

Ensaios de agitação no porto de Leixões em cenário de alteração climática

Wave disturbance tests in the port of Leixões on a climate scenario

Miguel Silva¹, Conceição J.E.M. Fortes^{2*}, Rute Lemos³, Maria da Graça Neves⁴, Carlos Caeiro⁵

* Autor correspondente. Email : jfortes@lnec.pt

¹ Aluno da Escola Profissional de Ciências Geográficas, Lisboa, Portugal, 96masilva@gmail.com

² Investigadora Principal do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

³ Técnica Superior do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

⁴ Investigadora Auxiliar com Agregação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

⁵ Técnico Superior na Escola Profissional de Ciências Geográficas

RESUMO: Para caracterizar a agitação marítima no Porto de Leixões após o prolongamento do quebra-mar exterior, sob condições de alterações climáticas foi realizado um extenso grupo de ensaios em modelo físico tridimensional de agitação, num tanque do LNEC, à escala 1:80, representando-se toda a bacia portuária e o prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões. Foram realizados ensaios com diferentes condições de agitação incidente para o rumo W e com dois níveis de maré, que correspondem ao nível médio e a preia-mar com uma sobrelevação representativa dos efeitos das alterações climáticas e da sua influência na agitação marítima. Foi medida a agitação em 30 pontos localizados na entrada do porto e no interior da bacia portuária e analisou-se o abrigo da bacia portuária com a ampliação do quebra-mar norte e as diferenças entre o abrigo para os dois níveis de maré ensaiados. As principais conclusões dos ensaios realizados foram que os maiores valores de alturas de onda ocorreram na zona exterior e de entrada do porto, diminuindo para o seu interior. Ao longo do canal de navegação, as alturas de onda vão diminuindo e no interior do porto obtiveram-se valores da altura de onda pequenos. A subida do nível do mar, para as condições ensaiadas, não afeta significativamente a agitação no interior da bacia portuária. No entanto, no exterior e zona de entrada do porto contribui para alterações da agitação que diferem consoante o período de pico e a altura de onda significativa incidente.

Palavras-chave: Agitação, Porto de Leixões, alteração climática

ABSTRACT: In order to characterize the sea wave characteristics in the Port of Leixões after the extension of the outer breakwater under conditions of climatic changes, an extensive group of tests was carried out in a three-dimensional physical model of agitation in a 1:80 scale. The tests were made at a LNEC's tank, reproducing the entire port basin and the extension of the outer breakwater of the Port of Leixões. Tests were carried out with different incident wave conditions coming from W and with two tide levels, corresponding to the average tide level and to the high tide level with elevation, as a climatic changes effect and its influence on the wave parameters. The wave characteristics were measured in 30 points located from the entrance of the port to the interior of the port basin. The shelter of the port basin with the expansion of the north breakwater was analyzed as well as the differences between the results for the two tide levels tested. The main conclusions of the tests were that the highest values of wave heights occurred in the outer zone and at the entrance of the port, decreasing towards the interior. Along the navigation channel, the wave heights are decreasing and inside the port small values of the wave height were obtained. Rising sea levels for the conditions tested do not significantly affect waves inside the port basin. However, outside the port and at port entry zone, such increase on the sea level contributes to differences on wave characteristics that depend on the peak period and the significant incident wave height.

Keywords: Wave agitation, Leixões Harbour, Climate change.

1. INTRODUÇÃO

O Porto de Leixões, localizado na costa norte de Portugal, é um dos maiores do país, recebendo diariamente um grande número de navios de grandes dimensões. O crescimento económico que se perspetiva a nível mundial leva a antecipar que o número de navios e a sua dimensão continuarão a aumentar nos próximos anos.

Nesse sentido, a APDL – Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, S.A. (APDL) pretende prolongar o seu quebra-mar principal (exterior) bem como promover o aprofundamento e alargamento do canal de acesso da bacia de rotação do porto de modo a criar as condições de abrigo e segurança necessárias para permitir a receção no porto de Leixões de navios com 300 m de comprimento, 40 m de boca e 13,5 m de calado. Para estudar a agitação marítima no interior do porto recorreu-se, entre outros, à modelação física. Para tal, foi efetuado um modelo físico da zona envolvente do porto de Leixões bem como do seu molhe principal num dos tanques do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Neves *et al.* (2017). Considerou-se 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. A restante configuração portuária foi proposta pela APDL (2016).

A exploração do modelo reduzido foi realizada de acordo com a lei de semelhança de Froude, tendo sido utilizada a escala geométrica de 1:80. Testaram-se várias alturas de onda significativa ($H_s=2, 3$ a 4 m), períodos de pico da onda incidente ($T_p=10$ s, 14 s e 16 s) e duas direções de onda (W e SW), para o nível de maré correspondente ao nível médio e procedeu-se à medição da elevação da superfície livre, com recurso a sondas resistivas, em diferentes pontos da bacia. Com base nos resultados dos índices de agitação obtidos nos ensaios, foi possível concluir que, para as condições ensaiadas e 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 $T_p=10$ s. 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.

Naqueles ensaios o número de pontos considerado foi de 8, o que não permitia uma caracterização

espacial detalhada da agitação no interior do porto, embora da informação considerada relevante e suficiente para os objetivos propostos. Além disso, não foi testado um nível de maré (o nível médio) que tivesse em conta cenários de alterações climáticas correspondentes a uma possível subida do nível do mar.

Assim, para completar o trabalho realizado, procurou-se avaliar o impacto do futuro prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões nas condições de abrigo do porto, considerando dois cenários de nível do mar: o cenário atual de nível médio do mar e o cenário de sobrelevação do nível de preia-mar, resultante de possíveis alterações climáticas, procurando uma melhor caracterização da agitação no interior do porto através da medição da agitação num maior número de pontos.

Para o efeito, foram realizados ensaios de agitação em modelo físico tridimensional considerando agitação incidente com diferentes alturas de onda significativas (4) e períodos de pico (3) e dois níveis de maré: o nível médio e o nível de preia-mar com sobrelevação, Silva (2018). A direção de agitação considerada foi a de oeste (W). Efetuaram-se medições da agitação marítima em 30 pontos localizados no porto, nomeadamente na bacia portuária, no canal de acesso ao porto, no terminal de cruzeiros, no terminal petrolífero e ainda nas imediações do quebra-mar exterior.

Com os resultados obtidos nos ensaios, foi possível avaliar:

- a proteção concedida pelo prolongamento do molhe no interior do porto, para cada condição de agitação incidente testada;
- o impacto da subida do nível do mar correspondente a um possível cenário de alterações climáticas nas condições do abrigo do porto.

Nesta comunicação descrevem-se os ensaios de agitação realizados no modelo bem como os resultados obtidos.

2. O PORTO DE LEIXÕES

O porto de Leixões (Figura 1), fica situada a cerca de 4 km a norte da foz do Rio Douro e nas proximidades da cidade do Porto, sendo enquadrado pelas povoações de Leça da Palmeira a norte, e Matosinhos a sul. O porto de Leixões é a maior infraestrutura portuária da Região Norte de Portugal e uma das mais importantes do país, dispondo de boas acessibilidades marítimas, rodoviárias e ferroviárias, bem como de modernos

equipamentos e avançados sistemas informáticos de gestão de navios.

Ao beneficiar de uma localização estratégica, o porto de Leixões tem uma posição privilegiada no contexto do sistema portuário europeu. Opera 365 dias por ano, usufruindo de uma barra permanentemente aberta ao tráfego portuário. A carga movimentada pelo porto, de cerca de 18 milhões de toneladas de mercadorias por ano, representa 25% do comércio internacional português. 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, melaços, produtos petrolíferos e ainda passageiros de navios de cruzeiro.

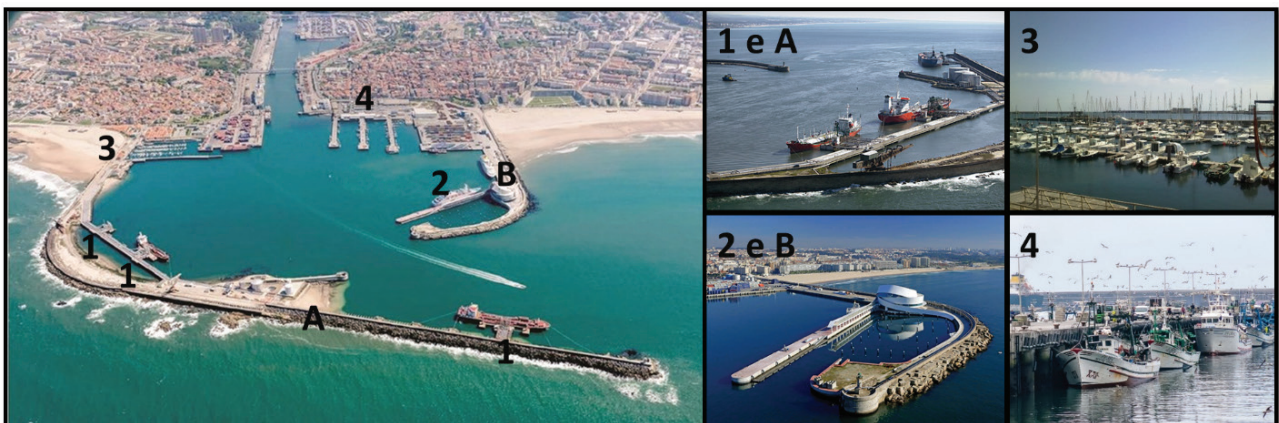
O porto é constituído por 2 molhes que protegem 3 terminais petrolíferos, 1 terminal de cruzeiros, 1 porto de pesca e 1 marina (Figura 1). De modo a aumentar as condições de abrigo que permitam a

entrada de navios porta-contentores até 300 m de comprimento, 40,2 m de boca e 14,0 m de calado, foi sentida pela APDL a necessidade de prolongar o quebra-mar exterior do Porto de Leixões e, conseqüentemente, a necessidade de realização de ensaios em modelo físico para a caracterização da agitação no acesso ao porto e na sua bacia portuária.

3. ENSAIOS EM MODELO FÍSICO

3.1 Batimetria e elementos reproduzidos

O modelo físico reduzido de agitação foi construído nas instalações experimentais do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do LNEC, num tanque de ondas do Pavilhão de Hidráulica Marítima, Figura 2, com as dimensões de 44,0 x 23,0 m², equipado com 4 geradores móveis de ondas irregulares com 6,0 m de comprimento cada, para profundidades de água até 75 cm.



A e B – Quebra-mar | 1 – Terminal petrolífero | 2 – Terminal de cruzeiros | 3 – Marina | 4 – Porto de pesca

Figura 1. Vista aérea do porto de Leixões.



Figura 2. Vista do modelo físico de agitação do Porto de Leixões com prolongamento do molhe norte.

Na construção do modelo reduzido, Figura 2, foi utilizada a escala geométrica de 1:80 e foram reproduzidos os 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 o 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).

A reprodução dos fundos foi feita de acordo com a batimetria e informações fornecidas pela APDL (APDL, 2016), Figura 2. Foi considerado um canal de acesso à cota -16,85 m (ZHL) e a bacia de rotação à cota -15,5 m (ZHL).

3.2 Condições de agitação ensaiadas e equipamento utilizado

Nos ensaios em análise foi reproduzida uma direção de agitação incidente, sobre a batimétrica 20.0 m (ZHL), correspondente a 270° (W), à qual 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, 4 m e 6 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 para dois níveis de maré, correspondentes ao nível médio, +2,0 m (ZHL) e ao nível correspondente a preia mar com sobrelevação, 4,75 m (ZHL). No Quadro 1 apresenta-se um resumo das condições de ensaio realizadas.

Quadro 1. Condições de ensaio realizadas nos ensaios de agitação.

NM = 2,0 m (ZHL)				PM = 4,75 m (ZHL)					
H_s (m)	T (s)	10	14	16	H_s (m)	T (s)	10	14	16
2		x	x	x	2		x	x	x
3		x	x	x	3		x	x	x
4		x	x	x	4		x	x	x
6		x	x	x	6		x	x	x

Para a verificação da tranquilidade portuária da bacia protegida pelo quebra-mar exterior prolongado em 300 m com o alinhamento de 20° face ao quebra-mar 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 5 grupos de pontos (Figura 3), cada um dos quais com 6 pontos cada, perfazendo um total de 32 pontos.

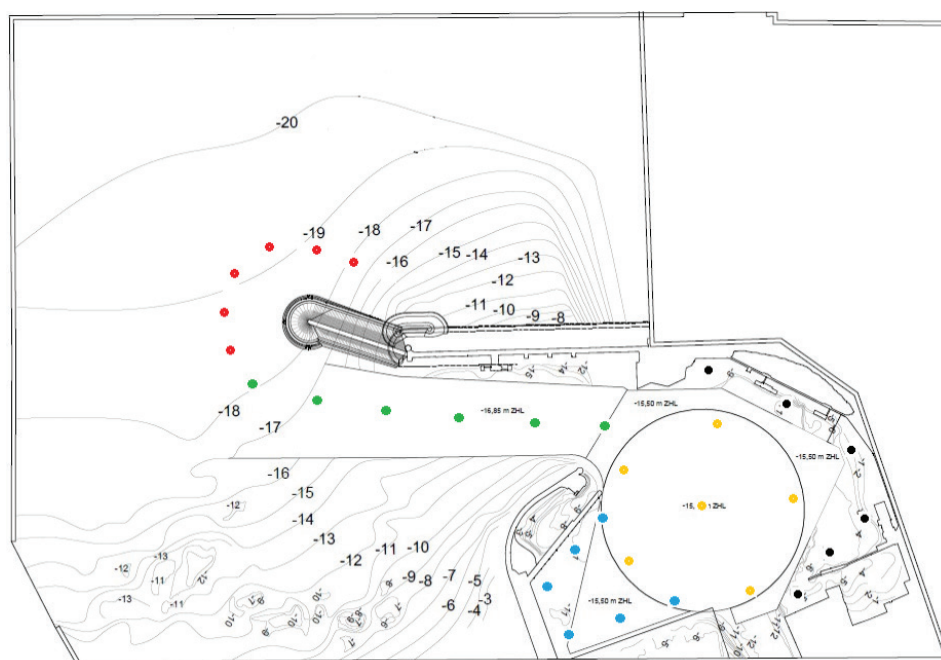


Figura 3. Grupos de pontos de medição da agitação no modelo físico de agitação do Porto de Leixões.

Os procedimentos necessários à realização dos ensaios são:

- Verificação do nível de água correspondente ao nível de maré pretendido;
- Ligar (desligar) o gerador de ondas;
- Calibração de sondas;
- Realização do ensaio;
- Tratamento da agitação.

Todos os ensaios foram repetidos, perfazendo um total de ensaios realizados de 250.

4. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE AGITAÇÃO EM MODELO FÍSICO

4.1 Alturas de onda significativas

Os resultados dos ensaios realizados foram analisados em termos de alturas de onda significativas, H_s , medidas nos pontos distribuídos na bacia portuária e imediações do talude exterior do quebra-mar.

Na Figura 4 e na Figura 5 apresenta-se a variação da altura de onda significativa ao longo dos pontos correspondentes aos cinco grupos de sondas para as condições de agitação incidente ensaiadas e para o nível de maré de +2,0 m (ZHL) e +4,75 m (ZHL), respetivamente.

De acordo com os resultados das alturas de onda significativas obtidos e apresentados na Figura 4 e na Figura 5, constata-se que:

- Em geral, a proteção concedida pelo quebra-mar exterior no canal de navegação e na bacia portuária é muito semelhante para todos os T_p ensaiados;
- Verifica-se uma tendência de diminuição dos valores das alturas de onda à medida que a agitação se propaga para o interior do porto;
- Em geral, verifica-se que o grupo onde se mediram as maiores alturas de onda significativas é o Grupo 1 (em redor da cabeça do quebra-mar exterior, em frente ao batedor), seguido do Grupo 2 (ao longo do canal de acesso do porto). Os grupos 4 (que percorre o Terminal Petrolífero, posto B e C* até a Marina), 5 (situado na Bacia portuária) e, finalmente, o 3 (no terminal de cruzeiros) apresentam valores significativamente inferiores aos restantes grupos;
- A bacia portuária goza de uma boa tranquilidade, na medida em que a agitação marítima aí medida é bastante inferior à altura de onda incidente.

É de salientar que a sonda 6 do grupo 1 (G1, 6) apresenta menores alturas de onda significativas que as demais sondas deste grupo, como se ilustra na Figura 6 para $H_s=6$ m, $T_p=10$ s e nível médio de maré, provavelmente devido à influência da abertura

da guia adjacente ao gerador, a qual eventualmente provocou alguma perda de energia nessa zona. Esta guia apresenta uma abertura muito acentuada e muito próxima do batedor, logo a onda gerada perde muito rapidamente a energia inicial, uma vez que esta se dissipa por uma maior área. Assim, registam-se ondas com H_s inferior ao esperado e que podem estar afetadas por estes efeitos de modelo.

4.2 Índices de agitação

Nesta secção são apresentados os resultados dos ensaios realizados em termos dos índices de agitação, isto é, da relação entre as alturas de onda significativas num ponto de interesse no porto de Leixões e a altura de onda significativa incidente.

A Figura 7 e a Figura 8 apresentam os valores dos índices de agitação obtidos ao longo dos pontos correspondentes aos cinco grupos de sondas para os três períodos de pico ensaiados e para o nível de maré de +2,0 m (ZHL) e +4,75 m (ZHL), respetivamente.

Na Figura 8 apresentam-se as diferenças entre os valores dos índices obtidos com cada um dos dois níveis de maré ensaiados nos grupos de pontos 1 a 3, que são os grupos para os quais se obtiveram os maiores índices de agitação.

De acordo com os resultados dos índices de agitação obtidos e apresentados nas figuras anteriores:

- Verificou-se que, para qualquer condição de agitação incidente ensaiada:
 - Os maiores valores dos índices de agitação ocorrem na zona exterior e de entrada do porto (Grupos 1 e 2) e diminuem para o interior do porto (Grupos 3 a 5);
 - Ao longo do canal de navegação (Grupo 2), em geral, os índices de agitação vão diminuindo à medida que se afastam da entrada do porto;
 - No interior do porto (Grupos 3 a 5), os valores do índice de agitação são da mesma ordem de grandeza e de baixo valor e, em geral, não variam com a altura de onda incidente.
- Verificou-se que a subida do nível do mar de 2.75 m, Figura 8 e Figura 9:
 - Não afeta significativamente os índices de agitação no interior da bacia portuária (grupos 3 a 5);
 - Contribui para alterações dos índices de agitação no exterior e na zona de entrada do porto (grupos 1 e 2). No entanto, não foi possível encontrar uma correlação entre a variação do nível do mar e o dos índices de agitação, pois o comportamento difere consoante o período de pico e a altura de onda significativa incidente.

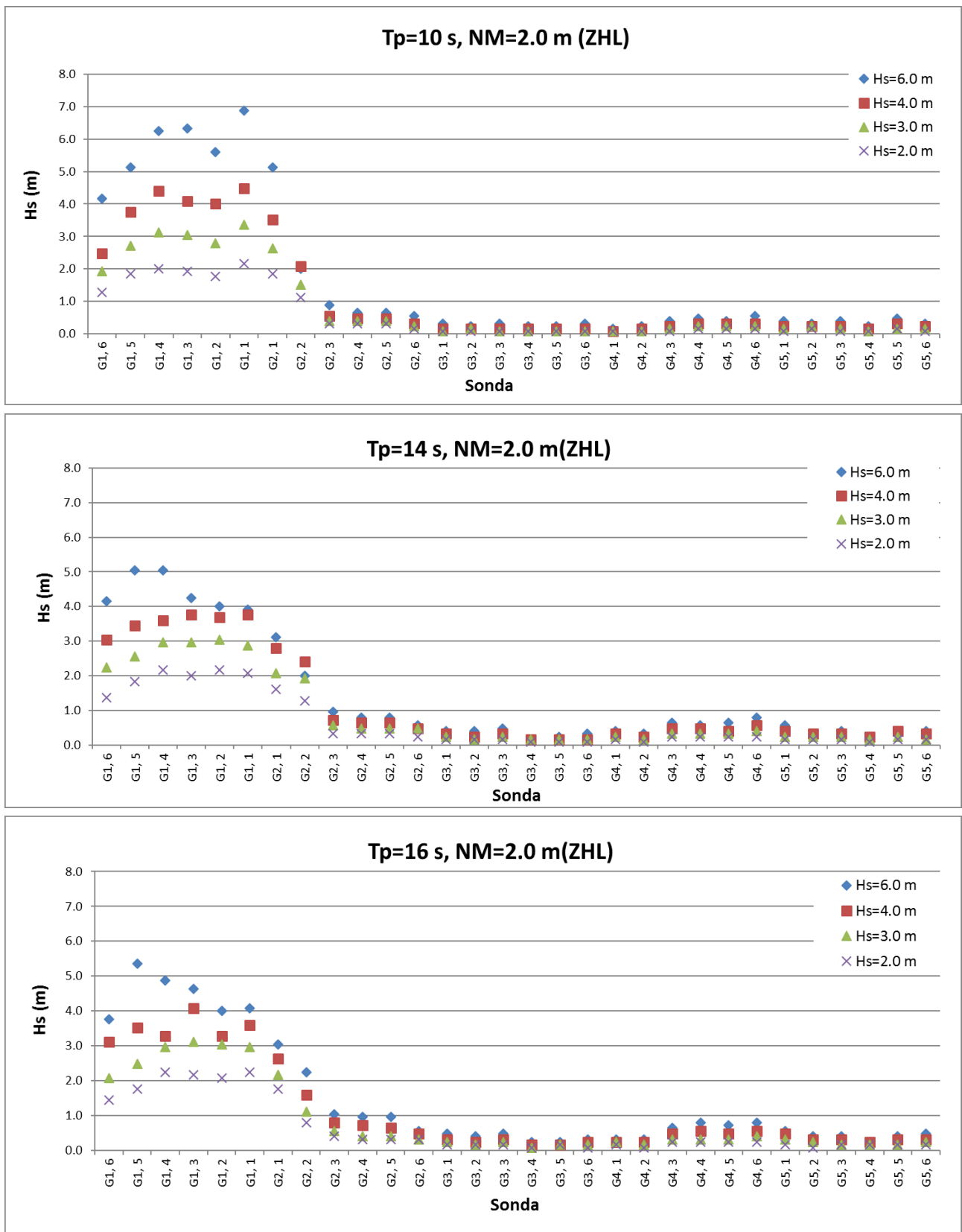


Figura 4. Alturas de onda significativas ao longo dos pontos de medição para $NM=2.0$ m (ZH) e para $T_p=10$ s, 14 s e 16 s.

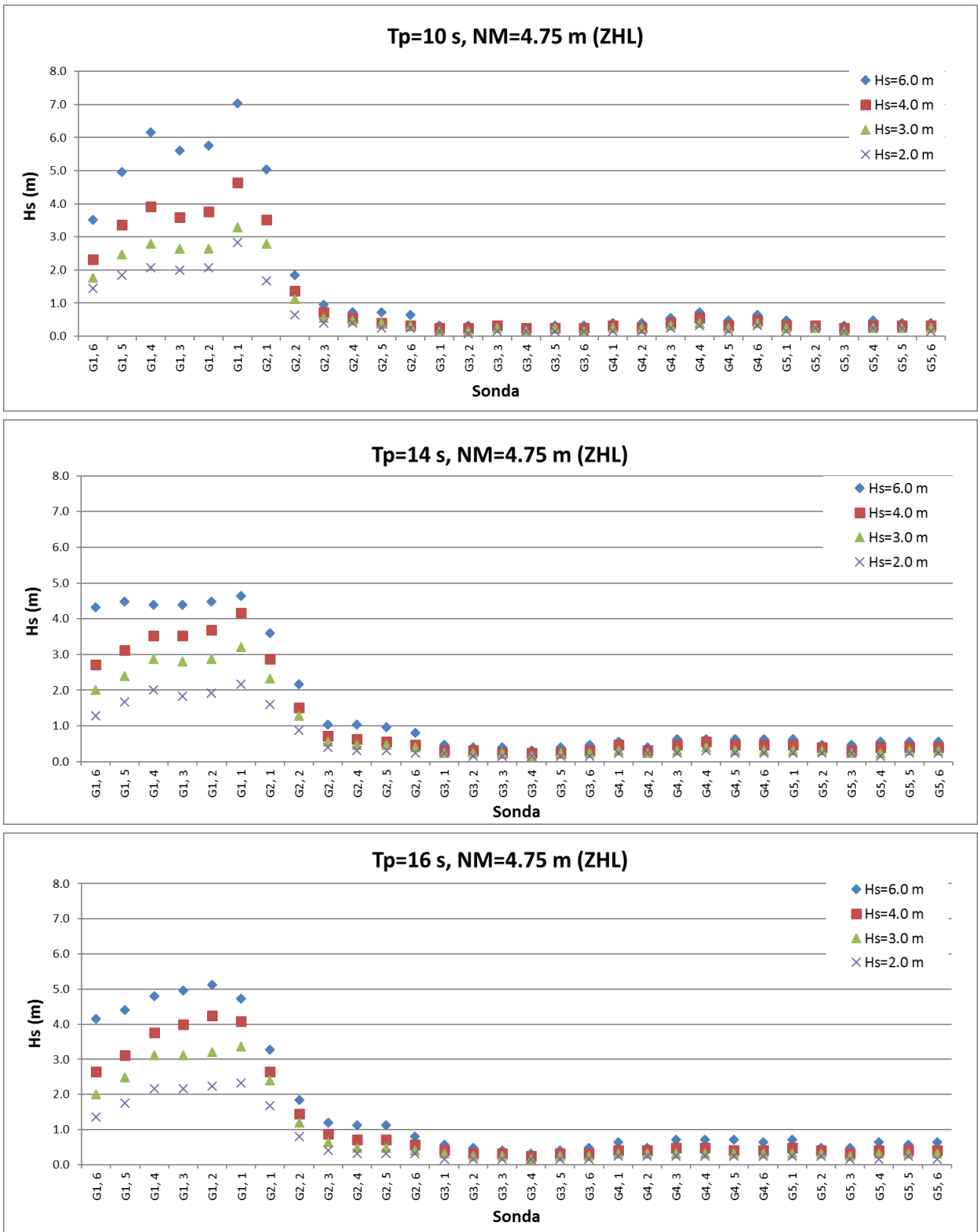


Figura 5. Alturas de onda significativas ao longo dos pontos para NM=4,75 m (ZHL) e Tp=10 s, 14 s e 16 s.

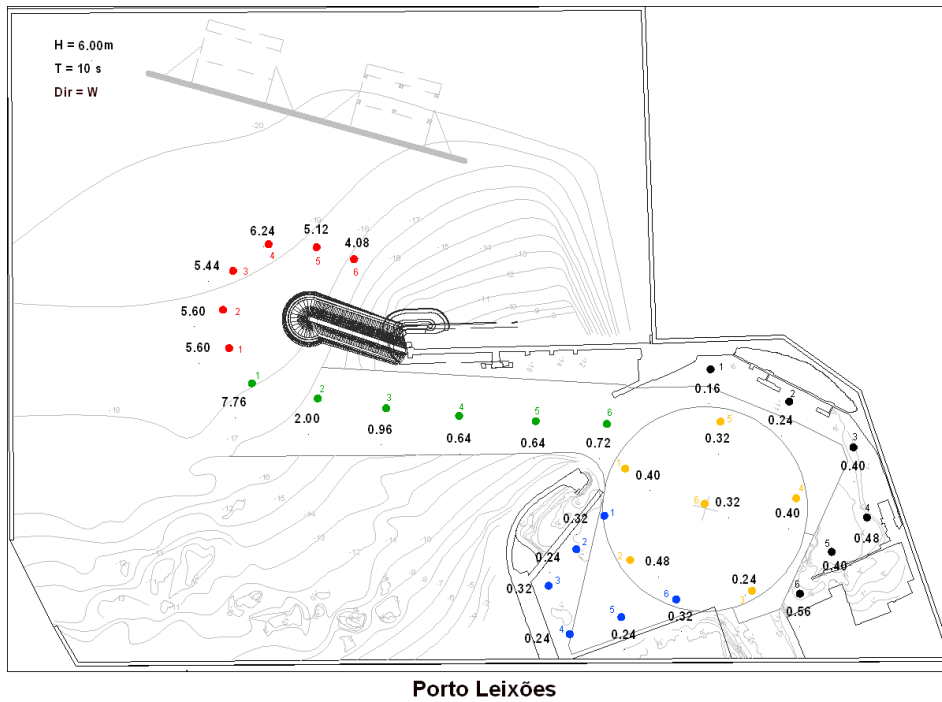


Figura 6. Alturas de onda significativas nos pontos de medição, para uma onda incidente com $H_s=6$ m, $T_p=10$ s e nível de maré $NM=2,0$ m (ZHL).

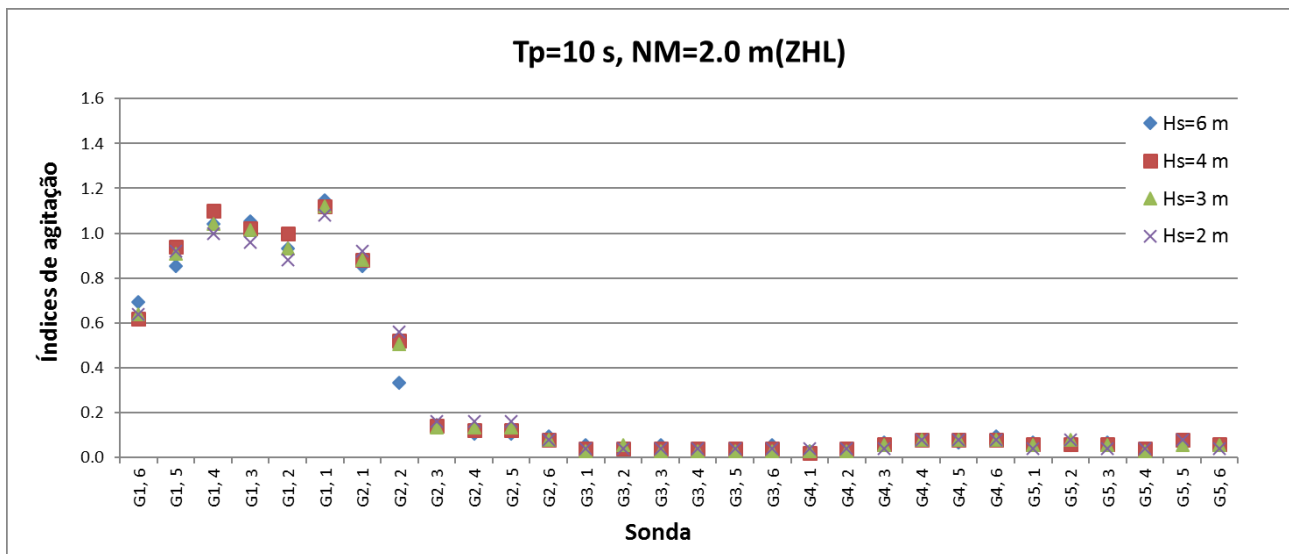


Figura 7. Índices de agitação ao longo dos pontos para $NM=2.0$ m (ZH) e $T=10$, 14 s e 16 s.

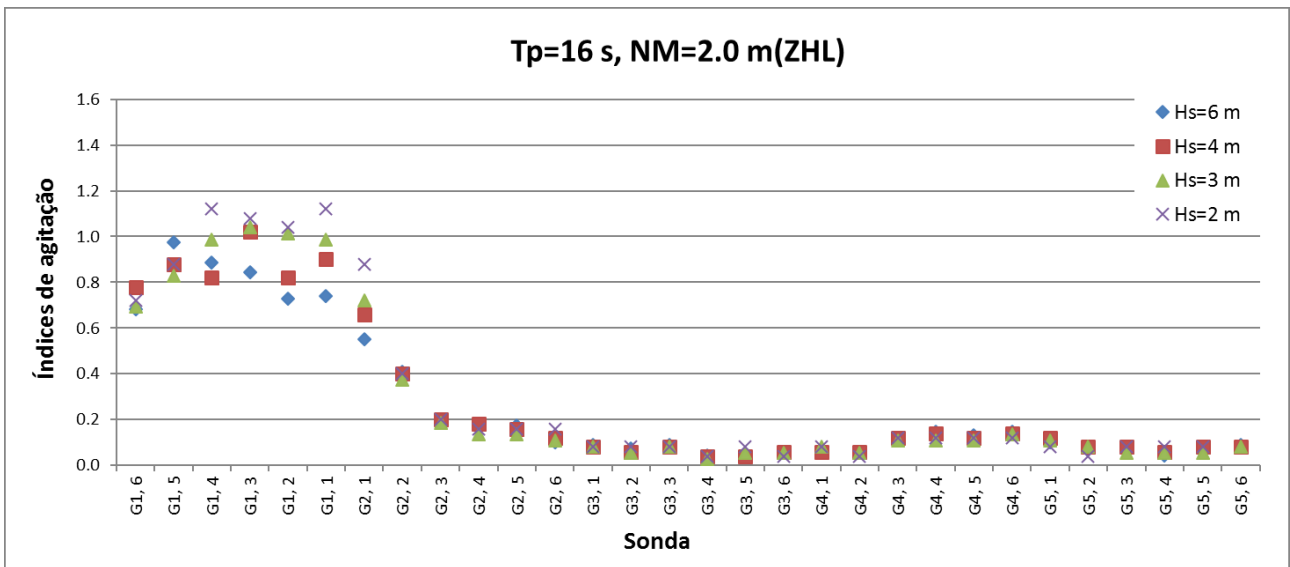
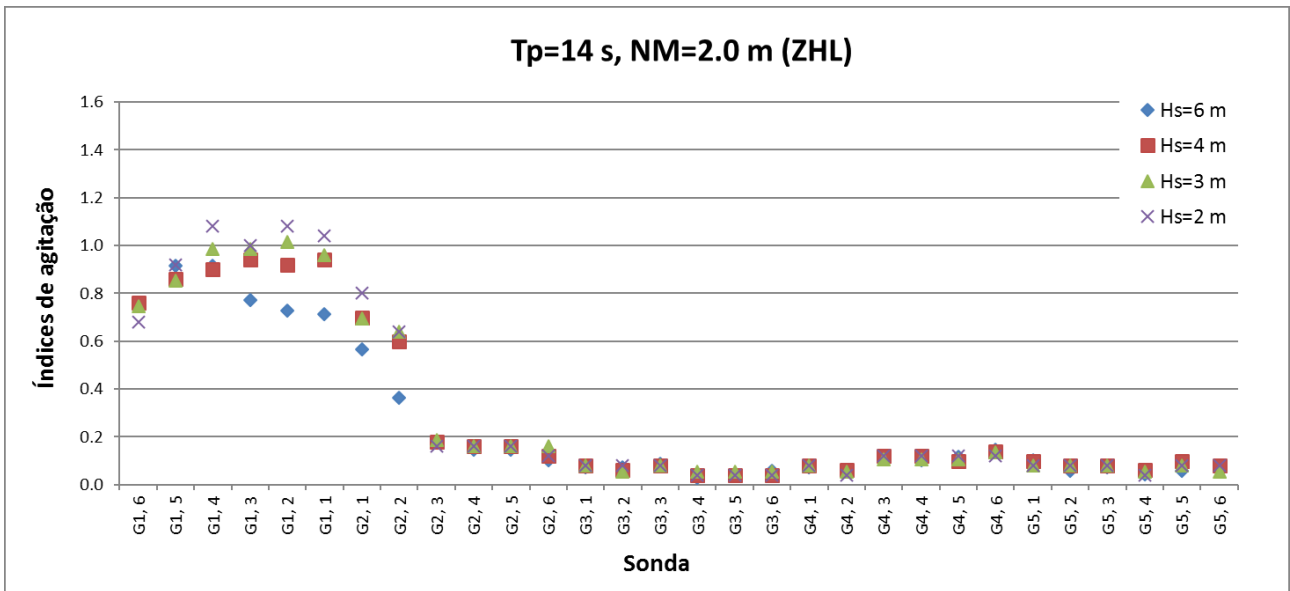


Figura 7. (continuação) Índices de agitação ao longo dos pontos para NM=2.0 m (ZH) e T=10 s, 14 s e 16 s.

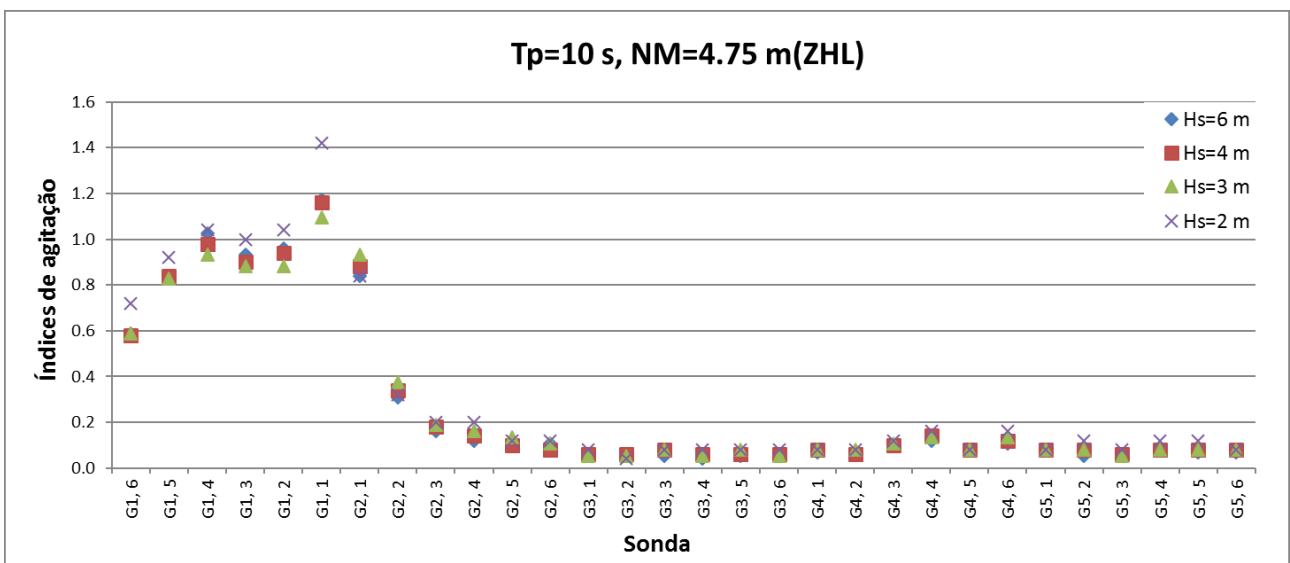


Figura 8. Índices de agitação ao longo dos pontos para NM=4.75 m (ZHL) e T=10 s, 14 s e 16 s.

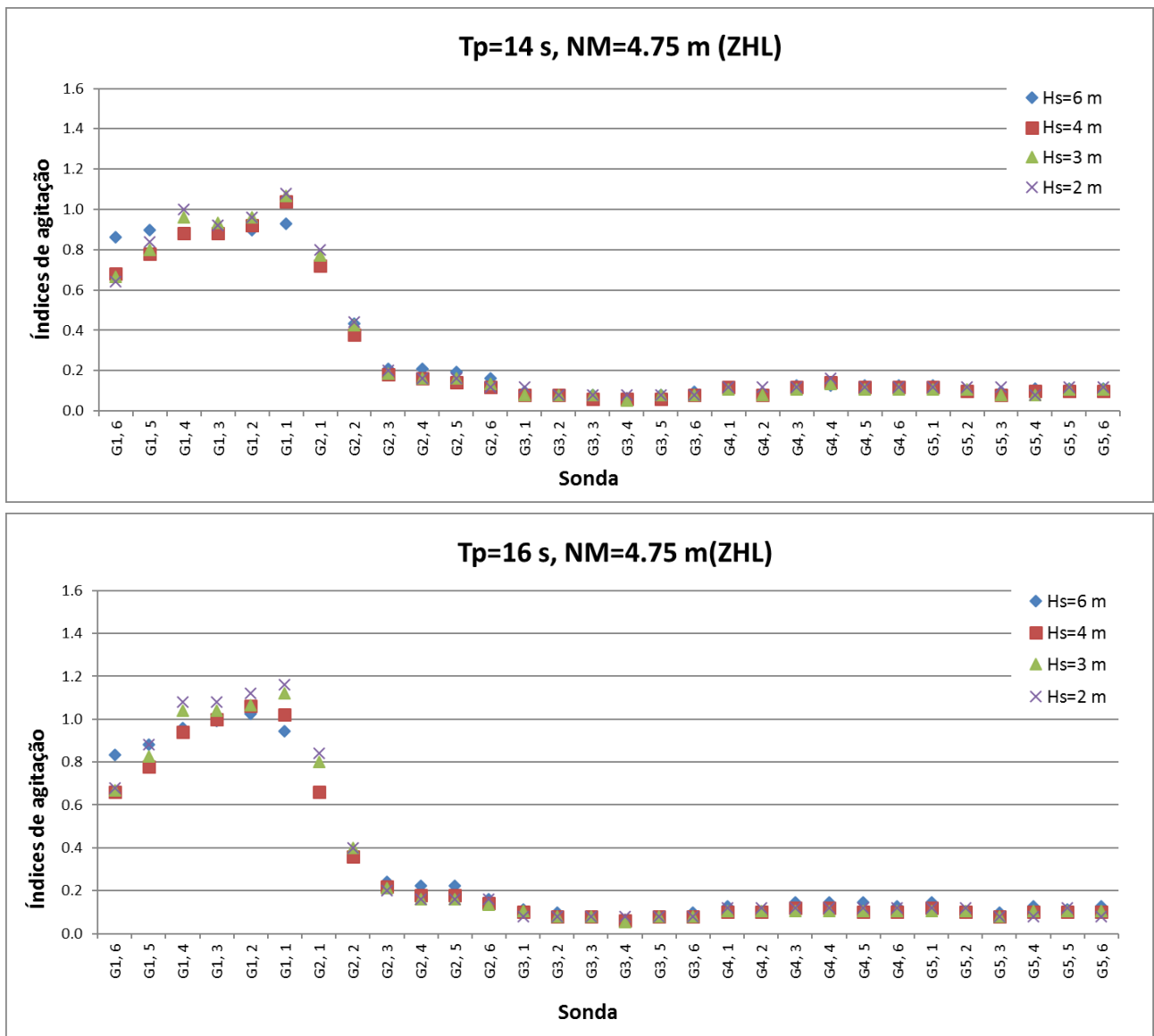


Figura 8. (continuação) Índices de agitação ao longo dos pontos para NM=4.75 m (ZHL) e T=10 s, 14 s e 16 s.

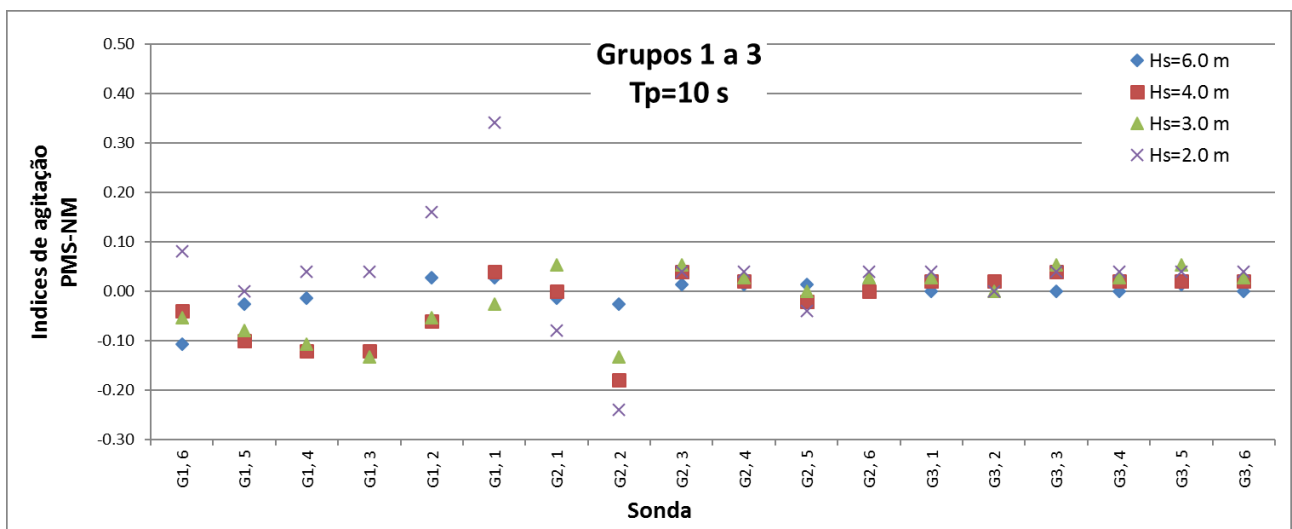


Figura 9. Diferenças nos índices de agitação verificadas nos grupos 1 a 3 com os níveis de maré de +2,0 m (ZHL) e +4,75 m (ZHL) e com Tp=10 s, 14 s e 16 s.

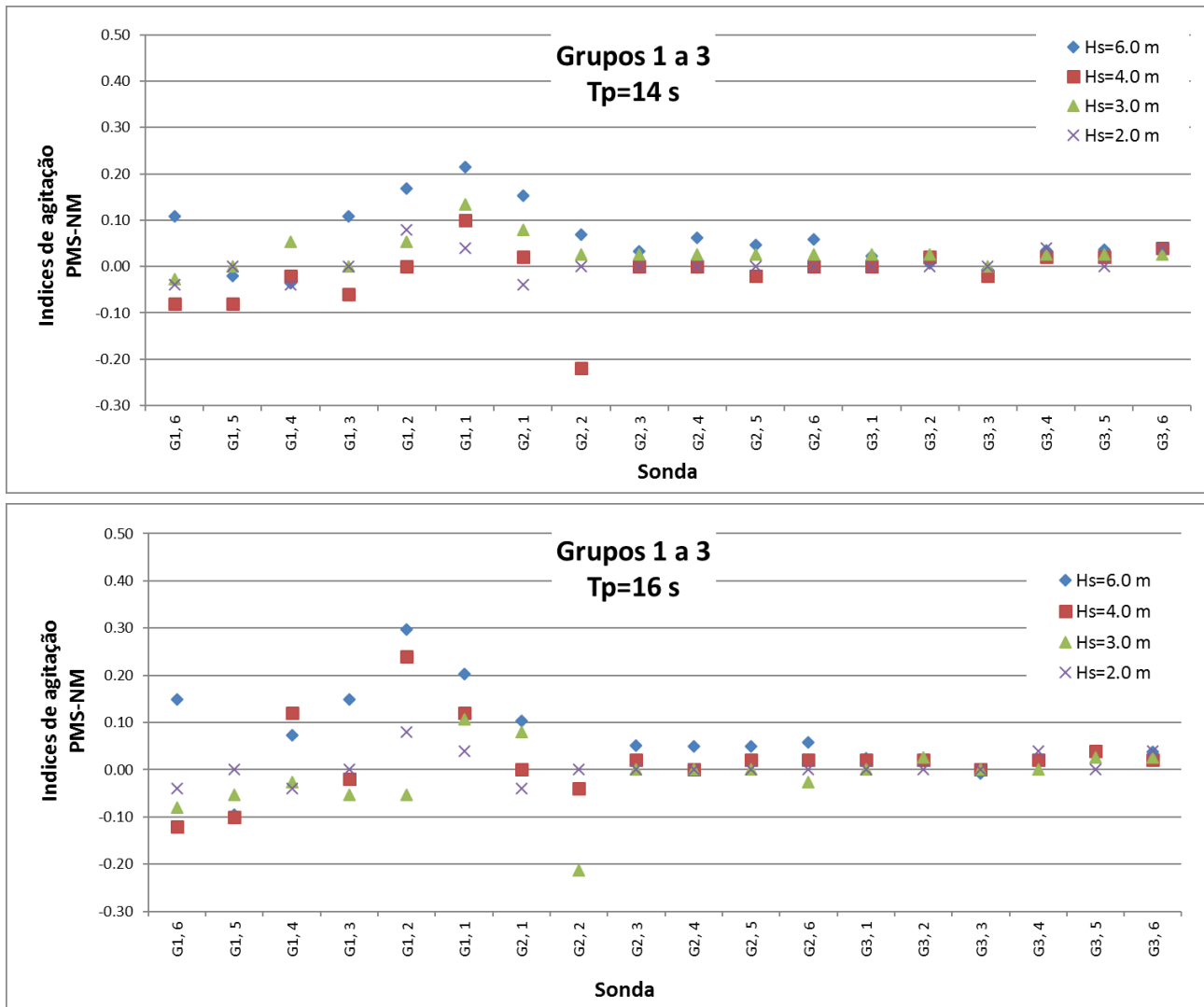


Figura 9. (continuação) Diferenças nos índices de agitação verificadas nos grupos 1 a 3 com os níveis de maré de +2,0 m (ZHL) e +4,75 m (ZHL) e com $T_p=10$ s, 14 s e 16 s.

CONCLUSÕES

A caracterização da agitação marítima no porto de Leixões após o prolongamento do quebra-mar exterior, sob condições de alterações climáticas foi feita recorrendo à modelação física. Foi realizado para tal um extenso grupo de ensaios em modelo físico tridimensional de agitação, num tanque do LNEC à escala 1:80, representando-se a bacia portuária até à foz do Rio Leça e o prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões. Foram realizados ensaios com diferentes condições de agitação incidente para o rumo W e com dois níveis de maré, que correspondem ao nível médio e a preia-mar com sobrelevação. Com os resultados obtidos nos ensaios, analisou-se o abrigo da bacia portuária com a ampliação do quebra-mar norte e as diferenças entre o abrigo para os dois níveis de maré ensaiados. As principais conclusões dos ensaios foram que, para as condições ensaiadas:

- Para qualquer condição de agitação incidente:
 - Os maiores valores de alturas de onda ou índices de agitação acontecem na zona exterior e de entrada do porto e diminuem para o seu interior;
 - Ao longo do canal de navegação, esses valores vão, em geral, diminuindo;
 - No interior do porto, os valores são da mesma ordem de grandeza e de baixo valor. Em geral, não variam com a altura de onda incidente.
- Em geral, a proteção concedida pelo quebra-mar exterior no canal de navegação e na bacia portuária é menor para $T_p=10$ s e muito semelhante para $T_p=14$ s e 16 s;
- A subida do nível do mar:
 - Não afeta significativamente os resultados (altura de onda ou índices de agitação) no interior da bacia portuária;

- Contribui efetivamente para alterações dos resultados no exterior e zona de entrada do porto. Não foi, no entanto, possível obter uma correlação entre o nível do mar e a agitação na zona abrigada pelo quebra-mar, pois o comportamento difere consoante o período de pico e a altura de onda significativa incidente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à APDL a disponibilização dos dados necessários aos estudos, e em especial ao Eng.º Hugo Lopes pelo apoio dado ao trabalho.

REFERÊNCIAS

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.

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 - Ensaios tridimensionais de agitação marítima. Relatório 315/2017 - DHA/NPE, LNEC, abril.

Silva, M.A. (2018) Ensaios de agitação em condições de alterações climáticas no modelo físico do Porto de Leixões após o prolongamento do quebra-mar exterior. Relatório da prova de aptidão profissional do Curso Profissional de Técnico de Gestão do Ambiente. Escola Profissional de Ciências Geográficas, julho.