



PRESSÕES INDUZIDAS POR ONDAS EM ESTRUTURAS VERTICAIS E HORIZONTAIS – APLICAÇÃO A PORTO INGLÊS

Miguel Robert; Sofia Freire; Maria Graça Neves
Consulmar mrobert@consulmar.pt; sofia.freire@consulmar.pt; LNEC gneves@lnec.pt

Resumo

A presente comunicação apresenta os resultados de pressões induzidas por ondas extremas sob as lajes de Ponte-cais existente e sobre cortina vertical de abrigo, duas rampas Ro-Ro e plataforma de acesso, recorrendo a modelo físico reduzido 3D e a simulações em modelo numérico RANS VOF 2D, para várias condições de agitação e maré.

São salientadas as potencialidades e limitações de ambos os modelos, sua complementaridade, referindo-se alguns constrangimentos encontrados, assim como opções e simplificações tomadas, com vista à sua minimização e aplicação ao projeto.

1. Enquadramento geral 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, em 2020, ensaios em modelo físico reduzido tridimensional (3D) e simulações numéricas RANS VOF (2D). Os ensaios permitiram verificar a estabilidade e os galgamentos, bem como estudar a agitação, as sobrelevações e as pressões nas estruturas projetadas. As simulações complementaram os resultados dos ensaios, em termos das pressões e galgamentos sobre as estruturas verticais e horizontais.

As pressões induzidas por ondas sobre estruturas complexas, como é o caso (plataformas a distintas cotas, delimitadas por malhas de vigas sobre estacaria, presença de cortina de abrigo vertical), variam muito no espaço e no tempo, de elemento para elemento e ao longo de cada elemento. As pressões máximas são normalmente caracterizadas por picos mais elevados e de curta duração, atuando sobre zonas mais ou menos reduzidas, seguidos, por vezes, por um segundo pico (ou série) de distribuição variável, mas mais uniforme (no espaço e no tempo).

As poucas formulações teóricas existentes são muito específicas e de âmbito limitado, sendo indispensável ao projeto a medição de pressão com sensores em modelo físico reduzido. No entanto, o número de sondas disponível é limitado e registando estas apenas valores “pontuais”, não sendo, pois, rigorosamente aplicáveis à generalidade de cada elemento e a todos os elementos estruturais. Por outro lado, os valores medidos são “médios” na área do sensor, podendo ainda ocorrer efeitos no modelo físico, espúrios e/ou locais (efeitos 3D, emulsão de ar, “respingos”, etc.), que mascarem as leituras registadas ou as tornem menos representativas.

As simulações numéricas permitem uma caracterização contínua, no espaço e no tempo, de todos os elementos de obra e suas frações (dependendo da malha do modelo), para uma maior gama de condições de agitação e maré, pelo que, quando previamente “calibradas” com resultados obtidos em modelo físico, podem constituir um precioso aliado. Estas simulações, porém, exigem potentes recursos computacionais, apresentando limitações numéricas (multiplicação de domínios, exigindo simplificações diversas, etc) e científicas (não representação da emulsão de ar, por exemplo), durando ainda cada teste muito mais tempo do que um teste em modelo físico.

Estas limitações tornaram inviável a consideração de um modelo numérico 3D, substituído então por 4 modelos 2D (4 perfis longitudinais). Para melhorar a representatividade dos resultados globais, foi considerado um elevado número de sensores de pressão em modelo físico (24).

As pressões induzidas pelas ondas sobre estruturas têm efeitos distintos consoante a sua magnitude e duração, podendo distinguir-se dois casos: as variações lentas, do tipo “quase-hidroestático”, e as variações rápidas e de curta duração, do tipo “impulsivo”. Nestas últimas, não é válida a lei de semelhança de escala de Froude, normalmente utilizada em modelo físico, sendo necessária uma correção que lhes pode reduzir substancialmente o valor de pico.

2. Ensaios de pressão em modelo físico reduzido 3D

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 (Figura 1). Esta escala foi selecionada pela CONSULMAR, tendo em conta os blocos disponíveis, a dimensão do tanque, as condições de agitação a ensaiar, assim como a representatividade da interação onda-estrutura (reflexão, dissipação, transmissão e pressões) no modelo, evitando-se efeitos de escala significativos.

As obras (ponte-cais existente, cortina de abrigo e sua proteção, rampas Ro-Ro e plataforma de acesso, proteção frontal do terrapleno, praia e quebra-mar destacado) foram integralmente reproduzidas sobre fundos até à cota -20 m(ZH), recorrendo-se a material acrílico para as estruturas verticais/horizontais (Figura 1).

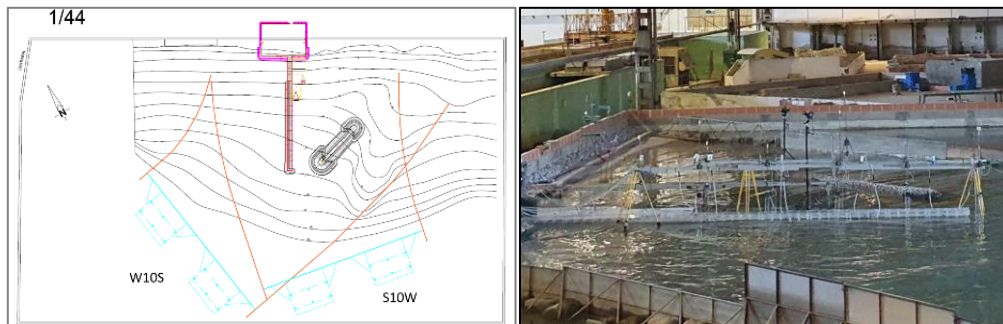


Figura 1. Esquema da implantação do modelo e aspeto do modelo implantado no tanque.

Para registar a elevação da superfície livre, foi colocado um conjunto de 14 sondas resistivas (SA1 a SA14, Figura 2) e duas sondas de controle junto dos geradores de ondas (SA15 e SS16).

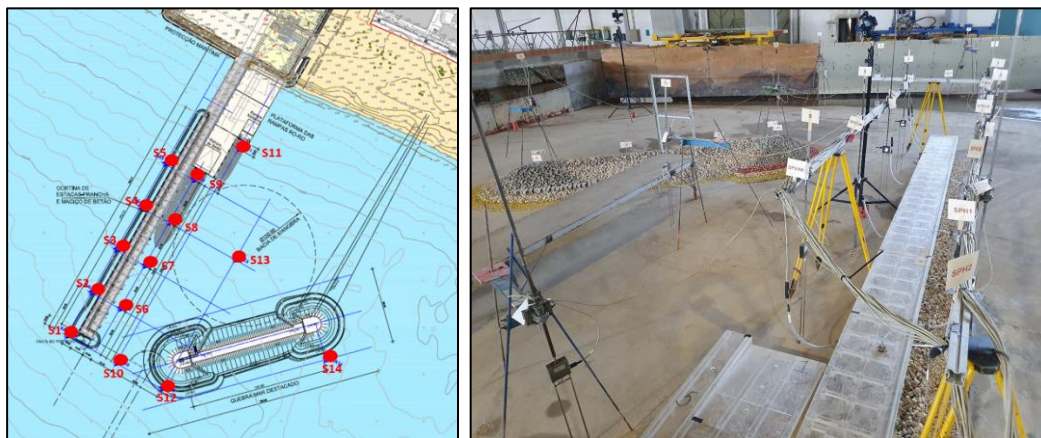


Figura 2. Posicionamento das sondas no tanque.

As pressões foram medidas por sensores da *Honeywell* (modelo ABH015PGC1B3), com sinal não amplificado e compensação de temperatura, variável de saída entre 0 e 100 mV (± 1 mV) e tempo de resposta inferior a 0,5 ms. A precisão da medição foi inferior a 0,1 m de coluna de água

no protótipo. A Figura 3 ilustra a localização dos 24 sensores de pressão nas estruturas. Todos os sensores de pressão foram calibrados tendo em conta a relação entre a pressão que solicita o sensor (expressa em metros de coluna de água) e a voltagem medida. Os ensaios foram fotografados e filmados, recorrendo a 4 câmaras fixas.

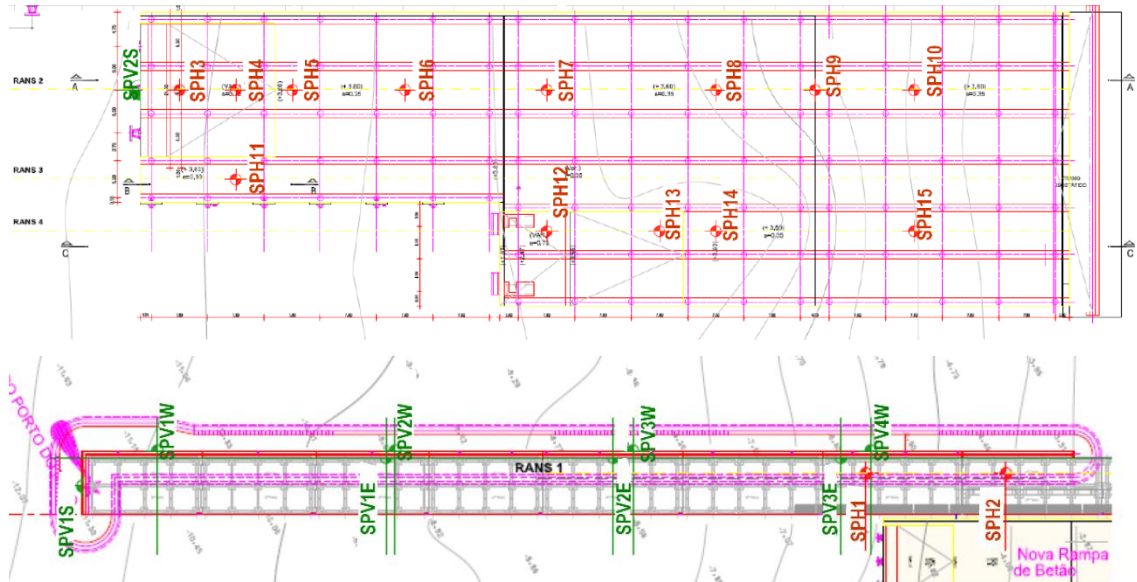


Figura 3. Esquemas do posicionamento dos sensores de pressão no modelo.

Os sensores foram conectados, por meio de tubo flexível, a tomadas de pressão, sendo o seu comprimento reduzido ao mínimo, para não introduzir amortecimento excessivo nas flutuações do sinal. De forma a evitar interferência entre sinais medidos nos sensores, evitou-se sempre que possível a colocação de dois sensores muito próximos.

Foram realizados ensaios para a situação atual e para as soluções inicial e melhorada, esta com cortina de abrigo sem e com aberturas. Simulou-se agitação incidente irregular, com espectro empírico de Pierson-Moskowitz-Kitaigorodskii (PMK) associado a duas direções de agitação incidente na batimétrica -20 m(ZH), W10S e S10W, diferentes períodos de pico, T_p , alturas significativas, H_s e níveis de maré. A duração dos ensaios foi a necessária para a reprodução fiel dos fenómenos ensaiados, variável de acordo com o período da agitação. Na Tabela 1 apresentam-se as condições hidráulicas simuladas.

Tabela 1. Condições de agitação incidente simuladas no modelo físico.

Configuração de obras	Direção	Nível de maré (m)ZH	T_p (s)	H_s (m)
Solução inicial e Melhorada, com Cortina opaca	S10W	1.30	11, 14, 17	2.0, 2.5, 3.0
		1.60	11, 14, 17	1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0
		1.90	14, 17	2.5, 3.0
Solução Melhorada, com Cortina com aberturas e Situação atual	W10S	1.90	14, 17, 20	1.5, 2.0, 2.5
		0.0	14, 17, 20	1.5, 2.0
		1.6	14, 17, 20	1.5, 2.0

Para obter as pressões dinâmicas, os valores medidos foram subtraídos da pressão no início do ensaio, ou seja, sem a presença de agitação (pressão hidrostática). Considerando a lei de semelhança de Froude, os valores das pressões foram expressos em metros de coluna de água (mca). A taxa de aquisição de dados dos sensores foi de 128 Hz (~0,05 s no protótipo, lei de Froude). Os registos de pressão foram objeto de uma análise pelo método do zero ascendente.

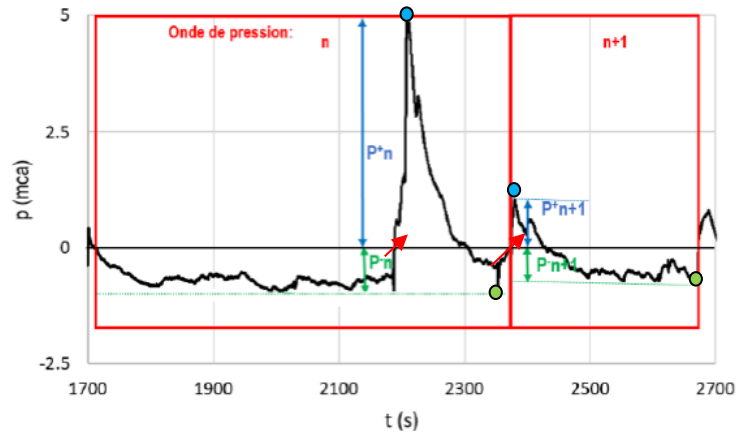


Figura 4. Diagrama da análise do zero ascendente (ver setas) utilizada.

Os valores obtidos foram ordenados e expressos em termos das seguintes estatísticas iniciais:

- Pressões positivas (p^+n), média (p^+med), média de 1/3 e 1/10 dos maiores valores positivos ($p^{+1/3}$ e $p^{+1/10}$, respetivamente) e máxima (p^+max);
- Pressões negativas (p^-n), mínima (p^-min);

Entretanto, a análise minuciosa dos registos das séries temporais de valores individuais de pressões em todos os captadores e para todas as condições de ondas e maré ensaiadas (Consulmar, 2020, LNEC 2021), permitiu detetar, identificar e corrigir diversas anomalias nos resultados (ver Cap. 4), entre as quais a consideração das seguintes estatísticas, em termos de Amplitudes de Pressões ($P = \Delta p = p^+n + |p^-n|$):

- Amplitudes de Pressões, média ($Pmed$), média de 1/3 e 1/10 das maiores amplitudes ($P_{1/3}$ e $P_{1/10}$, respetivamente) e máxima ($Pmax$).

Foi ainda considerado o número de “ondas de pressão” (passagem consecutiva entre dois zeros ascendentes) em cada série de registos, uma vez que alguns parâmetros, como $P_{1/10}$, por exemplo, podem corresponder a eventos impulsivos e, na presença de apenas algumas ondas impulsivas, pode não haver “ondas” suficientes para definir alguns desses parâmetros.

Salienta-se que todos os valores de pressão foram expressos em termos de metros de coluna de água no protótipo, de acordo com a lei de semelhança de Froude, sendo necessária a sua correção, no caso de pressões de natureza impulsiva (ver Cap. 4). Os resultados dos ensaios de pressão variaram muito, como esperado, com as condições de agitação e maré, com a solução/configuração testada e de elemento para elemento, conforme referido no capítulo 4.

3. Simulações numéricas com modelo do tipo RANS VOF 2D

As pressões hidrodinâmicas induzidas por ondas em estruturas complexas variam consideravelmente no espaço e no tempo. Assim, para complementar a análise das pressões nas estruturas obtidas em modelo físico reduzido, que consistem em valores de pressão pontuais medidos com sensores, utilizou-se o modelo numérico IH2VOF (<https://ih2vof.ihcantabria.com>), um modelo bidimensional (2DV) que resolve as equações RANS em meios fluidos e porosos.

O semi-confinamento que a cortina de abrigo da ponte-cais proporciona à bacia a leste faz com que a propagação das ondas desde a entrada do Porto possa ser razoavelmente aproximada por um modelo numérico 2D (tipo canal), sobretudo para o rumo S10W testado no modelo físico, considerando o conceito de “onda significativa ao largo equivalente” (H_{so}'), para calibrar a altura a gerar no modelo numérico com a medida no modelo físico (Consumar, 2020, 2021):

$$H_{so}'(d) = \prod_{i=1}^n K_i(d) \cdot H_{so} \quad e \quad H_s(d) = K_s(d) \cdot H_{so}'(d)$$

sendo $k_i(d)$ os coeficientes de refração, difração, etc, com exceção do empolamento/rebentação, $k_s(d)$, até à profundidade d .

Este modelo permitiu obter valores da pressão dinâmica induzida pelas ondas ao longo dos seguintes perfis longitudinais, representativos das estruturas estudadas (Figura 5), indicando-se igualmente os sensores (S) do modelo físico utilizados para a calibração da agitação:

- RANS1 (S8): representativo dos últimos cinco módulos da ponte-cais;
- RANS2 (S9): rampa Ro-Ro maior e plataforma de acesso;
- RANS3 (S9): cais da rama RoRo menor e plataforma de acesso;
- RANS4 (S11): rampa Ro-Ro menor e plataforma de acesso.

Durante as simulações, observou-se, por vezes, quando as estruturas eram galgadas por pequena lâmina de água, que o passo de cálculo do modelo se reduzia acentuadamente, aumentando em muito o tempo de cálculo total. Percebendo que tal decorria de uma multiplicação de domínios, recorreu-se ao artifício de introduzir uma pequena parede vertical no topo da estrutura, impedindo que a água resultante do galgamento ultrapassasse uma determinada posição, reduzindo a área de análise no topo da estrutura (ver Figura 5). Para a seção RANS1, como é simulado apenas uma parte da ponte-cais mais próxima da costa, sendo o galgamento fictício, colocou-se uma parede na zona frontal da estrutura simulada. Para as seções RANS 2 a 4, interessando medir o galgamento e as pressões sobre as lajes, a parede foi posicionada mais à frente e, como tal, os resultados foram analisados apenas até esta zona.

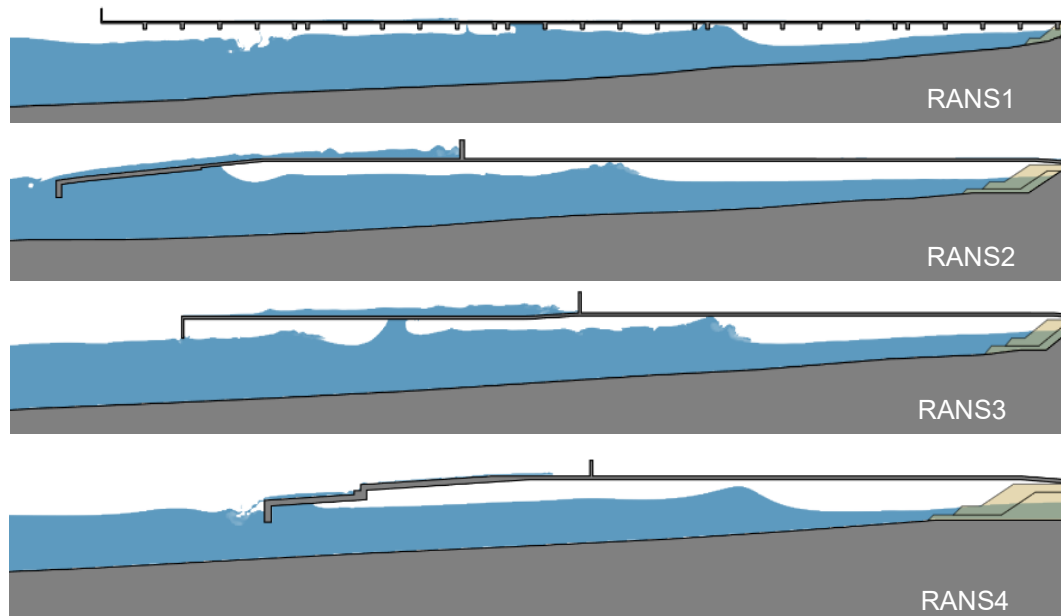


Figura 5. Aspeto da modelação numérica das secções RANS 1 a RANS 4.

As estruturas reproduzidas no modelo numérico incluem as mencionadas acima, bem como a proteção do terrapleno e a praia (ver Figura 5), numa malha de 0,1m x 0,1m, envolvendo 2600 a



2900 elementos. O domínio de simulação inclui, verticalmente (eixo y), fundos desde a cota -12m(ZH), coincidente com a entrada do porto, até 6m acima do ponto mais alto da estrutura e, horizontalmente (eixo x), pelo menos 180 m, entre a zona de geração e a seção da estrutura.

A posição das sondas numéricas coincide com a das sondas no modelo físico, sendo colocada pelo menos uma sonda na testa de cada estrutura e à -12m(ZH). A agitação gerada a esta cota foi calibrada de forma a reproduzir nas sondas próximas das testas das estruturas a altura aí medida no modelo físico (e que incluía os efeitos de propagação 3D, por refração, difração, reflexão, etc). As condições de agitação simuladas numericamente foram definidas para os resultados de pressão mais desfavoráveis obtidos nos ensaios em modelo físico reduzido, considerando uma “onda regular equivalente”, obtida pelo método de Goda (Consulmar, 2020 e 2021), o qual integra o conceito de “onda significativa ao largo equivalente” na propagação de um estado de agitação irregular sobre fundos com um dado declive médio, m. Para efeitos de projeto, a agitação regular incidente, traduzida por um valor de altura de onda, H e período, T, a uma profundidade de -12 m(ZH), corresponde aos valores de $H_{1/250}$ medidos em modelo físico nas sondas S8 a S11. A partir da série temporal da superfície livre, foram calculados os valores de altura média de onda ($H=H_{mean}$) e período médio ($T=T_{mean}$), para cada uma das sondas.

Foram simuladas 13 condições de ensaio para os diferentes perfis. Com base nos resultados dessas simulações, foram definidas outras 12 condições de simulação. As características das simulações realizadas são apresentadas na Tabela 2, que inclui as condições nominais dos respetivos ensaios em modelo físico, altura significativa de onda, H_s à cota - 20 m(ZH), e períodos de pico, T_p , e as condições simuladas em um modelo numérico (H a -12 m(ZH) e T).

Tabela 2. Condições de agitação incidente simuladas no modelo numérico.

Perfil	Nível de maré m (ZH)	T_p / T (s)	Hs (m)	
			Modelo físico	Modelo numérico
RANS 2	1.6	14	2.0	2.54
		17	2.0	2.69
		11	2.5	2.63
RANS 1	1.6	14	2.5	3.12
RANS 2				3.09
RANS 3				3.12
RANS 4				2.04
RANS 2	1.6	17	2.5	3.04
RANS 4				2.01
RANS 2	1.6	14	3.0	3.66
		17	3.0	3.82
		14	2.5	2.94
	1.3	17	2.5	2.973
RANS 1	1.6	17	3.0	3.92
	1.9			4.09
	1.6			2.73
RANS 3	1.6	17	3.0	3.85
	1.9			3.96
RANS 4	1.6	14	3.0	2.11
	1.6	17		2.13
RANS 2	1.3	20	2.5	1.48
	1.6			1.55
	1.9			1.62
	1.9	14	3.0	3.80
		17		3.93



Foi considerado um tempo de simulação variável entre 450 e 550 s, que permitiu a análise de cerca de 20 ondas regulares, após estabilização da simulação.

As pressões são obtidas no centro de cada célula, na sua parte superior (Top), inferior (Bottom), à esquerda, ou seja, de onde vem a agitação (Left) e no lado oposto (Right), conforme mostrado na Figura 6. Assim, na face inferior obtêm-se subpressões na base da laje das estruturas, na face superior obtêm-se pressões (verticais) na laje, e nas faces esquerda e direita, pressões horizontais no sentido de agitação e na direção oposta, respetivamente.

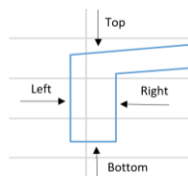


Figura 6. Quatro faces de estrutura onde são obtidas as pressões no modelo numérico.

Para cada perfil considerado (ver Figura 5) e caso simulado (ver Tabela 2), o modelo fornece séries temporais de superfície livre, em diferentes pontos do domínio denominados sondas digitais, e de pressões no centro das células, em cada uma dessas quatro faces.

A partir da série temporal de pressões medidas no centro de todas as células que compõem cada face da estrutura, foi calculada a pressão máxima (P_{max}) ao longo dessa face (horizontal, x , ou vertical, y). A origem do referencial está em 0 m(ZH), em y , e na posição da testa da seção estudada, em x . Além desses valores, foi obtida a série temporal das pressões na posição dos sensores de pressão do modelo físico.

As forças e momentos foram obtidos por integração das pressões ao longo de cada área. Para isso, a estrutura foi dividida em zonas e para cada uma obtiveram-se os seguintes parâmetros:

- A pressão máxima, P_{max} , verificada na zona e a coordenada na qual ocorre P_{max} , xP_{max} ou yP_{max} , o instante em que ocorre P_{max} , tP_{max} , a pressão média registada, P_{med} , em todas as células na área onde se registou a P_{max} ;
- A força máxima, F_{max} , verificada na zona e o instante em que ocorre F_{max} , tF_{max} , a pressão máxima no momento tF_{max} , $P_{max}(tF_{max})$ e coordenada correspondente, $yP_{max_tF_{max}}$ ou $xP_{max_tF_{max}}$, a pressão média na área naquele momento, $P_{med}(tF_{max})$;
- O momento máximo, M_{max} , verificado na zona e o instante em que ocorre M_{max} , tM_{max} e o momento verificado em tF_{max} , $M_{max}(tF_{max})$.

Todos os resultados são apresentados com referência às características “nominais” das correspondentes condições de agitação e maré ensaiadas em modelo físico e em valores de protótipo. Os resultados dos ensaios de pressão variaram muito, como esperado, com as condições de agitação e maré, de perfil para perfil, e de elemento para elemento, conforme referido no capítulo 4.

4. Análise e extrapolação dos resultados de pressão

4.1 Validação dos resultados

A análise detalhada dos registos das séries temporais de valores individuais de pressões em todos os captadores e para todas as condições de ondas e maré ensaiadas (Consulmar, 2020 e 2021, LNEC 2021), permitiu detetar e identificar certos padrões de anomalias nos resultados (Figura 7), assim como as suas causas mais prováveis, ligadas a algumas instabilidades, mas essencialmente decorrentes das elevadas temperaturas verificadas no pavilhão de ensaios

(>40°C). As correções introduzidas incluíram desprezar os valores no intervalo inicial dos ensaios (2000s), a consideração de amplitudes de pressão horizontais e de pressões verticais positivas, entre outras, conforme ilustrado na Figura 8. Salienta-se que, face às centenas de milhares de valores registados, se começou por fazer uma correção inicial com amplitudes de pressão calculadas automaticamente, a partir da pressão média de cada ensaio (LNEC, 2021), depois detalhada para os casos mais desfavoráveis, através de médias móveis (Consumar, 2021).

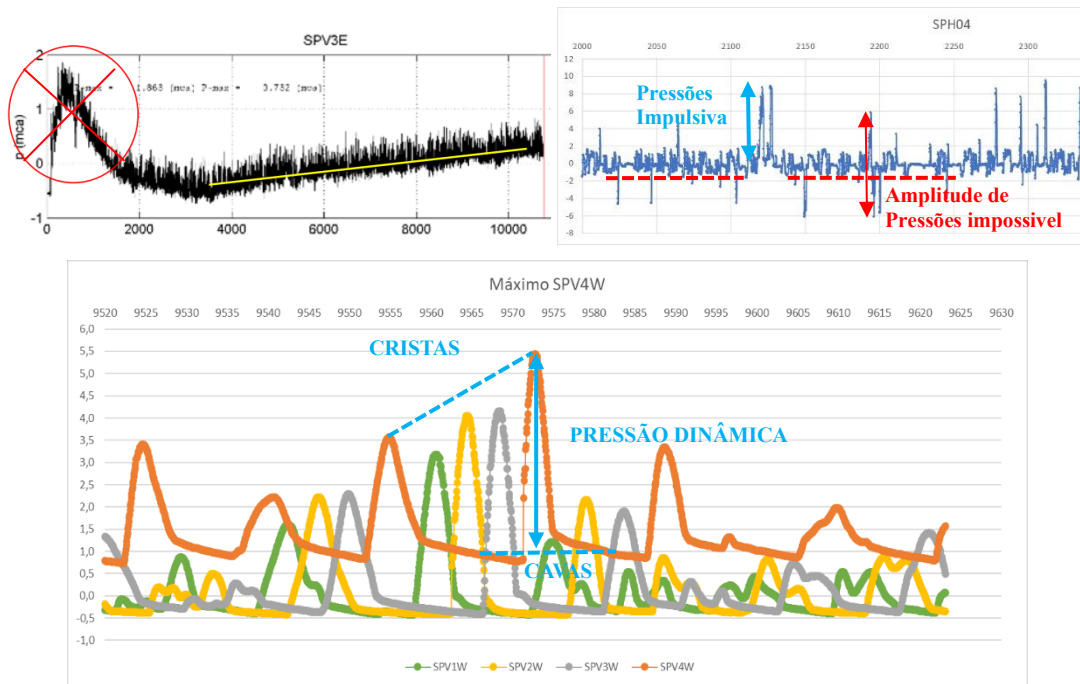


Figura 7. Exemplos de anomalias detetadas nos registos e sua correção.

4.2 Pressões sobre estruturas Verticais - Comparação dos resultados do modelo físico

Três pares de Sensores Verticais de pressão (SPV1 a 3, W e E) foram colocados em lados aproximadamente opostos da cortina permitindo, ao emparelhar os seus resultados no tempo, estudar a variação de pressão e desfasamento entre os dois lados. Procedeu-se igualmente ao emparelhamento no tempo da fiada de sensores de cada lado (4 a Oeste e 3 a Leste), assim se avaliando a variação da pressão ao longo da cortina, de ambos os lados. A cortina de topo da Ponte-cais e a viga de topo da rampa Ro-Ro grande tinham também um sensor cada (SPV1S e SPV2S).

A comparação dos resultados obtidos (Figuras 8 e 9), atendendo à complexidade dos cálculos e ao grau de aproximação das hipóteses associadas, permitiu introduzir algumas simplificações, do lado conservativo:

- As pressões hidrostáticas anulam-se entre os dois lados da cortina;
- Para rumos de SW-NW (incidentes por W), as pressões dinâmicas do lado Oeste, claramente dominantes e desfasadas das pressões menores do lado Este, agem sozinhas, sem contra-pressão dinâmica de Este (esta pressão é pois anulada);
- As pressões resultantes, induzidas por ondas de SW-NW são mais desfavoráveis do que as de SE-S (incidentes por Este). Estas últimas apresentam valores similares e pouco desfasados entre um e outro lado da Cortina, pelo que a resultante das pressões dinâmicas é mais equilibrada e por isso menos desfavorável.

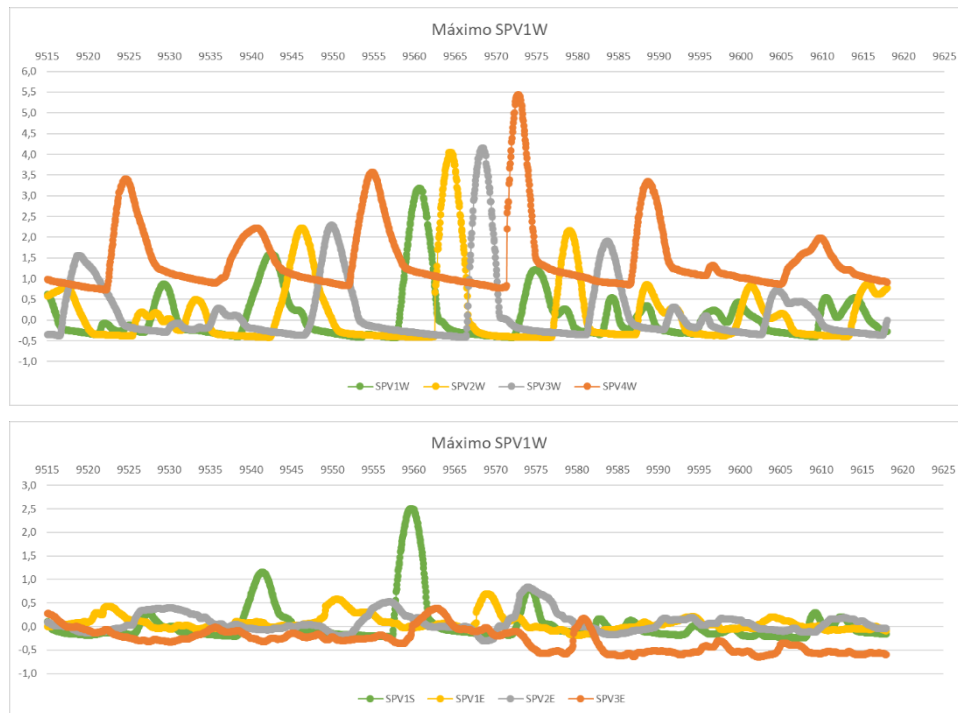


Figura 8. Comparação das pressões máximas (mca) obtidas ao longo da Cortina de abrigo, do lado Oeste (W) e Leste (E), para maré a +1,6m(ZH) e onda de W10S, com $T_p=17s$ e $H_s=1,5m$

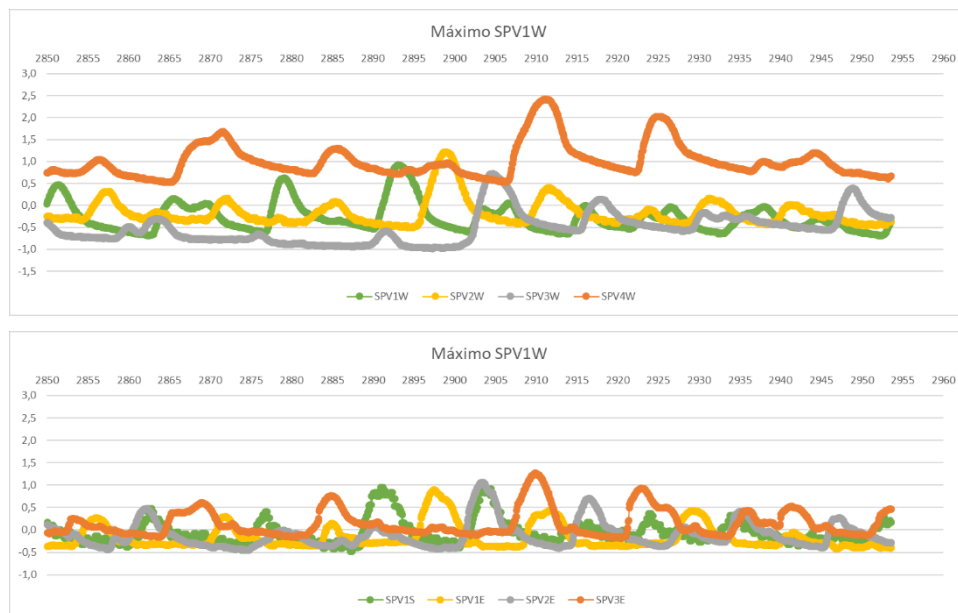


Figura 9. Comparação das pressões máximas (mca) obtidas ao longo da Cortina de abrigo, do lado Oeste (W) e Leste (E), para maré a +1,6m(ZH) e onda de S10W, com $T_p=17s$ e $H_s=1,5m$

Em resumo, para ondas de W10S, as maiores pressões a Oeste são 3 a 5 vezes superiores às maiores do lado Leste, enquanto, para o rumo S10W, essa relação é de 1 a 1,5.



4.2 Pressões sobre estruturas Horizontais - Comparação dos resultados dos modelos

Para comparação e complemento dos resultados de pressão obtidos nos ensaios em modelo físico com os decorrentes das simulações numéricas, fez-se coincidir os 4 perfis longitudinais numéricos com os 4 alinhamentos de sensores de pressão do modelo físico, designadamente:

- RANS1: Sensores SPH1 e 2 (faces inferiores de lajes da Ponte-cais);
- RANS2: Sensores SPH3 a 10 (face inferior da rampa Ro-Ro grande e acesso);
- RANS3: Sensores SPH11 (face inferior do cais da rampa Ro-Ro menor);
- RANS4: Sensores SPH12 a 15 (face inferior da rampa Ro-Ro menor e acesso).

O modelo físico mostra comportamentos distintos para a zona abrigada pela cortina vertical (picos irregulares < 100kPa), plataforma intermédia (picos raros < 70kPa) e enraizamento (picos elevados mas raros < 160kPa), valores ainda não corrigidos do efeito de escala. Os valores de pressão obtidos nas simulações numéricas são, em geral, inferiores aos obtidos no modelo físico, devido a efeitos 3D não considerados. As pressões e forças obtidas nas vigas e lajes sob a ponte-cais são superiores às das rampas Ro-Ro e plataforma de acesso, o que confirma o efeito favorável destas não terem vigas transversais (carlingas). As pressões máximas, em ambos os modelos, são pontuais, nos domínios do espaço e do tempo (a pressão média é muito inferior, em cada elemento).

4.3 Pressões sobre estruturas verticais – Ajuste e extrapolação dos resultados em perfil longitudinal

Para cada condição hidráulica, a partir das pressões máximas verificadas em cada sensor, foi definida a envolvente dos valores máximos ao longo da cortina ($P_k(s)$ = pressão no sensor k , no instante em que a pressão é máxima no sensor s), com a qual se pôde estimar (interpolando) os máximos previsíveis em cada secção da cortina. O modelo estrutural (Figura 9) foi dividido nos 8 módulos da Ponte-cais (e Cortina), cada um subdividido em três trechos de igual comprimento, nos quais se admitiu, por simplificação, pressão constante em planta.

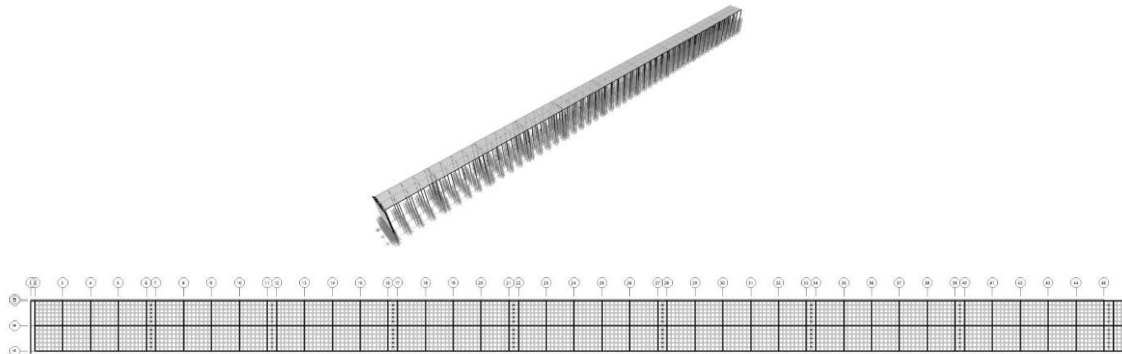


Figura 10. Modelo estrutural da Ponte-cais – Vista 3D e Planta.

A partir dos máximos obtidos em cada sub-módulo da Ponte-cais e cortina, estimou-se uma matriz de propagação das ondas com pressões máximas, ao longo da cortina, tendo em conta a variação do comprimento de onda (distância entre dois picos de pressão, obtida a partir do período de pico) com a profundidade. Cada matriz corresponde a uma condição hidráulica e tem $24 \times 24 = 576$ condições de pressão, de acordo com os índices do seguinte parâmetro:

- $P_{i,j}(a,b)$ = pressão no sub-módulo j do módulo i , no instante em que as pressões máximas na cortina se verificam no sub-módulo b do módulo a .

Cada módulo da Ponte-cais e cortina foi dimensionado e verificado para a distribuição de pressões que lhe era mais desfavorável, incluindo a sua variação em perfil transversal.

4.3 Pressões sobre estruturas verticais – Ajuste e extrapolação dos resultados em perfil transversal

A análise individual dos gráficos de evolução das pressões hidrodinâmicas horizontais induzidas pelas ondas, registadas nos sensores situados na Cortina de abrigo (SPV), durante os ensaios em modelo físico reduzido 3D, mostrou variações “lentas”, do tipo não impulsivo, ou seja, “oscilantes” (ou “quase-hidrostáticas”). A variação vertical deste “regime” de pressões dinâmicas pode ser modelada através da formulação de Y. Goda (Oumeraci H. et al., 2001), Figura 10.

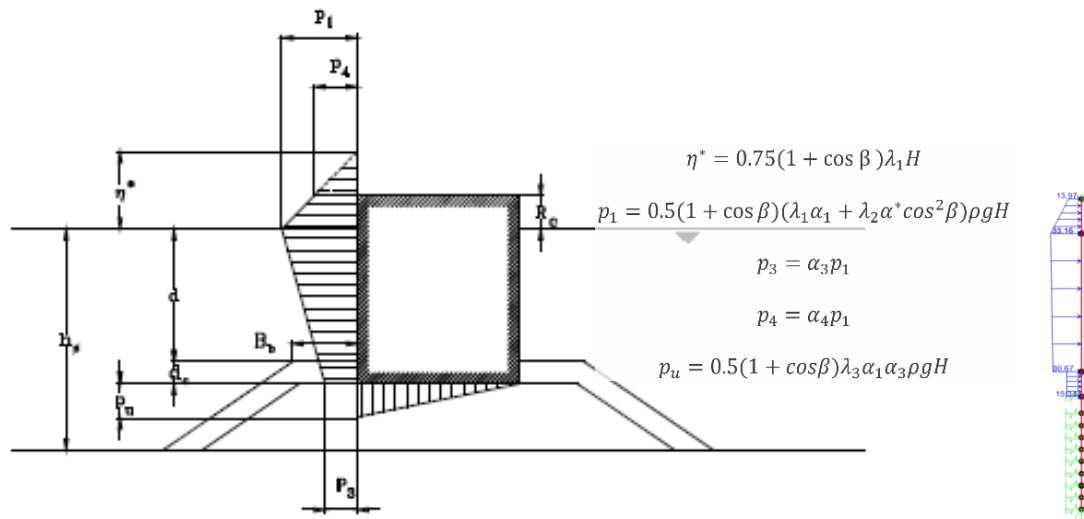


Figura 11. Diagrama de pressões dinâmicas de Goda (Goda Y., 2000) e exemplo de modelo estrutural da cortina e suas pressões do lado Oeste (sem escala).

- Em que :
- H : Altura de onda incidente
 - β : Ângulo de incidência da onda
 - ρ : Densidade da água do mar
 - $\alpha_1, \alpha_1, \alpha_1, \alpha^*$: Fatores relativos a condições de ondas e profundidade
 - $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$: Fatores relativos à geometria da estrutura

Consideraram-se os valores máximos de pressão medidos nos sensores, para cada condição de agitação e o nível de maré crítico (p_1) ensaiados, estimando os restantes valores ao longo de cada secção vertical, segundo processo iterativo em H. Note-se que se obtiveram assim valores de H em geral superiores aos nominais (nos batedores), devido ao efeito do empolamento dos fundos e da reflexão sobre a cortina. Outros efeitos estão aqui implicitamente incluídos, como o galgamento e formação de onda de “Mach” (acumulação adicional de energia ao longo da cortina) por onda oblíqua (W10S), de acordo com o visualizado e registado no modelo físico.

Tendo em conta a esbelteza e profundidade de cravação da cortina, a pressão p_u é nula, considerando-se ainda uma atenuação da pressão na espessura da berma de proteção em enrocamentos, para ter em conta a dissipação longitudinal de onda incidente oblíqua.

4.3 Pressões sobre estruturas horizontais – Ajuste e extrapolação dos resultados

Os valores de pressão vertical, medidos durante os ensaios em modelo físico reduzido, nos sensores Horizontais (SPH), quer da Ponte-cais, quer das rampas Ro-Ro e plataforma de acesso, devido ao tirante de ar entre a face inferior destas estruturas e o nível de água em repouso, apresentam tipicamente um comportamento segundo picos, por vezes elevadíssimos e de muito curta duração, correspondentes a pressões “impulsivas” (ou “de impacto”). Neste “regime” de pressões (sejam horizontais ou verticais), não é válida a lei de semelhança de escala



de Froude, normalmente utilizada em modelo físico, uma vez não modelar o efeito do ar no protótipo (aprisionamento ou fuga de ar no impato, teor de emulsão de ar na água e compressão do ar). Com efeito, a conversão deste tipo de pressões, obtidas à escala do modelo, para o protótipo, obedece a outro tipo de leis de semelhança, sendo normalmente proporcionalmente bastante inferiores aos valores do modelo.

Para efeitos de projeto, foi adaptada metodologia seguida em Wallingford (Cuomo G., 2010) e que conduziu aqui a reduções de pressões da ordem de 40 a 60% do valor do modelo (Froude). Os relatórios do LNEC, conforme então acordado, não contemplam esta correção, podendo alguns dos seus valores ser muito conservativos.

5. Conclusões

A complementaridade entre os ensaios em modelo físico 3D e simulações numéricas RANS VOF 2D, aplicados a conjunto de obras e condições hidráulicas complexas, permitiu dotar o projeto com a informação necessária ao dimensionamento das suas estruturas verticais e horizontais.

A articulação e complementaridade entre Laboratório e Projetista, permitiram uma melhor resolução de constrangimentos técnicos e o desenvolvimento de metodologias inovadoras.

Salienta-se, a nível do projeto: 1) Para minimizar as pressões sobre a cortina, sua transmissão à estrutura da Ponte-cais existente e galgamento, foram consideradas aberturas verticais na cortina lateral (com largura inferior à do modelo físico, decorrente de testes complementares com modelo MIKE 21 BW, objeto de outra Comunicação) e tubos na viga de coroamento, entre outras medidas. As pressões obtidas implicaram ainda o dimensionamento da cortina de topo como um contraforte; 2) Para minimizar as pressões das ondas sobre as rampas Ro-Ro e plataforma de acesso, esta não apresenta vigas transversais, elevou-se o coroamento (primeiro critério a seguir e introduziram-se grelhas de furos (alívio de pressões e drenagem).

Referências Bibliográficas

- 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 modèle réduit 3D et sur modèle numérique. Rapport final: Études sur modèle réduit tridimensionnel. Relatório 018/2021 – DHA/NPE.
- Neves, M.G. (2020). Travaux d'expansion et requalification du Porto Inglês, île de Maio, République du Cap Vert. Etudes sur modèle réduit 3D et sur modèle numérique. Rapport final: Études sur modèle numérique. Relatório 426/2020 – 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 (2020). Travaux d'extension et Modernisation du Port Inglês, Île de Maio, Project d'Éxecution des Plateformes de Rampe Ro-Ro.
- CONSULMAR (2021). Travaux d'extension et Modernisation du Port Inglês, Île de Maio, Projects d'Éxecution du Rideau Palplanche - Palplanche et Poutre de béton.
- Goda Y. (2000). "Random Seas and Design of Maritime Structures". World Scientific. 443 pp.
- Oumeraci H. et al (2001). "PROVERBS: Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters". A.A. Balkema Publishers. 373 pp.
- McConnell K. et al (2004). Piers, Jetties and related structures exposed to Waves. Guidelines for Hydraulic loadings". HR Wallingford, dti – Department of Trade and Industry. 148 pp.
- Cuomo G., Allsop W., e Takahashi S. (2010). "Scaling wave impact pressures on vertical walls". Coastal Engineering, 57, 604-609.