

AGITAÇÃO MARÍTIMA NA ENVOLVENTE DE ESTRUTURAS VERTICAIS POROSAS – APLICAÇÃO A PORTO INGLÊS

Miguel Robert; Sofia Freire
Consulmar mrobert@consulmar.pt ; sofia.freire@consulmar.pt.

Resumo

Nesta comunicação apresentam-se e comparam-se resultados de agitação obtidos nos ensaios em modelo físico reduzido 3D e em simulações numéricas com o modelo MIKE 21 BW, realizados no âmbito do projeto das “Obras de Expansão e Modernização de Porto Inglês, para Cabo Verde.

São brevemente descritos os modelos, testes e simulações realizados, suas limitações e complementaridade, apresentando-se exemplos de comparações dos índices de agitação e da sua extrapolação numérica a outros casos, com foco em cortina de abrigo com aberturas.

1. Enquadramento e objetivos

No âmbito do projeto das “Obras de Expansão e Modernização de Porto Inglês”, na Ilha do Maio (Cabo Verde), foram realizados no LNEC ensaios de estabilidade, galgamento, agitação e pressões, em modelo físico reduzido tridimensional (3D), envolvendo ponte-cais em estacaria, cortina vertical adjacente e berma de proteção, quebra-mar destacado em taludes, duas rampas Ro-Ro e plataforma de acesso em estacaria, proteção marítima de terrapleno.

Para verificar e melhor avaliar os resultados dos ensaios de agitação obtidos em 14 sondas, estender a sua análise pontual a qualquer área portuária, assim como testar outros casos e ajustes estruturais, foram realizadas simulações numéricas de agitação com o módulo Boussinesq do modelo MIKE 21 da DHI, ajustado através da reprodução exata das condições hidráulicas e físicas do modelo reduzido.

2. Ensaios em modelo físico reduzido 3D no LNEC

A descrição do modelo e ensaios é objeto de uma outra Comunicação às Jornadas. O modelo físico foi construído num tanque de ondas com 30,0x19,6 m² e profundidade até 75 cm, equipado com 2 geradores de ondas irregulares móveis, com 6,0 m de comprimento e 1,2 m de altura.

O modelo foi construído e explorado de acordo com a lei de semelhança de Froude a uma escala geométrica de 1/44, reproduzindo todas as obras previstas, sobre fundos até à batimétrica -20 m(ZH) (Figura 1 a). Para registar a elevação da superfície livre, recorreu-se a conjunto de 14 sondas resistivas (SA1 a SA14, Figura 1 b) e duas sondas de controle, próximas de cada gerador de ondas.

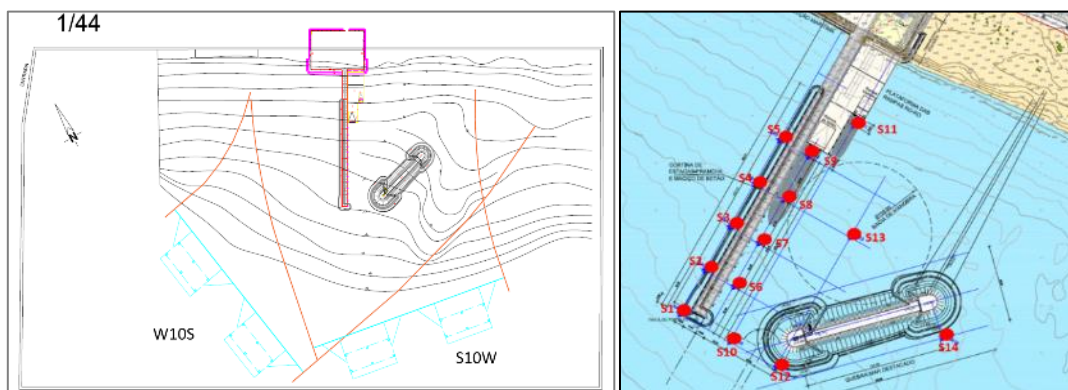


Figura 1. Esquema da implantação do modelo (a) e localização das sondas resistivas (b).

Foram realizados ensaios com três níveis de maré, NM (ZH, +1.6 m ZH, +1.9 m ZH), e um nível adicional a +1.3 m (ZH) (ensaios de pressão), simulando-se ondas irregulares com o espectro de Pierson-Moskowitz-Kitaigorodskii (PMK), associadas a duas direções, W10S e S10W, e quatro períodos de pico, T_p , de 11 s, 14 s, 17 s e 20 s. Associados a cada direção, cada nível de maré e cada valor do período, foram reproduzidos vários valores de altura de onda significativa, H_s , compreendidos entre 1.5 m e 3.0 m, variáveis com a direção.

No final dos ensaios em modelo físico e com base na análise contínua dos resultados, foi testada uma variante na cortina de abrigo vertical, adjacente à Ponte-cais existente, com introdução de aberturas verticais (Figuras 2 e 3), para redução das pressões induzidas nas estruturas e do seu galgamento. Foram introduzidas 15 aberturas com 2m de largura em 3/4 do comprimento da cortina (porosidade média ~10%), mais próximas no trecho mais profundo (porosidade ~20%), afastando-se no trecho intermédio (porosidade ~10%), não havendo aberturas no trecho mais recuado (adjacente à principal zona de acostagem dos navios Ro-Ro).

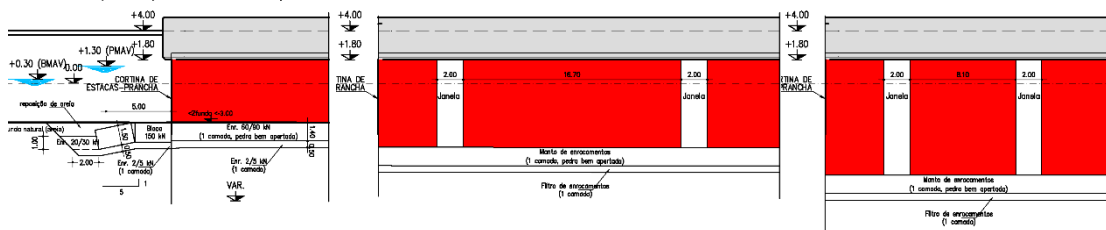


Figura 2. Cortina de abrigo da Ponte-cais com aberturas de 2m de largura, para Ensaio no modelo Reduzido (3 Secções do Alçado Oeste, ordenadas de terra para o mar).



Figura 3. Cortina de abrigo da Ponte-cais com 15 aberturas, em modelo Reduzido.

3. Simulações numéricas com o modelo MIKE21-BW

3.1 O modelo, domínio, malhas e áreas representativas

O modelo MIKE21 BW do DHI aplica as equações de Boussinesq modificadas (DHI, 2014), por forma a simular no domínio do tempo a propagação de ondas de superfície de amplitude finita, em domínio bidimensional sobre batimetria complexa, apresentando declives suaves, desde condições de águas profundas até águas pouco profundas. As equações de Boussinesq correspondem às equações do movimento e da continuidade do volume, numa formulação bidimensional no plano horizontal. Nas equações do movimento são retidos os termos não lineares e termos de terceira ordem.

Simula a propagação da agitação marítima, incluindo os processos de empolamento, refração, difração, reflexão parcial, transmissão e rebentação, assim como a dissipação por atrito no fundo, interações não lineares entre ondas, dispersão na frequência e dispersão direccional. O modelo simula a sobrelevação da superfície livre e as componentes da velocidade do escoamento integradas na vertical, num domínio bidimensional (2D). Com base nos valores da sobrelevação da superfície livre ao longo do período de simulação, determina a altura significativa (H_{m0}) e o índice de agitação, que corresponde a uma altura significativa normalizada pela altura especificada como condição de fronteira ou num ponto da malha.

Tendo em conta a evolução dos resultados obtidos no modelo físico reduzido e a particularidade das suas estruturas, foi necessário recorrer a malhas distintas do modelo numérico:

- Numa primeira fase, foi utilizada a base do modelo numérico já montado e desenvolvido no pré-dimensionamento e estudo de operacionalidade inicial da obra e que apresentava um domínio de 3250mx2100m até profundidades de 80 m, com malha regular de células de 5m x 5m. Para efeitos de comparação com o modelo físico, a malha foi simplificada, limitando-se as profundidades aos 20 metros e introduzindo-se guias semelhantes às consideradas no modelo físico.

As comparações realizadas permitiram “calibrar” os principais parâmetros do modelo, em particular a porosidade, e abrangeram a configuração de projeto com cortina de abrigo, sem e com aberturas verticais (esta implicando simplificações adicionais).

- Numa segunda fase, dadas as limitações da malha anterior (5m x 5m), face às dimensões das aberturas na cortina (2m), construiu-se um novo modelo, perfeitamente encaixado no primeiro, com malha regular extremamente fina (3,9 milhões de células de 0,5mx0,5m), que permitiu melhorar a reprodução das aberturas na cortina, assim como introduzir individualmente todas as estacas de fundação da ponte-cais e das plataformas das rampas Ro-Ro, no limite das possibilidades computacionais do MIKE21-BW.

Este modelo permitiu afinar as comparações com o modelo físico e estimar novos casos de ondas (por exemplo, direções), assim como variações nas configurações estruturais (por exemplo, aberturas e porosidade média na cortina).

Na Figura 4 apresentam-se os domínios de modelo construídos. Delimitado a preto, encontra-se a área do tanque utilizado nos ensaios em modelo reduzido, tal como a localização dos batedores e respetivas guias. As linhas a amarelo correspondem às linhas de geração interna da condição de onda simulada no modelo numérico inicial (malha 5m x 5m). Os contornos a vermelho correspondem aos domínios considerados no modelo numérico fino (0.5 mx0.5 m).

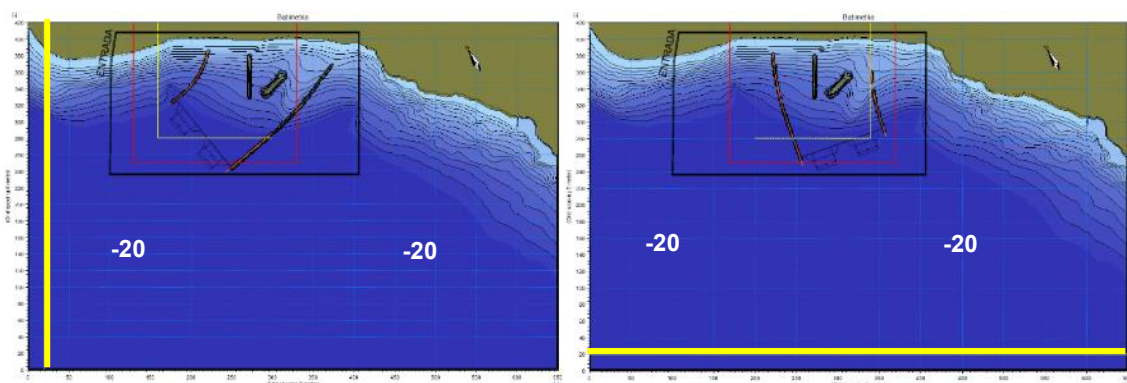


Figura 4. Domínios de cálculo (preto – modelo físico, vermelho – modelo 0,5mx0,5m, amarelo – modelo 5mx5m) e batimetrias dos modelos, para as simulações de rumo W10S (a) e S10W (b)

Com base nos índices de agitação registados nas sondas dos ensaios em modelo físico, foram comparados os resultados obtidos pelo modelo matemático e iterativamente ajustados os seus coeficientes de porosidade. Na Figura 5 apresenta-se a identificação do conjunto de células de cálculo selecionadas para comparação com os resultados das sondas. Para atender à variabilidade inter-célula, foram considerados quadrados de 9 células ($15\text{m} \times 15\text{m} = 225\text{m}^2$), no modelo de malha 5m x 5m, e polígonos de cerca de 72 células ($4.5\text{m} \times 4.0\text{m} = 18\text{m}^2$), no modelo de malha 0.5m x 0,5m, aproximadamente centrados em cada posição de sonda.

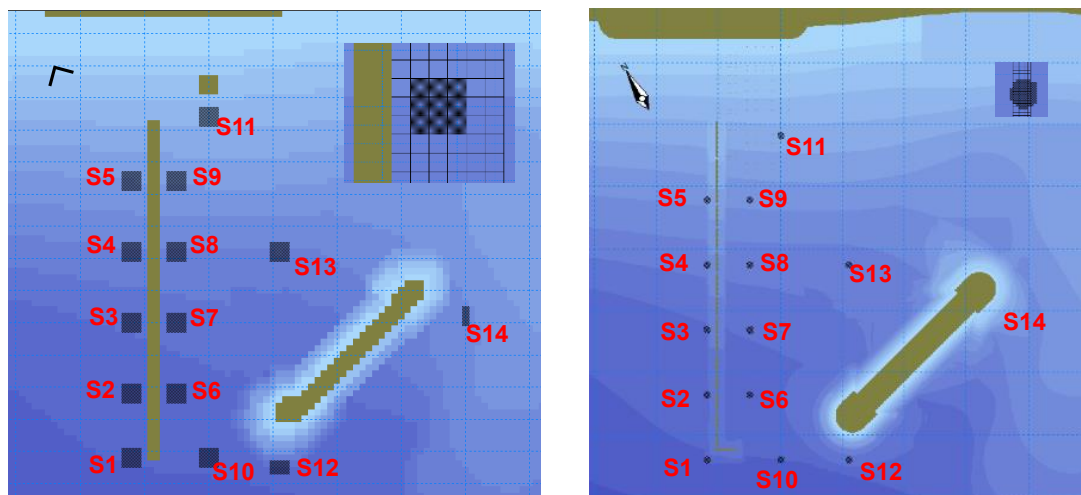


Figura 5. Localização de áreas de modelo numérico representativas das posições das sondas do modelo físico: modelo 5m x 5m (esq.), modelo 0,5m x 0,5m (dir.)

3.2. Porosidade

A fronteira de “terra” foi definida como refletora ou transmissora (total ou parcial) através da constituição de camadas de porosidade variável e ajustável. Para definição dos valores e “espessura” a atribuir às camadas de porosidade foram previamente estimados os coeficientes de reflexão e transmissão associados a cada tipo de estrutura e condição a simular (Tabela 1)

Tabela 1. Intervalos das estimativas dos coeficientes de reflexão e porosidade.

Estrutura	Principais características	Intervalo Cr (-)	Intervalo Cp (-)
Ponte-Cais (estacas)	Tabuleiro com 1.2 m esp. entre as cotas +2,8 e +4,0 m ZH, Estacas com 0,9 m de diâmetro e encabeçamentos de 1,9x2,0 m	0.35-0.70	0.54-0.82
Cortina vertical (estacas-prancha)	Config. 1 - 13 aberturas largas Config. 2 e 3 - 13 aberturas de 1 ou 2m	0.90	0.99
Proteção marítima do terraplano	Enr. 30 a 60kN (3/2)	0.55-0.58	0.71-0.84
Rampa RO-RO maior	Laje com 0.6 m esp. entre as cotas +1,60 m ZH e +4.40, incluindo dois degraus, Viga de topo (0,7x2,2), entre as cotas -0.60 e +1,60 m ZH	0.72-0.90	0.96-0.99
Rampa RO-RO menor	Laje com 0.6 m esp. entre as cotas +1,97 m ZH e +3.55, incluindo dois degraus, Viga de topo (0,7x2,2), entre as cotas -0.23 e +1,97 m ZH	0.66-0.94	0.95-0.99
Quebra-mar destacado	Cabeça S e N (Accropodes II 6m ³ - 4/3)	0.67-0.98	0.33-0.66/0.71
	Tronco (Enr. 30/60 e 60/90 kN – 3/2)	0.59-0.60	0.62-0.77



Os principais efeitos da porosidade são introduzidos pela adição nas equações de Boussinesq de termos relativos às perdas de energia através de estruturas porosas devido ao escoamento turbulento e laminar. Baseiam-se sobretudo na definição de resistência ao escoamento de Madsen e Warren, 1984 e Madsen 1983, que incluem os coeficientes empíricos de resistência para partículas laminares e turbulentas recomendados por Engelund, 1953.

Em rigor, os valores da porosidade apenas podem ser obtidos por um processo iterativo, uma vez dependerem da onda incidente e sua reflexão, tal como das características da estrutura, do nível de maré e das profundidades locais. Este parâmetro foi usado na “calibração” do modelo.

3.3. Modelo de malha 5m x 5m

Para maximizar o ajuste ou “calibração” dos parâmetros do modelo numérico de malha 5m x 5m, procedeu-se à sua adaptação, procurando reproduzir o melhor possível as condições físicas e hidráulicas efetivamente ensaiadas no modelo físico reduzido, nomeadamente através de:

- Criação de batimetria simplificada, igual à do modelo físico e limitada à batimétrica dos 20 m (cota dos batedores do modelo físico), independentemente da fronteira de geração;
- Introdução de estruturas verticais, idênticas às guias do modelo físico;
- Manutenção de fronteira de geração extensa e afastada (assim se assegurando condições uniformes de ondas nos locais homólogos dos batedores do modelo físico);
- Geração de condições de onda unidirecionais (como no modelo físico), com o mesmo espectro empírico de frequências, período de pico e altura significativa.

Nesta fase, foram comparadas as seguintes condições de agitação ensaiadas em modelo físico.

Tabela 2. Condições de agitação incidente simuladas no modelo numérico 5m x 5m

Tipo de onda	Rumo	Nível de maré	Hs (m)	Tp (s)
Espectro Pierson-Moskowitz-Kitaigorodskii (PMK),	W10S	ZH e 1,6mZH	1,5 e 2,0	14, 17 e 20
	S10W	ZH e 1,6mZH	2,0 e 2,5	11, 14 e 17

Para além da solução de projeto inicial (que incluía uma cortina de abrigo vertical, situada a Oeste da Ponte-cais existente), foi também “reproduzida” uma alternativa na configuração da cortina de abrigo, incluindo aberturas verticais, assumindo todas as limitações inerentes (desde logo o facto das células do modelo terem dimensão superior à da abertura, mas também por ser um modelo bidimensional, não permitindo distinguir a variação das estruturas na vertical, por exemplo o efeito da viga de coroamento da cortina de abrigo). Para o efeito, num processo de tentativa e erro, foi necessário distribuir 13 aberturas com dimensões entre 5 e 15m, com células dotadas de coeficientes de porosidade especial (que se fizeram variar), para se obter níveis de energia semelhantes aos do modelo físico, quer para um quer para outro lado da Ponte-cais.

Apresentam-se na Figura 6 alguns dos resultados obtidos para os rumos W10S e S10W, o primeiro rumo para a configuração de projeto (MF – Modelo Físico e MM – Modelo matemático) e para a configuração de cortina com janelas (MFJ e MMJ), o segundo apenas para a configuração de cortina fechada. Apesar dos pontos representados serem discretos, optou-se por unir os seus resultados com linhas, de forma a simplificar a visualização dos resultados e a permitir uma mais rápida leitura de tendências e da sua concordância ou não concordância.

Os resultados obtidos com o modelo matemático aproximam-se dos registos obtidos no modelo físico principalmente na zona exterior da cortina (sondas 1 a 5) e na zona junto às rampas e interior da bacia (sondas 9, 11 e 12), apresentando o modelo numérico sempre valores ligeiramente superiores aos do modelo físico. Nas zonas das sondas 6 a 8, o modelo numérico não consegue reproduzir tão bem os resultados obtidos no modelo físico.

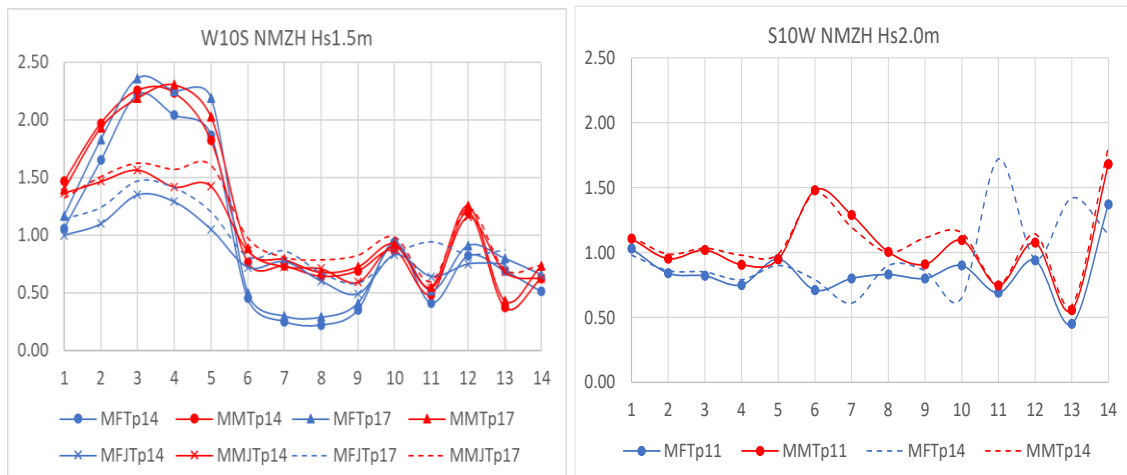


Figura 6. Resultados do índice de agitação (MF – modelo físico; MM – modelo matemático, j – com janelas), na posição das sondas, para a) rumo W10S, Hs=1.5 m e Tp =14 e 17 s, b) rumo S10W, Hs=2.0 m e Tp de 11 e 14 s

3.4. Modelo de malha 0.5m x 0.5m

Neste modelo foi possível reproduzir todas as aberturas da cortina de abrigo, tal como ensaiadas em modelo físico reduzido, assim como todas as estacas da Ponte-cais existente e da plataforma de acesso às rampas Ro-Ro, simplificadas como quadrados de 0,5m de lado. Permiteu ainda testar variações na configuração das aberturas (largura e distribuição). As simulações apresentadas abrangem as seguintes configurações:

- Configuração 0 - solução de projeto original, com cortina de abrigo contínua.
- Configuração 2 – solução de cortina de abrigo com aberturas verticais (13 aberturas de 1 m de largura), correspondentes a uma porosidade de 5% (J1);
- Configuração 3 - solução de cortina de abrigo com aberturas verticais (13 aberturas de 2 m de largura), correspondentes a uma porosidade de 10% (J2).

A Figura 7 mostra o domínio de cálculo deste modelo, abrangendo área semelhante à reproduzida em modelo físico, com dimensões de 1150 m por 850 m, até profundidades de 20 m.

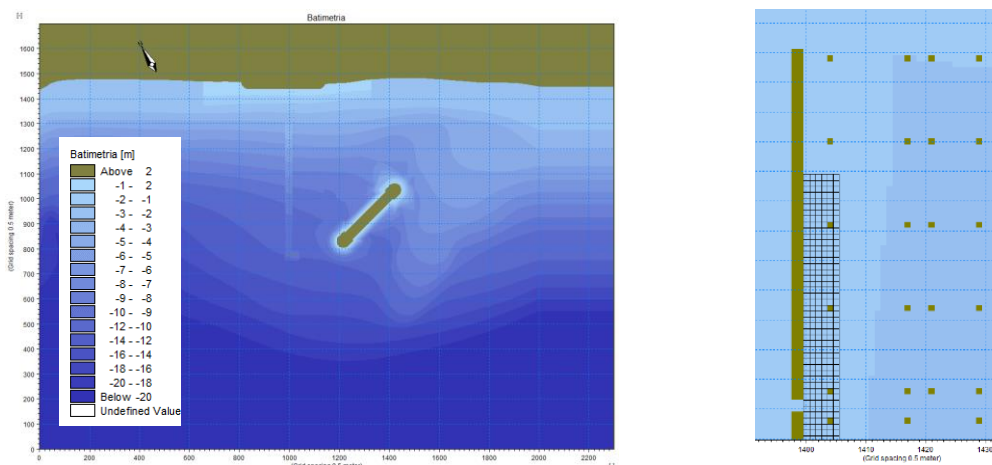


Figura 7. Exemplo do domínio de cálculo e batimetria utilizados (incluindo pormenor da malha)



Salienta-se que não foram reproduzidas as guias laterais do modelo físico, por forma a aproximar mais também a situação real e condições de projeto. A definição da camada de esponja teve de ser composta por pelo menos 300 linhas, devido à pequena dimensão das células e à necessidade de garantir a circunscrição da propagação das ondas à área do domínio. As condições de porosidade foram as indicadas atrás (Tabela 1), com pequenos ajustes.

As condições impostas na fronteira aberta foram de agitação incidente irregular, com espectro empírico tipo Pierson-Moskowitz-Kitaigorodskii (PMK), unidirecional, em plataforma à -20 m(ZH).

A duração das simulações foi a mínima necessária para a estabilização da condição simulada, com um passo temporal de 0,025 s (n° de Courant=0.84), o que resultou em aproximadamente 5 horas de simulação por condição. Por limitações computacionais e de tempo associados à estabilização do modelo, optou-se por simular alturas de onda até 1m. Na Tabela 3 listam-se as condições de agitação simuladas.

Tabela 3. Condições de agitação simuladas no modelo numérico de malha 0,5m x 0,5m.

Configurações	Rumo	Nível de maré	Hs (m)	Tp (s)
0 e 2	W10S	ZH e 1,6mZH	0,5 e 1,0	11, 14, 17 e 20
0 e 2	S10W	ZH e 1,6mZH	0,5 e 1,0	11, 14 e 17
3	W10S	ZH	1,0	14 e 17
3	S10W	ZH	1,0	11 e 14
0, 2 e 3	SW	ZH	1,0	14 e 17
0, 2 e 3	SSW	ZH	1,0	14 e 17
0, 2 e 3	SSE	ZH	1,0	11 e 14

Para além dos resultados obtidos em áreas representativas das posições das sondas, foi igualmente obtida a distribuição espacial dos índices de agitação, para as várias configurações e condições de agitação, conforme representado nas Figuras 8 e 9. O índice de agitação em cada ponto resulta da divisão entre a altura significativa aí obtida e a que foi gerada na fronteira do modelo.

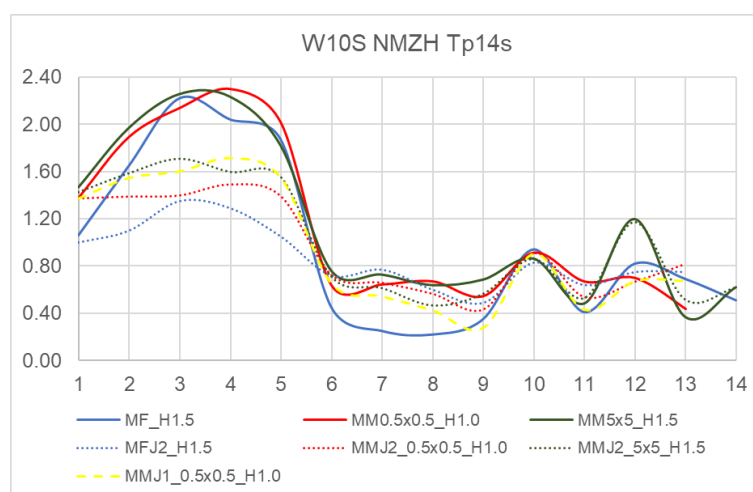
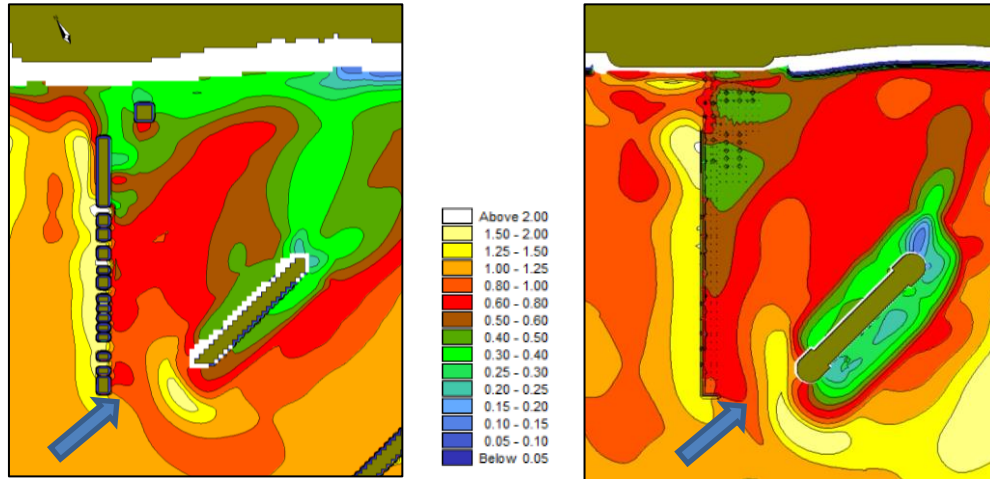


Figura 8. Resultados do índice de agitação para configurações de cortina fechada e com aberturas (J1 – 1m, J2 – 2m), para a condição W10S, Hs=1.0 e 1.5 m e Tp= 14 s

O modelo de malha fina (0.5 mx0.5 m), parece reproduzir melhor, em média, os resultados do modelo físico, para ambas as configurações, mas sobretudo para a configuração com janelas.



Modelo 5 mx5 m (Hs=1,5 m)

Modelo 0.5 mx0.5 m (Hs=1,0)

Figura 9. Distribuição dos índices de agitação para a Configuração 3 (cortina com janelas de 2 m), condição W10S e Tp 14 s

As setas azuis representadas ilustram a direção da onda incidente sobre a batimétrica dos 20 m, sendo que esta ainda sofre alguma refração até atingir a entrada da bacia.

O mapa da distribuição espacial mostra resultados semelhantes para ambos os modelos, com o rumo a incidir enviesado na entrada da bacia, refletindo-se na cabeça Sul do quebra-mar destacado e daí incidindo no tardoz da cortina, a qual, com as aberturas, parece deixar passar mais energia para o lado poente do que o oposto, reduzindo-se, pois, os índices no interior.

Na Figura 10 são apresentados os resultados obtidos para o rumo S10W. No modelo físico, este rumo apenas foi ensaiado para a solução original da cortina de abrigo (configuração 1), fechada, sem qualquer abertura.

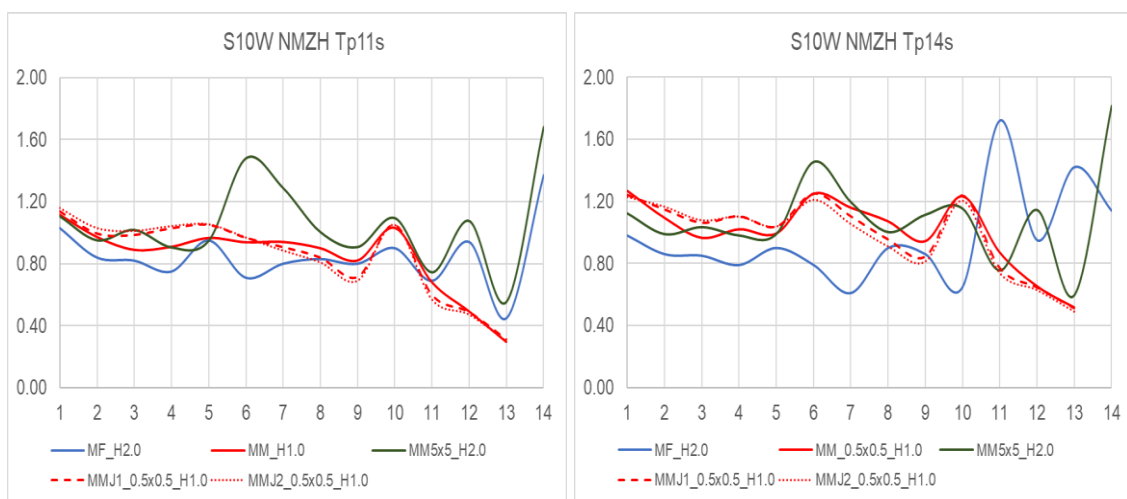
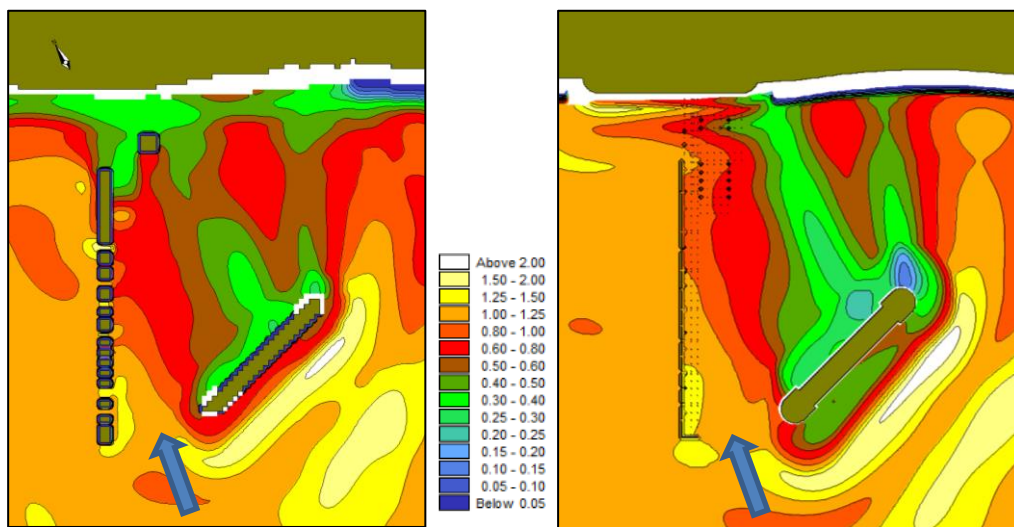


Figura 10. Resultados do índice de agitação para configurações de cortina fechada e com aberturas (J1 – 1m, J2 – 2m), para as condições S10W, Hs = 1 e 2 m e Tp 11 e 14 s

Os resultados apresentados nos gráficos da figura anterior mostram uma melhor concordância do modelo de malha fina com o modelo físico, principalmente para a condição de 11 s. Para este rumo é evidente um menor desfazamento entre os índices estimados para cada lado da cortina, comparativamente ao rumo anterior, já que a onda incide mais orientada com a Ponte-cais, tal como se deduz a partir da linha aproximadamente horizontal que une os valores obtidos. Por essa razão talvez, o efeito das aberturas na cortina para esta condição aparenta não provocar grandes alterações.

Os mapas de distribuição dos índices de agitação apresentados na Figura 11, parecem confirmar as considerações anteriores.



Configuração 3 (cortina com janelas de 2 m)

Modelo 5m x 5m (Hs=2,0 m)

Modelo 0,5m x 0,5m (Hs=1,0)

Figura 11. Distribuição dos índices de agitação para a condição S10W e Tp 14 s

Da análise efetuada pode-se concluir que o modelo numérico de malha fina permite uma melhor aproximação dos resultados obtidos com o modelo físico (e tanto mais quanto mais ajustados forem os parâmetros do modelo, numa perspetiva da sua extrapolação a outras condições), parecendo reproduzir bem as principais tendências de índices de agitação, quer do lado oeste ou leste da cortina.

3.5. Exploração de outras condições de ondas com o modelo numérico de 0.5mx0.5m

No presente capítulo apresentam-se resultados exploratórios, obtidos com o modelo numérico de 0.5 x 0.5 m, com o intuito de analisar toda a área portuária, perante condições adicionais de rumos de ondas e variações na configuração das aberturas na cortina de abrigo, por forma a complementar os ensaios em modelo reduzido e permitir uma tomada de decisão mais suportada sobre a solução de projeto.

Na Figura 12 apresenta-se painel de resultados obtidos, para as três configurações de cortina e para cinco (5) rumos simulados, em termos da distribuição dos índices de agitação, para o exemplo de onda com período de pico de 14 s.

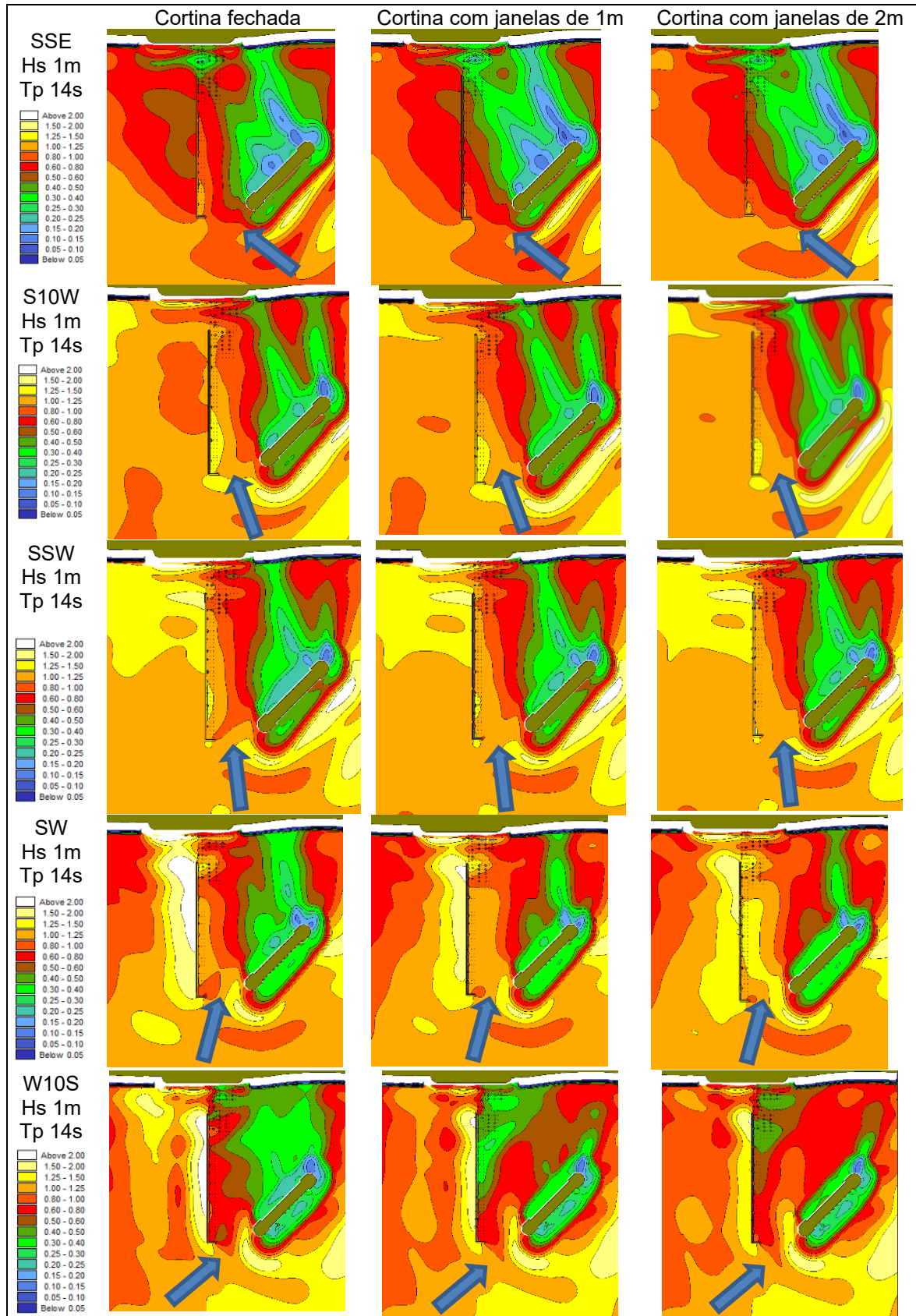


Figura 12. Distribuição de índices de agitação na aproximação a Porto Inglês e suas bacias



Relembra-se que as setas azuis acima representadas ilustram a direção da onda incidente sobre fundos a -20 m(ZH), sendo que esta sofre ainda alguma refração até atingir a entrada da bacia.

Procurou-se resumir na Figura 13 os resultados acima apresentados, em termos dos índices de agitação obtidos nas posições das sondas do modelo físico reduzido, para o mesmo exemplo ($H_s=1m$, $T_p=14s$)

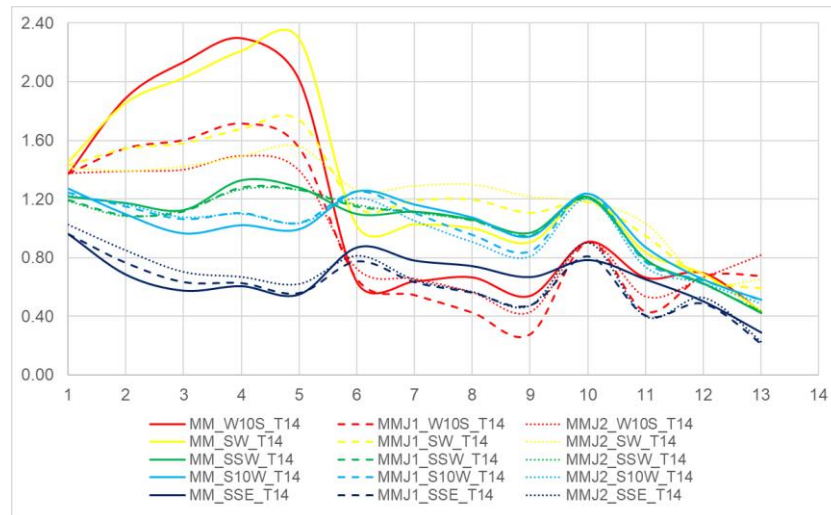


Figura 13. Distribuição dos índices de agitação, para configurações de cortina fechada e com aberturas (J1 – 1m, J2 – 2m), para a condição $H_s=1m$ e $T_p=14s$, e vários rumos

A análise dos resultados anteriores mostra que o rumo SSW é quase que um rumo de charneira, atuando praticamente alinhado com a ponte-cais (depois de se refratar desde a batimétrica -20m.ZH exterior) e por isso sendo mínimas, ou quase nulas, as diferenças entre os seus lados, com cortina fechada ou com aberturas, e tenham estas maior ou menor dimensão.

Nos restantes rumos, à medida que se passa da cortina fechada para com aberturas, verifica-se que:

- Para rumos incidindo por Leste da Ponte-cais, o rumo S10W induz um muito ligeiro melhoramento e agravamento, dos lados leste e oeste, respetivamente, devido ao efeito da passagem de energia através das aberturas (menor reflexão para leste, maior transmissão para oeste). Este efeito é reduzido e mais evidente no trecho mais profundo da ponte-cais (onde a concentração de aberturas é maior). Para SSE as variações são superiores, devido ao maior ângulo que este rumo faz com o alinhamento da ponte-cais e conseqüente maior capacidade de transmissão de energia para o outro lado. Quer para S10W, quer SSE, há maiores diferenças entre a cortina fechada e a abertura de 1m. As diferenças atenuam-se entre 1 e 2 m de abertura;
- Para rumos incidindo por Oeste da Ponte-cais, o SW induz um comportamento simétrico do verificado para os rumos incidindo do outro lado, como seria de esperar, mas exibindo maiores diferenças em ambos os lados. Para o rumo W10S, verifica-se o mesmo comportamento, mas apenas do lado Oeste e no primeiro quarto do lado Leste. Nos restantes 3/4 do lado Leste, os resultados do modelo mostram uma aparente melhoria de cortina fechada para com aberturas de 1 m, e de um agravamento, para aberturas de 2 m (mas melhor que com cortina fechada, contrariando os resultados obtidos no modelo físico). Poderá haver, e de forma apenas parcial, alguma explicação física para estas



particularidades (reflexões na cabeça sul do quebramar destacado e sua maior perpendicularidade ao incidir na ponte-cais por oeste, efeito do “clapotis” sobre a altura medida/calculada etc), mas a principal razão será numérica, decorrente das limitações do modelo e malha usados em reproduzir fenómenos a tão pequena escala, como se pode intuir do comportamento mais “normal” obtido para a abertura maior. A utilização de modelos numéricos complexos, 2D e 3D, permitirá aprofundar este tipo de análises.

4. Conclusões

Nesta comunicação foram apresentados e comparados resultados de agitação obtidos nos ensaios em modelo físico reduzido 3D e em simulações numéricas com o modelo MIKE 21 BW, realizados no âmbito do projeto das “Obras de Expansão e Modernização de Porto Inglês, para Cabo Verde.

Salientam-se as possibilidades e limitações do modelo numérico de agitação 2D utilizado, na reprodução de efeitos de menor escala, assim como a sua complementaridade na verificação de resultados obtidos em modelo físico e expansão a outros casos e configurações, aqui particularizados num conjunto de diversas tipologias de obras, incluindo estruturas verticais porosas (cortinas de estacas-prancha ou tubulões, com e sem aberturas, estacaria, etc).

As comparações realizadas, por vezes mais qualitativas e apesar das suas limitações, foram essenciais para as opções tomadas no projeto final das obras.

Referências Bibliográficas

- DHI Software, 2014. MIKE 21: Waves – Boussinesq Wave Module. Scientific Documentation.
- Engelund, F. 1953. On the laminar and turbulent flows of ground water through homogeneous sand. Transactions of Danish Academy Technical Science, Vol. 3.
- Fortes, C.J.E.M.; Lemos, R.; Neves, M.G.; Silva, L.G.; Pinheiro, L., 2020 - Travaux d'expansion et requalification du Porto Inglês, île de Maio, République du Cap Vert. Etudes sur modele reduit 3D et sur modele numerique. Rapport final: Études sur modèle réduit tridimensionnel. Relatório 018/2021 – DHA/NPE.
- CONSULMAR (2020) - Travaux d'extension et Modernisation du Port Inglês, Île de Maio, Spécification des Essais sur Modèle Physiques Réduit 3D et Simulations sur Modèle Numérique.
- CONSULMAR (2021) – Obras de Expansão e Modernização do Porto Inglês, na Ilha do Maio, Novo Estudo da Operacionalidade do Porto, Nota Técnica.
- Madsen, P. A. and Sorensen, O. R., 1992. A New Form of the Boussinesq Equations with Improved Linear Dispersion Characteristics, Part 2: A Slowly – varying Bathymetry. Coastal Engineering, 18, pp 183-204.
- Madsen, P. A. and Warren, I.R., 1984. Performance of a numerical short-wave model. Coastal Engineering, 8: 73--93,
- Madsen, P. A., 1983. Wave reflection from a Vertical Permeable Wave Absorber. Coastal Engineering, 7, pp 381-396.
- Seelig, W. N. e Ahrens, J. P. (1981). “Estimation of Wave Reflection and Energy Dissipation for Beaches, Revetments and Breakwaters.” CERC, Technical paper 81-1, Fort Belvoir, U.S.A.C.E., Vicksburg, MS.
- Zanuttigh, B., et J. W. Van der Meer (2006), Wave reflection from coastal structure, J M Smith, Proc. 30th Int. Conf. on Coast. Engrg., ASCE, San Diego, California, USA, Vol. 5, pp. 4337–4349. 44, 143, 144, 226