

## **ESTUDOS REALIZADOS COM VISTA À MELHORIA DAS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA DO ACESSO MARÍTIMO AO PORTO DE LEIXÕES**

Conceição Juana Fortes, Rute Lemos, André Fortunato, Rui Capitão, Liliana Pinheiro, Maria da Graça Neves, Paula Freire, Filipa Oliveira, Alberto Azevedo (LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil)

Hugo Lopes, Pedro Tato, Emílio Brogueira Dias (APDL – Administração do Porto do Douro, Leixões e Viana do Castelo, S.A.)

Lucília Luís (CONSULMAR, Projectistas e Consultores, Lda.)

### **RESUMO**

Com vista a otimizar a geometria do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões, bem como a avaliação dos impactes desse prolongamento nas condições de agitação da praia de Matosinhos e na dinâmica sedimentar na vizinhança do porto, revelou-se necessária a realização de três grandes estudos, envolvendo modelação numérica e modelação física. A presente comunicação descreve os estudos realizados, focando-se essencialmente na descrição dos seus objetivos, nas metodologias utilizadas e nos principais resultados obtidos e a forma como estas se refletirão na elaboração dos respetivos Projetos de Execução e Estudo de Impacte Ambiental.

### **1 - INTRODUÇÃO**

O Porto de Leixões, localizado na costa norte de Portugal, é um dos mais expostos às severas condições de agitação que assolam esta parte da costa portuguesa. Este porto é também um dos maiores do país, recebendo diariamente um grande número de navios de grandes dimensões. O crescimento económico que se perspetiva leva a antecipar que o número de navios e a sua dimensão continuarão a aumentar. É por isso necessário criar as condições de segurança compatíveis, consistindo estas no aumento das dimensões (largura e cota do rasto) do canal de acesso e bacia de rotação, bem como na melhoria das condições de tranquilidade da entrada, através do prolongamento do molhe principal.

Nesse sentido, a APDL promoveu, antes do lançamento do concurso para a elaboração do PE e EIA (APDL, 2016), diversos estudos com vista a analisar soluções que permitam responder a estas novas exigências, de onde se destacam os estudos económicos, financeiros, jurídicos, de navegabilidade, os estudos geológicos, os estudos preliminares para definição dos potenciais perfis transversais da estrutura (IHRH 2013) e os ensaios em modelo físico e numérico para validação e otimização dos mesmos.

Tais estudos foram conduzidos com o objetivo de permitir a receção em Leixões de navios com 300 m de comprimento, 40 m de boca e 13.5 m de calado, ou seja, cerca de 5 000 TEU, classe de navios que tenderá a ser gradualmente deslocada das suas rotas atuais para aquelas que servem o Porto de Leixões pela entrada em serviço dos novos porta-contentores de grandes dimensões.

Além dos estudos já realizados, a APDL previu ainda a realização de estudos adicionais, mais aprofundados, que confirmassem as principais conclusões, designadamente, estudos em modelo numérico de: a) agitação e ressonância no interior do porto; b) avaliação dos impactes do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões nas condições de agitação da praia de Matosinhos e na dinâmica sedimentar na vizinhança do porto; e estudos em modelo físico (2D e 3D) de agitação, estabilidade e galgamentos.

Nesta comunicação apresenta-se uma síntese de cada estudo, destacando as principais conclusões.

## 2 – OBJETIVOS DOS ESTUDOS

O objetivo dos estudos é a otimização da geometria do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões, bem como a avaliação dos impactes desse prolongamento nas condições de agitação da praia de Matosinhos e na dinâmica sedimentar na vizinhança do porto. Nesse sentido, foram realizados 3 grandes estudos, envolvendo modelação numérica e modelação física. Estes estudos foram:

- Estudo I – Otimização da geometria do novo troço do quebra-mar exterior do Porto de Leixões – que incluiu a realização dos seguintes estudos parciais: a) Regimes de agitação marítima, com modelo numérico; b) Agitação marítima e ressonância - Propagação de ondas curtas e longas para o interior do porto, com modelo numérico; Ensaios em modelo físico de: I) estabilidade e galgamento de secções transversais do prolongamento do quebra-mar exterior, em canal (2D); II) agitação, estabilidade e galgamento, em tanque (3D);
- Estudo II – Avaliação dos impactes do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões nas condições de agitação da praia de Matosinhos, que inclui a realização de estudos em modelo numérico;
- Estudo III – Avaliação dos impactes da construção do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões na dinâmica sedimentar na vizinhança do porto, que inclui a realização de estudos através de modelo numérico.

A zona de estudo, designada por Porto de Leixões, fica situada a cerca de 2.5 milhas a norte da foz do Rio Douro e nas proximidades da cidade do Porto, sendo enquadrada pelas povoações de Leça da Palmeira, a norte, e Matosinhos, a sul, Figura 1.



Figura 1 – Porto de Leixões e praia de Matosinhos (à direita)

O Porto de Leixões é a maior infraestrutura portuária da Região Norte de Portugal e uma das mais importantes do país. Com 5 quilómetros de cais, 55 hectares de terraplenos e 120 hectares de área molhada, o Porto de Leixões dispõe de boas acessibilidades marítimas, rodoviárias e ferroviárias, bem como de modernos equipamentos e avançados sistemas informáticos de gestão de navios.

Beneficiando de uma localização estratégica, de um *hinterland* rico em indústria e comércio, o Porto de Leixões tem uma posição privilegiada no contexto do sistema portuário europeu. Opera 365 dias por ano, tendo o principal canal de acesso ao porto uma profundidade de cerca de -15 m (ZHL), usufruindo de uma barra permanentemente aberta ao tráfego portuário, sem restrições de acesso por efeito das marés.

Este porto representa 25% do comércio internacional português e movimenta cerca de 18 milhões de toneladas de mercadorias por ano. Pelo porto passam cerca de três mil navios por

ano e todo o tipo de cargas, das quais se destacam: têxteis, granitos, vinhos, madeira, automóveis, cereais, contentores, sucata, ferro e aço, álcool, aguardente, açúcares, óleos, melações, produtos petrolíferos e ainda passageiros de navios de cruzeiro.

### 3 – ESTUDOS EM MODELO NUMÉRICO

#### 3.1 - Introdução

Os estudos em modelo numérico visaram a caracterização dos regimes de agitação marítima ao largo e em frente ao porto, da agitação de curto e longo período no interior do porto (Estudo I) e dos impactes na agitação marítima (Estudo II) e na dinâmica sedimentar na vizinhança do porto e na praia de Matosinhos (Estudo III), considerando diferentes configurações para o prolongamento do quebra-mar e uma nova geometria em planta para o interior do porto.

As configurações propostas para o prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões visam aumentar as condições de abrigo de forma a permitir a entrada de navios porta-contentores de até 300 m de comprimento, 40.2 m de boca e 14.0 m de calado. De acordo com indicações da APDL, estudos anteriores (IHRH, 2013) apontam para a necessidade de prolongamento do quebra-mar exterior entre 200 m e 300 m, com um ângulo de abertura de até 20°.

Na análise e definição das soluções a estudar em modelo numérico, para além da configuração atual, S0, avaliaram-se seis configurações de desenvolvimento, diferindo entre si na extensão do prolongamento e no ângulo de abertura relativamente ao alinhamento do quebra-mar existente, Figura 2 (esq.): Configuração 1 (S1) – prolongamento de 300 m com ângulo de abertura de 20°; Configuração 2 (S2) – prolongamento de 250 m com ângulo de abertura de 20°; Configuração 3 (S3) – prolongamento de 200 m com ângulo de abertura de 20°; Configuração 4 (S4) – prolongamento de 300 m com ângulo de abertura de 0°; Configuração 5 (S5) – prolongamento de 250 m com ângulo de abertura de 0°; Configuração 6 (S6) – prolongamento de 200 m com ângulo de abertura de 0°.

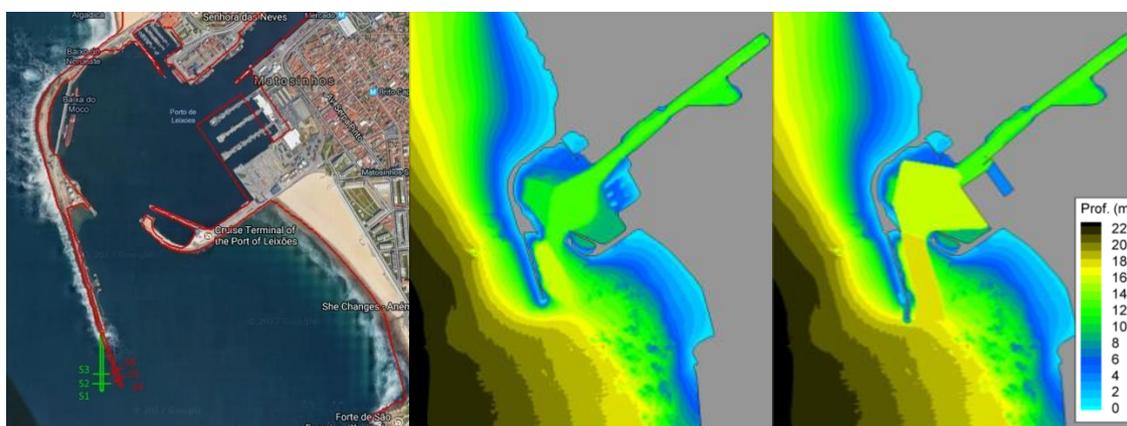


Figura 2 – Configuração atual e Configurações 1 a 6, S1 a S6 (esq.). Configuração e batimetrias: Configuração atual (centro) e Configuração 3 (dir.)

Quanto ao interior do Porto de Leixões, foi considerado em todas as configurações de desenvolvimento a nova configuração portuária proposta pela APDL (2016). Para além disso, considerou-se também a dragagem do canal de acesso à cota -16.85 m (ZHL) e da bacia de rotação à cota -15.5 m (ZHL), também propostas da APDL, Figura 2 (centro, dir.).

Na Figura 2 (centro, dir.) apresentam-se apenas a Configuração atual e a Configuração 3, uma vez que as restantes configurações são em tudo semelhantes à Configuração 3 variando somente o comprimento do prolongamento do molhe e o alinhamento do mesmo, Figura 2 (esq.).

O estudo de todas configurações do ponto de vista do abrigo a ondas curtas e longas e do impacto na agitação marítima na praia de Matosinhos é apresentado nas secções 3.3 e 3.4. Para o caso da dinâmica sedimentar, apresenta-se apenas o estudo comparativo da solução atual com a solução 3, secção 3.5.

### 3.2. Regimes de Agitação Marítima ao Largo e Junto à Costa

#### Objetivos e Metodologia

Neste estudo, considerou-se necessário caracterizar os regimes gerais de agitação marítima, quer ao largo (ponto W), quer local (ponto P), Figura 3, utilizando modelação numérica. As etapas foram, assim: (i) a caracterização dos regimes de agitação marítima ao largo; (ii) a transferência das características das ondas ao largo para a zona próxima do Porto de Leixões, com o modelo numérico SWAN (Booij et al. 2006) e (iii) a caracterização dos regimes de agitação marítima locais em frente ao futuro prolongamento do molhe de Leixões, à cota batimétrica de aproximadamente -20 m (ZHL). Esta componente do estudo, descrita em detalhe em Capitão et al. (2017), encontra-se resumida nos parágrafos seguintes.



Figura 3 – Localizações relativas do ponto de cálculo do modelo de reconstituição WAM (ponto W), ao largo de Leixões, e do ponto local, P - Google Earth© 2017

Utilizou-se, face à inexistência de dados medidos em número suficiente, de um conjunto de dados estimados pelo modelo numérico de reconstituição da agitação marítima WAM ponto W (Figura 3), de coordenadas  $41^{\circ} 10' 00''$  N,  $8^{\circ} 59' 00''$  W, para um período de aproximadamente 38 anos consecutivos (1979-2016). Os resultados dessas estimativas, nesse ponto, consistem em valores de 6-6 horas dos parâmetros  $H_s$  (altura significativa),  $T_z$  (período médio) e  $Dir$  (direção média), entre outros. O total dos trios ( $H_s$ ,  $T_z$  e  $Dir$ ) é de 55032. Com base nestes dados, definiu-se nesse ponto W os regimes de agitação ao largo.

A transferência dos regimes de agitação marítima foi efetuada com o modelo SWAN desde o largo (ponto W) até à zona próxima do Porto de Leixões, isto é, no ponto P (Figura 3), para o qual foram definidos os regimes de agitação marítima, à semelhança do que se fez para o largo. Para esse efeito, utilizou-se a metodologia de transferência acima referida, o que, em maior detalhe, consistiu nas seguintes etapas: (i) Estabelecimento do domínio de cálculo do modelo SWAN e a respetiva discretização do domínio por malhas computacionais encaixadas; (ii) Estabelecimento das condições de fronteira com base nos dados de agitação marítima obtidos no ponto W; (iii) Estabelecimento dos parâmetros de cálculo do modelo SWAN; (iv) Realização das simulações numéricas com o modelo SWAN para a obtenção das características das ondas ( $H_s$ ,  $T_z$ ,  $Dir$ ) no domínio de cálculo e, em especial, no ponto P, na vizinhança do Porto de Leixões. Para os cálculos foi considerado o nível de maré fornecido pelo modelo XTIDE (Flater, 1998), durante o período de estudo. Os fenómenos físicos considerados foram a refração, difração, atrito de fundo e rebentação induzida pelo fundo. Para a preparação dos dados de entrada, a execução automática do modelo SWAN e a visualização dos resultados utilizou-se o pacote de modelos numéricos SOPRO, (Pinheiro *et al.* 2007).

#### Resultados

Com esta metodologia foram obtidos regimes de agitação marítima ao largo e na zona do futuro prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões, nomeadamente os regimes gerais observados, as estatísticas descritivas das séries de  $H_s$ ,  $T_z$  e  $Dir$ ; as séries temporais de parâmetros de onda  $H_s$ ,  $T_z$  e  $Dir$ ; os histogramas conjuntos de  $H_s$ - $T_z$ ,  $H_s$ - $Dir$ , e marginais de  $H_s$  de  $T_z$ ; as rosas de vento da direção média,  $Dir$ , por setores de  $45^{\circ}$ , os regimes médios de

Hs, Tz e Dir; os regimes da média dos máximos mensais de Hs e valores das alturas significativas máximas mensais, assim como a distribuição conjunta das alturas significativas máximas mensais com o período médio e com a direção e os valores máximos anuais de Hs, correspondentes aos invernos marítimos. Apresentam-se de seguida alguns destes resultados, para os pontos W e P, Figura 4, Figura 5 e Figura 6:

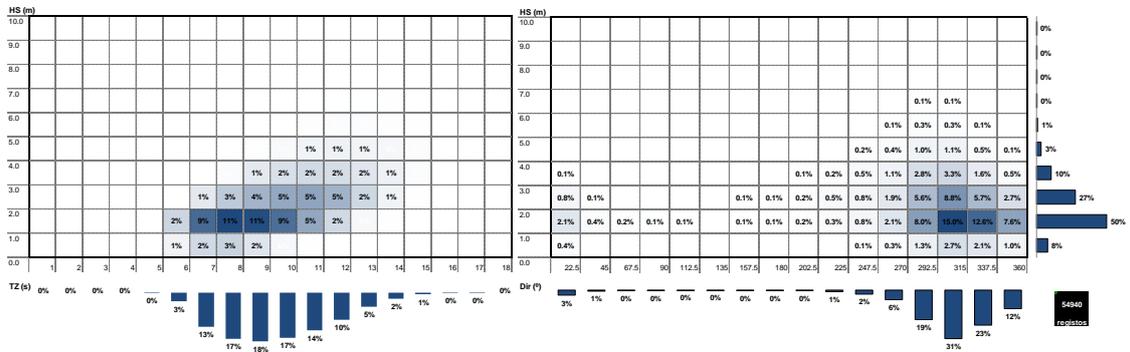


Figura 4 – Largo (ponto W). Distribuições conjuntas de Hs-Tz (esq.) e Hs-Dir (dir.).

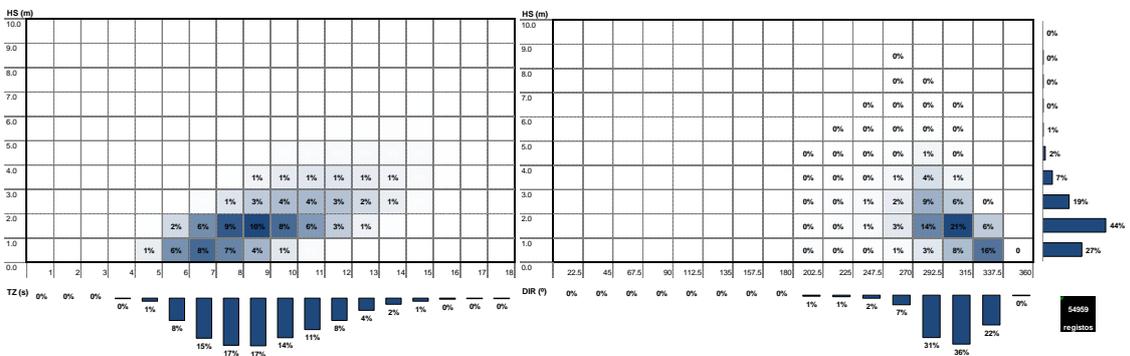


Figura 5 – Local (ponto P). Distribuições conjuntas de Hs-Tz (esq.) e Hs-Dir (dir.).

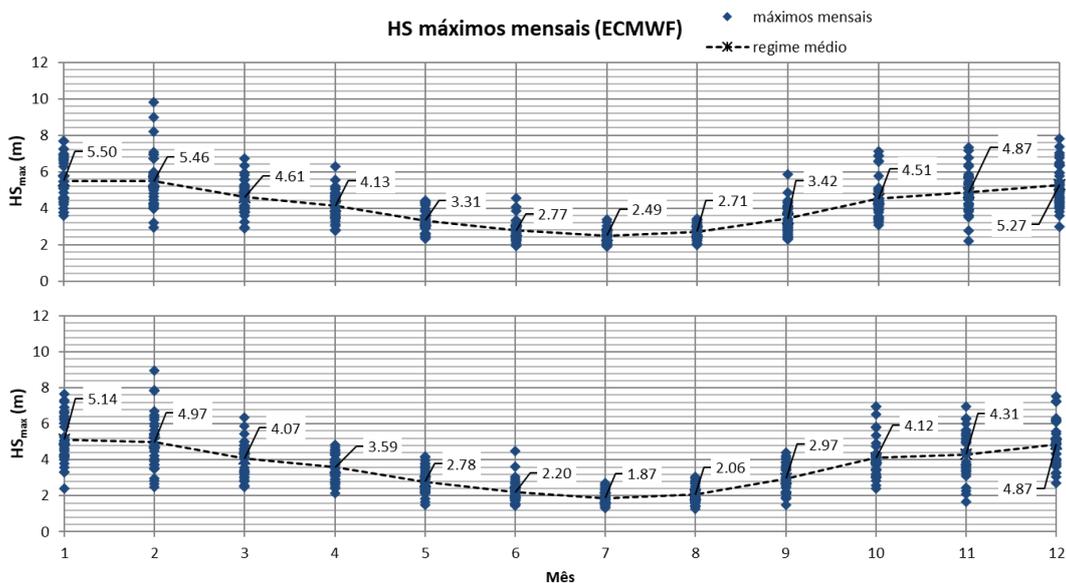


Figura 6 – Alturas significativas máximas mensais e respetivas média mensais: ao Largo – Ponto W (em cima); Local – Ponto P (em baixo)

## Discussão e Conclusões

Da análise dos regimes gerais observados obtidos quer ao largo (ponto W) quer junto ao Porto de Leixões (ponto P), pôde, em síntese, concluir-se o seguinte:

- Os valores de Hs no ponto P sofrem uma pequena redução quando comparados com o largo, devido aos fenómenos da refração e difração das ondas, consequência da variação da batimetria dos fundos. Em especial, os valores de Hs máximos que ao largo atingiram 9.82 m no ponto W, sofrem uma redução de aproximadamente 1 m, em P, obtendo-se neste ponto um valor máximo de 8.98 m;
- Do largo até junto à costa os valores de Tz mantiveram-se dentro de uma gama aproximada de 4 s a 17 s;
- A direção Dir sofre, como esperado, uma rotação no sentido de as ondas se apresentarem mais perpendiculares à batimetria, i.e., há uma rotação das gamas das direções, de 0° a 360° (em W, ao largo), para 180 a 342° (no ponto P).

Em termos de valores médios, há, conseqüentemente, também uma ligeira redução das alturas significativas de onda, Hs, desde o largo até junto à costa, mas os períodos, Tz, não variam significativamente. Quanto às direções de onda, verifica-se um ligeiro estreitamento da gama de direções de onda no ponto P e rotação para W, relativo ao largo.

Em termos de valores máximos anuais de Hs, verifica-se igualmente uma ligeira redução desde o largo até junto à costa, assim como o aumento dos valores de Tz associados àqueles máximos e um estreitamento das direções no ponto P.

### **3.3 – Estudo de Agitação e de Ressonância**

#### 3.3.1 Estudos de agitação

##### Objetivos e Metodologia

O objetivo do estudo de agitação foi analisar a influência do prolongamento do quebra-mar exterior nas características da agitação marítima na zona do Porto de Leixões, mais concretamente, da zona do canal de acesso ao porto interior. Mais ainda, avalia-se e compara-se o abrigo proporcionado por cada uma das 7 configurações portuárias estudadas. O estudo inclui a análise da agitação de curto período e foi utilizado o modelo numérico de elementos finitos DREAMS (Fortes, 1993). Esta componente do estudo é descrita em detalhe em Pinheiro et al. (2017a), apresentando-se aqui um resumo.

As simulações da propagação das ondas foram feitas para uma gama de trios de ondas regulares (H, T, DIR) e de níveis de maré (NM) que englobam todos os estados de mar de que há registo no período total de dados, de 1 de janeiro de 1979 e 31 de agosto de 2016 (regime geral analisado junto à costa), e para cada uma das configurações portuárias (configuração atual, S0, e configurações S1 a S6) selecionadas. São assim construídas matrizes de transferência, que relacionam as características de agitação no exterior (ponto P) com as correspondentes características em diferentes localizações na zona do porto, distribuídas por 49 pontos de controlo.

Estas matrizes permitem a transferência dos valores de altura de onda significativa, período de zero ascendente e direção média de onda, que caracterizam o regime de agitação estabelecido em P, para cada um dos 49 pontos de controlo no interior do porto. Neste estudo, o foco foram os pontos P2 a P8, que se encontram ao longo do canal de navegação, Figura 7a.

Assim, e com base nas séries temporais de agitação marítima obtidas junto ao porto (ponto P), foram obtidas as correspondentes séries nos 7 pontos analisados.

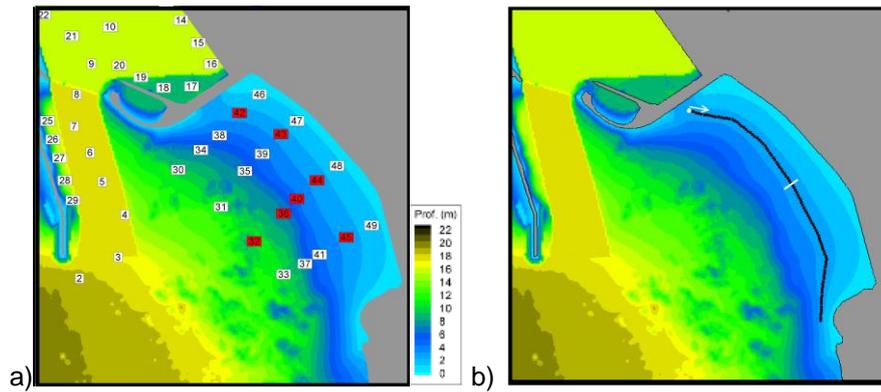


Figura 7 – a) Localização dos pontos de análise (vermelho); b) linha de 100 pontos extraídos sobre a batimétrica -2.0m (ZHL)

A comparação dos valores de direções, alturas e períodos da onda em diferentes pontos para as sete configurações portuárias permite avaliar o abrigo proporcionado por cada configuração. Assim, analisaram-se os regimes da agitação nesses 7 pontos de controlo e contabilizou-se o número médio de dias por ano em que determinadas condições de agitação ocorrem, o que permitiu uma análise ao impacto nas condições de acessibilidade e navegabilidade no interior do porto.

### Resultados

Na Figura 8 apresenta-se a linha de pontos extraídos sobre o canal de entrada do porto numa extensão de 900 m e os valores dos índices de agitação (ou alturas de onda no caso da onda incidente ser  $H_0=1$  m) para as 7 configurações testadas, para baixa-mar e para a condição de agitação:  $T=10$  s,  $D=292.5^\circ$  e  $NM=+0.5$  m (ZHL).

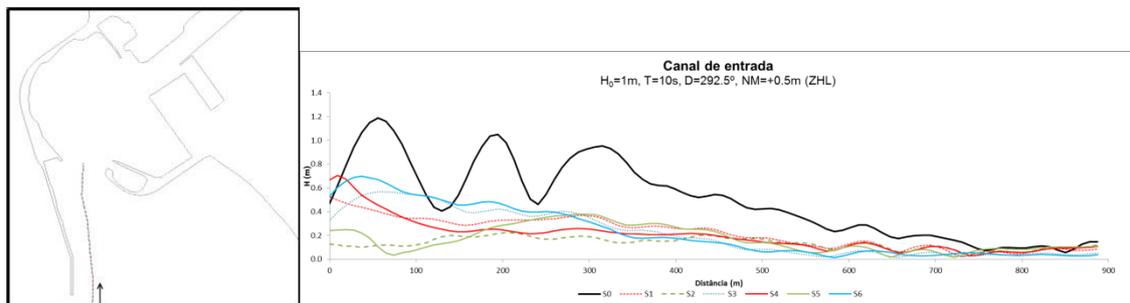


Figura 8 – Alturas de onda ao longo do canal de entrada (sobre uma linha de pontos com uma extensão de 900 m, à esq.) para a condição de agitação:  $T=10$  s,  $D=292.5^\circ$  e  $NM=+0.5$  m (ZHL), para as 7 configurações testadas

Em geral, para as várias condições de agitação incidente analisadas, a configuração atual (S0) conduz a índices de agitação superiores a qualquer das restantes configurações (S1 a S6) nos primeiros 200 m. No restante comprimento, esta tendência não é tão evidente.

Analisaram-se os regimes gerais, rosa de direções e os histogramas marginais de  $H_s$ , nos 7 pontos obtidos. Apresenta-se, de seguida, o histograma obtido no ponto P3 (Figura 9) correspondente ao período total de dados para as 7 configurações.

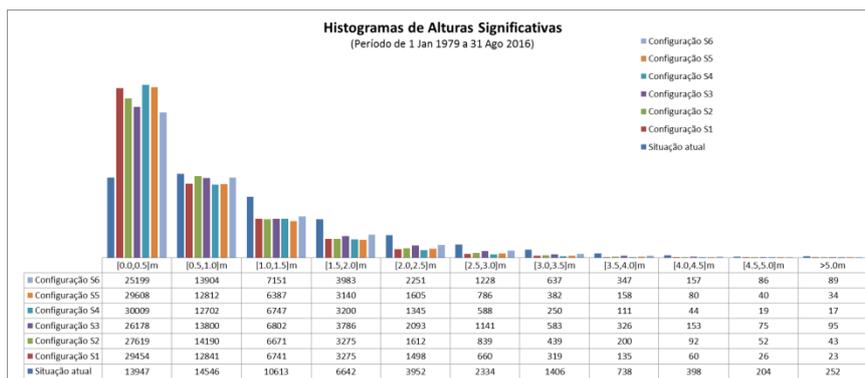


Figura 9 – P3. Histogramas marginais de alturas significativas. Período de 1 de Janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016. Configuração atual (S0) e Configurações S1 a S6

Verificou-se que as alturas de onda significativas mais frequentes são as das classes até 1.5 m. As configurações correspondentes ao prolongamento do molhe conduzem a um maior abrigo face à configuração atual. Com efeito, o número de ocorrências associado a alturas de onda significativas mais elevadas (acima de 1.5 m) é menor do que o verificado para a Configuração atual nesses pontos. O abrigo do quebra-mar diminui da configuração S1 para S3 e de S4 para S6, devido ao menor comprimento do quebra-mar.

As configurações S1 e S4 são as que, em geral, conduzem a um maior abrigo, i.e, são as que apresentam o maior número de ocorrências nas classes de altura significativa de onda dos 0 aos 0.5 m e o menor número de ocorrências nas classes de altura mais elevadas (acima de 1.5 m). Destas 2 configurações, a configuração S4 apresenta um número de ocorrências nas classes mais elevadas inferior à configuração S1, em geral.

De seguida, trataram-se os dados dos regimes gerais nos 7 pontos e efetuou-se uma análise estatística dos mesmos. Apresenta-se na Figura 10 os resultados obtidos no ponto P3.

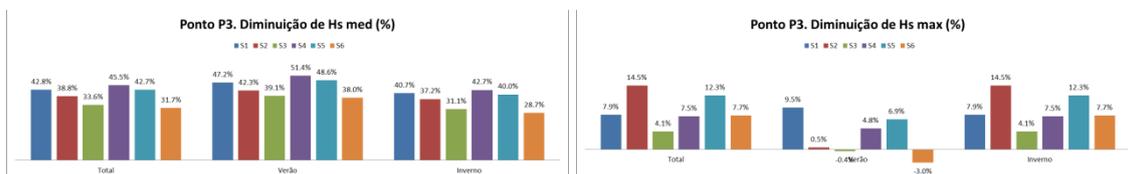


Figura 10 – P3. Diminuição de Hs med (%) e Hs máx (%)

A análise destes resultados confirma que as configurações correspondentes ao prolongamento do molhe conduzem, em média, a um maior abrigo face à configuração atual. O abrigo do quebra-mar diminui da configuração S1 para S3 e de S4 para S6, devido ao menor comprimento do quebra-mar, sendo, em geral, a configuração S4 que conduz ao maior abrigo embora a diferença face a S1 seja pouco significativa. Em termos máximos, este comportamento não é tão evidente, embora se note, uma tendência de redução do valor de Hs max para todas as soluções estudadas, relativamente à de referência.

Finalmente, efetuou-se uma análise às condições de acessibilidade e navegabilidade, através da determinação do nº de dias médio em que as alturas significativas são superiores a um determinado valor limite, Figura 11. Foram excluídos os dias em que a altura significativa das ondas, no exterior do porto, é superior a 4 m, pois nessas condições ocorre limitação à entrada e saída de embarcações mais pequenas no porto.

As configurações correspondentes ao prolongamento do molhe conduzem a um menor número de dias com alturas de onda superiores a 1.0 m nos pontos ao longo do canal de navegação.

O número de dias com alturas de onda nas diferentes classes aumenta com a diminuição do comprimento do molhe (de S1 para S3 e de S4 para S6).

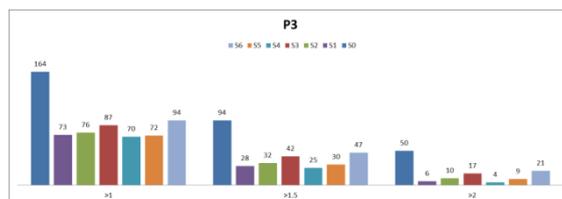


Figura 11 – P3. Número médio de dias com alturas de onda significativa superiores a 1.0, 1.5 e 2.0 m

### Discussão e Conclusões

Os resultados do estudo permitiram concluir que o prolongamento do molhe conduz a um maior abrigo do canal de navegação:

As configurações correspondentes ao prolongamento do molhe conduzem a um menor número de dias com alturas de onda elevadas (superiores a 1.5 m) face à configuração atual. As configurações S1 e S4, correspondentes ao maior comprimento do molhe, são as que conduzem a um maior abrigo sendo o ângulo de abertura de 0° mais favorável do que um de 20°, embora a diferença seja muito pequena.

#### 3.3.2 Estudos de ressonância

##### Objetivos e Metodologia

O objetivo deste estudo foi analisar, usando um modelo numérico, a influência do prolongamento do quebra-mar exterior nas características da agitação marítima de longo período no interior do porto de Leixões, para cada uma das configurações testadas. Esta componente do estudo é descrita em detalhe em Pinheiro et al. (2017b), apresentando-se aqui um resumo.

O modelo numérico utilizado foi o modelo de elementos finitos DREAMS (Fortes, 1993) que permite realizar estudos de ressonância portuária.

Os cálculos com o modelo DREAMS (por se tratar de um modelo linear, i.e., não variar com a altura de onda incidente) foram efetuados para as seguintes condições de agitação regular: a) períodos de onda, T, de 20 s a 700 s com intervalo de 20 s; b) direções de onda à entrada do domínio de cálculo de 180° a 360°, com intervalo de 22.5°; c) nível de maré de +0.5 m (ZHL) a +4.0 m (ZHL), com intervalo de 0.5 m.

Os resultados obtidos (curvas de resposta em diversos pontos de controlo e diagramas de amplificação na totalidade do domínio de cálculo), para a configuração atual (S0) e as seis configurações portuárias (S1 a S6) permitem avaliar as consequências, em termos de coeficientes de amplificação e velocidade, que cada configuração poderá ter no interior do porto.

##### Resultados

A Figura 12 mostra exemplos de diagramas dos coeficientes de amplificação para períodos de onda que originaram situações de ressonância, para as configurações S0 e S1.

Nos exemplos apresentados verificam-se zonas de ressonância distintas associadas a períodos distintos, nomeadamente, nos postos B e C do terminal petrolífero (60 s), na bacia de rotação (60 s), no terminal multiusos (60 s), na marina (240 s), terminal polivalente e toda a bacia portuária (580 s). Para a configuração S1, verifica-se que os coeficientes de amplificação reduziram-se significativamente nos terminais petrolíferos, terminal multiusos, porto de recreio e na marina. As configurações S2 a S6 mostraram a mesma tendência.

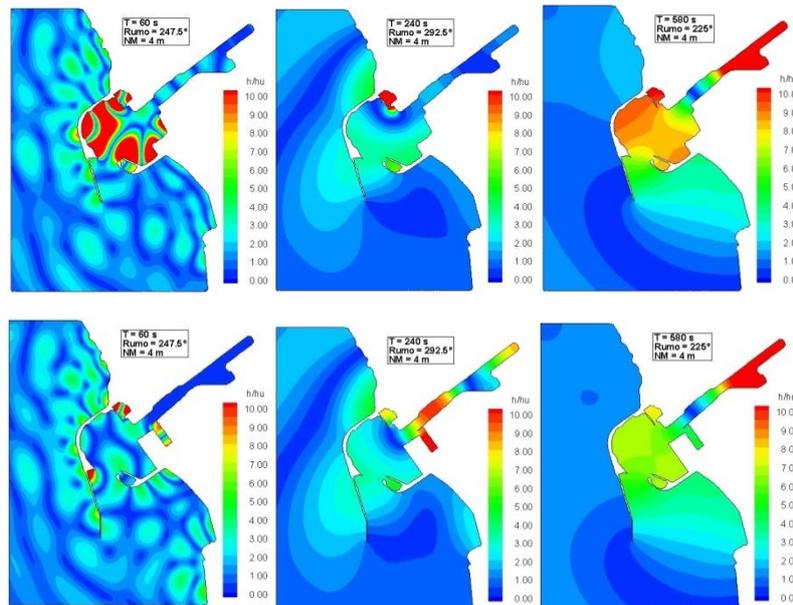


Figura 12 – Diagramas do coeficiente de amplificação para os períodos de onda de 60 s, 100 s, 160 s, 240 s e 580 s. Configuração Atual, S0 e Configuração S1

No entanto, olhando apenas para condições de onda isoladas não é possível garantir que os picos de amplificação não se tenham simplesmente transferido para outros períodos e/ou direções. De forma a verificar esta possibilidade, extraíram-se os valores máximos dos coeficientes de amplificação obtidos em todo o domínio de cálculo para qualquer das condições de onda simuladas, Figura 13, assim como a direção e período correspondentes. Foi assim possível identificar as zonas que estão associadas às condições de onda longa incidente que originam os maiores coeficientes de amplificação para a configuração atual, S0.

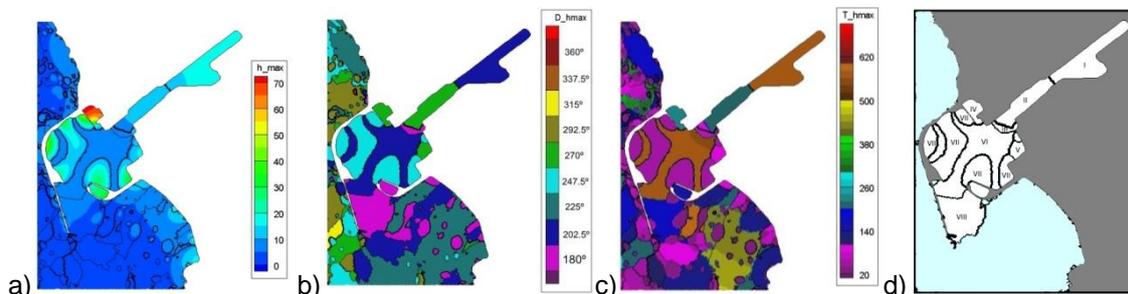


Figura 13 – Configuração atual, S0. a) Coeficiente de amplificação máximo obtido para os períodos e direções de onda simulados; b) direção correspondente ao coeficiente de amplificação máximo; c) período correspondente ao coeficiente de amplificação máximo; d) zonas de coeficiente de amplificação máximo

A zona da marina é o local onde se verificam os maiores coeficientes de amplificação máximos chegando a valores de 70. Segue-se o terminal petrolero, a bacia de rotação, o terminal de cruzeiros e o terminal multiusos com valores perto de 40, e ainda o porto de recreio e a zona interior do porto, com valores de 30 e 20, respetivamente. Os períodos e direções associados a estes coeficientes variam e são específicos de cada zona.

Na Figura 14 apresenta-se o coeficiente de amplificação máximo assim como a direção e período correspondentes, para as configurações S1 a S6.

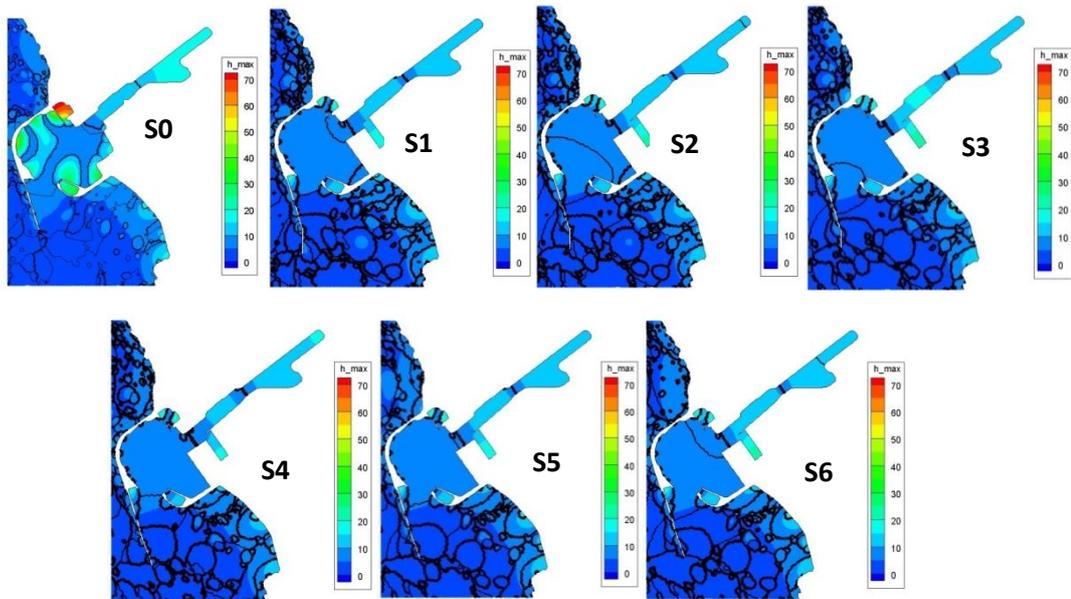


Figura 14 – Configurações S0 a S6. Coeficiente de amplificação máximo obtido para os períodos e direções de onda simulados

Verificou-se que o coeficiente de amplificação máximo se reduz, nalguns casos significativamente, em relação à configuração atual do porto, qualquer que seja a configuração S1 a S6. A exceção é a zona V (futuro porto de pesca), onde os coeficientes de amplificação máximos aumentam ligeiramente em todas as configurações, exceto na configuração S4. Note-se que se trata de uma bacia retangular que não existe atualmente.

Os períodos ressonantes não sofreram alterações significativas nas zonas I, II, VI e IX, i.e., a variação é de 20 s. Nas restantes zonas houve uma alteração nas condições de ondas incidentes que excitam essa mesma zona, nomeadamente na zona III, a condição de amplificação máxima ressonante era de 560 s e direção de 202.5° na configuração atual e passa para 240 s e 270° nas configurações S1 a S6, embora com uma amplificação da mesma ordem de grandeza.

Foram selecionados alguns pontos representativos de algumas zonas do porto de Leixões para a apresentação das curvas de resposta, para todas as condições de agitação incidente testadas, Figura 15.

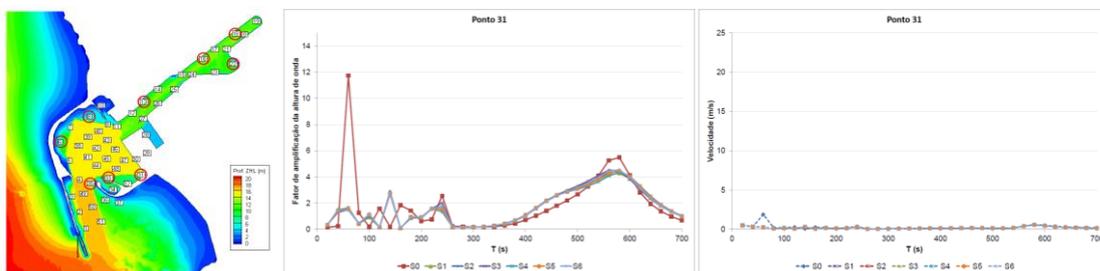


Figura 15 – Curva de resposta médias dos coeficientes de amplificação e de velocidade média no ponto P31

As curvas de resposta médias dos coeficientes de amplificação, nos pontos da zona VII apresentam um pico pronunciado nos 60 s, com amplificações de cerca de 10 vezes na configuração atual, que se reduzem, para qualquer das configurações, para menos de 2.

Em termos de velocidades médias, estas são relativamente baixas (inferiores a 2 m/s), em todas as configurações, podendo atingir valores de 5 m/s nos períodos mais altos. No ponto P6

(Terminal de petroleiros) o período ressonante de 60 s origina também velocidades um pouco mais elevadas, mas apenas na configuração atual (S0).

### Discussão e Conclusões

De modo geral, os resultados sugerem que as configurações propostas para o prolongamento do molhe tendem a atenuar as possíveis situações de ressonância no interior do porto, havendo, no entanto, algumas zonas em que tal não acontece. Não se verificaram diferenças significativas entre configurações.

No entanto, julga-se necessária uma análise aprofundada, baseada em dados históricos concretos de ondas longas, registados nas imediações do porto de Leixões para se poder inferir sobre a real atenuação ou agravamento das situações de ressonância que se verificam atualmente no interior do porto.

## **3.4. Avaliação do Impacte na Agitação Marítima na Praia de Matosinhos**

### Objetivos e Metodologia

O objetivo deste estudo foi avaliar, comparativamente, as características da agitação marítima que se obtêm na proximidade da praia de Matosinhos, considerando cada uma das configurações portuárias testadas. Esta componente do estudo é descrita em detalhe em Pinheiro et al. (2017c), apresentando-se aqui um resumo.

Os principais aspetos a analisar, para efeito da avaliação dos impactes das intervenções propostas, incluem os índices de agitação médios, as alturas de onda em frente à praia de Matosinhos, em toda a sua extensão e entre as cotas de -10 m ZHL e -0.5 m ZHL e ainda a posição da linha de rebentação face à linha de praia.

A metodologia utilizada neste estudo é em tudo semelhante à descrita em 3.3.1, sendo que a análise é efetuada para os pontos P30 a P49, Figura 7b.

### Resultados

Analisaram-se na Figura 16, os índices de agitação médios nos pontos de controlo e a altura de onda sobre a linha da batimétrica -2.0m (ZHL), Figura 7b.

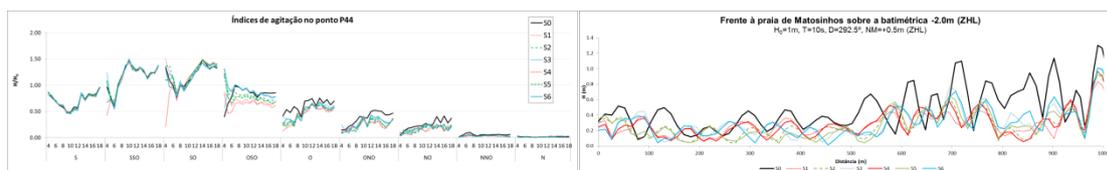


Figura 16 – P44. Índices de agitação médios e altura de onda sobre a linha da batimétrica -2.0 m (ZHL), em frente à praia para a condição de agitação:  $H=1.0$  m,  $T=10$  s,  $D=292.5^\circ$  e  $NM=+0.5$  m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6

O efeito do prolongamento do molhe é mais relevante para as direções de agitação incidente entre WSW a WNW e a redução do índice de agitação, quando ocorre, é, em geral, superior para a configuração S1.

Verificou-se que existem duas zonas com características diferentes, os primeiros 500 m sobre a linha, mais abrigados para direções de agitação mais rodadas a NW, e os restantes 500 m sobre a linha, menos abrigados para estas direções. A redução de  $H_s$  varia entre 9% e 42%.

A altura de onda média diminui com o aumento do prolongamento do molhe, como seria de esperar, e as diferenças são maiores para as direções mais rodadas a norte, para as quais o quebra-mar confere maior abrigo. Relativamente ao ângulo de abertura do prolongamento, em geral, um ângulo de abertura de  $0^\circ$  leva a maiores reduções das alturas de onda, embora as diferenças sejam ténues face a um ângulo de abertura de  $20^\circ$ .

No que se refere à linha de rebentação na praia de Matosinhos, Figura 17, verificou-se em geral, para baixa-mar, a alteração da posição da linha de rebentação entre a configuração atual, S0 e as diferentes configurações S1 a S6, que se aproxima mais da linha de costa. A diferença entre configurações não é relevante.



Figura 17 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: H=2.0 m, T=10 s, D=292.5° e NM=+0.5 m (ZHL), para as configurações: S0, S1 e S6

Apresenta-se, de seguida, para o ponto P42, os histogramas marginais de Hs (Figura 18) correspondentes ao período total de dados.

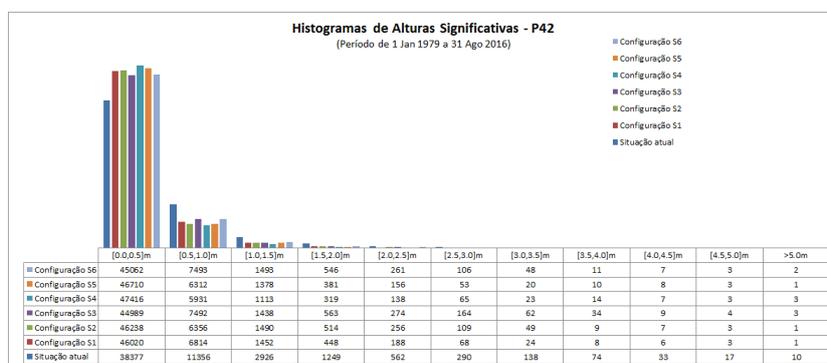


Figura 18 – P42. Histogramas marginais de alturas significativas. Período de 1 de Janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016. Configurações S0 a S6

Verificou-se que, para qualquer ponto, as alturas de onda significativas mais frequentes são as da classe até 0.5 m. A redução de altura de onda em frente à praia devido ao prolongamento do quebra-mar é evidente, para as seis configurações, na medida em que aumenta o número de registos inferiores a 0.5 m e diminuem os registos superiores a 0.5 m, qualquer que seja a configuração considerada. As configurações S1 e S4 são os que, em geral, conduzem a maiores reduções de altura de onda em frente à praia, i.e., são os que apresentam o maior número de ocorrências nas classes de altura significativa de onda dos 0.0 m aos 0.5 m e o menor número de ocorrências nas classes de altura mais elevadas. A redução de altura de onda em frente à praia diminui da configuração S1 para S3 e de S4 para S6, devido ao menor comprimento do quebra-mar. Parece existir uma maior redução de altura de onda quando o ângulo de abertura do molhe é de 0°.

Finalmente, determinou-se o nº médio de dias por ano em que as alturas significativas estão numa determinada gama de valores, Figura 19. Na figura apresenta-se a sombreado azul a zona de possível rebentação (tendo em conta a profundidade do ponto e o nível de maré).

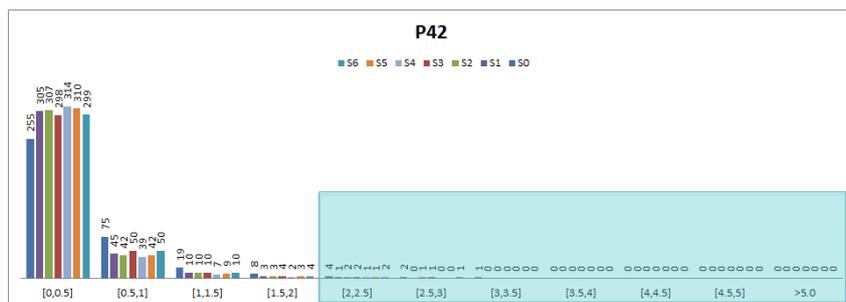


Figura 19 – P42. Número médio de dias associados a classes de alturas de onda significativa. Configurações S0 a S6

As configurações correspondentes ao prolongamento do molhe (qualquer que seja a inclinação) conduzem a um menor número de dias com alturas de onda superiores a 0.5 m, nas diferentes classes, nos pontos em análise, face à configuração atual. Em todos os pontos, o número de dias com alturas de onda nas diferentes classes superiores a 0.5 m aumenta, em geral, com a diminuição do comprimento do molhe. Em todos os pontos, a diferença do número de dias com alturas de onda superiores a 0.5 m para a situação de 0° e 20° é pequena.

O número de dias com alturas de onda superiores a 2.0 m diminui com o prolongamento do molhe, não diferindo muito entre configurações (S1 a S6), Figura 20.

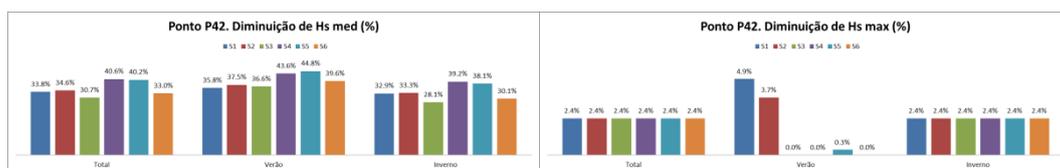


Figura 20 – P42. Diminuição de Hs med (%) e Hs max (%)

### Discussão e Conclusões

As configurações analisadas levam a uma redução das alturas de onda na praia de Matosinhos, principalmente para direções de onda de WNW, W e SW, atualmente menos abrigadas. As direções mais rodadas a norte afetam mais as alturas de onda na metade sul da praia, enquanto as direções mais rodadas a sul afetam mais as alturas de onda na metade norte da praia.

A posição da linha de rebentação, em geral, ou mantém-se inalterada ou aproxima-se da praia (o que ocorre especialmente na metade norte da praia e para incidências mais rodadas a sul).

As diferenças entre as configurações S1 a S6, não são significativas e o ângulo de abertura tem uma influência reduzida nos resultados.

### 3.5. Avaliação do Impacte na Dinâmica Sedimentar

#### Objetivos e Metodologia

As intervenções em análise, nomeadamente o prolongamento do molhe norte e as dragagens, poderão afetar a dinâmica sedimentar no porto e na praia de Matosinhos. É por isso necessário avaliar estas alterações e determinar potenciais impactes negativos. Esta componente do estudo é descrita em detalhe em Fortunato et al. (2017), apresentando-se aqui um resumo.

Conceptualmente, quatro tipos de fluxos sedimentares são relevantes no presente contexto. Primeiro, o trânsito litoral pode ser parcialmente capturado pelo porto, contribuindo para o seu assoreamento. Em segundo lugar, embora a praia de Matosinhos esteja confinada a norte pelo molhe sul, uma rotação excessiva desta praia no sentido anti-horário pode conduzir à transposição de areias da praia para o interior do porto. Terceiro, os sedimentos provenientes do rio Leça podem depositar-se no porto. Finalmente, em situações de forte agitação, os fluxos

de água através do molhe norte são sentidos nos navios atracados e poderão transportar areias para o porto.

A análise da dinâmica sedimentar e do impacte das intervenções foi efetuada com base na recolha e análise de dados e na aplicação de vários modelos. Os dados analisados incluíram batimetrias, volumes de dragagem, imagens aéreas e amostras de sedimentos. Os modelos utilizados foram de diferentes tipos. O modelo acoplado de circulação, agitação marítima e dinâmica sedimentar SCHISM (Zhang et al., 2016; Guerin et al., 2016) foi usado para simular a dinâmica sedimentar das areias provenientes do trânsito litoral durante um mês representativo (janeiro de 1991). A dinâmica da praia de Matosinhos entre 2008 e 2016 foi simulada com o modelo de linha de costa LITLINE (DHI, 2016), forçado com os resultados descritos na secção 3.4. O destino dos sedimentos provenientes do rio Leça foi simulado com o modelo lagrangeano VELApart (Oliveira e Fortunato, 2002). Finalmente, os fluxos de areia através do quebra-mar norte não foram explicitamente simulados dado que não serão afetados pelas intervenções previstas.

### Resultados

Colheram-se e analisaram-se amostras de sedimento superficial no interior e na envolvente do porto (Figura 21). Os sedimentos superficiais no interior do porto são vasas ricas em matéria orgânica, exceto à entrada do porto, onde 30% da amostra é areia. Em frente à praia de Matosinhos, a fração grosseira é dominante, com diâmetros medianos de 0.15-0.22 mm. Na zona subaérea da praia de Matosinhos este valor varia entre 0.19 e 0.29 mm, enquanto na praia de Leça as areias são mais grosseiras (0.46-0.64 mm).

Avaliaram-se os volumes dragados e as evoluções batimétricas. Entre 2007 e 2016, o volume anual médio de material dragado no Porto de Leixões é cerca de 200 mil m<sup>3</sup>. Neste período, o interior do porto assoreou à taxa média de 0.2-0.3 m/ano. A zona a montante da bacia de rotação apresenta uma taxa de assoreamento da ordem de 0.4 m/ano.

Simularam-se as trajetórias de sedimentos provenientes do rio Leça. Uma fração significativa dos sedimentos de origem fluvial deposita-se no interior do porto, sobretudo na zona de montante e junto às margens, o que é consistente com os dados. As intervenções aumentarão a percentagem de sedimentos depositados, em particular para os sedimentos mais finos. Em contrapartida, as taxas de sedimentação diminuirão na bacia de rotação.

O modelo SCHISM permitiu avaliar a circulação, agitação marítima e dinâmica das areias na envolvente do porto (Figura 22 a-d). Na praia de Matosinhos ocorre uma movimentação significativa de areias. Os caudais sólidos residuais na praia de Matosinhos são dirigidos para norte, provocando uma acumulação de sedimentos junto ao molhe sul. No interior do porto e numa zona protegida pelo quebra-mar norte, as condições hidrodinâmicas são insuficientes para mobilizar sedimentos com diâmetros superiores a 0.1 mm. Este resultado é consistente com os dados, que indicam uma quase ausência de areias nos sedimentos superficiais do porto. Assim, os sedimentos não tenderão em geral a penetrar no interior do porto, embora se admita que algum material mais fino possa ser transportado em suspensão e depositar-se no anteporto. Junto à cabeça do molhe norte, os caudais sólidos residuais são dirigidos para o exterior, o que contribui para que o trânsito litoral não seja capturado pelo porto.

As intervenções analisadas afetam a dinâmica sedimentar. A zona em que as condições hidrodinâmicas não permitem a mobilização dos sedimentos à entrada do porto estende-se para sul e para este. O anteporto fica assim mais protegido, e a extensão da zona sujeita a assoreamento diminui. Na praia de Matosinhos o padrão de erosão e assoreamento torna-se mais estruturado, aumentando a erosão da zona sul da praia e a deposição a norte.

Contrariamente ao comportamento revelado pela análise dos dados, o modelo não evidencia um assoreamento significativo junto ao Posto A TPL. Este contraste sugere que o assoreamento que se verifica no Posto A TPL se deve a um mecanismo não considerado no modelo, concretamente ao atravessamento do quebra-mar norte pelos sedimentos.

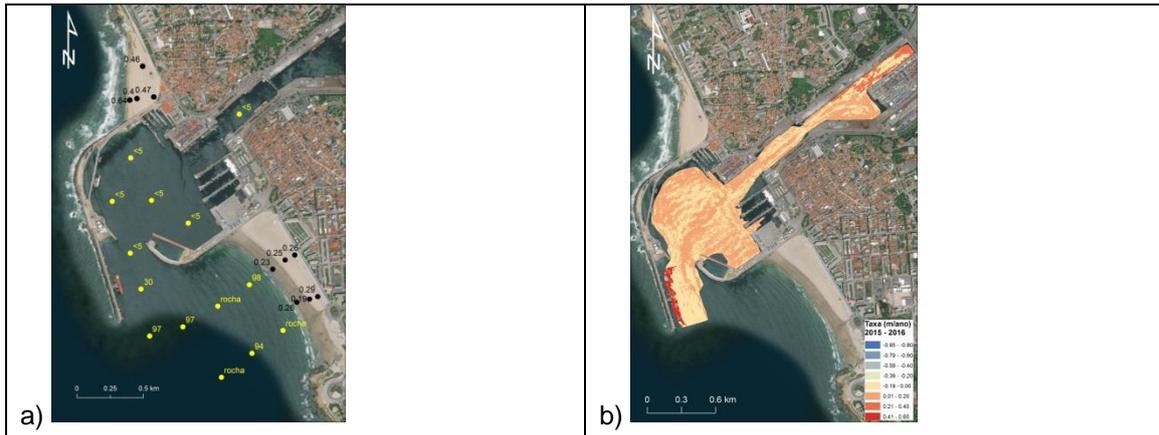


Figura 21 - a) Percentagem da fração grosseira (partículas com dimensão superior a  $63 \mu\text{m}$ ) nas amostras de sedimento superficial recolhidas em 23/02/2017 (a amarelo); diâmetro mediano (em mm) dos sedimentos das praias de Leça e de Matosinhos em sedimentos recolhidos em 06/01/2017 (a preto); b) exemplo da variação da taxa média anual de evolução dos fundos na zona interior do porto (estes valores não consideram as dragagens efetuadas), Imagem - ESRI Basemap

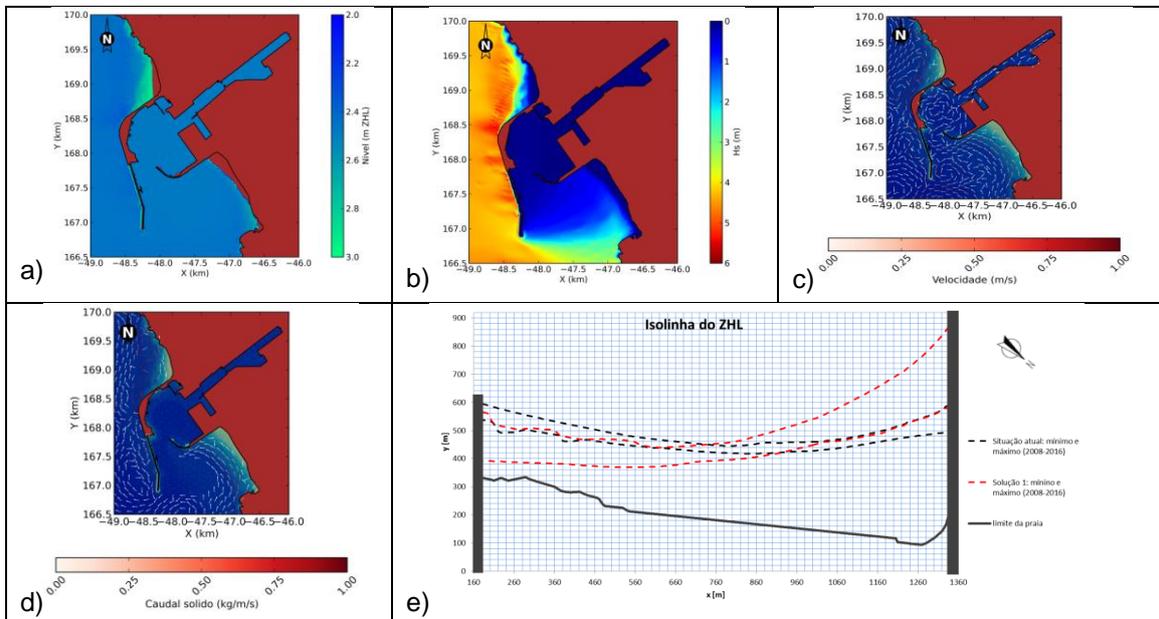


Figura 22 - Exemplos de resultados: a) níveis máximos; b) altura de onda significativa; c) campo de velocidades; d) caudais sólidos residuais; e) evolução da isolinha do ZHL entre 2008 e 2016

O modelo LITLINE permitiu reproduzir a evolução da praia a longo prazo (2008-2016). A solução analisada promove a rotação da praia no sentido anti-horário em torno do seu setor central (Figura 22 e) devido ao maior efeito de abrigo relativamente às ondas incidentes mais rodadas a norte em frente à praia, e à maior exposição da praia aos rumos incidentes mais rodados a sul relativamente à configuração atual. A solução analisada aumenta a amplitude da variação da isolinha do ZHL ao longo da praia de Matosinhos. Contudo, este resultado estará majorado pelo facto da isolinha do ZHL inicial da simulação (observada em 2008) ter uma configuração divergente da tendência da forma plana da praia conferida pela solução analisada.

Em resultado deste comportamento, a solução analisada: i) promove a fuga de sedimentos para o canal de acesso ao porto no extremo norte da praia de Matosinhos, uma vez que a zona ativa da praia adjacente ao quebra-mar sul progride em direção ao mar; e ii) aumenta a vulnerabilidade à erosão e galgamento do setor sul da praia em condições extremas de tempestade marítima. Contudo, a existência de afloramentos rochosos em frente e na zona

ativa da praia, nomeadamente, imediatamente abaixo da profundidade ativa no caso do Perfil Norte e na face de praia no extremo sul, poderá atenuar os dois efeitos apontados.

#### Discussão e Conclusões

A análise de dados e de resultados de modelos permitiu determinar as alterações à dinâmica sedimentar resultantes das intervenções consideradas. A configuração atual foi caracterizada através da análise de dados de sedimentologia, de batimetria e de volumes de dragagem. Os modelos de circulação, agitação marítima, transporte sedimentar e evolução da linha de costa permitiram complementar a compreensão da dinâmica sedimentar atual, e avaliar as alterações que resultarão das intervenções. Estas abordagens complementares oferecem uma visão consistente sobre a dinâmica sedimentar atual e futura.

A dinâmica sedimentar nesta zona pode ser decomposta em quatro componentes.

O rio Leça constitui uma importante fonte de sedimentos. Estes depositam-se maioritariamente na zona de montante do porto, onde se observam as maiores taxas de assoreamento. As melhores condições de abrigo proporcionadas pelas intervenções previstas irão aumentar a sedimentação na zona montante do porto e reduzi-la na bacia de manobra.

Na zona costeira, os sedimentos superficiais são constituídos por areias médias (praia de Leça) a finas (praia de Matosinhos e anteporto). O abrigo proporcionado pelos quebra-mares cria condições hidrodinâmicas que não permitem mobilizar estas areias e transportá-las para o interior do porto. No entanto, em determinadas condições de agitação marítima, forma-se uma corrente de deriva de sul para norte que é parcialmente capturada pelo porto durante a enchente. Esta corrente poderá transportar as frações mais finas dos sedimentos presentes na praia (areias muito finas) para o interior do porto. O prolongamento do molhe norte alargará para sul e para este a zona em que não existem condições de mobilização de areias, dificultando ainda mais a penetração de areias finas e médias de origem marítima no interior do porto. Contudo, a captura da deriva litoral pelo quebra-mar norte irá aumentar, potenciando assim a penetração de areias muito finas no porto.

O prolongamento do molhe norte afetará também a praia de Matosinhos. As melhores condições de abrigo na parte norte da praia e as diferentes condições de abrigo proporcionadas à praia em função da direção da agitação conduzirão a uma rotação da praia no sentido anti-horário. Esta rotação reforçará a atual tendência de acumulação de areia no extremo norte da praia e de erosão da zona sul. Se esta tendência não for contrariada por intervenções regulares, a acumulação de areia junto ao quebra-mar sul poderá levar a algum assoreamento no canal de acesso ao porto a médio prazo. Simultaneamente, a erosão no extremo sul da praia poderá fomentar galgamentos nessa zona. Contudo, a existência de afloramentos rochosos na zona submersa e na face de praia no extremo sul poderá atenuar estes dois impactes da solução proposta.

Finalmente há indicações de que, em situações de forte agitação marítima, penetra areia no porto através do quebra-mar norte, o que afeta principalmente o Posto A TPL. Este fenómeno não foi analisado em detalhe, uma vez que se deverá manter inalterado.

#### **4. ESTUDOS EM MODELO FÍSICO**

Para a otimização da solução do prolongamento do quebra-mar do Porto de Leixões, foram efetuados ensaios de agitação, estabilidade e galgamento em canal (2D) e em tanque (3D), que se descrevem em 4.1, 4.2 e 4.3 respetivamente. Esta componente do estudo é descrita em detalhe em Lemos et al. (2017 a e b) e em Neves et al. (2017), apresentando-se aqui um resumo.

Nesta fase, considerou-se a configuração 3 de prolongamento do quebra-mar para os ensaios de agitação e de estabilidade e galgamentos em tanque.

#### 4.1. Ensaio de Agitação

O objetivo dos ensaios em modelo físico de agitação foi a análise da agitação marítima no interior do porto considerando uma configuração para o prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões, com 300 m de comprimento e com um ângulo de abertura de 20° relativamente ao alinhamento do quebra-mar existente e a configuração portuária proposta pela APDL (2016). Esta componente do estudo é descrita em detalhe em Neves et al. (2017), apresentando-se nesta comunicação um breve resumo.

O modelo físico reduzido de agitação foi construído nas instalações experimentais do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do LNEC, no tanque de ondas do Pavilhão de Hidráulica Marítima, Figura 23 (esq.). Trata-se de um tanque com as dimensões de 44.0 x 23.0 m<sup>2</sup>, equipado com 4 geradores móveis de ondas irregulares com 6.0 m de comprimento cada, para profundidades de água até 75 cm, que foi dividido de forma a albergar quer o modelo físico de agitação quer o de estabilidade e galgamentos do Porto de Leixões.

A construção do modelo reduzido, Figura 23, foi realizada de acordo com a lei de semelhança de Froude, tendo sido utilizada a escala geométrica de 1:80).

A construção do modelo implicou a reprodução dos seguintes elementos: totalidade da bacia portuária até à Foz do Rio Leça; totalidade dos terraplenos portuários da bacia portuária representada; obras de proteção da agitação marítima atuais e prolongamento do quebra-mar exterior em 300 m com um ângulo de 20° face ao seu alinhamento atual; fundo fixo até à cota -20 m (ZHL), tendo em conta as direções da agitação marítima previstas reproduzir.

A reprodução dos fundos foi feita de acordo com a batimetria e informações fornecidas pela APDL (APDL, 2016) até -20.0 m (ZHL), Figura 23 (dir.). Foi considerado o canal de acesso à cota -16.85 m (ZHL) e a bacia de rotação à cota -15.5 m (ZHL).

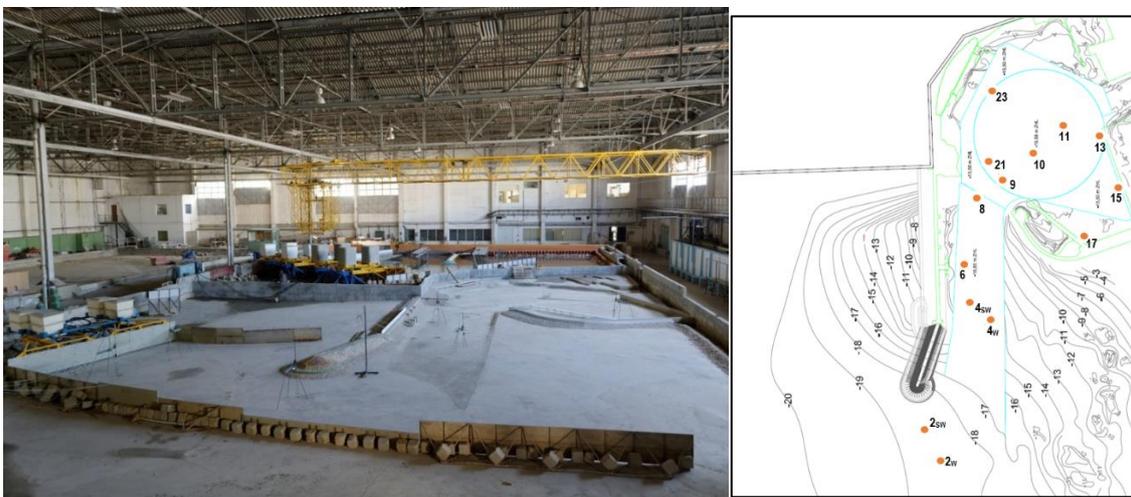


Figura 23 – Aspeto do modelo implantado no tanque de ondas irregulares (esq.). Batimetria e pontos de medição da agitação marítima no modelo (dir.)

Foram reproduzidas as direções, sobre a batimétrica -20.0 m (ZHL), correspondentes a 225° (SW) e 270° (W), às quais se associou a reprodução de 3 valores de período de pico do espectro,  $T_p$ , de 10 s, 14 s e 16 s. Associados a cada um dos três períodos de pico de espectro considerados e a cada direção, foram efetuados ensaios com três valores de altura de onda significativa,  $H_s$ , próximos de 2 m, 3 m e 4 m à saída do gerador de ondas irregulares (ou seja, sobre a batimétrica -20.0 m (ZHL)). Cada um dos valores de  $H_s$  atuou no modelo durante um período correspondente a 3 horas no protótipo (aproximadamente 20 minutos no modelo físico). Os ensaios foram realizados com o nível de maré único e constante de +2.0 m (ZHL), correspondente ao nível médio de maré.

Para a verificação da tranquilidade portuária da bacia protegida pelo quebra-mar exterior prolongado em 300 m com o alinhamento de 20° face ao atual, procedeu-se à medição das características da agitação marítima com sondas de condutância, para cada uma das condições de agitação marítima incidente atrás referidas.

A medição foi feita em dois pontos à saída do gerador (na batimétrica de -20.0 m (ZHL)) e em 12 pontos cuja localização, sugerida pelo projetista, se apresenta na Figura 23 (dir.) e corresponde a: um ponto à entrada do porto (2), três pontos (4, 6 e 8) ao longo do canal de acesso; 8 pontos (9, 10, 11, 13, 15, 17, 21 e 23) no interior da bacia portuária. Como a posição dos pontos 2 e 4 no rumo SW foi ligeiramente diferente da do rumo W, na Figura 23 (esq.) indica-se, em índice e para esses pontos, o rumo correspondente. As demais sondas mantiveram a sua posição em todos os ensaios.

A Figura 24 ilustra o aspeto da agitação na entrada do porto, canal de navegação e bacia portuária para um ensaio com o rumo de W e outro de SW.

Com base nos resultados dos índices de agitação obtidos nos ensaios, em geral, o abrigo concedido pelo prolongamento do quebra-mar exterior no canal de navegação e na bacia portuária é maior para a agitação proveniente de W do que para a agitação de SW e para os períodos de pico de 14 s e 16 s, que apresentam resultados semelhantes, do que para  $T_p=10s$ .

Tal como seria de esperar, verifica-se uma tendência de diminuição dos valores dos índices de agitação à medida que a agitação se propaga para o interior da bacia portuária.



Figura 24 – Aspeto da agitação no ensaio com o rumo de SW (cima) e W (baixo)

## 4.2. Ensaios de Estabilidade e Galgamentos em Canal

### Objetivos, solução a ensaiar, e metodologia

O objetivo dos ensaios em modelo físico bidimensional foi a avaliação do comportamento hidráulico de perfis-tipo do troço corrente do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de

Leixões em termos da estabilidade do manto resistente e do efeito do galgamento na estabilidade do manto interior. Esta componente do estudo é descrita em detalhe em Lemos et al. (2017a), apresentando-se aqui um resumo.

Pretendeu-se com este primeiro estudo otimizar a secção projetada para o tronco do prolongamento do molhe, para posterior aplicação no modelo físico tridimensional (Figura 25). O perfil encontrava-se fundado a uma cota de cerca de -16.7 m (ZHL) estando o seu coroamento localizado a +14.7 m (ZHL). O manto resistente constituído por duas camadas de blocos Antifer e o intradorso, em camada única era constituído por blocos de alta densidade (2650 kN/m<sup>3</sup>) com 550 kN.

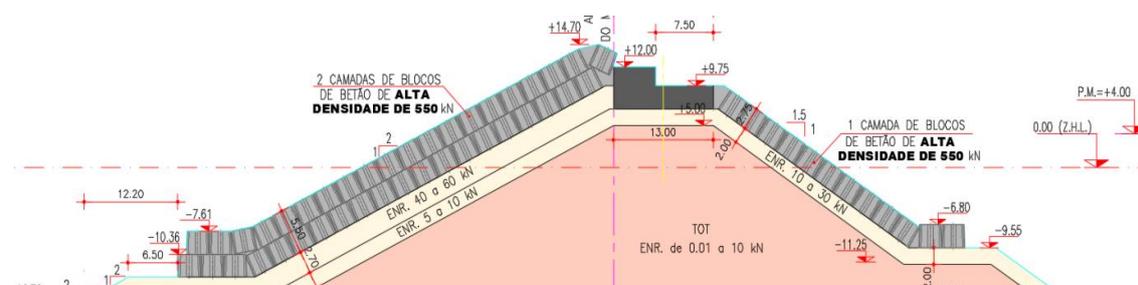


Figura 25 – Corte transversal do perfil ensaiado

Para a realização do estudo, as principais tarefas foram: construção dos fundos; realização de séries de ensaios com vista à calibração da agitação marítima incidente; Implantação do perfil; Instalação do equipamento necessário à geração da agitação e aquisição de dados; realização dos ensaios de estabilidade e galgamentos; análise dos resultados.

#### Modelo físico

O modelo físico reduzido do perfil tipo ensaiado foi construído num dos canais de ondas do Pavilhão de Hidráulica Marítima, Figura 26a. Trata-se de um canal de ondas irregulares com 49.4 m de comprimento e 1.60 m de largura e designado por COI1. A construção do modelo foi realizada de acordo com a lei de semelhança de Froude, tendo sido utilizada a escala geométrica de 1:61, Figura 26b.



Figura 26 – a) Canal de ondas COI1; b) Aspeto do perfil após construção

A agitação irregular foi simulada utilizando o espectro JONSWAP (com um coeficiente  $\gamma=3,3$ ), permitindo a reprodução de ondas com fase aleatória de acordo com o espectro teórico definido.

Os ensaios foram realizados com dois níveis de maré constante: +0.0 m (ZHL) e +4.0 m (ZHL), correspondendo a baixa-mar e a preia-mar, respetivamente, três períodos de pico ( $T_p$ ) de 12, 16 e 20 s associados a alturas de onda crescentes entre 6 m e 14 m em escalões de 2 m. Os valores de altura nominal adotados foram os obtidos através das médias dos valores registados em 3 sondas localizadas à cota -20 m (ZHL).

## Resultados Discussão e Conclusões

A Figura 27 ilustra o aspecto do talude exterior no final de um ensaio com nível de maré de +4.0 m (ZHL) e  $T_p=12$  s.

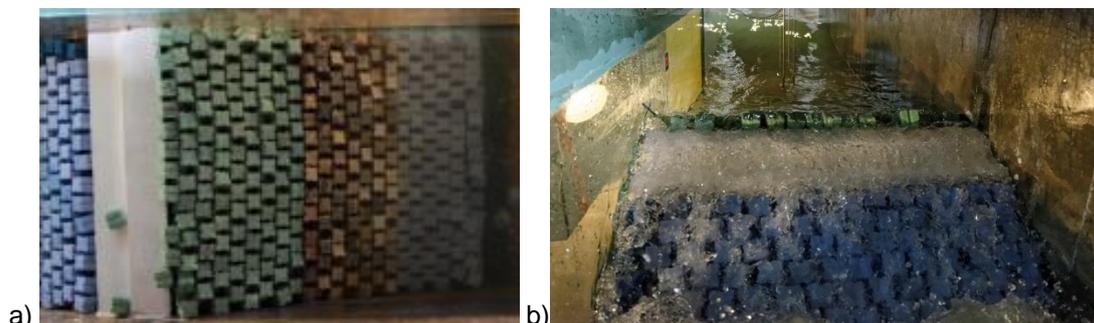


Figura 27 – a) Aspecto do talude exterior no final do ensaio com nível de maré de +4.0 m (ZHL) e  $T_p=12$  s; b) Aspecto de um galgamento com nível de maré de +4.0 m (ZHL) e  $T_p=20$  s

Os resultados obtidos nos ensaios (movimentos e quedas de blocos) permitiram concluir que, embora o comportamento da solução concebida tenha sido bom, para ambos os níveis de maré e para todas as condições de ensaio ocorreu, com maior ou menor visibilidade, um assentamento dos blocos do manto, em parte devido a alguma ineficácia no apoio do manto resistente por parte das duas fiadas de cubos que constituem o pé do talude.

Também a primeira fiada de cubos, adjacente ao coroamento, demonstrou carecer de maior apoio, tendo sido recomendado que ficasse completamente apoiada no muro-cortina. Pretende-se, deste modo, evitar a possível projeção de blocos para o intradorso da estrutura.

No que diz respeito à estabilidade do manto interior, os resultados obtidos nos ensaios permitiram concluir que a solução concebida se revelou bastante estável, manifestando, no entanto, alguma propensão para a ocorrência do escorregamento dos blocos do manto, provavelmente por deficiência no apoio do talude por parte dos blocos constituintes do pé, especialmente para o nível de maré de +4.0 m (ZHL), situação onde o galgamento é mais intenso.

Concluiu-se, assim, que as alterações a introduzir na solução a ensaiar no modelo tridimensional de estabilidade e galgamentos, passariam por aumentar o peso dos blocos do pé do talude exterior de 550 kN para 645 kN (tipologia de blocos a utilizar na cabeça) bem como aumentar 1 m a cota do muro-cortina de modo a promover o apoio dos blocos da primeira fiada do coroamento.

### **4.3. Ensaio de Estabilidade e Galgamentos em Tanque**

#### Objetivos, solução a ensaiar e metodologia

O objetivo dos ensaios em modelo físico tridimensional foi a otimização do comportamento hidráulico do prolongamento do quebra-mar quando sujeito à obliquidade da agitação proveniente de diferentes direções. Esta componente do estudo é descrita em detalhe em Lemos et al. (2017b), sendo nesta comunicação apresentado apenas um resumo.

O perfil do tronco foi em tudo semelhante ao ensaiado no modelo bidimensional, tendo apenas sido implementadas as melhorias determinadas por esses ensaios. Assim sendo, o muro cortina passou a estar à cota +13.0 m (ZHL) e o pé do talude exterior passou a ser constituído por blocos de alta densidade ( $3200 \text{ kN/m}^3$ ) com 645 kN, mantendo, assim, a mesma geometria dos blocos menos densos. A Figura 28 ilustra os cortes transversais do perfil do tronco e da cabeça da solução a ensaiar.

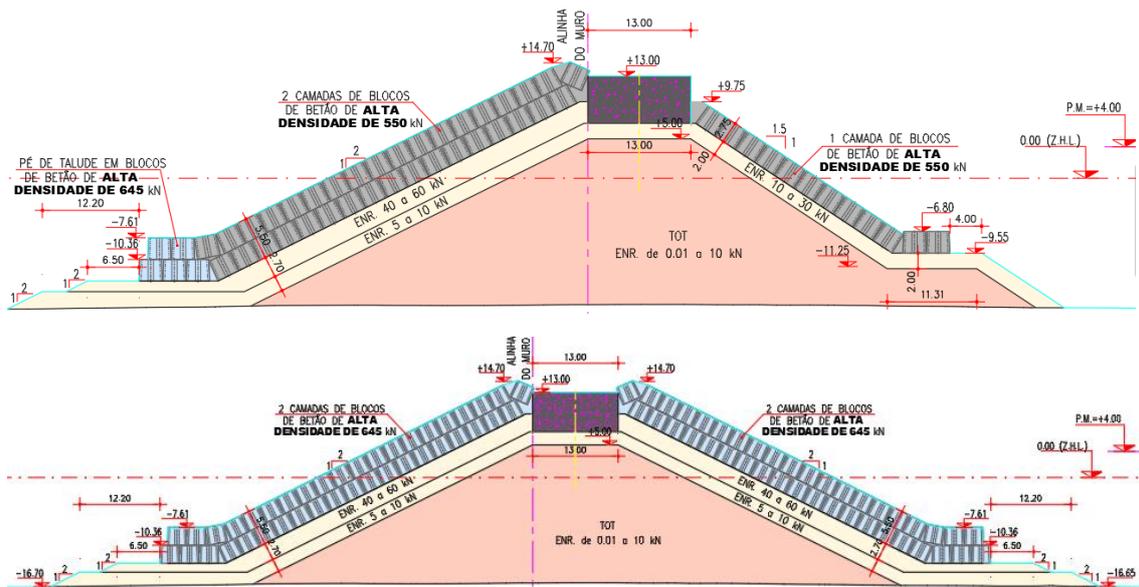


Figura 28 – Corte transversal do perfil do tronco (em cima) e da cabeça (em baixo)

As principais etapas do estudo foram: construção dos fundos do modelo; realização de uma série de calibrações, com o objetivo de ajustar convenientemente a configuração do espectro de agitação marítima a utilizar nos ensaios sobre a plataforma situada à cota -20.0 m (ZH); implantação do modelo da estrutura a ensaiar; realização dos ensaios de estabilidade e galgamentos; análise de resultados.

#### Modelo físico

A construção e a exploração do modelo físico foram feitas de acordo com a lei de semelhança de Froude, tendo sido utilizada a escala geométrica de 1:63, Figura 29.



Figura 29 – Tanque de ondas (em cima). Aspeto do modelo após construção (em baixo)

Os ensaios foram realizados considerando os rumos de agitação, provenientes de SW e W, dois níveis de maré correspondentes a Baixa-mar e Preia-mar associados cada um aos períodos de pico de 12 s e de 20 s. Foram ensaiadas alturas significativas crescentes entre 5.5 m e 12 m.

#### Resultados Discussão e Conclusões

O modelo tridimensional de estabilidade e galgamentos encontra-se, à data desta publicação, ainda em fase de exploração. A Figura 30 ilustra o modelo no final de um ensaio com nível de maré de Preia-mar e  $T_p=20$  s. Através dos ensaios até agora realizados, prevê-se que sejam necessários alguns ajustes no dimensionamento da berma do pé do talude do setor interior da cabeça, bem como da zona de transição da obra existente com o prolongamento a construir.

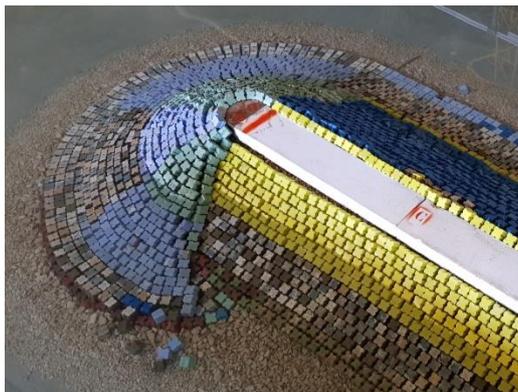


Figura 30 – Aspeto do modelo no final de um ensaio com nível de maré de Preia-mar e  $T_p=20$  s

#### **4. CONCLUSÕES**

Neste trabalho procurou-se, mediante estudos específicos de modelação numérica e física, otimizar a geometria do prolongamento do quebra-mar exterior e aprofundamento do canal e bacia de rotação do Porto de Leixões e avaliar o modo como esse prolongamento se vai refletir nas condições de agitação da vizinha praia de Matosinhos, assim como na dinâmica sedimentar próximo do porto.

Aspeto essencial para desenvolvimento dos estudos numéricos e físicos é a caracterização da agitação marítima quer ao largo, quer local. Assim, para esses locais foram obtidos regimes de agitação marítima, nomeadamente os regimes gerais observados, as séries temporais e estatísticas descritivas dos parâmetros de onda mais relevantes, assim como regimes médios e regimes da média dos máximos mensais desses mesmos parâmetros, entre outros.

Os resultados dos estudos em modelo numérico permitiram concluir que o prolongamento do molhe conduz a um maior abrigo no canal de navegação em termos de agitação marítima, a uma atenuação, em termos de amplificação das alturas de onda e de velocidades, das possíveis ocorrências de ressonância no interior do porto e a uma redução generalizada das alturas de onda na praia de Matosinhos.

Uma análise aos regimes obtidos em diversos pontos do domínio estudado permite concluir que o número de dias de inoperacionalidade do canal de navegação diminui, em todas as configurações, com maior significância no caso do maior comprimento do prolongamento (300m) e ângulo de abertura de  $0^\circ$ . Por outro lado, na praia de Matosinhos, o regime geral caracteriza-se por uma diminuição das alturas de onda e conseqüente aproximação das linhas de rebentação da fronteira da praia, principalmente na metade norte da praia e para direções de onda de WNW, W e SW. No que respeitam as condições de agitação na praia de Matosinhos não existem diferenças significativas entre as configurações estudadas.

Recomenda-se uma análise mais aprofundada da ressonância da bacia portuária, baseada em dados históricos concretos de ondas longas, registados nas imediações do porto de Leixões.

Foram aplicados vários modelos numéricos para simular a hidrodinâmica e a dinâmica sedimentar no Porto de Leixões e na sua envolvente. A análise dos resultados juntamente com os dados de campo permitiu compreender a dinâmica sedimentar da zona de estudo e perspetivar as alterações que resultarão do prolongamento do molhe exterior do porto. Os principais efeitos desta obra serão o aumento da deposição de sedimentos de origem fluvial e o reforço da tendência de rotação da praia de Matosinhos no sentido anti-horário

Os ensaios tridimensionais de agitação revelaram que, em geral, o abrigo concedido pelo prolongamento do quebra-mar exterior no canal de navegação e na bacia portuária é maior para a agitação proveniente de W do que para a agitação de SW. Tal como seria de esperar, verificou-se uma tendência de diminuição dos valores dos índices de agitação à medida que a agitação se propaga para o interior da bacia portuária.

No que diz respeito aos estudos em modelo físico tridimensionais de estabilidade e galgamento, prevê-se que venham a ser necessários alguns ajustes no dimensionamento da berma do pé do talude do setor interior da cabeça, bem como da zona de transição da obra existente com o prolongamento a construir, de modo a otimizar a geometria final das secções do quebra-mar, sendo este um trabalho em curso.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem aos elementos da equipa de ensaios André Ramos, Joana Simão, Jan Hilário, Pedro Guerreiro, Matteo Miglietta e Rosa Emília Soares a colaboração nos ensaios em modelo físico. Agradece-se ao Núcleo de Betões a realização dos cubos Antifer empregues no modelo físico.

### **Referências bibliográficas**

- APDL, 2016 – Pedido de apresentação de proposta. Estudos em modelo físico e numérico do prolongamento do quebra-mar exterior e do novo terminal de contentores do Porto de Leixões, julho.
- BOOIJ, N.; HAAGSMA, I.J.G.; HOLTHUIJSEN, L.H.; KIEFTENBURG, A.T.M.M.; RIS, R.C.; VAN DER WESTHUYSEN, A.J.; ZIJLEMA, M., 2006 – SWAN Technical Documentation, Cycle III, version 40.51. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- CAPITÃO, R.; PINHEIRO, L.; Fortes, C.J.E.M., 2017 - Estudos em modelo físico e numérico do prolongamento do quebra-mar exterior e das acessibilidades marítimas do Porto de Leixões. Estudo I - Regimes de agitação marítima. Relatório 227/2017-DHA/NPE, abril.
- DHI, 2016 – Litpack. Noncohesive Sediment Transport in Currents and Waves. User Guide. Danish Hydraulic Institute, Denmark.
- FLATER D., 1998 – XTIDE: harmonic tide clock and tide predictor. <http://www.flaterco.com/xtide/>
- FORTES, C.J.E.M., 1993 – Modelação matemática da refração e difração combinadas de ondas marítimas (análise pelo método dos elementos finitos). Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, IST, Lisboa, Portugal.
- FORTUNATO, A.B.; FREIRE, P.; OLIVEIRA, F.S.B.F.; AZEVEDO, A.; PINHEIRO, L., 2017 – Impacte do prolongamento do quebra-mar norte do porto de leixões na dinâmica sedimentar, Atas das 9<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, 14 pp.
- GUERIN, T.; BERTIN, X.; DODET, G., 2016a – A numerical scheme for coastal morphodynamic modelling on unstructured grids. *Ocean Modelling*, 104: 45–53.
- IHRH, 2013 – Projeto de criação de um novo terminal para contentores no porto de Leixões. Relatório final, janeiro 2013, Porto.
- LEMONS, R; NEVES, M.G.; FORTES, C.J.E.M., 2017a - Estudos em modelo físico e numérico do prolongamento do quebra-mar exterior e das acessibilidades marítimas do porto de Leixões. Estudo I - Ensaios bidimensionais de estabilidade e

- galgamentos. Relatório 2 – Apresentação de Resultados”. Relatório 226/2017 – DHA/NPE, abril.
- LEMOS, R; NEVES, M.G.; FORTES, C.J.E.M., 2017b - Estudos em modelo físico e numérico do prolongamento do quebra-mar exterior e das acessibilidades marítimas do porto de Leixões. Estudo I - Ensaio tridimensionais de agitação e de estabilidade e galgamentos. Relatório 1 - Construção do modelo físico 3D. Relatório 298/2017 – DHA/NPE, abril.
- NEVES, M.G.; FORTES, C.J.E.M.; LEMOS, R., 2017 - Estudos em modelo físico e numérico do prolongamento do quebra-mar exterior e das acessibilidades marítimas do porto de Leixões. Estudo I – Ensaio tridimensionais de agitação marítima. Relatório 315/2017 – DHA/NPE, abril.
- OLIVEIRA, A.; FORTUNATO, A.B., 2002 – Velapart user’s manual: a quasi-3D particle tracking model for shallow water simulations, Relatório LNEC, 37 pp.
- PINHEIRO, L., SANTOS, J.A., FORTES, C.J.E.M., CAPITÃO, R., 2007 – SOPRO – Pacote integrado de modelos para avaliação dos efeitos das ondas em portos. Revista da Tecnologia da Água, Edição I, março.
- PINHEIRO, L.; FORTES, C.J.E.M.; NEVES, M.G., 2017a - Estudos em modelo físico e numérico do prolongamento do quebra-mar exterior e das acessibilidades marítimas do Porto de Leixões. Estudo I – Estudo de agitação - Propagação de ondas curtas para o interior do porto, com modelo numérico. Relatório 296/2017- DHA/NPE, abril.
- PINHEIRO, L.; FORTES, C.J.E.M.; NEVES, M.G., 2017b - Estudos em modelo físico e numérico do prolongamento do quebra-mar exterior e das acessibilidades marítimas do Porto de Leixões. Estudo I – Estudo de ressonância - Propagação de ondas longas para o interior do porto, com modelo numérico. Relatório 300/2017- DHA/NPE, abril.
- PINHEIRO, L.; FORTES, C.J.E.M.; NEVES, M.G., 2017c - Estudos em modelo físico e numérico do prolongamento do quebra-mar exterior e das acessibilidades marítimas do Porto de Leixões. Estudo II – Avaliação dos impactes do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões nas condições de agitação da praia de Matosinhos. Relatório Final. Relatório 306/2017- DHA/NPE, abril.
- ZHANG, Y.J.; YE F.; STANEV, E.V.; GRASHORN, S., 2016 – Seamless cross-scale modeling with SCHISM. Ocean Modelling, 102: 64-81.