IH recomenda que se adicione +0,1 m para se ter em conta a subida do nível médio do mar:

♦ PMmáx	- Preia-mar de águas-vivas, máxima	+3,93 m (ZH)
♦ PMAV	- Preia-mar de águas-vivas, média	+3,41 m (ZH)
♦ PMAM	- Preia-mar de águas mortas, média	+2,64 m (ZH)
♦ NM	- Nível Médio	+2,00 m (ZH)
♦ BMAM	- Baixa-mar de águas mortas, média	+1,38 m (ZH)
♦ BMAV	- Baixa-mar de águas-vivas, média	+0,59 m (ZH)
♦ BMmin	- Baixa-mar de águas-vivas, mínima	+0,16 m (ZH)

O Zero Hidrográfico (ZH) situa-se 2,0 m abaixo do Nível Médio do mar (NM), constituindo a base de referência das cotas do levantamento topo-hidrográfico.

2.3 Agitação marítima

2.3.1 Dados considerados e metodologia de propagação e tratamento

A elaboração do estudo de agitação foi baseada nos dados de ondulação disponíveis à altura relativos aos registos tri-horários da boia ondógrafo direcional de Sines, localizada à profundidade de 97 m, cobrindo um período de cerca de 28 anos de dados (26 de maio de 1988 a 30 de setembro de 2016), embora com períodos de interrupção do registo de informação motivados pela inoperacionalidade da boia, com destaque para o intervalo entre 27 de dezembro de 2005 e 1 de fevereiro de 2006.

Estes dados encontram-se entre os mais completos e atuais disponíveis, tendo sido ainda positivamente comparados com outras fontes de informação disponíveis, designadamente o "hindcast" de 37 anos do projeto europeu ERA-Interim, disponibilizado pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF).

A propagação da agitação até ao local de implantação do prolongamento do molhe Leste, num total de 78 793 registos, no seu formato integrado (decomposto em espectros empíricos), foi realizada com recurso a dois modelos matemáticos distintos:

- Um programa de cálculo de refração espectral por leques inversos de raios de onda, desenvolvido pela CONSULMAR, baseado no método estudado pela *Hydraulics Research*



Station, no formato espectral completo, ou seja, considerando-se a distribuição de energias por frequência e por direção, através da adoção de espectros empíricos.

Este modelo matemático foi utilizado para propagar a agitação desde a fronteira da boia ondógrafo até aos pontos de referência PFA e PFB na fronteira do modelo local;

- Para o modelo local, recorreu-se ao modelo matemático MIKE-21 BW, selecionando-se 5 pontos de referência (P1 a P5) ao longo da extensão de implantação do prolongamento do molhe Leste, conforme se apresenta na figura seguinte.

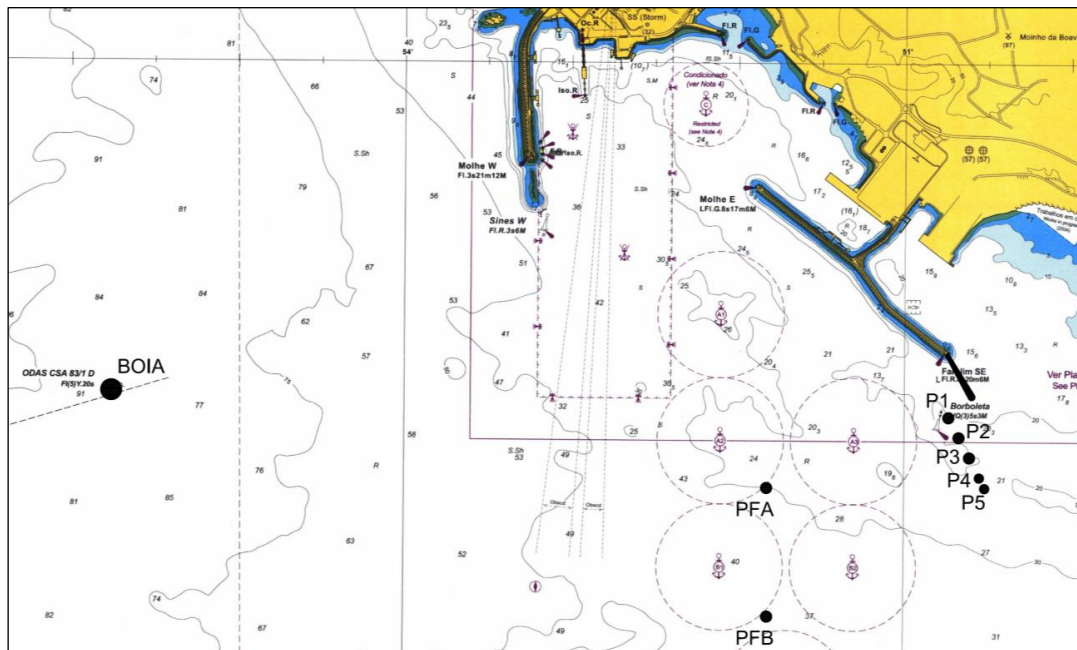


Figura 1. Localização da boia ondógrafo e dos pontos de referência considerados.

2.3.2 Regime médio na boia

O rumo dominante no local é o NO (cerca de 49% dos casos), seguido de ONO (cerca de 40%).

Quanto à altura significativa das ondas, cerca de 21% das ondas tem altura inferior a 1 m, 51% têm alturas de 1 a 2 m, sendo a frequência de ondas superiores a 3 e 5 m inferior a 10 e 1%, respetivamente.

Os períodos médios mais frequentes variam entre 3 e 9 s, totalizando cerca de 90% das ocorrências. Os períodos médios maiores que 11 s têm pouco mais que 1% das ocorrências.

Apresentam-se nas figuras seguintes as distribuições de rumos, alturas significativas (H_s) e períodos médios (T_z) medidos pela boia, em escalões de 22,5°, 0,5 m e 2 s, respetivamente.

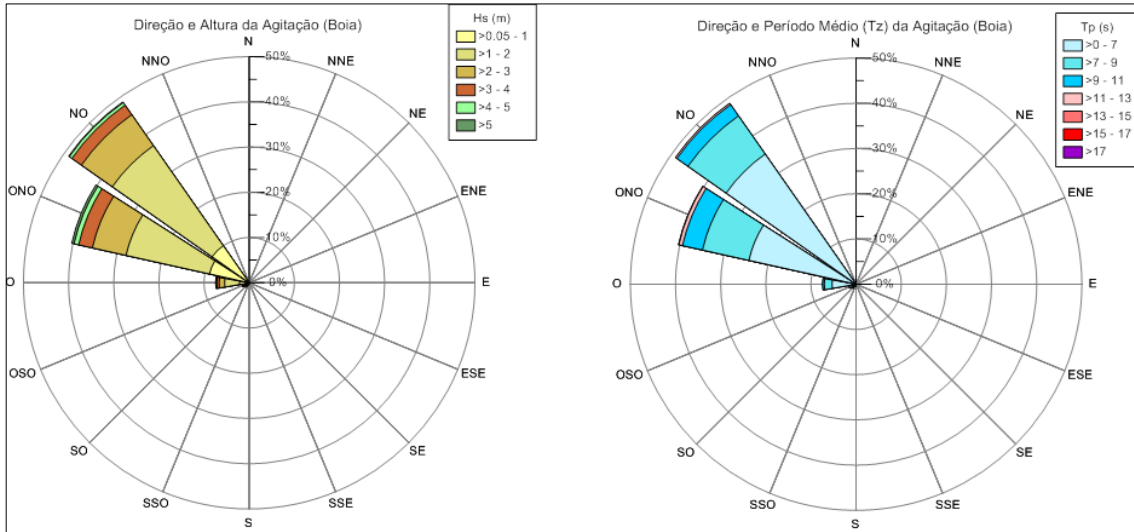


Figura 2. Direção, altura e período da agitação na boia.

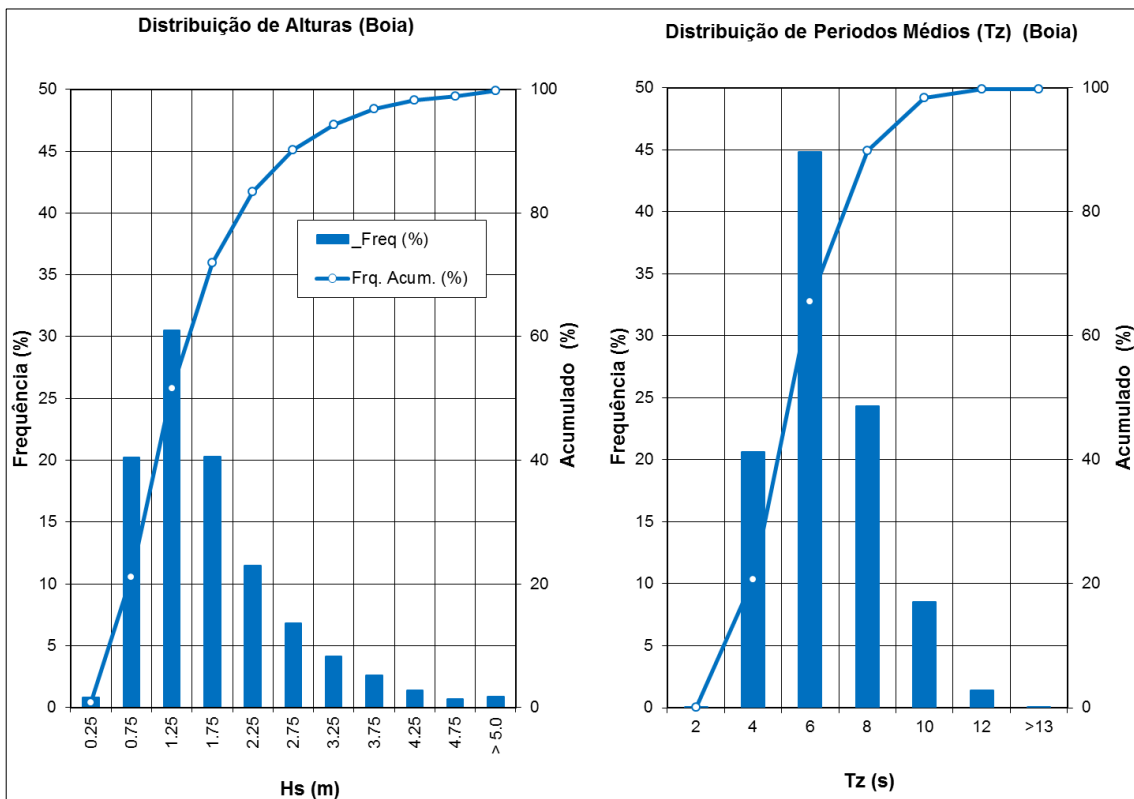


Figura 3. Distribuição de alturas (Hs) e períodos (Tz) na boia.

2.3.3 Valores extremos na boia

Para efeito do estudo dos valores extremos na boia ondógrafo, para períodos de retorno entre $T = 2$ anos e $T = 100$ anos, extrapolaram-se os dados de agitação existentes que abrangem um período de 28 anos – 1 de julho de 1988 a 30 de junho de 2016. Optou-se por explorar várias funções de distribuição assintótica de extremos e seleccionar aquela que melhor se ajustasse à



distribuição da amostra, tendo-se utilizado as funções de Gumbel, Fréchet, Kimball e Weibull III.

A função de distribuição das amostras foi obtida a partir das posições gráficas de Weibull, Goda e Gringorten, seguindo a metodologia preconizada em Goda (2000), sendo o ajuste realizado pelo método do mínimo dos quadrados e a sua qualidade aferida através do coeficiente de correlação.

Concluiu-se que as funções de Gumbel e Kimball são aquelas que apresentavam melhor correlação às séries de alturas significativas máximas anuais. Apresenta-se na tabela seguinte os resultados para os rumos ONO e O, para o qual se estimam os maiores valores externos de altura significativa.

Tabela 1. Valores extremos de altura significativa na boia ondógrafo [-97 m (ZH)] – Ano Completo.

ONO	Hs (m)							
	GUMBEL				KIMBALL			
T (anos)	Goda 1	Goda 2	Weibull	Gringorten	Goda 1	Goda 2	Weibull	Gringorten
2	6,7	6,6	6,6	6,6	6,7	6,6	6,6	6,6
5	7,8	7,7	7,8	7,7	7,8	7,8	7,8	7,7
10	8,6	8,5	8,6	8,4	8,6	8,4	8,6	8,4
25	9,6	9,4	9,6	9,3	9,4	9,2	9,4	9,1
50	10,3	10,1	10,4	10,0	10,1	9,8	10,0	9,6
100	11,0	10,8	11,1	10,7	10,7	10,3	10,6	10,1
O	Hs (m)							
	GUMBEL				KIMBALL			
T (anos)	Goda 1	Goda 2	Weibull	Gringorten	Goda 1	Goda 2	Weibull	Gringorten
2	5,3	5,2	5,2	5,2	5,5	5,5	5,5	5,5
5	6,6	6,5	6,6	6,5	6,7	6,7	6,7	6,7
10	7,5	7,4	7,5	7,3	7,3	7,2	7,1	7,1
25	8,7	8,5	8,7	8,4	7,8	7,6	7,5	7,5
50	9,5	9,4	9,5	9,2	8,0	7,8	7,7	7,7
100	10,3	10,2	10,4	10,0	8,3	7,9	7,8	7,8

2.3.4 Regime médio na fronteira do modelo (PFA)

Apresentam-se nas figuras seguintes as distribuições de rumos, alturas significativas (Hs) e períodos médios (Tz) caracterizadores do regime médio da agitação no ponto PFA, em escalões de 22,5°, 0,5 m e 2 s, respetivamente.

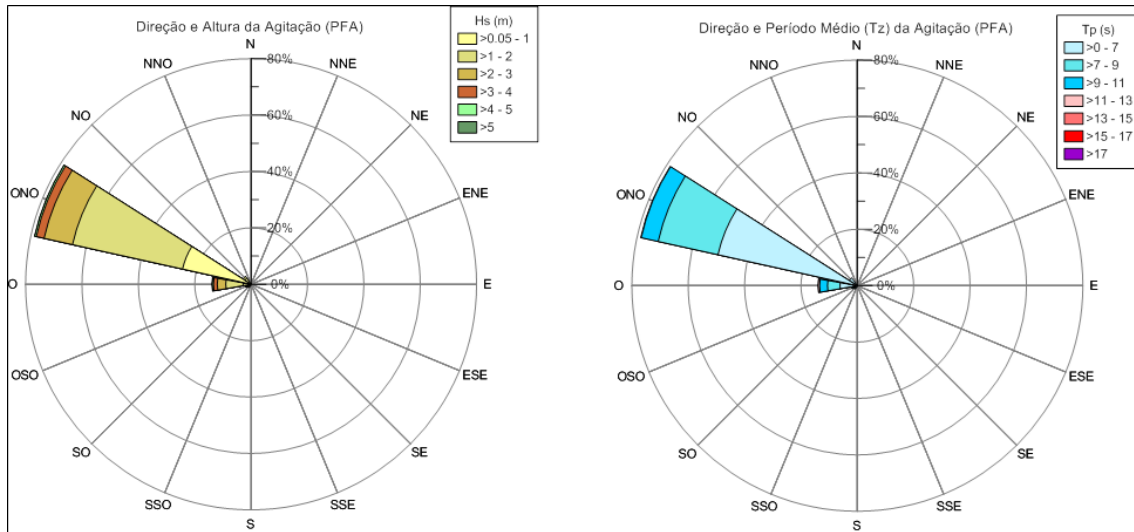


Figura 4. Direção, altura e período da agitação na fronteira do modelo local (PFA).

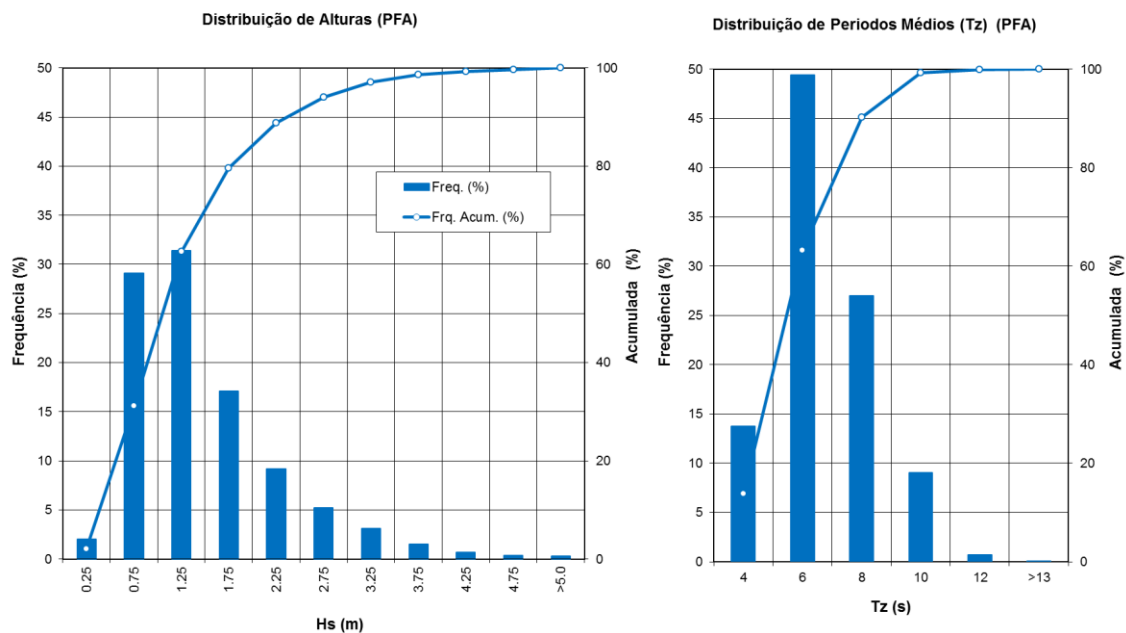


Figura 5. Distribuição de alturas (Hs) e períodos (Tp) na fronteira do modelo local (PFA).

O regime de agitação em PFA é caracterizado por rumos predominantemente do sector ONO, com frequências na ordem dos 79%, verificando-se uma rotação clara dos rumos de NO para ONO, como seria de esperar. Para além deste setor, a distribuição de rumos a sul deste rumo apresenta uma frequência acumulada próxima de 18% das ocorrências e entre O e S superior a 3% para NO.

No que respeita à altura significativa das ondas, os escalões mais frequentes correspondem, em geral, a alturas entre 0,5 e 1,5 m, com frequência conjunta superior de 60%. Verificam-se alturas superiores a 3 m, em aproximadamente 6% dos casos. A frequência de ondas com alturas superiores a 5 m é de cerca de 0,3%. Os períodos médios mais frequentes variam entre 3 e 9 s,



totalizando cerca de 90% das ocorrências. Os períodos médios maiores que 11 s têm frequência inferior a 1% das ocorrências.

2.3.5 Propagação da agitação no modelo local

A propagação da agitação em domínio local foi efetuada com recurso ao modelo matemático BW do Mike21 (DHI), tendo sido definidas as condições de fronteira de agitação incidente com base na análise da estatística do clima de agitação no ponto PFA na fronteira do modelo.

O domínio de cálculo foi construído sobre uma malha regular com dimensões das células de 4 m x 4 m, com uma representação até à batimétrica dos 35 m. As ondas geradas no modelo matemático, correspondem a ondas irregulares unidireccionais segundo o espectro JONSWAP.

Apresentam-se na tabela seguinte os resultados obtidos considerando os rumos de ONO e O, e para agitação com H = 1 m, períodos de picos $T_p = 16$ s e $T_p = 20$ s e níveis de água ZH e +3,5 m (ZH).

Tabela 2. Índices de agitação no conjunto de pontos de referência (P1 a P5).

Índices de Agitação Médios							
Rumo	Tp (s)	N _{maré}	P1	P2	P3	P4	P5
ONO	16	BMAV 0,0 m (ZH)	1,320	1,155	0,890	0,928	0,907
		PMAV +3,5 m (ZH)	1,290	1,143	0,924	0,885	0,868
	20	BMAV 0,0 m (ZH)	1,737	1,625	1,308	1,224	1,184
		PMAV +3,5 m (ZH)	1,492	1,459	1,160	1,116	1,116
O	16	BMAV 0,0 m (ZH)	1,249	1,106	0,933	1,046	1,115
		PMAV +3,5 m (ZH)	1,122	1,135	0,971	0,975	1,008
	20	BMAV 0,0 m (ZH)	1,211	1,519	1,126	1,205	1,170
		PMAV +3,5 m (ZH)	1,139	1,507	1,125	1,107	1,120
Índices de Agitação Máximos							
Rumo	Tp (s)	N _{maré}	P1	P2	P3	P4	P5
ONO	16	BMAV 0,0 m (ZH)	1,485	1,182	0,952	0,952	0,938
		PMAV +3,5 m (ZH)	1,372	1,238	0,949	0,896	0,878
	20	BMAV 0,0 m (ZH)	1,795	1,666	1,319	1,248	1,207
		PMAV +3,5 m (ZH)	1,594	1,491	1,594	1,132	1,141
O	16	BMAV 0,0 m (ZH)	1,375	1,274	1,026	1,085	1,194
		PMAV +3,5 m (ZH)	1,236	1,372	1,081	1,035	1,070
	20	BMAV 0,0 m (ZH)	1,295	1,650	1,160	1,240	1,227
		PMAV +3,5 m (ZH)	1,184	1,570	1,153	1,129	1,147



2.3.6 Onda de projeto

Com base no conjunto de dados obtidos através da modelação matemática, nos resultados das alturas de onda significativas registadas nas sondas dos ensaios em modelo físico tridimensionais, quer dos realizados em 2017 como dos de 2021, bem como através da comparação deste com a estimativa de valores extremos no local através da propagação pela metodologia empírica de Y. Goda, sintetizam-se na tabela seguinte as características das ondas de projeto adotadas.

Tabela 3. Onda de projeto na área de expansão do molhe leste de Sines.

Zona do molhe	T (anos)	Tp (s)	Hs _{projeto} (m)
Tronco (primeiros 500 m)	100	20	12,1
Tronco (últimos 250 m)	100	20	12,5
Cabeça	100	20	12,5

3. Pré-dimensionamento da estrutura resistente

3.1 Conceptualização da solução estrutural

A solução estrutural utilizada para a 3.^a Fase de Ampliação do molhe leste foi, em grande parte, adaptada da solução já anteriormente utilizada no mesmo molhe e agora validada e afinada com base nos resultados dos ensaios em modelo físico 3D, seguindo assim as características de base definidas pela APS para esta estrutura no projeto de execução originalmente revisto pela CONSULMAR.

É do tipo quebra-mar de talude, com núcleo composto por material de todo-o-tamanho (ToT) e mantos de proteção, de extradorso e de intradorso, constituídos por blocos de betão de alta densidade do tipo Antifer. A transição entre estas camadas será feita através de camadas de filtro em enrocamento. Por fim, desenvolver-se-á, ao longo de todo o coroamento da obra, a superestrutura em maciço de betão, à semelhança da que existe, assumindo-se que se trata de uma estrutura galgável perante a combinação de condições extremas de agitação e de nível da superfície do mar.

As inclinações dos taludes (V:H), serão de 1:2,5 no extradorso e de 1:1,5 no intradorso. A inclinação mais suave adotada em toda a face do extradorso e na cabeça do molhe (a mais exposta à agitação marítima) tem por objetivo permitir uma maior dissipação da energia das ondas.

Relativamente aos mantos resistentes, conforme a opção de projeto adotada na 2.^a Fase de Prolongamento do molhe leste e mantida pela APS para a 3.^a Fase, previu-se a utilização de blocos de betão do tipo Antifer com a mesma geometria fixa, com um volume de 27,5 m³, diferindo no peso através da diferenciação da densidade do betão que os compõe. Prevê-se a colocação dos blocos de forma arrumada em camada dupla no extradorso e em camada simples no intradorso.

3.2 Pré-dimensionamento do manto resistente



Para efeito do pré-dimensionamento do manto resistente, após avaliação da aplicabilidade das várias fórmulas de cálculo existentes ao caso específico, em função da especificidade do volume pré-definido para os blocos que compõem o manto, optou-se por recorrer à fórmula de Hudson (1959), cuja expressão é:

$$W = \frac{w_r H^3}{K_d (S_r - 1)^3 \cot \theta} \quad (1)$$

em que:

W - peso de um elemento do manto (kN)

$S_r = w_r/w_w$

w_r - peso volúmico do material dos cubos (kN/m³)

w_w - peso volúmico da água do mar (10,25 kN/m³)

K_d - coeficiente relativo ao tipo de elemento do manto e arrumação

O dimensionamento deste manto de proteção tem a si associadas várias especificidades que o tornam numa solução muito particular, com destaque para a relativa suavidade do declive do talude adotado para o manto exterior, bem como para a utilização de blocos em betão de alta densidade.

Assim, recorreu-se à ponderação de várias fontes para o valor a adotar para o coeficiente K_d a utilizar na fase de pré-dimensionamento, das quais se destacam Pita (1986) e U.S. Army Corps of Engineers (2002), assumindo para este os valores 8,0 e 3,6, conforme se trata do tronco ou da cabeça do molhe, respetivamente. A adoção destes valores foi posteriormente validada pelos resultados dos ensaios em modelo físico.

Em função das diferentes ondas de projeto consideradas, conforme referido anteriormente, e adotando valores de densidade do betão compatíveis com aqueles aplicados aos blocos fabricados para o prolongamento da 2.^a Fase do Molhe Leste, resultaram as seguintes soluções:

- Nos primeiros 500 m do tronco do molhe, blocos de betão de densidade de 25,40 kN/m³, com 695 kN, arrumados em dupla camada com 6,0 m de espessura, num talude com inclinação 1:2,5;
- Na restante extensão do tronco do molhe, blocos de betão de densidade de 25,89 kN/m³, com 712 kN, arrumados em dupla camada com 6,0 m de espessura, num talude com inclinação 1:2,5;
- Na cabeça do molhe, blocos de betão de densidade de 30,66 kN/m³, com 843 kN, arrumados em dupla camada com 6 m de espessura, em talude de igual inclinação.

Para efeito da densidade de colocação dos blocos que seria adotado inicialmente nos ensaios em modelo físico, para a qual se adotou $N_R = 13$, foi calculada de acordo com a seguinte fórmula do *Shore Protection Manual*:

$$N_R = A n k_\Delta (1-P) (W_r/W)^{2/3}$$

sendo:

N_R - número de cubos de betão a aplicar numa superfície de talude com área A;

A – superfície de talude de referência (considerou-se 100 m²);

n - número de camadas de revestimento do manto;

k_Δ - coeficiente que depende do tipo de elemento;

P – porosidade (%);



W_r - (peso específico do material dos cubos) (kN/m^3);

W - peso de um cubo (kN).

4. Ensaios em modelo reduzido

4.1 Considerações iniciais

Os ensaios tridimensionais em modelo reduzido realizados em 2017 encontravam-se associados inicialmente ao projeto de execução original da APS, sendo alterados em função da revisão de projeto realizada pela CONSULMAR, concretamente ao nível do pré-dimensionamento do manto resistente.

4.2 Ensaios realizados em 2017

A realização dos ensaios em modelo reduzido em 2017 baseou-se na construção e simulação de um modelo físico com dimensão correspondente em tanque à escala geométrica de 1:56.3 do prolongamento de 500 m do molhe leste, a qual era extensão prevista para a nova estrutura à data da construção do modelo.

Para a construção deste modelo físico foram utilizados no seu enraizamento blocos com peso equivalente a 600 e 710 kN no protótipo, em função dos pesos estipulados no projeto de execução original, tendo-se ensaiado blocos com peso equivalente de 695 e 825 kN no protótipo respetivamente no tronco e cabeça do prolongamento do molhe Leste.

Assinala-se que fez parte das especificações iniciais de colocação de blocos em parte do extradorso do tronco o teste da sua colocação de forma regular e irregular, o que foi conseguido através da definição de seções distintas com os dois tipos de colocação, conforme se pode verificar na figura seguinte.



Figura 6. Configuração inicial dos ensaios em 2017 – Vista do extradorso: extensão com manto colocado de forma regular e irregular.

Os ensaios foram conduzidos adotando os seguintes parâmetros para o nível da água e a agitação simulada:

a) Níveis de água

- PM, Preia-mar máximo +4,00 m (ZH)
- BM, Baixa-mar mínimo 0,00 m (ZH)

b) Agitação incidente

- Ondas irregulares, com o espectro empírico JONSWAP;
- Períodos de pico de 12 e 20 s;



- Alturas de onda crescentes (medidas ao largo ou no gerador do modelo), para cada um daqueles períodos, com escalões de 1 m desde 6 a 14 m, ou até à rebentação, ou até que se verifique que os estragos atingem um grau a que corresponde o início da ruína da estrutura;
- Nos ensaios tridimensionais, a agitação deverá incidir nas cabeças com dois rumos distintos: O e SO;
- O espectro utilizado deve contemplar grupos de ondas, segundo o método utilizado pelo laboratório.

A opção por realizar ensaios com alturas superiores à altura da onda de projeto (avaliada em $H_s = 12,1$ m associada ao rumo de O e $H_s = 7,5$ m associada ao rumo de SO) prende-se com o facto de se pretender avaliar a margem de segurança.

Do acompanhamento do primeiro conjunto de ensaios e da análise dos respetivos resultados, foram recomendadas pela CONSULMAR as seguintes alterações/melhorias, implementadas de imediato pelo LNEC antes de prosseguir com o plano de ensaios:

- Alteração do modo de colocação dos cubos nos troços com colocação semi-arrumada para arrumada no tronco do manto exterior (Figura 7 a);
- Substituição dos blocos de 695 kN do pé do talude (iguais aos do manto do tronco), por blocos de 825 kN (iguais aos do manto da cabeça), especialmente nas zonas onde se revelou um maior número de estragos, tais como o sector interior da cabeça;
- Ligeiro aumento da densidade de colocação nas zonas de maior ocorrência de movimentos/reajustes de posição dos blocos quer no sector interior da cabeça quer no tronco do manto exterior adjacente à cabeça (Figura 7 b e c);
- Seleção de um modo de colocação, mas estável (modo arrumado) e prossecução dos ensaios com modo de colocação único.

A figura seguinte ilustra o modelo após as alterações efetuadas:

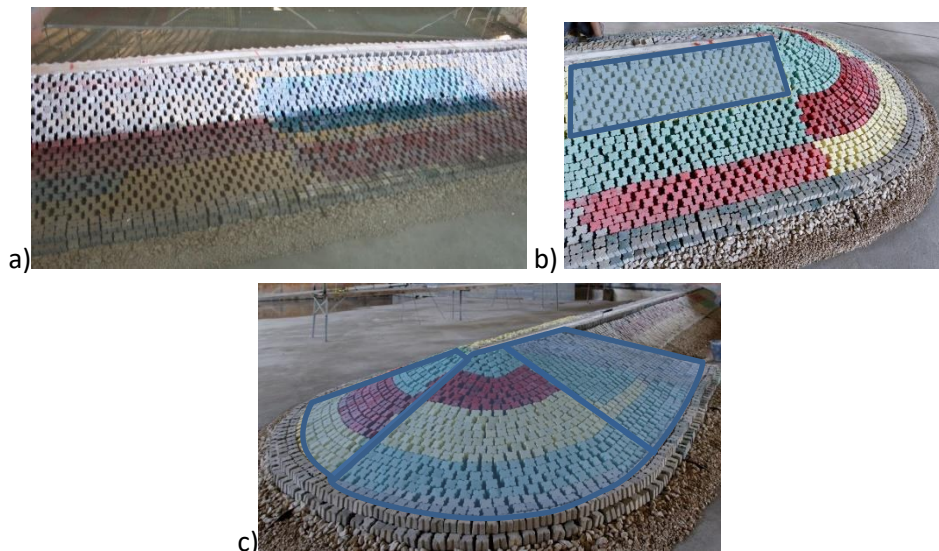


Figura 7. Aspeto das alterações implementadas no modelo.

Após a análise dos resultados do 2.º conjunto de ensaios, verificou-se que parte das preocupações resultantes dos primeiros ensaios tinham sido resolvidas e que as medidas até agora consideradas, nomeadamente a subida do peso dos blocos no pé de talude do interior da



cabeça e zona de transição para a camada única do intradorso resolveriam os problemas de instabilidade detetados.

4.3 Ensaios realizados em 2021

Em 2020, numa fase ainda prévia ao início da empreitada, a APS estabeleceu contatos com o LNEC para a realização de um conjunto de ensaios adicionais em modelo reduzido que permitissem aferir a extensão adicional do prolongamento do molhe leste que não tinha sido representada no modelo reduzido de 2017.

Em consequência de atrasos gerados pela pandemia do COVID-19, em particular pelas limitações operacionais geradas pelos dois períodos de confinamento obrigatório em 2020 e 2021, a realização da parte operacional dos ensaios atrasou-se até ao Outono de 2021, passando assim a decorrer a par com o início da empreitada de prolongamento do molhe Leste.

O modelo foi construído e explorado de acordo com a lei de semelhança de Froude a uma escala geométrica de 1/65. A escala geométrica utilizada nos ensaios realizados em 2017 não pôde ser replicada em virtude da maior exigência atual em termos das características de agitação marítima que se pretendia reproduzir, nomeadamente com a especificação de valores de altura de onda significativa até $H_s = 15$ m (mais 1,0 m do que em 2017).

Apresentam-se nas figuras seguintes a representação do aspeto final da configuração inicial do modelo físico, assim como a representação em planta quer da extensão agora estudada como da relação entre esta com a extensão estudada em 2017.

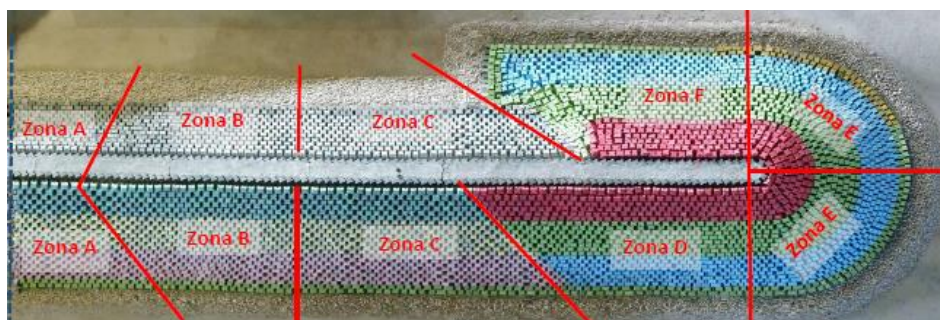


Figura 8. Configuração inicial dos ensaios em 2021 – Planta dos 350 m terminais do prolongamento, reproduzidos no modelo físico, e definição dos trechos tipo para a análise de danos.

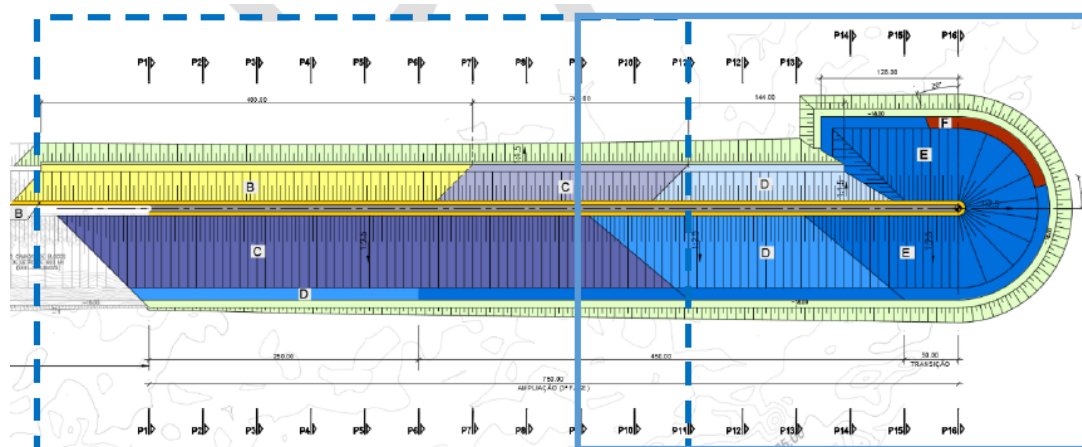


Figura 9. Planta do prolongamento de 750 m a construir. Trechos ensaiados em 2017



(tracejado) e durante os ensaios 2021 (cheio).

Os ensaios foram realizados considerando os mesmos níveis de água que em 2017. Relativamente à agitação, foram novamente realizados ensaios com agitação marítima irregular com o espectro empírico JONSWAP, caracterizada por ter rumo de O e SO, considerando-se 2 períodos de picos – $T_p = 12$ s e $T_p = 20$ s, resultando assim em 4 séries de ensaios para cada altura de onda ensaiada. Apresenta-se na tabela seguinte as alturas de onda significativas geradas no baterdor.

Tabela 4. Alturas de onda ensaiadas no modelo físico de 2021, medidas à saída dos geradores de ondas irregulares.

Rumo	T_p (s)	Hs (m)											
SW	12	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9					
	20												
W	12	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
	20	6	7	8	9	10	11	12	13				

Assinala-se que, de acordo com o LNEC, apesar de a escala geométrica do modelo ser inferior à dos ensaios realizados em 2017 para se poder simular ondas com $H_s = 15$ m, limitações do equipamento de geração impediram que se tivesse podido ir além de $H_s = 13$ m nos ensaios associados a $T_p = 20$ s.

Apresenta-se na figura seguinte a configuração inicial estabelecida para o modelo reduzido.

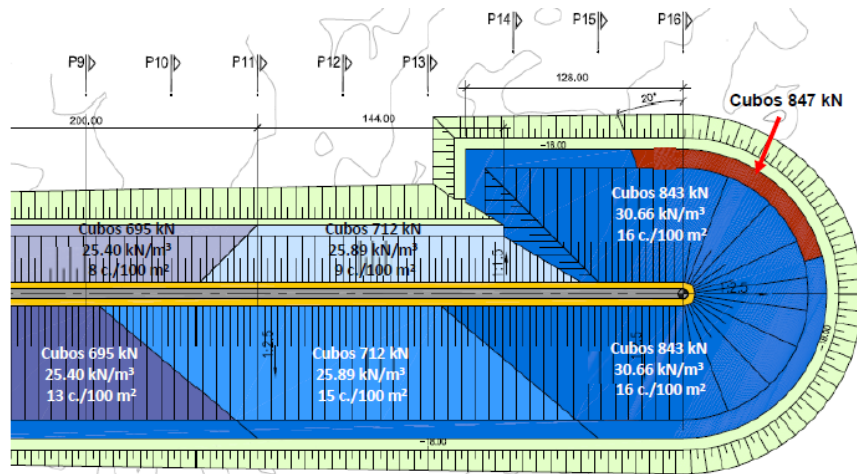


Figura 10. Ensaios 2021 – Configuração Inicial. Pesos e densidades de colocação (em blocos/m²).

Após a realização do primeiro conjunto de ensaios, os resultados obtidos levaram à alteração das densidades de colocação no tronco do seguinte modo:

- Extradorso:



Zona A (Cubos 695 kN) - de 13 para 15 blocos/100 m² em todo o talude;

Zonas B e C (cubos de 712 kN) - de 15 para 16 blocos/100 m² em todo o talude;

- Intradorso em camada única: 9 blocos/100 m² em todo o talude.

Resultou daqui a Configuração Alternativa 1. O comportamento desta nova configuração demonstrou melhorias ao nível dos taludes, mas persistiam algumas fragilidades nos pés de talude quer do tronco (extradorso e intradorso) como no intradorso da cabeça.

Testaram-se progressivamente várias soluções alternativas, nas quais se foram progressivamente minorando as fragilidades observadas, resultando por fim na Configuração Alternativa 5, que se apresenta na figura seguinte.

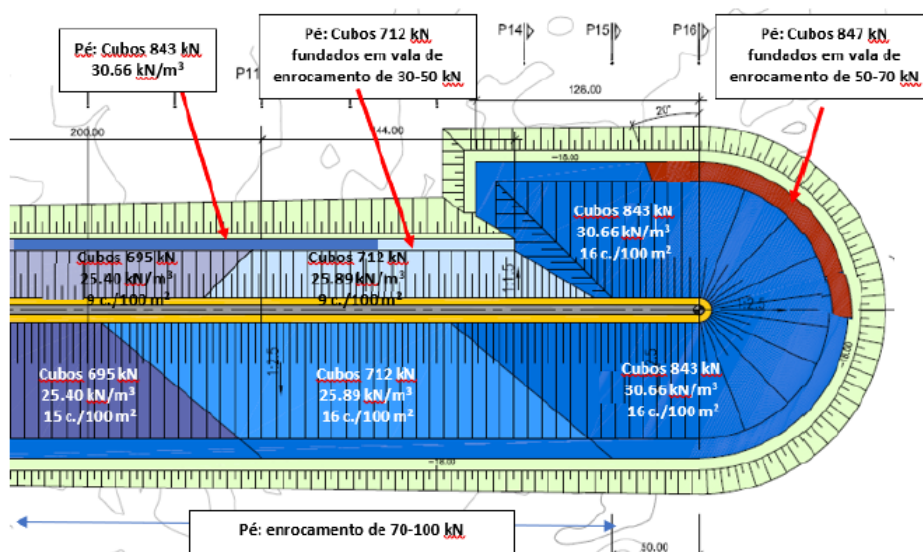


Figura 11. Ensaio 2021 – Configuração Final. Pesos e densidades de colocação (em blocos/m²).

As principais alterações introduzidas ao longo deste processo, que culminaram na Configuração Alternativa 5, são as seguintes:

Setor interior da cabeça:

- Alteração da gama de enrocamento da berma do pé do talude de 30-60 kN para 50-70 kN, com aumento da largura de berma;
- Alteração das duas fiadas de cubos correspondentes ao pé do talude, para uma configuração com o manto resistente fundado numa vala do enrocamento de 50-70 kN à cota -18 m (ZH).

Intradorso do tronco – Troço C:

- Alteração da gama de enrocamento da berma de 10-30 kN para 30-50 kN;
- Alteração das duas fiadas de blocos de 712 kN correspondentes ao pé do talude, para uma configuração com o manto resistente fundado numa vala do enrocamento de 30-50 kN à cota -9,75 m (ZH);
- Manutenção da solução anterior em parte do Troço C e nos Troços A e B, mas com aumento do peso dos blocos do pé de talude para 843 kN.

Extradorso do tronco - Troços A a D:

- Alteração da gama de enrocamento da berma do pé de talude de 30-60 kN para 70-100 kN.



4.4 Solução estrutural final – conclusão

A solução estrutural final, a qual resulta da adequação iterativa da solução modelada após realização de dois conjuntos de ensaios em modelo reduzido, corresponde fundamentalmente à solução que demonstrou maior estabilidade global até sensivelmente aos primeiros 400 m de prolongamento nos ensaios de 2017 (A) e da solução com maior estabilidade nos últimos 350 m de prolongamento nos ensaios de 2021 (B), apresentando-se na tabela seguinte o resumo das características do manto resistente.

Tabela 5. Densidade de colocação dos blocos.

Zona do molhe	Peso dos blocos de betão	Processo de colocação (densidades de colocação recomendadas)
Perfil corrente, lado de extradorso (A)	695 kN, em dupla camada com 6,0 m	15 blocos/100 m ² de talude, colocação arrumada
Perfil corrente, lado de intradorso (A)	Blocos reaproveitados de 600 e 710 kN, em camada simples com 3,0 m	9 blocos/100 m ² de talude, blocos arrumados
	Blocos novos de 695 kN, em camada simples com 3,0 m	9 blocos/100 m ² de talude, blocos arrumados
Perfil corrente, lado de extradorso (B)	712 kN, em dupla camada com 6,0 m	16 blocos/100 m ² de talude, colocação arrumada
Perfil corrente, lado de intradorso (B)	712 kN, em camada simples com 3,0 m	9 blocos/100 m ² de talude, blocos arrumados
Zona da cabeça (B) do molhe	843 kN, em dupla camada com 6,0 m	16 blocos/100 m ² de talude, colocação arrumada

Referências Bibliográficas

Goda, Y (2000). "Random Seas and Design of Maritime Structures" (2nd edition), Chapter 11 – Statistical Analysis of Extreme Waves. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.

Lemos, R. Neves, M.G., Fortes, C.J.E.M. (2017). "3.^a Fase de Ampliação do Molhe Leste do Porto de Sines – Ensaio em Modelo Reduzido – Ensaio tridimensionais de estabilidade e galgamentos – Relatório 2 – Apresentação de Resultados". Relatório 393/2017 – DHA/NPE.

Lemos, R.; Silva, L.G., Fortes, C.J.E.M. (2021). "3.^a Fase de Ampliação do Molhe Leste do Porto de Sines – Ensaio em modelo reduzido. Ensaio tridimensionais de estabilidade e galgamentos". Relatório/2021 – DHA/NPE.

Pita, C (1986). "Dimensionamento Hidráulico do Manto Resistente de Quebra-Mares de Taludes", Memória N°670, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

U.S. Army Corps of Engineers. 2002. Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-



10^{as} Jornadas de Engenharia Costeira e Portuária
Sines, 7 e 8 de abril de 2022

1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.