



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MARINHAS TROPICAIS –
PPGCMT

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MARCELO NUNES ALBUQUERQUE

MODELAGEM DE ONDAS APLICADA À REDUÇÃO DO SEU IMPACTO EM ZONAS
PORTUÁRIAS COSTEIRAS

FORTALEZA - CEARÁ

2021

MARCELO NUNES ALBUQUERQUE

MODELAGEM DE ONDAS APLICADA À REDUÇÃO DO SEU IMPACTO EM ZONAS
PORTUÁRIAS COSTEIRAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Marinhas Tropicais. Área de concentração: Ciência, tecnologia e gestão costeira e oceânica.

Orientador: Prof. Carlos Eduardo Peres
Teixeira, Ph.D.

FORTALEZA - CEARÁ

2021

MARCELO NUNES ALBUQUERQUE

MODELAGEM DE ONDAS APLICADA À REDUÇÃO DO SEU IMPACTO EM ZONAS
PORTUÁRIAS COSTEIRAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Marinhas Tropicais. Área de concentração: Ciência, tecnologia e gestão costeira e oceânica.

Orientador: Prof. Carlos Eduardo Peres Teixeira, Ph.D.

Aprovada em: 31/03/2021.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Paulo Henrique Gomes de Oliveira Sousa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Eduardo Siegle
Universidade de São Paulo (USP)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A311m Albuquerque, Marcelo Nunes.

Modelagem de ondas aplicada à redução do seu impacto em zonas portuárias costeiras / Marcelo Nunes Albuquerque. – 2021.
65 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

1. Modelagem de ondas. 2. SWAN. 3. XBEACH. 4. Wavewatch III. 5. Portos. I. Título.

CDD 551.46

AGRADECIMENTOS

Concluo essa importante etapa da minha vida com um sentimento enorme de gratidão. Ter vindo de uma área de formação distante tornou o desafio ainda mais motivador. A possibilidade de aprender e agregar conhecimentos em temas cuja aplicação é perceptível na minha área de atuação profissional também foi um fator motivacional de grande relevância.

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por ter me abençoado em todas as etapas deste projeto, desde a fase de seleção e ingresso no curso até o presente momento, sendo fundamental para que eu mantivesse minha fé, disciplina e energia, perseverando diante dos momentos de dificuldade que surgiram ao longo dos processos de aprendizagem e desenvolvimento da pesquisa.

Registro um agradecimento especial à minha família, em especial aos meus pais, José Alberto e Ana Claudia, pela educação que me deram e por toda a dedicação, amor, entrega e sacrifícios que sempre fizeram e fazem por mim. Sou e serei sempre eternamente grato a vocês.

Agradeço imensamente também à minha esposa Renata, por toda paciência, parceria, companheirismo e incentivo neste e nos outros projetos que decido encarar. Ter você ao meu lado todos os dias torna tudo mais fácil. Muito obrigado por tudo!

Tenho enorme gratidão também ao professor Carlos Eduardo Perez, que aceitou me orientar neste projeto, e esteve sempre presente com comentários e recomendações importantíssimas para a evolução do trabalho no rumo certo. Agradeço por todas as reuniões e por todos os momentos que você dedicou seu tempo e energia para contribuir com este trabalho.

Estendo minha gratidão também aos professores Eduardo Siegle e Paulo Henrique Sousa, que concordaram em compor a banca de avaliação e desde o momento da qualificação demonstraram atenção e interesse verdadeiro no sucesso da pesquisa, dedicando tempo e energia na revisão do trabalho e orientação de pontos passíveis de melhoria, e compartilhando críticas construtivas de fundamental importância para o enriquecimento da pesquisa.

Agradeço também aos meus colegas do Laboratório de Oceanografia Física, em especial ao Rafael, Giulian e Gustavo, que sempre foram muito prestativos e me ajudaram bastante, principalmente na fase inicial, com dicas e ensinamentos que fizeram toda a diferença nos processos de aprendizado e adaptação em relação ao uso de parte das ferramentas que precisei utilizar na pesquisa.

Agradeço aos professores do LABOMAR, com os quais tive o prazer de poder aprender mais sobre temas importantes ligados à oceanografia, e a toda a equipe que compõe esta instituição. É muito perceptível a cultura de parceria e cooperação que existe ali, fato este que só contribui para o enriquecimento dos trabalhos conduzidos pelos seus pesquisadores.

Expresso minha gratidão também à Companhia Docas do Ceará, por compartilhamento dos dados coletados nas proximidades do Porto do Mucuripe, assim como também à Marinha do Brasil, que disponibiliza gratuitamente os dados coletados pela boia do projeto PNBOIA localizada próximo à costa cearense. Tais conjuntos de dados foram de fundamental relevância para a obtenção dos resultados do presente trabalho. Registro também meu agradecimento ao

Victor Peixoto Nunes, pela ajuda na interpretação de detalhes importantes ligados aos dados coletados pela Companhia Docas do Ceará.

Por fim, gostaria de agradecer também a todos na empresa Ceará Marine Pilots, onde eu tenho a honra de trabalhar desde 2010, em especial aos práticos e ao Heverson Souza, por todo o apoio e incentivo no sentido de garantir que minhas pesquisas e aprendizados no mestrado fossem bem-sucedidos.

RESUMO

A presente pesquisa foi conduzida com o objetivo de estudar o padrão de propagação das ondas no Porto do Mucuripe e avaliar o impacto de obras nas condições ondulatórias dentro da bacia portuária. Para isso, uma solução aninhada de modelagem utilizando as ferramentas SWAN (espectral) e XBEACH NH (de resolução de fase) foi aplicada em conjunto com percepções empíricas de marítimos locais para o estudo do regime de ondas neste porto aberto, que está localizado na costa do nordeste brasileiro. Posteriormente, a solução foi aplicada para avaliar o impacto de obras recentes e potenciais projetos futuros sobre o padrão ondulatório na área abrigada do porto. Foram empregados dados paramétricos do *NOAA Wavewatch III* (NWW3) para forçar os contornos da grade menos refinada do SWAN. Para fins de validação, as saídas de altura significativa (H_s), período de pico (T_p) e direção média das ondas (MWD) foram comparadas com medições efetuadas por um ADCP fundeado nas proximidades do canal de acesso ao porto. A performance geral do modelo na reprodução dos parâmetros H_s , T_p e MWD foi considerada adequada, com obtenção de um índice *Skill* médio de 0.8, e correlação R média de 0.72. Com o modelo validado, 3 eventos de chegadas dispersivas baseados em medições da boia de águas profundas do PNBOIA, localizada próximo à costa cearense, foram selecionadas e simuladas no SWAN. Os dados espectrais gerados nas proximidades do Porto do Mucuripe foram utilizados como condição de contorno para o domínio do modelo XBEACH NH. Os resultados obtidos por ambas as ferramentas foram comparados entre si, e utilizados para analisar os padrões ondulatórios na área abrigada e nos diferentes berços do porto. As simulações com o SWAN podem propiciar uma ideia geral sobre o regime de ondas na área abrigada do porto, entretanto, mesmo para um porto aberto de baixa complexidade, sua aplicação demonstrou limitações na descrição dos detalhes do campo de ondas. Na análise das obras, verificou-se um aumento de H_s em parte da área abrigada como consequência da construção e dragagem do novo terminal de passageiros. Ademais, foi possível verificar que, dentre duas opções de variação propostas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Hidrográficas para o molhe do porto, uma demonstrou potencial de minorar as condições de agitação dentro da bacia, enquanto a outra apresentou potencial contrário, podendo contribuir com o aumento de H_s . O incremento das discussões com o emprego das visões empíricas dos marítimos foi considerado relevante, de modo que tal prática deveria ser encorajada como uma fonte adicional de informação sobre o regime de ondas em áreas portuárias. Para estudos de ondas em projetos portuários, é fundamental utilizar os dois tipos de ferramentas de modelagem (espectral e de resolução de fase), complementadas sempre que possível pelas percepções de marítimos locais, que por sua vez podem corroborar com conclusões distintas das proporcionadas pela análise dos resultados dos modelos.

Palavras-chave: Modelagem de ondas, SWAN, XBEACH, Wavewatch III, Portos.

ABSTRACT

This research was conducted with the objective of analyzing the waves' propagation patterns in the Mucuripe Harbor, and to assess the impact that changes in the port layout may have over the wave conditions within the sheltered region. A nesting approach including the phase-averaged and phase-resolving wave models SWAN and XBEACH NH was applied together with empirical insights obtained from a survey conducted with local seafarers for the assessment of the wave regime in this open coastal port located in the Brazilian northeastern coast. The modeling solution was further applied to evaluate the impact that recent and possible future engineering works in the port would have over the wave agitation within the harbor basin. The SWAN coarser domain was forced by NOAA Wavewatch III (NWW3) parametric data in its boundaries, and the significant wave height (Hs), peak period (Tp) and mean wave direction (MWD) outputs were compared with ADCP's field measurements for validation purposes. The overall performance of the model in representing Hs, Tp and MWD was appropriate, achieving an average index skill and correlation R of respectively 0.8 and 0.72. Three distinct swell events based on a nearby deep-water buoy's database were selected and simulated in SWAN, and the spectral outputs generated were applied to force the XBEACH NH domain. The results obtained by both models were used to analyze the wave patterns within the harbor's sheltered area and berths. The SWAN simulations may give a general idea about the wave regime within the port; however, even for an open harbor with relatively small complexity, it showed limitations in describing the details of the wave field. Furthermore, part of the harbor's sheltered region experienced an increase in Hs as a result of the construction and dredging projects of the new passengers' terminal. The two options suggested to change the breakwater's layout showed very different and opposite outcomes. The first one is potentially effective in providing shelter to the harbor's basin, while the second one may have a negative effect, increasing Hs in part of the port. The increment of the discussions with empirical insights was considered relevant, and that practice should be encouraged as an important source of additional information regarding the wave regime in ports. When studying the waves' characteristics for harbor projects, applying both types of wave models (phase-averaged and phase-resolving) is utmost, and it is advised to supplement their outputs whenever possible with the empirical perception of local seafarers, which might corroborate with conclusions that are not evident when relying only on the modeling results.

Keywords: Wave modeling, SWAN, XBEACH, Wavewatch III, Ports.

LISTA DE FIGURAS

<p>Figura 1: Área de Estudo – Ilustração do Porto do Mucuripe, com indicação de seus berços. Também estão identificados os molhes do Titan e do Titanzinho e a posição de fundeio do ADCP cujos dados foram utilizados para validação do modelo de ondas.....</p>	Pág. 19
<p>Figura 2 – Sugestões de variação no layout do molhe do Titan para redução da energia das ondas dentro da bacia portuária (INPH, 2013) (INPH, 2014).....</p>	Pág. 21
<p><i>Figure 1: A) Location of the study area, in the Ceará State, Brazilian Northeastern Coast. B) Indication of the three SWAN grids employed, with the identification of the PNBOIA buoy position, at the continental shelf break, and the ADCP used for validation purposes. C) Mucuripe Harbor, with indication of the XBEACH domain and the ADCP position.....</i></p>	Pág. 25
<p><i>Figure 2: Methodology overview.....</i></p>	Pág. 26
<p><i>Figure 3: A) Polar plot indicating the measured Hs (m) distributed over the wave directions for the period from 01/September/2018 to 29/October/2018 near the Mucuripe Harbor Fairway. B) Polar plot indicating the measured Hs (m) distributed over the wave directions for the period from 01/May/2019 to 31/May/2019.....</i></p>	Pág. 30
<p><i>Figure 4: A) Polar plot indicating the measured Tp (s) distributed over the wave directions for the period from 01/September/2018 to 29/October/2018 near the Mucuripe Harbor Fairway. B) Polar plot indicating the measured Tp (s) distributed over the wave directions for the period from 01/May/2019 to 31/May/2019.....</i></p>	Pág. 30
<p><i>Figure 5: Comparison between the ADCP’s measurements (red) and the modeled outputs (blue) for Hs (5.A), Tp (5.B) and MWD (5.C), during September and October 2018. The quantitative metrics are also used do assess the overall model performance.....</i></p>	Pág. 31
<p><i>Figure 6: Scatter plots showing observed versus modeled values for Hs (6.A), Tp (6.B), and MWD (6.C). Data from September and October 2018.....</i></p>	Pág. 32
<p><i>Figure 7: Comparison between the ADCP’s measurements (red) and the modeled outputs (blue) for Hs (7.A), Tp (7.B) and MWD (7.C) during May 2019 (left) and scatter plots showing observed versus modeled values for Hs (7.D), Tp (7.E), and MWD (7.F) in the same period (right). The quantitative metrics are also used do assess the overall model performance.....</i></p>	Pág. 32
<p><i>Figure 8: Results obtained with the application of a survey with local maritime pilots and tugboat captains. A) Designation of months that use to be mostly affected by swell events. B) Classification of harbor berths, detailing the most impacted berths during the occurrence of swell events. C) Determination of the angles of attack that tend to cause more problems to ship operations. D) Mostly affected ships based on cargo condition. E) Mostly affected ships based on ship size. F) Moment during the tidal cycle when the waves’ conditions tend to become more severe.....</i></p>	Pág. 35

Figure 9: A) Mucuripe Harbor's bathymetry and berths. B) Sea level variation in Mucuripe Harbor at an arbitrary moment, extracted from the C-2 scenario simulation on XBEACH NH. To highlight the variations within the basin, the water levels are bounded by the limits -1m and 1m (dark blue and dark red points may indicate, respectively, places where the water level was below -1m or above 1m)..... Pág. 36

Figure 10: Representation of H_s (m) distribution within Mucuripe harbor for the three cases described in the Table 3, using the wave models SWAN and XBEACH NH. Panels A, B and C show, respectively, the SWAN wave heights for cases 1, 2 and 3. Panels D, E and F show XBEACH NH wave heights for the cases 1, 2 and 3, respectively. The panels G, H and I show the differences between SWAN and XBEACH NH H_s for cases 1, 2 and 3, respectively. The positive points indicate that the SWAN output is larger, and the negative points indicate that the XBEACH NH points are greater..... Pág. 37

Figure 11: H_s simulated by SWAN (solid lines) and XBEACH NH (dashed lines) along the harbor's quay berths, considering the 3 cases described in Table 3..... Pág. 38

Figura 3: Batimetria do Porto do Mucuripe, em cenário prévio à construção do terminal de passageiros..... Pág. 43

Figura 4: Diferença de H_s (m) entre o cenário atual (com o berço 106) e o cenário prévio à construção e dragagem do referido terminal. Os valores positivos indicam pontos nos quais H_s é maior no cenário atual, e pontos negativos indicam pontos nos quais H_s é maior no cenário passado..... Pág. 44

Figura 5: Representação batimétrica do Porto do Mucuripe, considerando 2 variações possíveis para o molhe do Titan. Figura W.A: ilustração de alternativa proposta pelo INPH em 2013, com ampliação de cerca de 400m a partir da ponta do molhe do Titan, na direção sudoeste. Figura W.B: ilustração de alternativa proposta pelo INPH em 2014, com inclusão de um molhe interno com cerca de 350m, nas proximidades do berço 106..... Pág. 45

Figura 6: Diferença de H_s (m) entre o cenário atual e a alternativa de variação do molhe do Titan proposta pelo INPH em 2013. Os valores positivos indicam pontos nos quais H_s é maior no cenário com a inclusão do molhe, e pontos negativos indicam pontos nos quais H_s é maior no cenário atual..... Pág. 46

Figura 7: Diferença de H_s (m) entre o cenário atual e a alternativa de variação do molhe do Titan proposta pelo INPH em 2014. Os valores positivos indicam pontos nos quais H_s é maior no cenário com a inclusão do molhe, e pontos negativos indicam pontos nos quais H_s é maior no cenário atual..... Pág. 47

Figura 8.A: Variação do nível do mar em um dado momento aleatório, considerando a primeira alternativa de variação do molhe do Titan. Figura 8.B: Variação do nível do mar em um dado momento aleatório, considerando a segunda alternativa de variação do molhe do Titan..... Pág. 48

Figura 9: Defensas pneumáticas..... Pág. 49

LISTA DE TABELAS

<i>Table 1: Grid dimensions and resolutions</i>	Pág. 27
<i>Table 2: SWAN model set-up</i>	Pág. 28
<i>Table 3: wave conditions selected from the PNBOIA database to simulate the wave regime within the harbor</i>	Pág. 35

LISTA DE ABREVIATURAS

ADCP	.....	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
BNDO	.....	Banco Nacional de Dados Oceanográficos
CHM	.....	Centro de Hidrografia da Marinha
DHN	.....	Diretoria de Hidrografia e Navegação
GFS	.....	<i>Global Forecast System</i>
Hs	.....	Altura significativa da onda
INPH	.....	Instituto Nacional de Pesquisas Hidrográficas
ITCZ	.....	<i>Intertropical Convergence Zone</i>
JONSWAP	.....	<i>Joint North Sea Wave Project</i>
MAE	.....	<i>Mean Absolute Error</i>
MWD	.....	Direção média das ondas
NCEP	.....	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NH	.....	<i>Non-hydrostatic</i>
NOAA	.....	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NWW3	.....	<i>NOAA Wavewatch III</i>
PNBOIA	.....	Programa Nacional de Boias
RMSE	.....	<i>Root-Mean Square Error</i>
SWAN	.....	<i>Simulating Waves Nearshore</i>
Tp	.....	Período de pico da onda
WAM	.....	<i>Wave Modelling</i>
WMO	.....	<i>World Meteorological Organization</i>
ZCIT	.....	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	Pág. 14
1.1 Contexto geral.....	Pág. 14
1.2 Objetivos.....	Pág. 17
1.2.1 Objetivo geral.....	Pág. 17
1.2.2 Objetivos específicos.....	Pág. 17
1.3 Justificativa.....	Pág. 18
1.4 Hipóteses.....	Pág. 18
1.5 Material e métodos.....	Pág. 19
1.5.1 Área de estudo.....	Pág. 19
1.5.2 Métodos.....	Pág. 20
2 ASSESSMENT OF A COASTAL OPEN HARBOR'S WAVE REGIME DURING THE OCCURRENCE OF SWELL EVENTS USING WAVE MODELING AND EMPIRICAL INSIGHTS FROM LOCAL SEAFARERS.....	Pág. 22
1 Introduction.....	Pág. 22
2 Study area.....	Pág. 24
3 Methods.....	Pág. 25
3.1 Local wave data.....	Pág. 26
3.2 Swan model.....	Pág. 27
3.3 XBEACH model.....	Pág. 29
3.4 Survey applied with local seafarers.....	Pág. 30
4 Results and Discussion.....	Pág. 30
4.1 Observed data.....	Pág. 30
4.2 SWAN model results.....	Pág. 31
4.3 Mucuripe Harbor's wave regime.....	Pág. 34
4.3.1 Survey results.....	Pág. 34
4.3.2 Models' results within the harbor basin.....	Pág. 35
5 Summary and Conclusions.....	Pág. 39
3 SOLUÇÃO DE MODELAGEM APLICADA A DIFERENTES CENÁRIOS.....	Pág. 43
3.1 Cenário passado.....	Pág. 43
3.2 Potenciais cenários futuros.....	Pág. 45
3.3 Medidas complementares com potencial paliativo.....	Pág. 48
4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	Pág. 51
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	Pág. 55
APÊNDICES.....	Pág. 60
APÊNDICE A - SET-UP SWAN.....	Pág. 61
APÊNDICE B - SET-UP XBEACH NH.....	Pág. 62
APÊNDICE C - PESQUISA APLICADA JUNTO AOS MARÍTIMOS LOCAIS...	Pág. 64

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto Geral

A superfície de qualquer corpo d'água é geralmente caracterizada pela presença, em maior ou menor grau, de movimentos ondulatórios. Tais oscilações, por sua vez, consistem no deslocamento de energia pela superfície de interação entre o meio líquido e a atmosfera, e podem ser provenientes da combinação de diferentes forças geradoras e restauradoras. Nos oceanos, as chamadas ondas de gravidade, que resultam da interação entre a perturbação causada pelo efeito do vento e a força de restauração provocada pela ação da gravidade, são as mais comumente observadas, tendo influência sobre uma grande variedade de processos naturais, tais como mecanismos de dinâmica sedimentar, e sendo de significativa relevância para obras de engenharia costeira, como a construção de um espigão ou o planejamento de um porto (ALFREDINI, 2005; GARRISON, 2012).

Dessa forma, a realização de um gerenciamento costeiro eficaz depende, dentre outros fatores, de uma adequada compreensão sobre o clima de ondas local e suas variações sazonais. A caracterização do regime de ondas de uma determinada região pode ser obtida por diferentes meios, tais como pela análise de séries temporais obtidas com sensores instalados em posições estratégicas; aplicação de modelos computacionais ou físicos; ou por soluções analíticas (THOMAS e DWARAKISH, 2015). O método mais eficaz e confiável consiste naturalmente na utilização de dados medidos *in situ*, entretanto, a disponibilidade de dados de ondas observados é ainda, de modo geral, escassa em boa parte do Brasil. Apesar de que o ideal seria que todos os portos brasileiros dispusessem de sensores meteorológicos e oceanográficos medindo dados de forma contínua, isto ainda não é uma realidade para boa parte dos portos nacionais. Diante destas restrições, muitos estudos sobre climatologia de ondas são conduzidos com base em dados provenientes de modelos globais de larga escala (PIANCA *et al.*, 2010), que vêm sendo continuamente aprimorados no sentido de propiciar resultados mais acurados (WMO, 2018).

O tema modelagem de ondas é bastante vasto. Além de englobar uma série de áreas de conhecimento distintas, tais como a oceanografia física e a estatística, pode ser aplicável em uma grande diversidade de situações, tais como projetos e obras costeiras, previsões para movimentações portuárias e operações em alto mar, estudos morfodinâmicos, entre outros (THOMAS e DWARAKISH, 2015), oferecendo resultados importantes para complementar os dados observados disponíveis.

Tais ferramentas tiveram uma grande evolução ao longo do tempo. Os modelos de primeira geração baseavam-se em dados simplificados de vento, desconsiderando efeitos dominantes de dissipação e interação não-linear das ondas. Os modelos de segunda geração passaram a considerar informações variáveis de vento, além do efeito simplificado de interações não-lineares das ondas. Neles, a superfície do mar passou a ser considerada como a soma de uma grande quantidade de componentes de ondas, de diferentes frequências. A continuidade dos avanços de conhecimento em relação aos vários efeitos ligados à modelagem de ondas culminou no surgimento dos modelos de terceira geração, os quais se baseiam na equação do balanço de energia para descrever a evolução espacial e temporal do espectro das ondas ao longo do domínio considerado. Tais modelos vêm sendo continuamente aprimorados, pela adição ou ajuste de parâmetros físicos e numéricos (MANDAL e PRABAHARAN, 2010). Em paralelo, os avanços computacionais vêm propiciando maior capacidade de processamento, o que torna o processo de modelagem mais eficaz e viabiliza a utilização dos modelos em áreas maiores, ou com resoluções mais precisas.

Os modelos de ondas empregados em escalas globais, assim como os de escala costeira, são normalmente do tipo espectral e Euleriano. O movimento aleatório da superfície do mar resulta da interação de uma grande quantidade de componentes harmônicas de ondas, em diferentes frequências e direções, sendo a informação de fase das ondas desconsiderada (*phase-averaged*), o que é aceitável nesses contextos mais amplos. As ondas são caracterizadas de forma estatística com base em seu espectro de energia, por meio do qual se pode verificar a distribuição de energia pelas diferentes frequências e direções, propiciando uma visualização mais completa das condições existentes, assim como a identificação das frequências e direções dominantes (com maior energia). Os principais parâmetros (e.g. altura, período, etc.) que caracterizam as ondas em determinada posição e momento são derivados do seu espectro. Por meio da equação do balanço de energia, são consideradas as taxas de variação de energia ao longo do tempo e dos espaços geográfico e espectral (frequências e direções) em cada ponto do domínio considerado. A equação considera ainda o efeito de fontes (adição de energia por interação com a atmosfera) e sumidouros (dissipação de energia por uma série de fatores, como arrebentações e atrito com o fundo), além das interações não-lineares das ondas, que resultam na transferência de energia entre diferentes faixas de frequência do espectro (HOLTHUIJSEN, 2007).

Em águas profundas e escalas globais, as ferramentas de modelagem de ondas mais aplicadas são o NWW3 (*NOAA Wavewatch*) e o WAM (*Wave Modelling*). Apesar de apresentarem uma boa performance em águas profundas, tais modelos têm limitações em regiões costeiras. Por cobrirem áreas muito extensas, geralmente empregam grades com baixa resolução, dificultando a adequada representação do perfil batimétrico e de pequenos detalhes contidos ao longo da linha de costa. Como consequência, os resultados passam a não ser confiáveis próximo ao litoral. Para contornar tais óbices e proporcionar uma transformação eficaz para escalas regionais, é muito comum a utilização do modelo de código aberto SWAN (*Simulating Waves Nearshore*), empregando grades aninhadas de maior resolução, que por sua vez pode ser forçado por dados paramétricos ou espectrais provenientes de algum modelo global (BOOJI *et al.*, 1999; The SWAN Team, 2019; WMO, 2018).

Em áreas portuárias, por sua vez, outros processos ganham relevância, como a difração das ondas em torno das extremidades de obstáculos, e sua reflexão quando incidem em estruturas portuárias e demais obstruções. Neste contexto, a informação de fase das ondas passa a ser de grande relevância, principalmente quando avaliando pontos de interação construtiva e destrutiva, e possíveis padrões de ressonância e oscilação. Dessa forma, as ferramentas espectrais geralmente apresentam restrições e tendem a não reproduzir corretamente o padrão de ondas dentro de áreas abrigadas, como bacias portuárias (RUSU e SOARES, 2011; VAN MIERLO, 2014; WONG, 2016). O SWAN não é capaz de reproduzir corretamente os efeitos de reflexão em ambos os lados de um quebra-mar, e pode apresentar limitações quando lidando com o efeito da difração em frente a estruturas reflexivas (BOSHEK, 2009; THE SWAN TEAM, 2019). Ademais, somado ao fato de que a informação de fase das ondas é desconsiderada, as ondas não são resolvidas em sua escala individual, e o efeito das ondas de infragravidade, que podem ter impacto importante em áreas portuárias, não é considerado nas simulações (VAN MIERLO, 2014).

Apesar das considerações feitas, o SWAN pode ser uma ferramenta de grande relevância para prever as condições de ondas na entrada e no entorno de portos costeiros, como aplicado por Rusu e Soares (2011) em portos portugueses, assim como também pode ser utilizado em uma solução em cadeia com outros modelos, tendo papel importante na transformação de ondas provenientes de águas profundas para regiões costeiras, e na geração de condições aplicáveis como forçantes de contorno para domínios menores que compreendam a área portuária desejada. Em tais domínios menores, que geralmente apresentam características mais

complexas, a informação de fase das ondas passa a ser de grande relevância. Portanto, a aplicação de um outro tipo de ferramenta, os modelos de resolução de fase (*phase-resolving*), é geralmente preferível (RUSU e SOARES, 2011; VAN VLEDDER e ZIJLEMA, 2014; WONG, 2016).

Os modelos de resolução de fase também são do tipo Euleriano, mas demandam uma resolução espacial e temporal muito maior que a geralmente aplicada com os modelos espectrais. Como consequência, o esforço computacional é consideravelmente ampliado e a extensão dos domínios tende a ser reduzida. Em tais ferramentas, os conceitos de espectro de ondas e equação de balanço de energia são deixados de lado. Nelas, a reprodução da elevação da superfície do mar é feita de forma explícita, considerando a propagação individual de ondas curtas e ondas longas. Dessa forma, tendem a ser muito mais precisas quando avaliando a penetração de ondas em áreas complexas, como bacias portuárias, reproduzindo de forma mais fidedigna os efeitos de difração e reflexão, e proporcionando maior acurácia na identificação de pontos de interação construtiva e eventuais padrões de oscilação. Tais ferramentas podem ser ainda classificadas segundo 3 categorias principais: modelos de inclinação suave (*mild-slope*), como o PHAROS e o MIKE-21 EMS; modelos *Boussinesq*, como o TRITON, MIKE-21 BW, BOUSS-2D, FUNWAVE e o OVBM; e modelos não-hidrostáticos, como o SWASH e o XBEACH NH (BABANIN *et al.*, 2017; ROELVINK *et al.*, 2015; VAN VLEDDER e ZIJLEMA, 2014; WONG, 2016).

O modelo XBEACH, que assim como o SWAN também é uma ferramenta de código aberto, foi concebido inicialmente para ser aplicado em estudos envolvendo processos hidrodinâmicos e morfodinâmicos de costas arenosas, em domínios espaciais e temporais relativamente reduzidos. Desde então, o modelo vem sendo aplicado também para estudos em outros contextos. A ferramenta dispõe de 3 modos de operação: estacionário; *surfbeat*; e não hidrostático. Este último, conforme mencionado, permite que a ferramenta opere como um modelo de resolução de fase (ROELVINK *et al.*, 2015). Wong (2016) obteve bons resultados quando testou sua aplicabilidade em áreas portuárias, comparando os resultados obtidos pelo modelo com as medições de um modelo físico de escala reduzida.

Objeto desta pesquisa, o Porto do Mucuripe, cuja construção se iniciou no ano de 1939, tem suas instalações abrigadas pelo molhe do Titan (ilustrado na Figura 1), com comprimento de 1.910 m e largura média de 7 m. É caracterizado por uma estrutura do tipo enrocamento, composta de pedras e rochas de natureza granítica. (COMPANHIA DOCAS DO CEARÁ, 2016). Tal estrutura foi concebida com os propósitos principais de reduzir o impacto das ondulações sobre a bacia e berços do porto, assim como limitar o assoreamento da área portuária, resultante do transporte litorâneo de sedimentos, que na região se dá de leste para oeste, obedecendo a direção predominante das ondas. Após sua construção, verificou-se um padrão de difração em sua extremidade, propiciando a entrada de ondas difratadas na bacia de evolução do porto (PITOMBEIRA, 1976).

Apesar de oferecer proteção adequada para as ondas locais dominantes, que costumam atingir a costa provenientes de direções contidas no quadrante NE-SE, o molhe do Titan pode ser ineficaz na função de prover abrigo à bacia e berços do porto durante a ocorrência de chegadas dispersivas com direções próximas de N. Estudos locais de outros autores evidenciam que tais chegadas dispersivas ocorrem de forma recorrente ao longo do ano na região (AQUINO, 2016; COSTA, 2019; MAIA, 1998; VIEIRA, 2016), com tendência a provocar condições ondulatórias adversas dentro do porto.

Tais circunstâncias desfavoráveis costumam resultar em avarias para navios e estruturas portuárias, além de impactar na duração e segurança das operações de carga e descarga. Por

vezes, navios têm parte dos seus cabos partidos durante a estadia e, em condições mais extremas, precisam desatracar de emergência. Ademais, as defensas são submetidas a maior esforço e desgaste, reduzindo sua vida útil e elevando os custos de manutenção para o porto.

Posto isto, pretende-se avaliar o padrão ondulatório presente no porto do Mucuripe por meio de modelagem numérica, com foco principalmente nos momentos de ocorrência de chegadas dispersivas proveniente do Atlântico Norte. A solução compreende a preparação e aplicação de um conjunto de modelos em cadeia, considerando os dados de águas profundas provenientes das simulações do NWW3, que foram então convertidos para a região costeira por meio do SWAN, que por sua vez forneceu condições de ondas para aplicação como forçantes de contorno em domínio do XBEACH NH (não hidrostático) que compreende o Porto do Mucuripe.

Apesar do entendimento já mencionado de que modelos espectrais têm várias restrições quando aplicados em áreas portuárias, tais ferramentas acabam sendo eventualmente utilizadas em projetos portuários (DELTARES, 2014; DHI, 2017; INPH, 2014). Considerando que o Mucuripe é um porto costeiro aberto, de baixa complexidade geográfica, os resultados obtidos por ambos os modelos SWAN e XBEACH NH foram comparados para discussão das limitações do modelo espectral na região abrigada de portos costeiros abertos.

Para complementar os resultados obtidos por meio dos recursos de modelagem, foi aplicado um sucinto questionário objetivo com práticos e mestres de rebocadores locais, visando adicionar suas percepções empíricas sobre as características das ondas e seus efeitos sobre as operações portuárias no Mucuripe.

Por fim, as ferramentas de modelagem foram utilizadas para simular diferentes cenários e o impacto que teriam sobre as condições ondulatórias na bacia e berços do Porto do Mucuripe. Foram considerados 3 cenários, sendo 1 passado e 2 referentes a possibilidades futuras. No cenário pretérito, a bacia do porto será simulada sem o Terminal de Passageiros (berço 106). Para as possibilidades futuras, foram simuladas duas variações distintas previamente recomendadas pelo INPH (Instituto Nacional de Pesquisas Hidrográficas) para o layout do molhe do Titan.

O conteúdo da presente pesquisa foi dividido em duas partes principais. A primeira está apresentada no Capítulo 2, em formato de artigo científico, e compreende a quase totalidade do trabalho, exceto pela aplicação da solução de modelagem para variações no cenário do porto, a qual não faz parte do escopo do artigo e, portanto, está contida no Capítulo 3.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Estudar o padrão de propagação das ondas no Porto do Mucuripe e avaliar o impacto de obras portuárias sobre as condições ondulatórias dentro do porto.

1.2.2 Objetivos específicos

- i. Analisar as características das ondas nos diferentes berços do Porto do Mucuripe.

- ii. Identificar pontos de interação construtiva na região abrigada do porto, que possam ter consequente potencial negativo sobre as operações portuárias.
- iii. Avaliar a aplicabilidade do modelo SWAN desenvolvido para a área de estudo como ferramenta para providenciar previsões locais de ondas de curto-prazo, com base em prognósticos do modelo global NWW3.
- iv. Comparar os resultados obtidos por um modelo espectral e um modelo de resolução de fase em um porto costeiro aberto, com layout de baixa complexidade.
- v. Avaliar os impactos que a construção e dragagem do terminal de passageiros (berço 106) tiveram no padrão ondulatório do Porto do Mucuripe.
- vi. Avaliar a eficácia e limitações de variações no layout do molhe do Titan como possíveis medidas mitigadoras para redução dos problemas provocados pelas chegadas dispersivas dentro da bacia do porto.

1.3 Justificativa

Um entendimento mais aguçado sobre o clima de ondas local e suas implicações no padrão ondulatório do porto é de grande relevância para uma melhor compreensão sobre os efeitos que causam nos navios, assim como para embasar investigações sobre possíveis medidas mitigadoras que possam contribuir para uma maior dissipação da energia das ondas.

O porto do Mucuripe não conta com nenhum sensor oceanográfico medindo dados de ondas, tampouco dispõe de sistema de previsão para alertar seus usuários sobre a possibilidade de degradação do estado do mar dentro da área portuária. Além disso, não há planos de contingência com medidas a serem tomadas em tais cenários adversos.

Neste contexto, o emprego de ferramentas de modelagem numérica se apresenta como uma alternativa poderosa e de custo relativamente baixo para implementação. A possibilidade de prever condições adversas com antecedência pode ser muito importante no processo de planejamento de operações mais delicadas, reduzindo os riscos de avarias. Ademais, diferentes opções de layout para o porto, tais como mudanças no molhe do Titan ou aplicação de variações batimétricas, podem ser testadas sob diversas condições ambientais distintas, e seus resultados posteriormente comparados entre si para uma avaliação da eficácia das diferentes soluções propostas na redução da energia das ondas dentro da bacia portuária.

É fundamental destacar que, além dos impactos diretos causados nos navios e instalações portuárias, o efeito das ondas pode culminar em acidentes com potencial danoso ao meio ambiente e à vida humana.

Por fim, tendo em vista a grande utilização de modelos espectrais, inclusive em projetos portuários, é de grande relevância que seus resultados possam continuar sendo avaliados em diferentes contextos, de modo a contribuir com as discussões e entendimentos sobre suas limitações neste tipo de aplicação.

1.4 Hipóteses

O presente estudo considerou as seguintes hipóteses:

- i. Tendo em vista que o Mucuripe é um porto costeiro aberto, de baixa complexidade geométrica, espera-se que modelos de onda espectrais possam entregar resultados eficazes dentro da região abrigada.

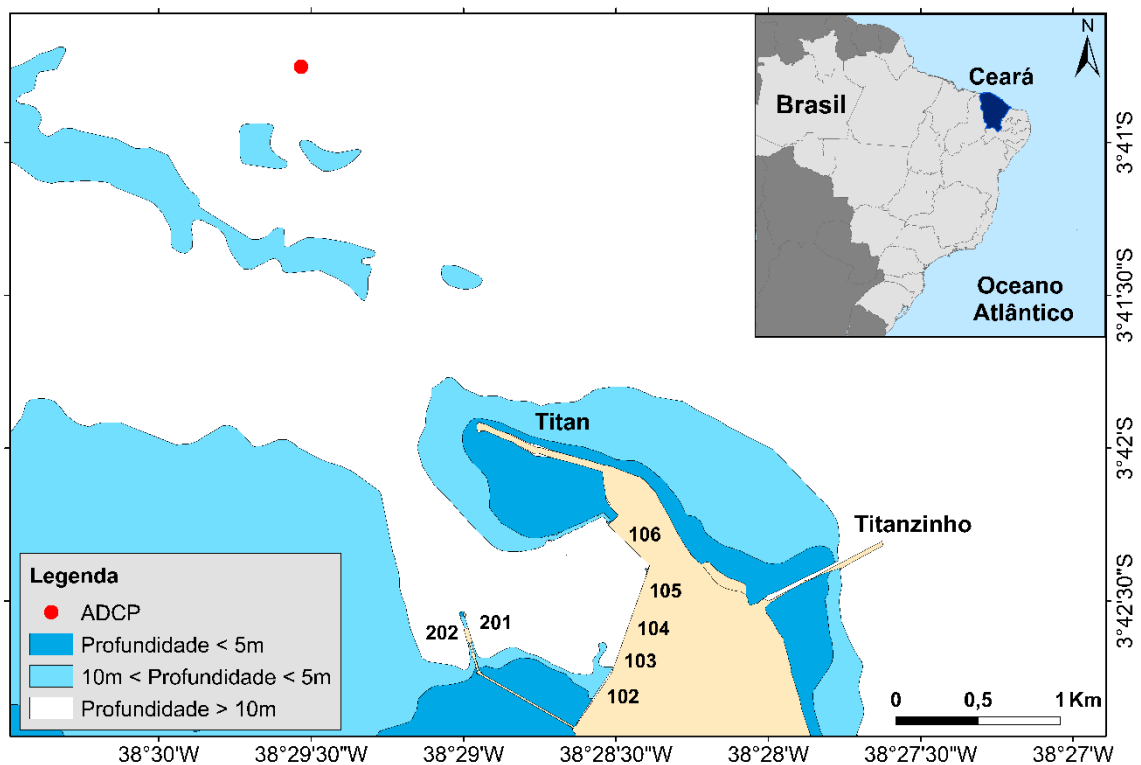
- ii. As discussões dos resultados obtidos por meio de ferramentas de modelagem de ondas podem ser enriquecidas quando adicionando considerações empíricas de marítimos locais.
- iii. As variações no layout do Titan propostas pelo INPH podem ser suficientes para minorar o impacto das ondas na bacia de manobras e cais do Porto do Mucuripe.

1.5 Materiais e métodos

1.5.1 Área de estudo

O presente estudo foi efetuado na região costeira de Fortaleza (Ceará – Brasil), com foco principalmente na área do Porto marítimo artificial situado na enseada do Mucuripe. O Porto do Mucuripe é constituído de um cais comercial contendo 4 berços de atracação e 1.116 m de extensão (102, 103, 104 e 105), com profundidades variando de 7 a 13 m; um terminal multimodal com 350 m de extensão e 13 m de profundidade (106); e um píer petroleiro composto por plataforma de operação de 90 m, possuindo 2 berços de atracação (201 e 202), ambos com 13 m de profundidade. O canal de acesso ao porto tem formato retilíneo e está disposto no sentido norte-sul, com aproximadamente 3.500 m de comprimento e 160 m de largura. Sua bacia de manobras, que é abrigada pelo molhe do Titan, tem 610 m de largura e profundidades variando entre 13,5 e 14 m (BRASIL, 2014; COMPANHIA DOCAS DO CEARÁ, 2016). A figura 1, disposta a seguir, ilustra a área do porto, indicando seus berços e os molhes do Titan e do Titanzinho. Este último foi construído com o intuito de reduzir o volume de sedimentos provenientes da costa leste que atingem o canal de acesso e bacia portuária.

Figura 1: Área de Estudo – Ilustração do Porto do Mucuripe, com indicação de seus berços. Também estão identificados os molhes do Titan e do Titanzinho e a posição de fundeio do ADCP cujos dados foram utilizados para validação do modelo de ondas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O perfil de cargas movimentadas no porto é bastante diversificado. Ao longo do cais comercial e terminal multimodal, são operados graneis sólidos vegetais, minerais e químicos, tais como trigo, clínquer, fertilizantes e minérios; cargas containerizadas; carga geral solta; cargas de projeto; entre outros. Em determinados meses do ano, o porto é escala para navios de passageiros, que seguem do hemisfério norte para a temporada de cruzeiros no hemisfério sul. Eventualmente também passam por suas instalações barcos de apoio para plataformas; embarcações de pesquisa; e embarcações de Marinha de Guerra. Ademais, os berços do cais também recebem navios que atracam apenas para abastecimento, sem operação de carga. No píer, o berço 201 é normalmente destinado à operação exclusiva de GLP (Gás liquefeito de petróleo), ao passo que no berço 202 são operados geralmente graneis líquidos, tais como gasolina, óleo diesel, querosene de aviação, álcool, petróleo bruto e óleo vegetal (COMPANHIA DOCAS DO CEARÁ, 2016).

A região é caracterizada por marés semidiurnas, que variam em torno de um nível médio de 1,6 m em relação ao Nível de Redução das cartas náuticas, com amplitude média de 2,5 m durante os períodos de sizíguas e 1,3 m durante os períodos de quadratura. Por sua vez, os ventos locais predominantes são verificados principalmente entre as direções NE a SE. Quando mais intensos, podem afetar de forma significativa as movimentações de navios e comprometer a amarração de embarcações atracadas (DHN, 2013). Por fim, no que diz respeito à influência das ondulações dentro da área portuária, o layout mais aberto do Porto do Mucuripe implica em duas características antagônicas: por um lado, a região abrigada pelo molhe do Titan está menos suscetível ao desenvolvimento de oscilações atreladas à ocorrência de ressonância, entretanto, a bacia de manobras e os berços do porto estão mais expostos à ação de ondas dispersivas com direções próximas a norte, que por sua vez difratam na ponta do Titan e atingem a zona de sombra com mais energia, provocando um aumento no nível de agitação (COMPANHIA DOCAS DO CEARÁ, 2016). Os detalhes sobre o clima de ondas local são abordados no conteúdo do artigo científico, contido no capítulo 2 do presente trabalho.

1.5.2 Métodos

A pesquisa foi conduzida com uso dos modelos de ondas SWAN e XBEACH (em seu modo não-hidrostático), e as discussões foram complementadas pelos resultados obtidos com uma pesquisa objetiva aplicada junto a marítimos (Práticos e Mestres de Rebocadores) que trabalham no Porto do Mucuripe. A figura 2 do artigo científico contém um fluxograma ilustrando os processos que compõem a metodologia do presente trabalho.

A solução em cadeia de modelagem numérica foi aplicada para transformação dos dados de águas profundas para águas mais rasas, e posteriormente para a área portuária do Mucuripe. Inicialmente, o software SWAN foi empregado, por meio do módulo WAVE do Delft3D, para elaboração de um modelo costeiro de ondas para a região, composto por um conjunto de 3 grades aninhadas, de modo a garantir uma boa resolução nas proximidades do porto e reduzir o esforço computacional. A solução foi forçada por dados paramétricos de ondas do modelo global NWW3, e validada utilizando dados medidos pelo ADCP indicado na Figura 1, posicionado próximo ao canal do porto, em local com profundidade de aproximadamente 13m. O equipamento fez parte de projeto de monitoramento ambiental contratado pela Companhia Docas do Ceará. As observações compreendem os meses de setembro e outubro de 2018, e maio de 2019. Tendo em vista as variações sazonais inerentes ao clima de ondas local, o processo de validação foi dividido em 2 períodos distintos, sendo o primeiro referente aos meses de setembro e outubro, e o segundo referente ao mês de maio.

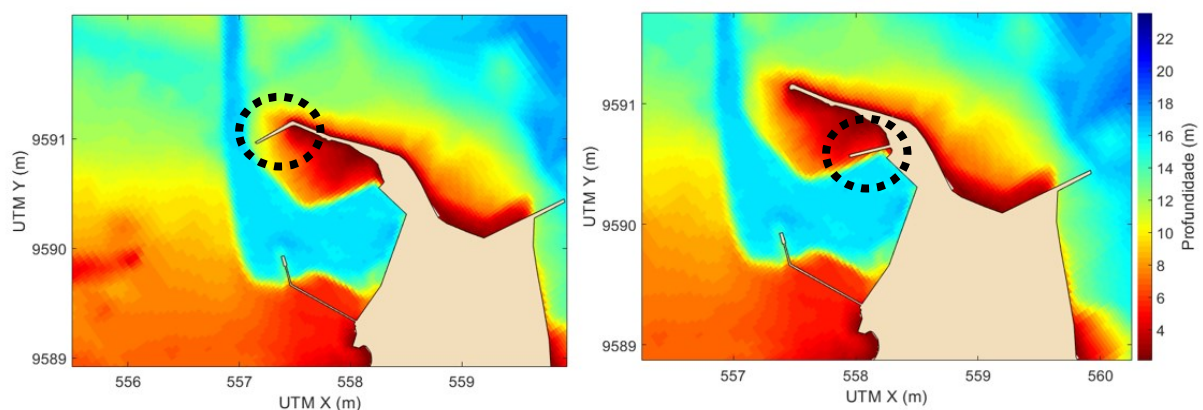
Concluída a etapa de validação, 3 cenários de chegadas dispersivas medidos pela boia do projeto PNBOIA no primeiro semestre de 2017, e que tem potencial para gerar condições adversas de agitação dentro da bacia do porto, foram selecionados e utilizados como condição de contorno para o modelo. Tais eventos foram selecionados com base na direção das ondas, que, na região, quando provenientes do quadrante norte, podem culminar na entrada de mais energia dentro da área abrigada, em momentos com períodos mais longos e alturas de ondas elevadas. As saídas espectrais da grade mais refinada utilizada no SWAN foram aplicadas como input para a simulação no modelo de resolução de fase XBEACH Não-Hidrostático, que, dentre outros fatores, por não desconsiderar a informação de fase das ondas e apresentar melhor capacidade para reproduzir efeitos como a difração das ondas na ponta do molhe do Titan e sua reflexão pelos berços do porto, tende a ser mais preciso em áreas portuárias do que o SWAN. As saídas do modelo XBEACH foram posteriormente comparadas com as obtidas pelo SWAN, e utilizadas para avaliação do padrão ondulatório dentro da área abrigada pelo molhe do Titan. Conforme previamente indicado, como medida de validação adicional, as discussões de resultados também levaram em conta o ponto de vista de marítimos locais sobre as características das ondas no porto, e sobre seu impacto em relação às operações dos navios.

As configurações utilizadas em ambos os modelos, assim como as perguntas incluídas na pesquisa aplicada junto aos práticos e mestres de rebocadores, estão contidas como apêndice do presente trabalho. Maiores detalhes sobre a metodologia aplicada no presente trabalho, assim como sobre as ferramentas de modelagem empregadas, são apresentados no capítulo 2.

Por fim, o modelo foi empregado para investigar o efeito que variações no layout do porto (e.g. mudanças na disposição do molhe do Titan) teriam sobre a energia das ondas dentro da bacia portuária. Este processo compreendeu a simulação do cenário anterior à construção e dragagem do Terminal de Passageiros (berço 106), assim como a simulação de duas sugestões de variação no layout do molhe do Titan, propostas pelo INPH à Companhia Docas do Ceará em 2013 e 2014 (conforme ilustrado na Figura 2). Nesta fase, foram considerados os resultados obtidos pela aplicação do modelo XBEACH em seu modo não-hidrostático, por ser mais apropriado para áreas portuárias.

Os dados de profundidade empregados nos modelos foram baseados em dados de cartas batimétricas aprovadas pelo CHM (em 2018, na área do terminal de passageiros, e 2013, no restante da área portuária), dados obtidos em levantamento expedito (2018) não oficial, e informações disponíveis nas cartas náuticas 701, 710 e 21800 da Marinha do Brasil. Para a grade menos refinada, a batimetria foi derivada da base de dados ETOPO1, com 1 minuto de resolução, disponibilizada pelo Centro Nacional de Dados Geofísicos da NOAA.

Figura 2 – Sugestões de variação no layout do molhe do Titan para redução da energia das ondas dentro da bacia portuária (INPH, 2013) (INPH, 2014).



Fonte: Adaptado de INPH (2013, 2014)

Wave modeling applied to the assessment of swell events on a coastal open harbor

Abstract

This research was conducted with the objective of analyzing the waves' propagation patterns within an open coastal harbor, using wave modelling and empirical insights from local seafarers. The phase-averaged and phase-resolving wave models SWAN and XBEACH NH were applied together with empirical insights obtained from a survey conducted with local seafarers for the assessment of the wave regime in Mucuripe Harbor, an open coastal port located in the Brazilian northeastern coast. The SWAN coarser domain was forced by NOAA Wavewatch III (NWW3) parametric data, and significant wave height (H_s), peak period (T_p) and mean wave direction (MWD) outputs were compared with ADCP's field measurements for validation purposes. The overall performance of the model in representing H_s , T_p and MWD was adequate, achieving an average index skill and correlation R of respectively 0.8 and 0.72. Three distinct swell events based on a nearby deep-water buoy's database were selected and simulated in SWAN, and the spectral outputs generated were applied to force the XBEACH NH domain. The results obtained by both models were used to analyze the wave patterns and identify points with higher wave heights that may be a result of constructive interaction. The SWAN simulations may give a general idea about the wave regime within the port; however, even for an open harbor with relatively small complexity, it showed limitations in describing the details of the wave field. The increment of the discussions with empirical insights was considered relevant as an extra source of validation for the results, contributing also with additional perceptions that might not be evident when relying on the modeling results alone. That practice should be encouraged as an important source of supplementary information regarding the wave regime in ports.

Keywords: Wave modeling, SWAN, XBEACH, Wavewatch III, nesting methodology, Ports.

1. Introduction

Maritime transportation plays a key role in international trade, encompassing, in volume, more than 80% of the total cargo exchanged between countries. For developing nations, this dominance tends to be even higher (UNCTAD, 2020). In this context, a comprehensive understanding of the regional wave climate and its patterns is crucial for the effective management of coastal ports. Wave forecasts and wave climatology are vital for a variety of applications, such as defining design sea states, carrying out operational planning and evaluating marine operations (WMO, 2018).

In coastal ports, wave diffraction and reflection are usually the major processes affecting local propagation. Waves diffract around the sharp corners of obstacles, such as breakwaters, allowing the energy penetration towards the sheltered regions. These incoming waves are then reflected by the quay walls and other harbor structures, producing points of constructive and destructive wave interaction and, depending on the port geometry, oscillation patterns may be verified (VAN MIERLO, 2014; WONG, 2016). When present, these oscillations may produce considerable horizontal water motions even for minor vertical sea level variations, inducing yaw, surge and sway movements to the moored ships. These horizontal velocities are not spatially uniform, being stronger near the nodes, so this effect may be important or less relevant depending on the ship's location and orientation within the harbor. In this context, infragravity waves, whether free or bounded to wave groups, can also play an important role (RABINOVICH, 2009). Therefore, mainly for semi-closed harbor basins, the presence of long waves generally has a negative effect over ships' operations, reducing their productivity and increasing the downtime period (MARCO *et al.*, 2008).

Harbors' efficiency is particularly assessed, amongst other factors, by its downtime during operations, which is in turn often a result of severe hydrodynamic conditions (WONG, 2016). The waves' patterns and the wind effect, together with the tidal amplitude, may exert a relevant influence over port technical efficiency (ALONSO *et al.*, 2020). For harbors installed in open coastlines, analyzing dispersive waves (swell waves) and locally generated wind waves (wind sea waves) is utmost for harbors' design and safe operations (THORESEN, 2014).

Despite its importance, the availability of measured *in situ* data is often limited. Particularly for smaller ports, it might not always be feasible to keep a structure with buoys and other sensors measuring real-time weather and oceanographic data. In this context, ongoing improvements have been implemented in numerical simulations in order to deliver more accurate estimates of sea-state conditions (WMO, 2018).

Numerical wave models have been applied as an important tool to assess wave characteristics on a wide variety of applications, and can be employed to evaluate the wave parameters within harbor basins and to foresee adverse conditions that may dampen port operations (THOMAS and DWARAKISH, 2015). Altogether, the wave models can be divided into two major groups, the phase-averaged and phase-resolving models, both having its own strengths and limitations (BABANIN *et al.*, 2017).

Phase-averaged wave models based on the waves' energy spectrum concept are relatively computational efficient and have been employed to predict wave conditions at distinct spatial scales (RUSU and SOARES, 2011). Third generation phase-averaged wave models such as WAM and NWW 3 were established specifically to deal with wave modeling at large ocean scales and are applied primarily for global model simulations. Despite achieving good results in oceanic waters, these models use coarser grids, which in turn do not allow for an accurate representation of smaller geomorphological features in coastal waters, such as details in the coastline, little islands, shoals and small obstacles. Furthermore, the bathymetry is not well represented, resulting in unreliable results nearshore (ATAN *et al.*, 2017; BOOJI *et al.*, 1999; The SWAN Team, 2019; WMO, 2018).

In order to represent the wave regime accurately in intermediate depth and shallow waters, a possible solution is to apply nested refined grids to represent the transformation of waves from global to regional and small scales (ATAN *et al.*, 2017; The SWAN Team, 2019; WMO, 2018).

Despite being a powerful tool for the assessment of coastal wave characteristics, SWAN has limited accuracy when applied in regions of complex geometry, such as harbors (WONG, 2016). It cannot properly reproduce the reflection effects on both sides of a breakwater and may show constraints when handling diffraction in front of reflecting structures (BOSHEK, 2009; THE SWAN TEAM, 2019). Moreover, further limitations are related to the facts that the waves' phase information is disregarded, the individual waves are not resolved and the infragravity waves are not considered in the computations (VAN MIERLO, 2014). The phase information is lost since the energy density is used instead of the waves' amplitude, and it poses significant restrictions for applying SWAN in harbors with standing wave patterns (HOLTHUIJSEN *et al.*, 2003). An alternative method to reduce the constraints related to the lack of infragravity waves was proposed by Hernandez *et al.* (2015), whereby the low-frequency energy was analytically included in the deep-water wave spectrum used by SWAN, allowing it to provide better results for the assessment of waves in Spanish open harbors. SWAN was successfully applied by Rusu and Soares (2011) to assess the wavefield in the vicinity and at the entrance of two coastal Portuguese ports, however, for the analysis of wave penetration and other processes such as reflection and resonances occurring within the harbor basin, the phase-resolving models consist in a more suitable and accurate tool (RUSU and SOARES, 2011; VAN VLEDDER and ZIJLEMA, 2014; WONG, 2016).

Phase-resolving models provide explicit reproduction of the sea surface elevation and velocity field evolution, considering the propagation and decay of individual short and long waves. These tools are, therefore, more suitable to yield higher accuracy outputs when simulating the wave transformation in areas with complex geometry, including non-uniform depths and reflective structures. The higher accuracy comes with the cost of a much larger computational effort due to the demand for higher spatial and temporal resolutions, restricting the domain extension. The phase-resolving wave models may be further categorized as mild-slope models (e.g. PHAROS and MIKE 21 EMS), Boussinesq type wave models (e.g. TRITON, MIKE 21 BW, BOUSS-2D, FUNWAVE and OVBM), or non-hydrostatic wave-flow models (e.g. SWASH and XBEACH NH) (BABANIN *et al.*, 2017; ROELVINK *et al.*, 2015; VAN VLEDDER and ZIJLEMA, 2014; WONG, 2016).

The open-source model XBEACH was initially idealized to handle hydrodynamic and morphodynamic processes in sandy shores with relatively small time and spatial domains. Nevertheless, it has also been employed in other contexts since then, including projects as a phase-resolving wave model (ROELVINK *et al.*, 2015). Smit (2008) adopted the scheme proposed by Stelling and Zijlema (2003) to develop a non-hydrostatic numerical model, which was then included as an alternative mode to the XBEACH model. The non-hydrostatic model achieved good results in different tests even when applied with just one vertical layer, fact that contributes to reduce the computational effort (SMIT, 2008). Wong (2016) assessed XBEACH NH applicability in harbor areas by comparing the model's outputs with physical model's measurements in two distinct scenarios, obtaining very good results.

Altogether, the wave propagation from oceanic regions to coastal ports is better assessed by concatenating a series of distinct types of wave models and applying them in a downscaling approach, extracting their advantages in each stage of the wave propagation towards the harbor area. Phase-averaged wave models may be employed in larger domains, applying NWW3 or WAM for oceanic scales and SWAN for nearshore transformation, and the outputs

from SWAN can be used as input to a small domain phase-resolving model comprehending the port area (VAN VLEDDER and ZIJLEMA, 2014). This chain approach has been applied by other authors, such as, for example, Rusu and Soares (2013), who used the models WAM, SWAN and FUNWAVE to provide wave conditions to the Portuguese port of Leixões; Alabart *et al.* (2014), who employed the models SWAN and SWASH to study the wave field within the Spanish Port of Blanes; Adytia *et al.* (2012), who utilized SWAN and OVBM models to analyze the wave characteristics in the Indonesian port of Jakarta; and Thein *et al.* (2019), who applied SWAN and BOUSS-2D to assess the wave conditions in two deep-sea ports along the Myanmar coastline. Furthermore, Sierra *et al.* (2017) used SWAN together with a Boussinesq-type model to investigate the impacts induced by the climate change, over the wave patterns and sea level rise, on the port operability and wave agitation within the Port of Barcelona, simulating the conditions with different values projected for the sea level.

Integrated modeling solutions have also been applied to provide operational forecasts in harbors' zones. Makris *et al.* (2021) developed an operational forecast platform for 8 Ports located in the Mediterranean Sea, using both the spectral wave model TOMAWAC, for off-shore and coastal regions, and the mild-slope phase-resolving model WAVE-L, for harbor basins. Their solution supplies end-users, such as ships' captains and harbor pilots, with expected sea states information, supporting ships' navigation procedures in these ports. Moreover, the provided information may also be applied to improve berths' occupancy, optimizing harbor's efficiency.

Alternatively, Artificial Neural Network (ANN) models have also been used to supply wave forecasts in harbor basins, acting as a possible substitute to the traditional numerical models, requiring a lower computational effort (LÓPEZ *et al.*, 2015). In this context, when developing and configuring an ANN solution to the assessment of wave data, numerical wave models may be useful for training and testing purposes (DELGADO and BERGILLOS, 2021).

The discussions and the modeling results verified for a particular harbor may be further complemented by the increment of empirical impressions from local seafarers who are continuously working in the port. Although this practice is generally unusual when applying numerical modeling for the assessment of the wave regime within harbor areas, it is expected that the empirical insights may be consistent with the wave models' results, further validating them, or may indicate patterns that might not be clearly identified when analyzing just the models' outputs. Empirical information from local professionals has also been considered by other authors in different contexts, such as Yang and Ge (2020), who applied questionnaires with experts working in local shipping companies and port management offices to assess potential strategies for Kaohsiung port infrastructure, considering the effects of climate change.

The main objective of this paper is to assess the wave regime characteristics within an open coastal port of relatively simple geometric complexity (Mucuripe Port), using a downscaling wave modeling approach together with empirical perceptions from local seafarers. Moreover, a comparison is carried between SWAN and XBEACH NH outputs within the harbor basin, to further discuss the SWAN limitations in this context. The SWAN model calibration, validation and skills assessment is carried by comparing the model's outputs with field measurements obtained by an ADCP anchored near the harbor fairway for a few months. An evaluation of the applicability of NWW3 global wave model hindcast parametric data as local forcing and the possibility of employing NNW3 forecasts for providing nearshore short-term boundary conditions for local predictions are discussed. Furthermore, three different swell events selected from the PNBOIA deep water buoy database are ran, and the outputs provided by both models (SWAN and XBEACH NH) within the sheltered region are compared for an assessment of the SWAN limitations inside the port. Finally, considering that empirical knowledge and visual observations of natural phenomena may generally be relevant when discussing their patterns, the numerical results are further discussed considering the outcomes of a survey conducted with local seafarers (maritime pilots and tugboat captains) to verify their empirical impressions regarding the wave field inside the harbor, in order to further validate the outputs achieved with the simulations and help to understand the patterns verified.

2. Study area

The Mucuripe Port, located in Northeast Brazil and illustrated in Figure 1.C, is an open coastal port protected by a 1.9km long breakwater (Titan groyne), that offers shelter to the harbor basin against the direct effect of the predominant easterly waves observed in the region. The port has 5 multipurpose berths along the quay (102, 103, 104, 105 and 106), and two berths located in the end of an open pier (201 and 202) for the operation of tanker

ships and gas carriers. The depth within the harbor and its fairway reaches up to 14m in some places. There is a shallower region formed by sedimentation on the leeward side of the Titan's breakwater (COMPANHIA DOCAS DO CEARÁ, 2016). The region is characterized by semidiurnal mesotidal tides that may reach a maximum range of up to 3.2m during springs periods (PINHEIRO *et al.*, 2016).

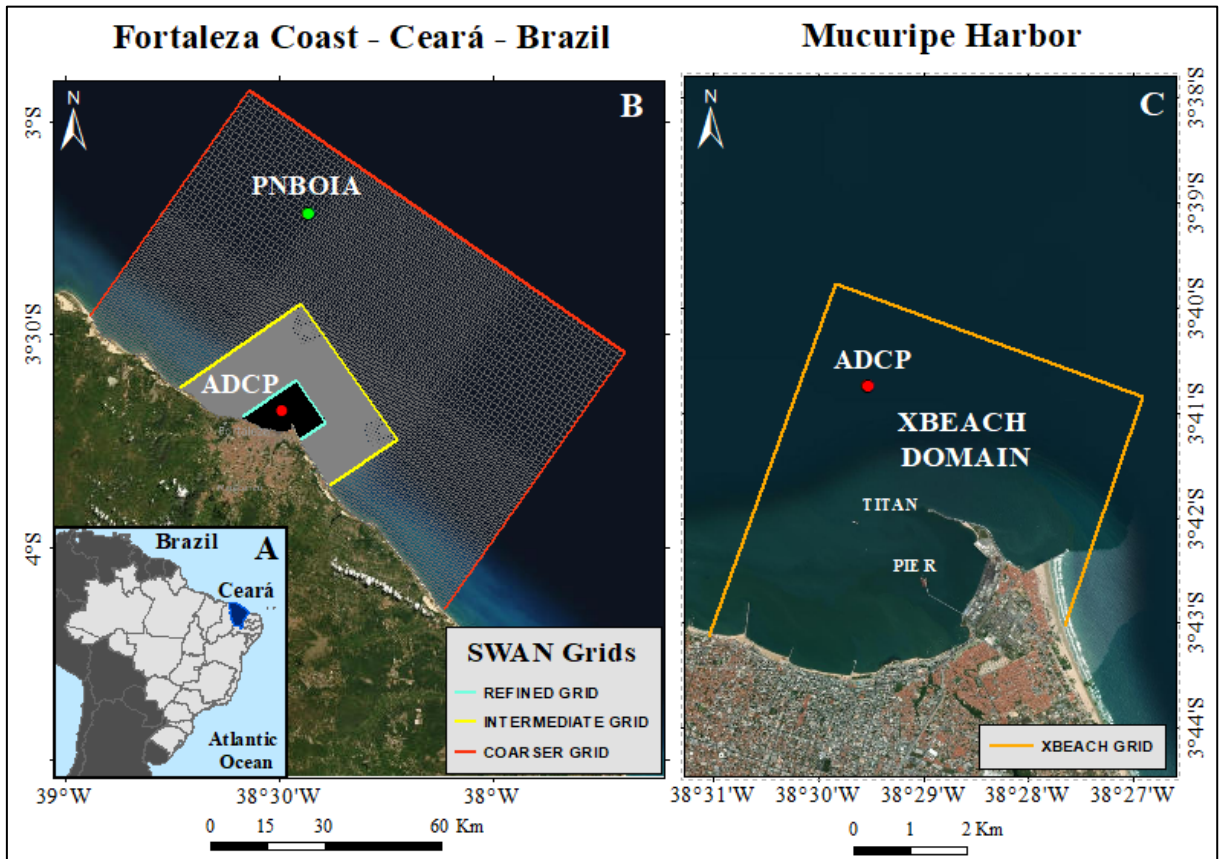


Figure 1: A) Location of the study area, in the Ceará State, Brazilian Northeastern Coast. B) Indication of the three SWAN grids employed, with the identification of the PNBOLA buoy position, at the continental shelf break, and the ADCP used for validation purposes. C) Mucuripe Harbor, with indication of the XBEACH domain and the ADCP position.

Due to its location near the Equator (Latitude $03^{\circ} 42' 36''$ S and Longitude $038^{\circ} 28' 24''$ W), the wave regime observed in the region is affected by the ITCZ's (Intertropical Convergence Zone) position, given that it has a remarkable effect on the local wind patterns. The ITCZ's position has a seasonally meridional shift towards the warmer hemisphere, commonly remaining between the latitudes 9° N and 2° N over the Atlantic Ocean (SCHNEIDER *et al.*, 2014). It presents a southward movement pattern between the austral winter and the austral summer, and the southernmost location is usually verified in the months of March and April, after which it reverts the movement northwards again (HASTENRATH, 2012). Therefore, the Mucuripe Harbor region is predominantly influenced by the easterly trade winds, showing a variable dominance of either the southeasterly or northeasterly trade winds depending on the ITCZ position (PINHEIRO *et al.*, 2016). Additionally, waves formed during mid-latitude storms in the North Atlantic Ocean have been observed as swell waves in the South Atlantic, reaching the northeastern Brazilian coast (WMO, 2018). These dispersive waves, which are more frequently verified in the period from December to April (SILVA *et al.*, 2011), tend to have northerly directions and, due to the breakwater's layout and orientation, may increase the agitation conditions within the harbor basin, increasing the risks for ships and port infrastructure.

3. Methods

The hybrid methodology applied in this research combines the employment of a chain of nested wave models (SWAN and XBEACH), that provides the wave transformation from deep water to the harbor area, with the

empirical insights regarding the wave regime within the port, obtained through the application of a succinct objective survey with local maritime pilots and tugboat captains. The flowchart presented in Figure 2 illustrates the methods, which are further explained along this section.

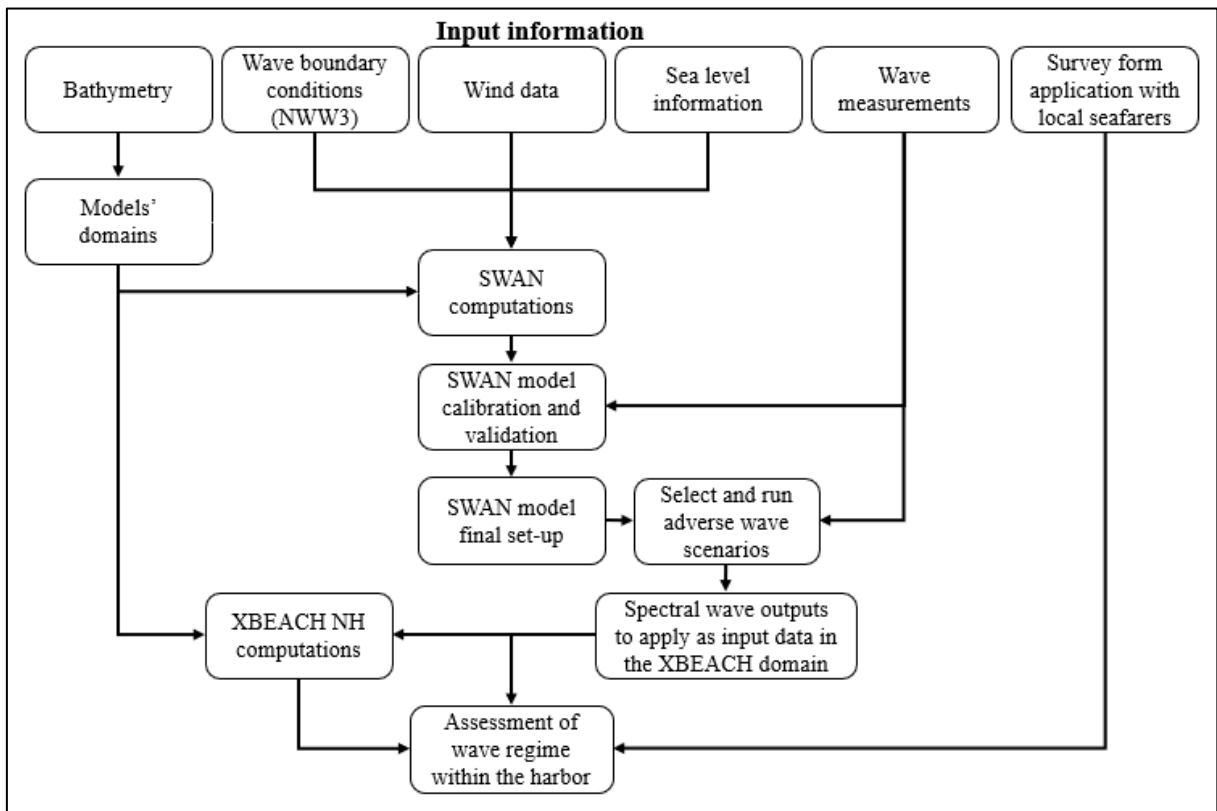


Figure 2: Methodology overview.

3.1 Local wave data

The buoy established by the National Program of Buoys (PNBOIA) is located nearly 55km north off the coast, at the continental shelf break, with a water depth of 200m (Figure 1.B). It collected meteorological and oceanographic data, for 20 minutes every 3 hours, from November 2016 until December 2017, using a wave data from a Triaxys direction wave sensor. COSTA (2019) analyzed the wave data from this buoy and showed that during this period, the mean significant wave height (H_s) was 1.66m. The highest mean H_s and maximum wave height (H_{max}) values were verified in September (respectively 2.1m and 3.4m), whereas the lowest values were observed in May (respectively 1.35m and 2.2m). This pattern is related with the seasonal variation in wind speed, which is stronger during the second semester and less intense along the first semester. Regarding the wave period (T_p), the mean value verified along the entire time series was 8.7s, with the highest value observed in March (22.2s). The seasonal variation is noticeable, with a mean T_p of 10.5s from December to April, and a lower mean T_p of 7.4s from April until November. Finally, the prevailing wave directions verified during the measurements were E (55.6%) and NE (36.2%), also with a clear distinction between the first and second semesters. From January to June, it was verified a wave directions' distribution between the quadrants N (14.8%), NE (59.1%) and E (25.95%). On the other hand, the dominant wave direction observed from July until December was E (85%), followed by NE (14.2%) (BIOLCHI *et al.*, 2019).

As previously mentioned, in addition to the *in-situ* wave measurements, global wave models' hindcast data has been used to describe regional climatologies (PIANCA *et al.*, 2010) and to define design criteria, and are used here to provide wave boundary conditions to validate a nearshore wave model. To assess the NWW3 model skill in predicting the wave conditions near Fortaleza coast, the closest NWW3 grid point to the PNBOIA buoy was selected by Costa (2019) and a comparison between modeled and observed data was conducted. The results indicated a RMSE of 2.45s for T_p , 33.11° for the mean wave direction (MWD), and 0.24m for H_s . The model tends to overestimate T_p all over the year, and this bias is stronger between September and November. It was

verified a correlation (R) of 0.725 for T_p , 0.814 for MWD, and 0.805 for H_s . Altogether, the correlation may be considered good, however, caution is recommended when using NWW3 data to represent the wave regime in this region. Particularly the T_p and MWD's RMSE should not be overlooked (COSTA, 2019).

3.2 SWAN model

For the present research, the Delft3D-WAVE standalone module was applied (currents were not considered). It runs the third-generation wave model SWAN (Simulating Waves Nearshore), which allows for the transformation of deep-water wave data obtained from NWW3 global wave model to nearshore refined grids. SWAN is an Eulerian phase-averaged model that describes the evolution of the waves with the two-dimensional wave action density spectrum equation, or the energy density spectrum equation, if the currents are not considered. SWAN considers the following processes as sources and sinks affecting ocean waves: generation by wind input effect; dissipation by whitecapping, bottom friction, and depth-induced breaking; and energy transfer through non-linear quadruplet and triad wave-wave interactions. (BOOJI *et al.*, 1999; DELTARES, 2014; HOLTHUIJSEN, 2007).

Shoaling induced by bottom and current effects (energy bunching) is properly resolved in the model. Refraction is likewise accounted for. On the other hand, diffraction is not originally included in the action balance equation. To accommodate this phenomenon, SWAN has the option to activate the phase-decoupled refraction-diffraction approximation, based on the mild-slope equation for refraction and diffraction, ignoring phase information. Moreover, SWAN also allows the establishment of obstacles, accommodating their transmission and reflection characteristics (DELTARES, 2014; HOLTHUIJSEN, 2007). For further details regarding the SWAN wave model, refer to HOLTHUIJSEN (2007), DELTARES (2014) and THE SWAN TEAM (2019).

As presented in Figure 1.B, a set of three nested grids was applied using the SWAN model, providing computational efficiency, and satisfying the requirements of higher resolution in the region of interest, particularly inside the harbor and navigational channel. The coarser grid's seaward boundary is located along a line with water depth greater than 1 km, slightly after the continental shelf break, approximately 64km from the coast. All the three grids have variable resolution. Their characteristics are summarized in Table 1.

Table 1: Grid dimensions and resolutions.

Model domain	Grid elements	Number of m-cells	Number of n-cells	Δx (m-direction)	Δy (n-direction)
Coarser grid	7438	109	79	800m - 1600m	800m - 1600m
Intermediate grid	19672	170	175	200m - 400m	200m - 400m
Refined grid	79378	326	334	30m - 60m	30m - 60m

NWW3 hindcast wave data was applied as input to the SWAN model boundaries. Parametric rather than spectral wave data was used. The wave parameters employed were H_s , T_p , MWD at peak period, and directional spreading.

For the coarser grid, the bathymetry was derived from the one-minute gridded database ETOPO1, supplied by NOAA's National Geophysical Data Center (NGDC). The bathymetries used on the intermediate and refined grids were build based on data obtained from the Brazilian Navy nautical charts 701, 710 and 21800, and from bathymetric data approved by the Brazilian Navy's Hydrographic Center (CHM), which cover the harbor basin and fairway with higher resolution.

Considering that one of the main purposes of the present research is to analyze the feasibility of a short-term prediction wave model using NWW3 forecast data, modeled rather than observed wind data was used to force the simulations. GFS (Global Forecast System) wind data, which is used to force the NWW3 simulations, was also applied in the Fortaleza's regional wave model.

Considering that currents are not accounted for in standalone wave model computations, it is important to provide sea-level information to the simulations (DELTARES, 2014). In the SWAN model, either harmonic predicted tidal data or measurements made by a sea level gauge can be applied. Particularly for Fortaleza's coastal region, the local sea level is almost entirely described by the tidal harmonic components, and meteorological effects barely exert influence on it. Moreover, harmonic tidal information can be used in short-term forecasts. The simulations

here used hourly sea level predictions based on the harmonics freely provided by the Brazilian Navy National Oceanographic Database (BNDO).

SWAN allows for the establishment of sub-grid obstacles that, besides interrupting the wave propagation, are also able to consider the effects caused by it on the transmission and reflection process. Obstacles were defined to represent the breakwaters and the quay line in the region, which may have a relevant reflecting effect.

The SWAN model calibration and validation processes were done by comparing the models' outputs with field observations obtained by the ADCP illustrated in Figure 1.C, which had been deployed near the port fairway, in a 13m local water depth. The amount of data measured in a period of a few months to a year is usually considered reasonable to perform a site-specific wave model validation (WMO, 2018). Hs, Tp and MWD data measured in the following periods were used: 09/01/18 to 09/18/18; 10/03/18 to 10/29/18; and 05/01/19 to 05/31/19. Preferably, mean rather than peak wave period should be used, since peak statistics are likely to switch rapidly between high and low frequencies, becoming much more unstable (MORTOLOK *et al.*, 2013). Nevertheless, measured Tp was the only wave period information available for the present research.

Conducting sensitivity tests is a key process when calibrating any wave model. They may be useful to provide a better comprehension regarding the relations between input parameters and the results. Moreover, they are relevant to assess the robustness of the model in the presence of uncertainties (WILLIAMS and ESTEVES, 2017).

A set of runs was conducted to identify model configurations that best represent the local wave conditions. Several parameters were varied, one at a time, to verify whether they have a relevant or negligible impact on the wave characteristics near the ADCP position. The validation compared the following wave parameters: Hs, Tp, and MWD. The subsequent statistical indicators were employed to quantify the overall performance of the wave model in each run: RMSE (Root-Mean Square Error), MAE (Mean Absolute Error), Pearson correlation coefficient R, and the Willmott's dimensionless index of agreement (skill) (WILLMOTT, 1981; WMO, 2018).

SWAN sensitivities to the following parameters were assessed: bottom friction's formulations and coefficients; whitecapping formulations; triads wave-wave interactions; the number of directional and frequency bins; sea-level variation; refraction; and diffraction. Corrections applied to the Tp boundary data were also tested. The months of September and October 2018 were selected for the sensitivity analyses. After conducting 20 runs applying variations on the aforementioned parameters, the set-up that best represented the ADCP's wave observations was assessed, as summarized in Table 2. For September and October 2018, Tp boundary data has to be reduced by 15% due to the overestimation pattern presented by NWW3 data during these months, but it was left unchanged for May 2019. The only different parameter adopted for May 2019 was the percentage of wet grid points, which was changed to 97%.

Table 2: SWAN model set-up.

Computational mode	Quasi-Stationary	Physical parameters	
Computational grids	Cartesian Coordinates	Depth-induced breaking	Activated
Currents	Not considered		$\alpha = 1; \gamma = 0.73$
Spectral space		Non-linear triad interactions	Activated
Directional space	Circle		$\alpha = 0.1; \beta = 2.2$
Number of direction bins	36	Bottom friction	Activated
Lowest frequency	0.04 Hz	Formula	JONSWAP (0.038 m ² /s ³)
Highest frequency	1 Hz	Diffraction	Activated
Number of frequency bins	24	Smoothing coefficient	0.2
Boundaries		Smoothing steps	5
Boundaries with input data	NE and SE	Adapt propagation	Activated
Boundaries forcing type	Wavecon - time varying	Wind growth	Activated
Specification of spectra	Parametric - JONSWAP	Quadruplets	Activated
Peak enhancement factor	3.3	Whitecapping	Activated
Numerical parameters		Formula	Van der Westhuysen
Directional space (CDD):	0.5	Refraction	Activated
Frequency space (CSS):	0.5	Frequently shift	Activated
Relative change Hs-Tm01	0.02	Wave Set-up	Deactivated
Relative change w.r.t. Hs	0.02	Constants	
Relative change w.r.t. Tm01	0.02	Gravity	9.81 m/s ²
Percentage of wet grid points	98%	Water density	1028 kg/m ³
Max number of iterations	40	Convention	Nautical
		Minimum depth	0.05 m

All the 3 grids were defined with the cartesian coordinate system. The computational mode used was the quasi-stationary, which consists in a sequence of varying stationary conditions. The spectral resolution details indicated in Table 2 were applied equally to all grids. Except by the maximum number of iterations, all the other numerical parameters were kept with their default values. All the physical parameters other than triads wave-wave interactions and wave set-up were activated.

Considering the importance of having quality lateral boundaries for regional wave models implemented in open coasts (ROLAND and ARDHUIN, 2014), associated with the fact that the local wave observations show a strong presence of easterly and southeasterly waves all over the year, incoming wave energy enters the coarser grid domain through both the northeast (NE) and the southeast (SE) boundaries. These boundaries were forced with hourly changes of the following parameters: H_s ; T_p ; MWD on peak frequency; directional spreading and sea-level. Parametric rather than spectral wave input was adopted, assuming a default JOSNWAP spectrum on these boundaries. Besides, it is simpler to use parametric input when working with short-term predictions. However, it requires SWAN to consider a likely inaccurate spectral shape, especially with multi-modal seas conditions (MORTOLOCK *et al.*, 2013). Consequently, important spectral components might be overlooked. Hourly values of wind speed and mean wind direction were used as surface forcing.

3.3 XBEACH model

The XBEACH model, used here for simulating the waves' propagation inside the harbor's sheltered zone without the limitations inherent to phase-averaged models, offers the possibility to work using three different modes: stationary (based on the action balance equation, disregarding phase information and infragravity waves); surfbeat (intermediate mode, wherewith the short waves are phase-averaged but the infragravity waves associated with the short waves' envelope variation are resolved); and non-hydrostatic (NH), which is a phase-resolving model that is able to simulate the propagation and decay of individual short and long waves. In the NH mode, which was selected to be used in this research, the three-dimensional non-linear shallow water equations are used with a non-hydrostatic pressure term in the horizontal momentum equation to calculate the depth-averaged flow resulting from waves and currents, allowing the computation of wave dynamics in the free-surface flow (ROELVING *et al.*, 2015; WONG, 2016). Relevant wave processes, such as shoaling, dispersion, refraction, diffraction, reflection, wave-wave interactions, etc., are included. Due to the fact that it works with only 1 vertical layer, the model accuracy is limited to $kd < 1$ (where k is the wave number and d is the water depth), which is not an issue for the wavelengths and depths adopted in the present study (STELLING and ZIJLEMA, 2003; WONG, 2016). For further details regarding the XBEACH NH wave model, refer to Roelving *et al.* (2015).

The XBEACH domain, illustrated in Figure 1.C, also has variable resolution, as described in Table 1. Spectral wave outputs generated from the refined SWAN grid were used as input in the XBEACH's seaward boundary, and the default no-gradient Neumann option was set to the lateral boundaries.

The same dataset used to build the SWAN domains' depth files were also applied to prepare the bathymetry for the XBEACH domain. A particular characteristic of XBEACH is that the obstacles and structures are described as an integrated part of the bathymetry. Therefore, adjustments had to be made when preparing the depth file for the XBEACH domain, in order to properly reproduce the breakwaters and slopes contained within the sheet-pile quay walls, which may have a relevant impact on the reflection produced by these structures.

The XBEACH model allows for the customization of a large number of parameters, however, it is highly recommended to use, as much as possible, the default settings (ROELVING *et al.*, 2015). For non-trivial parameters, Wong (2016) used their default values, and achieved good results when comparing with the measurements from a small-scale physical model. Therefore, the default settings to perform non-hydrostatic computations were applied. A time-step of 1 second was used, and the simulations covered a period of 2 hours, excluding the first 30 minutes as spin-up time.

After the SWAN model's calibration phase, three distinct swell events based on the PNBOIA measurements were selected to be used in the chain of models, in order to analyze the wave regime within Mucuripe Port and perform the comparison between SWAN and XBEACH NH results.

3.4 Survey applied with local seafarers

Finally, in addition to the results obtained through numerical modeling, a survey containing 10 questions was applied with local seafarers (12 maritime pilots and 5 tugboat captains). The sample size may be considered relatively small, however, the population of local maritime pilots and tugboat captains is also very limited in the region. The waves' spatial and temporal variability were qualitatively addressed through the assessment of the commonly most affected berths and the months of the year that mostly receive swell events. Moreover, the relation between the wave impact and the tide state was verified, as well as the wave impact in ships of different types, sizes and cargo conditions. The form containing the questions is available as supplementary of this paper.

4. Results and Discussion

4.1 Observed data

Hourly wave parameters H_s , T_p , and MWD at the peak period, obtained by the ADCP deployed near the Mucuripe Harbor fairway in a 13m local water depth (Figure 1.C), were used to calibrate and validate the SWAM model results. The characterization of these wave parameters is also presented here, since it is the first time that a dataset has been used to describe the wave regime close to the Mucuripe Harbor.

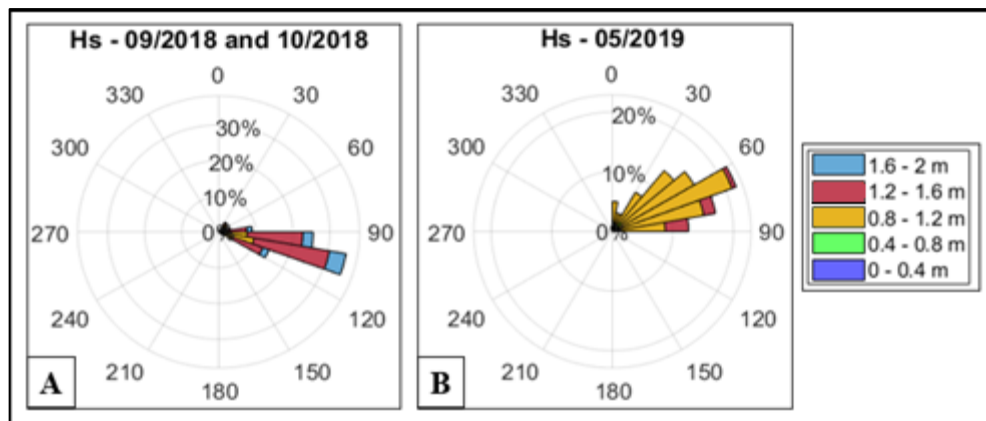


Figure 3: A) Polar plot indicating the measured H_s (m) distributed over the wave directions for the period from 01/September/2018 to 29/October/2018 near the Mucuripe Harbor Fairway. B) Polar plot indicating the measured H_s (m) distributed over the wave directions for the period from 01/May/2019 to 31/May/2019.

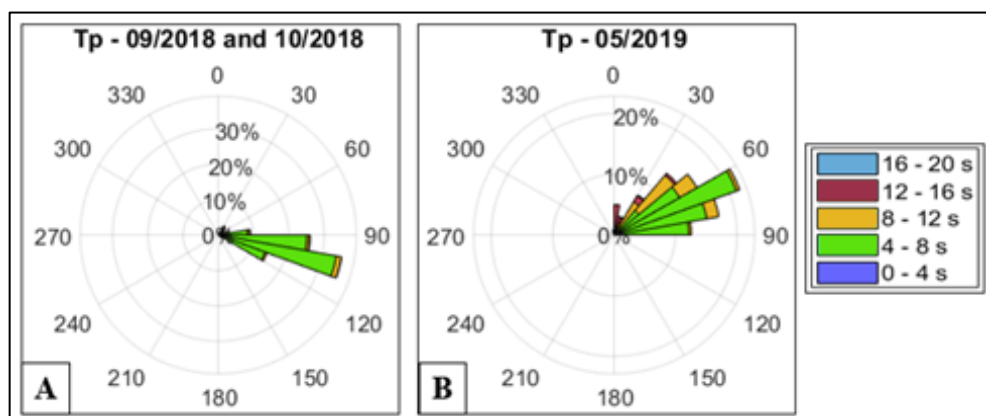


Figure 4: A) Polar plot indicating the measured T_p (s) distributed over the wave directions for the period from 01/September/2018 to 29/October/2018 near the Mucuripe Harbor Fairway. B) Polar plot indicating the measured T_p (s) distributed over the wave directions for the period from 01/May/2019 to 31/May/2019.

Due to the local wave regime seasonal characteristics, the validation process has been divided into two distinct periods: September and October/2018 (first period); and May/2019 (second period). The polar plots contained in Figures 3 and 4 illustrate the measured H_s and T_p distribution over the wave directions for both periods. The southeasterly dominance in the first period is evident, as well as the northeasterly and more scattered pattern during

May/2019. During the first period, when the winds are stronger, Hs remained most of the time above 1.2m, whereas most of the observations in May had Hs between 0.8m and 1.2m. Peak periods within the interval between 4s and 8s dominate the wave climate throughout the entire year. Higher Tp values were observed for more northerly directions, generally associated with dispersive swell waves arriving from distant regions. Due to the larger amount of data available for the first period, the sensitivity analyses were carried during this period.

4.2 SWAN model results

In September and October 2018, the best-represented wave parameter was the Hs. The overall averages achieved for both skill index of agreement and correlation coefficient were respectively 0.81 and 0.74. Considering that Tp tends to oscillate between higher and lower frequencies, there were several moments with larger differences between observed and modeled data, as can be verified through the Tp scatter plot presented in Figure 6. The observed wave directions have a larger range than the model outputs and SWAN results had a relevant general northward bias.

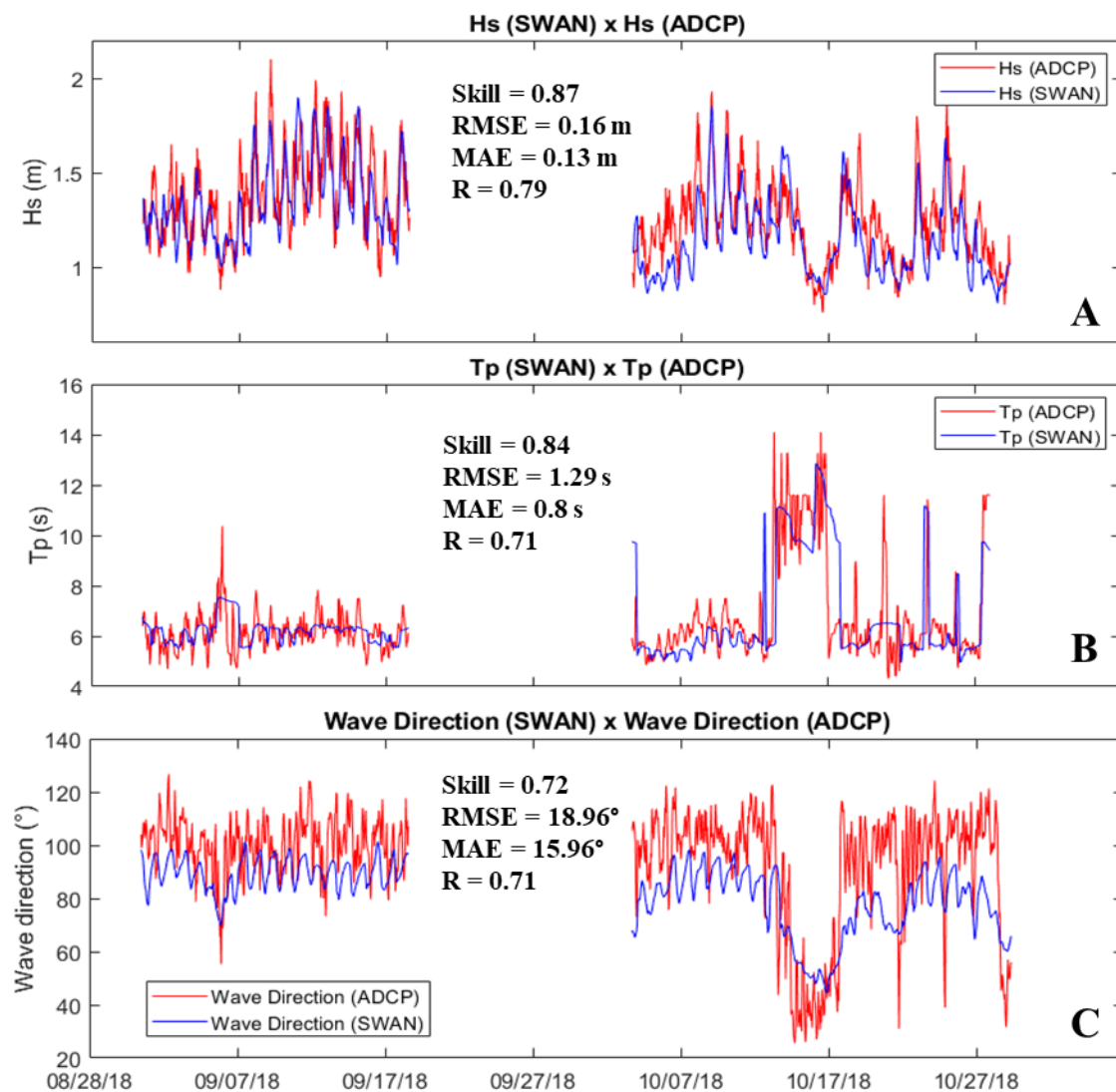


Figure 5: Comparison between the ADCP's measurements (red) and the modeled outputs (blue) for Hs (5.A), Tp (5.B) and MWD (5.C), during September and October 2018. The quantitative metrics are also used to assess the overall model performance.

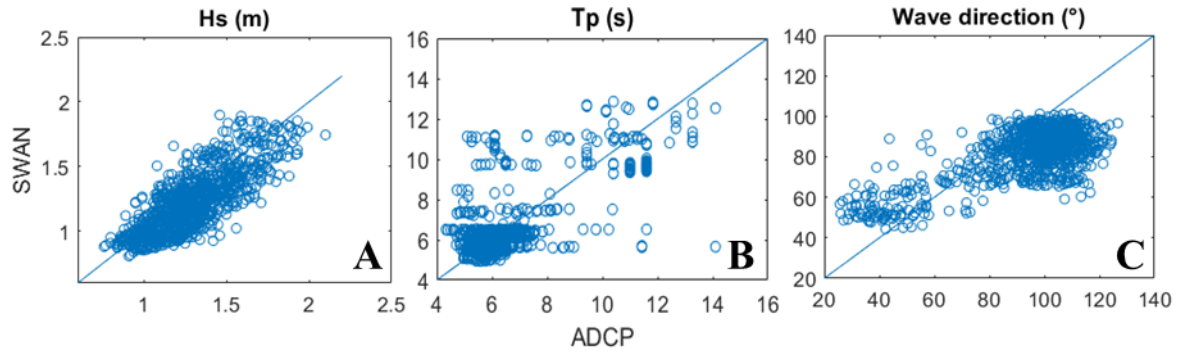


Figure 6: Scatter plots showing observed versus modeled values for Hs (6.A), Tp (6.B), and MWD (6.C). Data from September and October 2018.

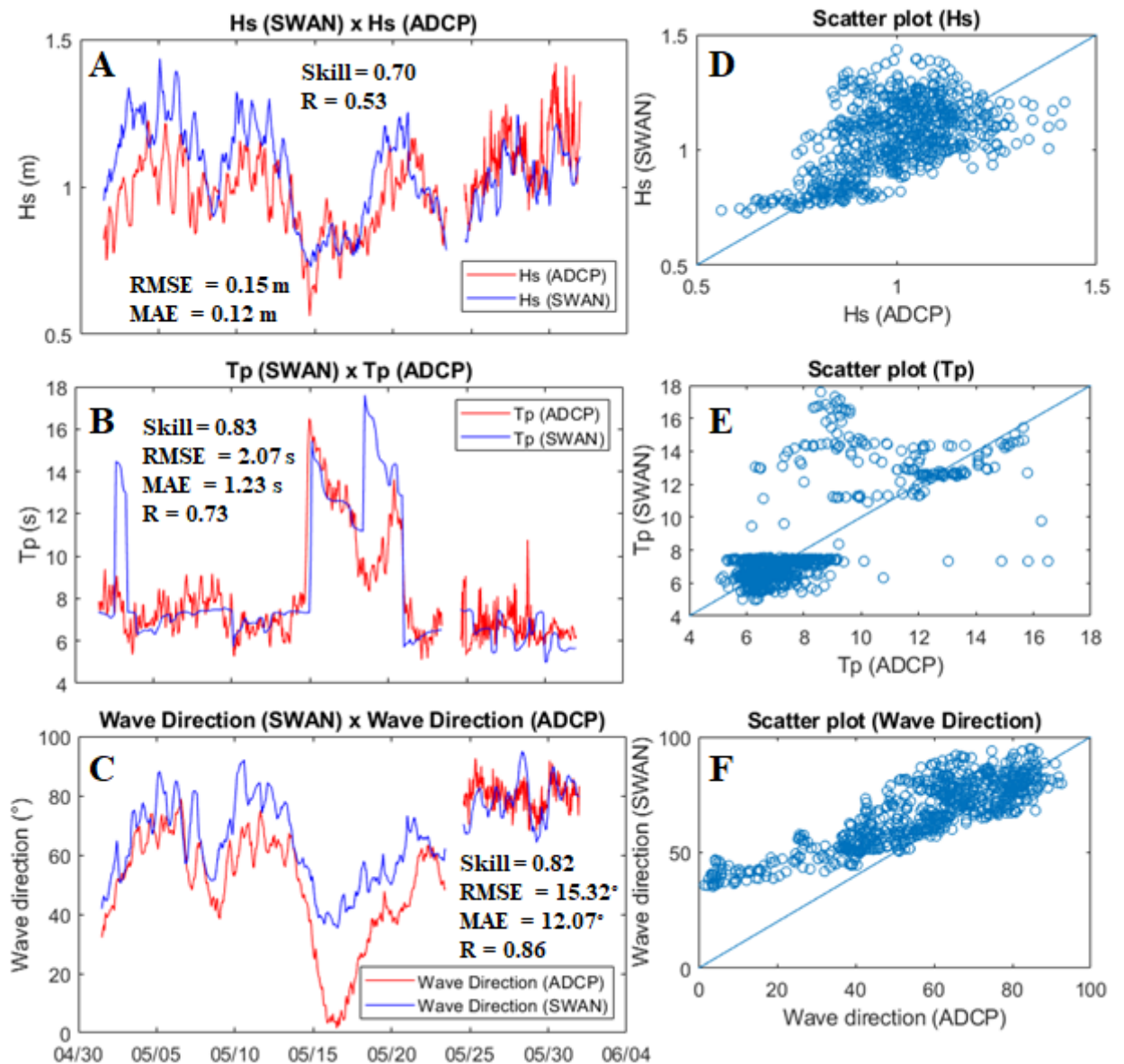


Figure 7: Comparison between the ADCP's measurements (red) and the modeled outputs (blue) for Hs (7.A), Tp (7.B) and MWD (7.C) during May 2019 (left) and scatter plots showing observed versus modeled values for Hs (7.D), Tp (7.E), and MWD (7.F) in the same period (right). The quantitative metrics are also used to assess the overall model performance.

In May 2019, the RMSE and MAE remained almost unchanged for Hs, however, both the skill index and the correlation R were reduced (Figure 7.A). On the other hand, the skill index and the correlation R for Tp were very similar to the results obtained in September and October 2018, but the error metrics increased, mainly due to two higher peak periods moments foreseen in the NWW3 model that were not verified by the ADCP (Figure 7.B). Despite the northerly swell waves that were not properly indicated by NWW3 forecasts between May 15th and May 17th, the performance for wave direction improved in all metrics when compared to the second semester (Figure 7.C).

Several different SWAN grid alternatives were tested initially, including options in which the wave energy was applied only along the deep-water boundary, but the best results were obtained with the set of 3 grids previously presented (Figure 1.A and Table 1), when wave energy was provided through both the northeast and the southeast boundaries. It happens because the local wave observations show a strong presence of easterly waves all over the year (BIOLCHI *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2011). Therefore, setting the southeast lateral boundary spectral densities to zero has a negative impact over the model's performance, since a relevant portion of wave components that constitute the local spectrum is ignored.

The quasi-stationary runs better represented the in-situ observations and this computational mode was therefore chosen to be used in this research. For domains smaller than 100km, the residence time of the waves in the region, when compared to the rate of change of the external conditions, is usually short. In these cases, the stationary (or quasi-stationary, when using a sequence of varying stationary conditions) computational mode of SWAN is advised. For greater domains, the non-stationary mode is generally recommended. (Ris *et al.*, 1999; The SWAN Team, 2019). Since the Coarser Grid dimensions are near the 100km threshold, tests with both computational modes were performed, and the results indicated that the quasi-stationary mode is more suitable for this case.

The validation between modeled and observed wave parameters showed different results in the two periods analyzed (September and October 2018, and May 2019), certainly due to the seasonality influence of the winds over the wave conditions and to limitations inherent to the modelled data applied as boundaries conditions. The impact of several input parameters over the modeled outputs also became evident.

Hs was better represented during September and October 2018, when it was slightly underestimated by SWAN. In May 2019, the model showed an opposite pattern, tending to slightly overestimate Hs. The accuracy of a wave model in properly predicting the Hs parameter generally depends on the correct reproduction of forcing variables, such as wind, currents and water levels, and also on the precision of source term parameterizations and the impact of numerical schemes (ROLAND and ARDHUIN, 2014). Regarding the input parameters, Hs output results considerably improved when the whitecapping formulation of Van Der Westhuysen *et al.* (2007) was employed, which is more suitable to multi-modal sea conditions and shallower waters (DELTARES, 2014). A similar improvement was verified by Biolchi *et al.* (2019) in their SWAN wave model. Changing the bottom friction effect between the JONSWAP's expression (1973) and the formulation of Collins (1972) had almost no impact on Hs outputs, but activating the expression of Madsen *et al.* (1988) had a more relevant and negative impact over modeled Hs. Varying the spectral resolution resulted in a modest effect over Hs outputs when the number of frequency bins was changed and had almost no impact when the number of directional bins was changed. Moreover, the 15% reduction applied to Tp input data had a negative influence on Hs results. Since the RMSE achieved for Hs in both periods was small compared to other studies (e.g. Mortolock *et al.* (2013), Atan *et al.* (2017) and Biolchi *et al.* (2019)), it was considered that the model is able to reproduce the Hs in the region.

In both periods analyzed, the modeled MWD data range was smaller than the range verified by the ADCP measurements. MWD had a northward bias during September and October 2018. The model's results showed better agreement with observed data in May 2019, when it had a performance similar to the achieved by Biolchi *et al.* (2019) and Mortolock *et al.* (2013) in terms of RMSE and correlation R.

The mean wave direction is a parameter that must be analyzed with caution. It may indicate either the most energetic frequency, or the mean direction obtained from the full spectrum. However, when two or more relevant wave components coming from different directions are present simultaneously, the MWD may often be misleading and it is advisable to compare measured and modeled waves using the wave spectra (WILLIAM and ESTEVES, 2017; WMO, 2018). As parametric rather than spectral wave data was used to both force and calibrate the model, restrictions may be expected within multi-modal sea conditions. Furthermore, the 33.11° RMSE verified when

comparing the measured data at the PNBOIA buoy and the NWW3's modeled wave direction (COSTA, 2019) should not be overlooked.

The T_p parameter also has several peculiarities that must be addressed when discussing the results obtained during the validation process. When compared with the results obtained by Biolch *et al.* (2019), it was achieved a smaller RMSE (1.68 s average) and a larger correlation R (0.72 average). It is important to remember that, unlike the H_s and MWD, the wave period remains constant when waves start feeling the bottom (WMO, 2018). Moreover, the use of mean rather than peak period data is preferable, due to the lack of stability of peak statistics, which shifts rapidly between higher and lower frequencies (MORTOLOCK *et al.*, 2013). The use of peak rather than mean wave period in the validation process of small-scale coastal domains makes the T_p outputs entirely dependent on the input data. Therefore, the nearshore wave model's performance in representing the T_p conditions is totally determined by the quality of the NWW3 global data applied to force it. An extra run to attest this pattern was conducted using the measured ADCP's peak period data as input in the Coarser Grid boundaries. The outputs achieved a skill index of 0.98 and a correlation R of 0.97 in the ADCP's position. As previously mentioned, it was verified a RMSE of 2.45 s when comparing the NWW3's modeled T_p with the deep-water PNBOIA buoy measured data, and this overestimation was more relevant between September and November (COSTA, 2019). Based on that pattern, a reduction of 15% was applied to the NWW3's T_p input data in September and October 2018, resulting in great improvements on the T_p results in the ADCP's position. For May 2019, no correction was applied. Altogether, except by the mentioned correction applied along the boundaries, the T_p outputs were not considerably affected by none of the parameters assessed during the sensitivity analyses. In their wave model, Rusu and Soares (2011) also obtained less reliable results for the peak period, when compared to the validation results achieved for H_s and wave direction, and suggested that spectral models may have restrictions when estimating the peak period.

The model's results showed to be rather insensitive to wave-wave triads interactions, which had just a small negative effect over the T_p outputs when activated in the ADCP's position. Regarding the spectral resolution, increasing the number of directional and frequency bins resulted in larger computational time and did not improve the overall performance of the model. Furthermore, ignoring the sea level variation had almost no effect over the model's outputs at the validation point, similar as identified by Mortolock *et al.* (2013), who inferred that it could be attributed to the depth in which the observations were taken (12m) relative to the small tidal range observed in their study area, which has a mean value of 1.3m during the springs' periods. The ADCP's employed in the present study was anchored in a place with similar depth (13m), however, the springs' tidal range can reach up to 3.2m (PINHEIRO *et al.*, 2016).

The model failed to properly reproduce the short time scale T_p and MWD variations. Similar results were verified by Biolchi *et al.* (2019) in their larger scale wave model for an adjacent oceanic region and using the same PNBOIA measured data for validation. These restrictions are likely related to the lack of currents on the simulations and the use of modeled rather than locally measured wind data. Although the wave-current interactions are still one of the main sources of uncertainties in wave modeling (BABANIN *et al.*, 2017), the results obtained by coastal wave models can be remarkably improved when the currents' effects are taken into account (ROLAND and ARDHUIN, 2014).

4.3 Mucuripe Harbor's wave regime

The discussions regarding the wave regime in Mucuripe Harbor were based on the empirical considerations from local pilots and tugboat captains and on the results of numerical simulations. After conducting the calibration and validation processes, the data from SWAN simulations were applied as boundary conditions in the XBEACH NH simulations, in order to infer some characteristics of the wave regime within Mucuripe harbor basin during the occurrence of severe swell events. A brief comparison between both models' outputs within the sheltered region of this open coastal port is also made.

4.3.1 Survey results

The graphs contained in Figure 8 summarizes several results obtained with the survey. According with the local seafarers' answers, swell events tend to occur mainly during the months of January, February and March, followed

by December and April, which is in line with Silva *et al.* (2011). The seafarers were asked to classify the harbor berths from the most affected to the least affected by the waves' effects. Each berth received a score based on its position from each survey, which was 10 points for the most problematic berth and 0 for the less problematic one, with a 1.67 point interval (e.g. the first received 10 points, the second 8.33, and so on). An average score for each berth was calculated based on the results achieved in each survey, and are presented in Figure 8.B. The local seafarers classified the berth 105 as the most problematic one, followed by the berths 104 and 106. The berths 201 and 202 were identified as the least problematic. Regarding the waves' angle of attack, the seafarers were also asked to score from 0 to 10 points, but now with a 2.5 points interval, the options that mostly cause problems to ships' operations. The results indicate that ships are mostly affected when the waves hit them almost perpendicularly, and the impact tends to be less problematic when the waves hit ship on their bow or stern (Figure 8.C). Regarding the cargo condition, ships in ballast were defined as the most affected (Figure 8.D). The opinions about the ship's size factor were not uniform, with 47% of answers stating that the smaller ships tend to be mostly impacted, and other 47% saying that both large and small ships are similarly affected (8.E). The answers regarding the mostly affected ship types were very diffuse and, according to the majority of the seafarers (53%), it is not a relevant variable when assessing the waves' impact over the ships' maneuvers. Finally, 94% of the seafarers answered that the tide has a remarkable effect over the wave regime, however, there was no consensus regarding the moment during the tidal cycle on which the waves conditions deteriorate (Figure 8.F). Further reference to the survey results is made when discussing the modeling results.

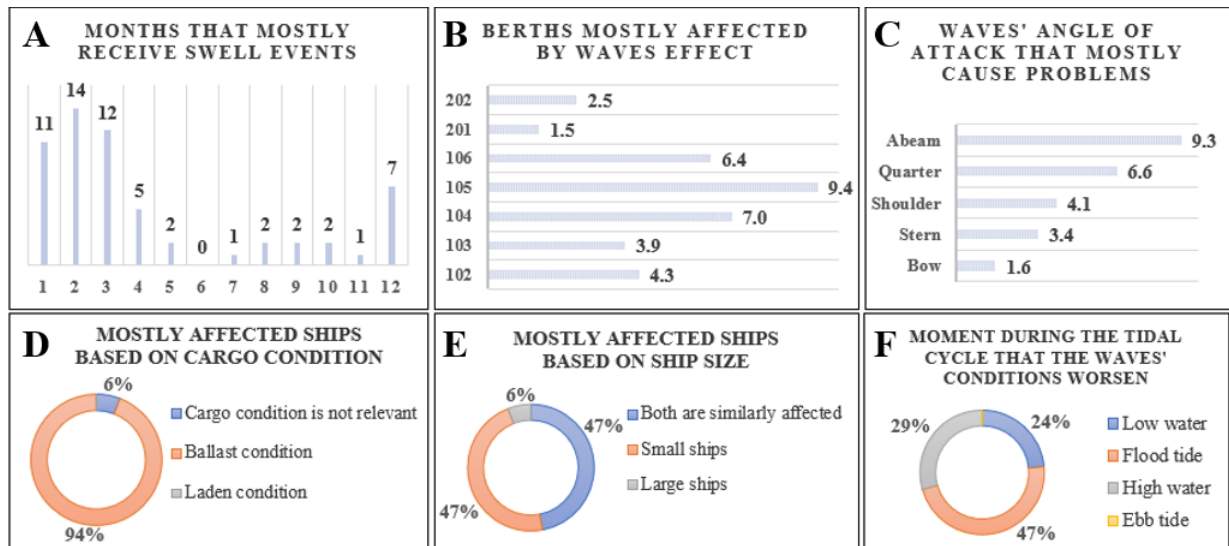


Figure 8: Results obtained with the application of a survey with local maritime pilots and tugboat captains. A) Designation of months that use to be mostly affected by swell events. B) Classification of harbor berths, detailing the most impacted berths during the occurrence of swell events. C) Determination of the angles of attack that tend to cause more problems to ship operations. D) Mostly affected ships based on cargo condition. E) Mostly affected ships based on ship size. F) Moment during the tidal cycle when the waves' conditions tend to become more severe.

4.3.2 Models' results within the harbor basin

Three distinct swell events were selected based on the PNBOIA measurements, as described in Table 3. Events with these characteristics tend to generate more energetic conditions within the Mucuripe Harbor due to its layout and the breakwater's dimensions and orientation. It is interesting to highlight that all the three cases happened between December and April, period when the dispersive waves are more frequently registered in this region (SILVA *et al.*, 2011). From case 1 (C-1) to case 3 (C-3), H_s increases, T_p decreases, MWD shifts westward and the spreading reduces.

Table 3: wave conditions selected from the PNBOIA database to simulate the wave regime within the harbor

Case	Date	H_s (m)	T_p (s)	MWD (°)	Spreading (°)
C-1	02/Mar/2017 18:00	1.41	22.2	45.7	34.3
C-2	18/Feb/2017 14:00	2.12	18.2	3	28.3
C-3	04/Apr/2017 16:00	2.95	16.7	348	21.6

Considering that the depth variation has an important role in shallow water wave propagation, the harbor's bathymetry is indicated in Figure 9.A to be used when discussing the results. It is complemented by an illustration of the sea level variation within the harbor (Figure 9-B), represented by an arbitrary time step of the C-2 simulation on the XBEACH NH wave model. The minimum and maximum water level limits were adjusted to, respectively, -1m and 1m, in order to emphasize the smaller amplitude variations within the harbor basin. Therefore, places with dark red or dark blue colors may indicate, respectively, water levels above 1m or below -1m. Furthermore, it is also important to state that the outputs provided by phase-resolving models consist of a sequence of sea level fields, and wave parameters such as the H_s are obtained by performing a zero-crossing analysis of the surface elevation record verified at each grid element, allowing the assessment of individual waves (ALABART *et al.*, 2014; HOLTHUIJSEN, 2007).

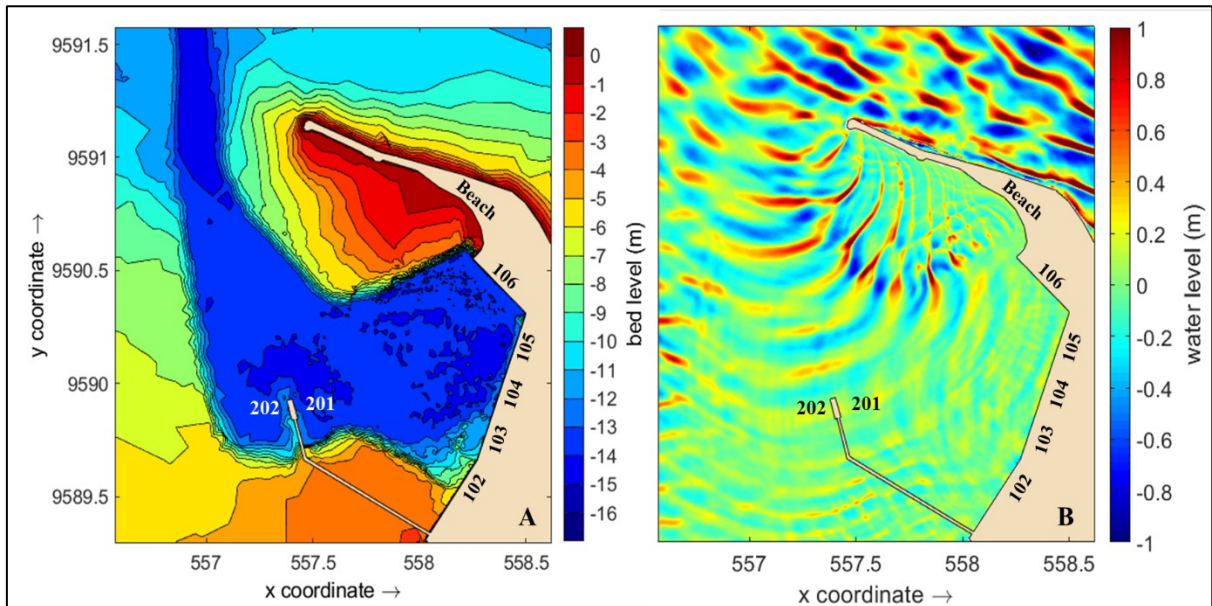


Figure 9: A) Mucuripe Harbor's bathymetry and berths. B) Sea level variation in Mucuripe Harbor at an arbitrary moment, extracted from the C-2 scenario simulation on XBEACH NH. To highlight the variations within the basin, the water levels are bounded by the limits -1m and 1m (dark blue and dark red points may indicate, respectively, places where the water level was below -1m or above 1m).

After conducting the zero-crossing analyses for each grid cell, H_s maps based on the XBEACH NH outputs were generated and a comparison was carried with the SWAN results. Besides all the differences between the phase-averaged and phase-resolving models already mentioned, it must also be stressed that the grid resolutions applied were also different. Inside and around the harbor area, the resolution was 30m for the SWAN refined grid and 5m for the XBEACH NH grid.

Furthermore, an analysis of the H_s pattern adjacent to each berth along the quay was carried out (Figure 11) for the three scenarios described in Table 3, comparing the results obtained from the simulations with both wave models.

Figure 10 illustrates several patterns within the sheltered basin. The shallower region formed by sedimentation on the leeward side of the breakwater has an important effect over the wave pattern. After diffracting around the breakwater tip, there is a strong refraction pattern that turns the waves towards the beach formed by sedimentation, next to the berth 106. Beaches usually present a lower reflection coefficient, mainly when compared with harbor structures (VAN VLEDDER and ZIJLEMA, 2014), and it seems that an important amount of wave energy is dissipated on this beach. The highest waves verified within the sheltered region are observed in this area due to the shoaling effect. The waves are not totally refracted towards the beach, and a part of the diffracted waves experiences a de-shoaling effect when returning to the deeper region of the turning basin.

The incoming waves interact with the waves that are reflected by the harbor's quay walls, resulting in destructive and constructive wave interactions at different points within the basin. Even with the slopes that constitute the inner part of the sheet pile quay walls, the reflection effect has a remarkable impact on the wave field during the occurrence of swell events, particularly for longer waves (higher periods). The critical points are mainly located

near and in front the berths 105, 106 and 104, as can be clearly verified in the H_s maps of Figure 10. In Figure 11, which represents the H_s variation over the quay line, the more severe conditions were also verified in berth 105, and this distinction was better represented in the XBEACH NH outputs. The survey results, illustrated in Figure 8.B, also corroborate with the models' outputs, on which the berth 105 was chosen as the most severely affected by the waves, followed by the berths 104 and 106. This pattern is certainly caused by the interaction between the incoming waves, the group of waves reflected by berth 106, and the group of waves reflected by the berths 104 and 105, generating a confused sea state with higher waves that may result in maneuvering difficulties for ships and tugboats.

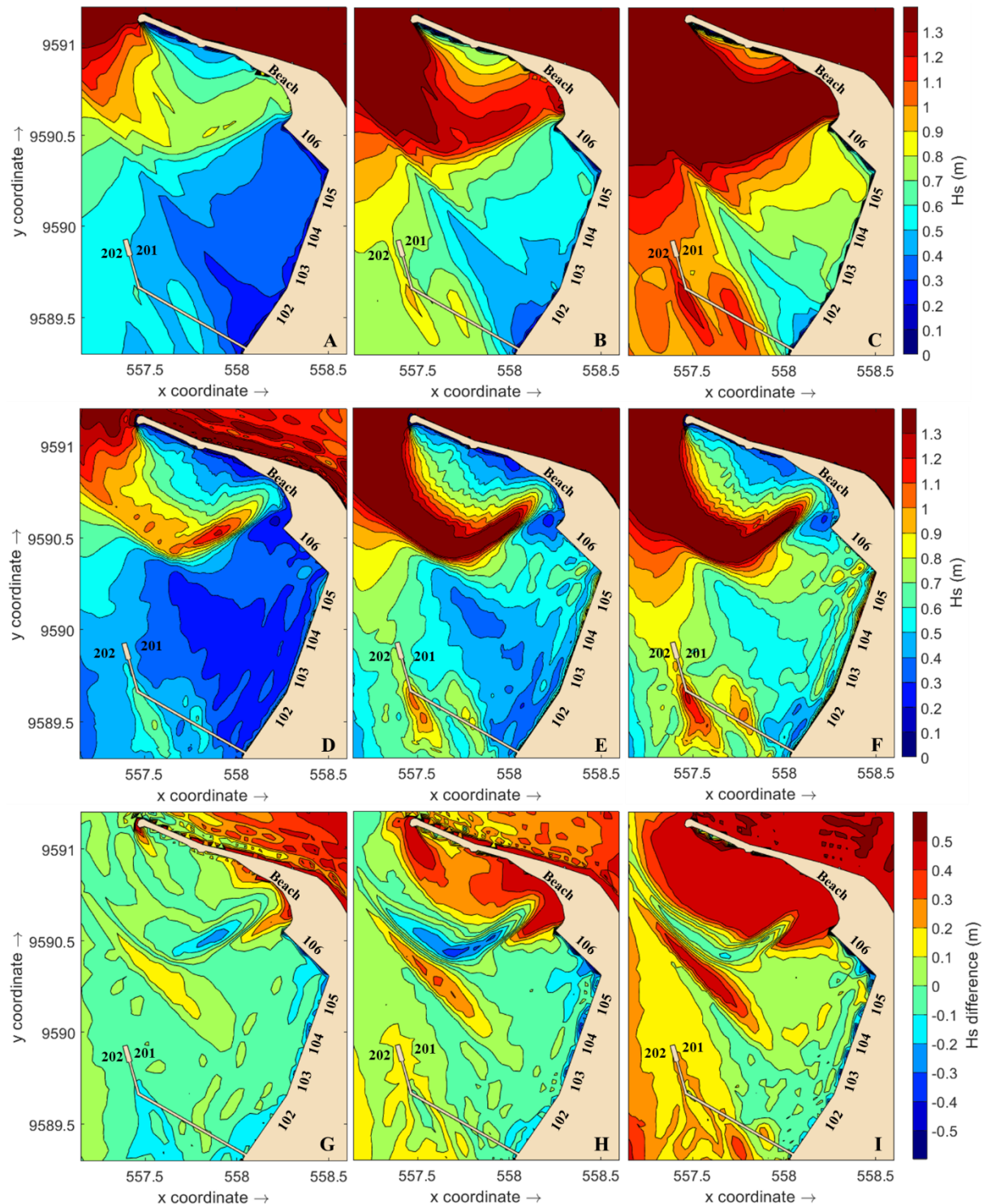


Figure 10: Representation of H_s (m) distribution within Mucuripe harbor for the three cases described in the Table 3, using the wave models SWAN and XBEACH NH. Panels A, B and C show, respectively, the SWAN wave heights for cases 1, 2 and 3. Panels D, E and F show XBEACH NH wave heights for the cases 1, 2 and 3,

respectively. The panels G, H and I show the differences between SWAN and XBEACH NH Hs for cases 1, 2 and 3, respectively. The positive points indicate that the SWAN output is larger, and the negative points indicate that the XBEACH NH points are greater.

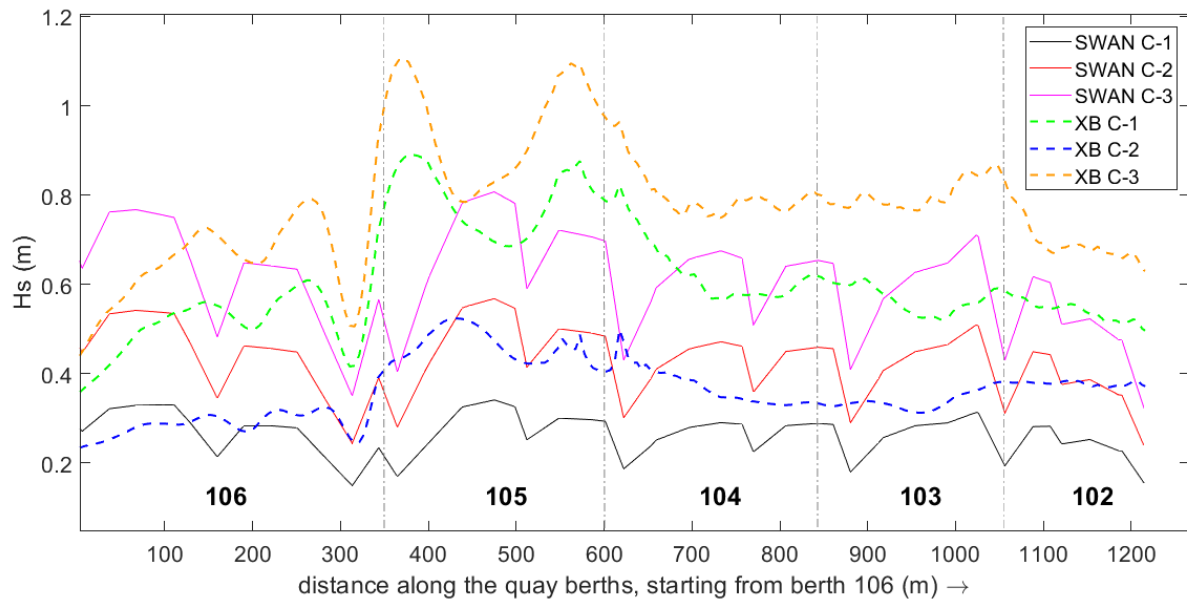


Figure 11: Hs simulated by SWAN (solid lines) and XBEACH NH (dashed lines) along the harbor's quay berths, considering the 3 cases described in Table 3.

The survey's results helped to get a deeper understanding of the local wave regime characteristics, enhancing the discussions with several details that might not be evident if one relies on the modeling results alone. When compared to the berths along the quay, both models show that higher waves are observed over the berths 201 and 202, since they are located in a less sheltered position. This may be an issue mainly for the tugs' operations, when the ship is turning, and no protection is provided to them. Nevertheless, the survey's results left the berths 201 and 202 amongst the least problematic regarding the wave effect over the ships' operations (Figure 8.B). This is certainly related with two main factors. The berths and the bridge that connects them to the shore are open, allowing the waves to pass and avoiding the problems related with the reflection effect, which may result in the development of points with constructive and destructive wave interaction, as can be verified along the quay. Moreover, the waves hit the ships on their stern or bow, and as indicated in Figure 8.C, this implies in a relatively smaller impact than if the angle of attack was nearly perpendicular.

It is, therefore, clear that, despite the fact that the wave energy is proportional to the square of wave height (HOLTHUIJSEN, 2007), analyzing only the Hs is insufficient when assessing the wave effect over the ships' operations. These impacts may vary for different ship's types, and for different positions within the harbor basin (MARCO et al., 2008). The negative consequences over cargo operations are highly dependent on the harbor berths' position and orientation (SIERRA et al., 2017). Moreover, they are also governed by other factors, such as the angle of attack that the waves hit the ship, the wave period, and the ship size. Generally, the accepted Hs inside a harbor is higher for larger ships and smaller when beam waves' conditions are present (LIU and BURCHARTH, 1999). Considering that ships alongside berths 105 and 104 are hit laterally by the waves, this is another important issue that aggravates the conditions in this region, and smaller wave heights are hence expected to hinder the ships' operations in these positions, when compared to other berths, such as the 106, 201 and 202. The situation may further deteriorate for ships in ballast condition or with just a small amount of cargo aboard, as indicated by the survey results (Figure 8.D). The aspects mentioned in the last paragraphs were more clearly understood due to the combined analyses of the modeling outputs with the survey results.

As the Mucuripe is an open harbor, it is more exposed to the short waves ($f < 0.04$ Hz) action, making them very relevant when analyzing the waves' effects on ships' operations. On the other hand, the problem of amplification of infragravity waves faced by many semi-closed basins and harbors is not an issue in this case.

The Hs presented in Figure 10 allow the comparison between the wave fields resulting from each case, and also the comparison between SWAN and XBEACH NH outputs within the sheltered region. Naturally, due to the

breakwater's orientation, for further westward wave directions (from C-1 to C-3), the sea state inside the port tends to become more severe, increasing the risks of damages for ships and port infrastructure. In C-1, the H_s differences between SWAN and XBEACH NH were smaller, remaining between -0.1m and 0.1m in most of the area, with higher values for XBEACH NH near the quay berths. This tendency of higher H_s values near the quay line was also kept in C-2 and C-3, however, there was an overall increment of the SWAN's dominance mainly in less sheltered regions, such as the area occupied by the berths 201 and 202, and over the shallower zone located at the leeward side of the breakwater. Possibly, this is partly related to the westward variation in MWD for C-2 and C-3, since the waves' energy enters the XBEACH domain only through its seaward boundary (ROELVINK *et al.*, 2015). Therefore, rotating the XBEACH domain for each different case, based on the MWD, similar to the method used by Rusu and Soares (2013) when using the phase-resolving wave model FUNWAVE, may affect the results. Through the analyses of Figure 11, it may also be observed that the SWAN outputs are not able to properly reproduce the H_s variation along the quay line, as can be verified with the XBEACH NH outputs. As already mentioned, considering that the waves' phase information is lost in phase-averaged simulations, the SWAN model is not able to identify points of constructive and destructive wave-wave interactions and regions with partly oscillatory pattern inside the basin.

The results provided by both wave models show that, despite offering acceptable shelter to the harbor basin and berths under the easterly wave conditions that are more often observed in the region, the harbor's breakwater is ineffective in providing proper protection when long swell waves reach the coast from northerly or northwesterly directions.

Due to the lack of observed data within the region protected by the breakwater, it was not possible to validate the models' performance inside the harbor basin. Measuring data in the sheltered area would be relevant to calibrate diffraction and reflection set-ups, and also to analyze if the effects resulting from the SWAN diffraction phase-decoupled limitations are significant in Mucuripe Harbor. Nevertheless, it is clear that, even for an open harbor with relatively small complexity, the application of a phase-averaged wave model has restrictions. It may give a general idea about the wave regime within the sheltered zone, however, several details cannot be reproduced due to all the limitations inherent to phase-averaged wave models already mentioned.

Considering the limitations inherent to the applied methodology, the overall performance of this chain of models in reproducing the local wave conditions is considered adequate. The chain of models may, therefore, be applied as a complementary tool when analyzing different wave scenarios or when evaluating the expected impact that changes in harbor characteristics would have on the wave field, such as the construction of a new breakwater or the implementation of a new dredging project. Moreover, considering the biases and seasonality patterns, NWW3 expected sea conditions should be used with caution to provide short-term local wave forecasts. It is paramount to remember that the accuracy of any wave forecast depends on the wind data. Erroneous wind intensities have a cumulative effect in time, and this may result in a relevant impact over the predicted H_s (THOMAS and DWARAKISH, 2015; WMO, 2018). Similar to the project carried by Makris *et al.* (2021), the operational forecasts may be shared with end-users in the local community, with a potential to improve navigational processes and port's efficiency.

5. Summary and Conclusions

A down-scaling chain of wave models was applied, together with empirical insights from local maritime pilots and tugboat captains, to assess the wave regime characteristics in an open coastal harbor during the occurrence of swell events that may result in adverse agitation conditions within the sheltered region, with a potential to hinder the local port's operations. A regional standalone SWAN wave model forced by NWW3's parametric wave data was tested and validated using ADCP's field measurements. A series of different set-ups for the SWAN model were also tested and their impact on the wave parameters described. Applying NWW3 parametric data to force the local SWAN wave model provided good results. These results present some limitations and biases due to the NWW3 limitations, and therefore, despite showing general good performance, caution is recommended when using this kind of wave forecast to take decisions regarding harbor's operations.

The spectral wave outputs generated by SWAN were further applied as input to force the phase-resolving wave model XBEACH NH, and the results obtained by both models were used to analyze the local wave field, identifying critical points and propagation patterns. The discussions were further incremented by the addition of

considerations obtained from the local empirical knowledge, assuring extra validation to the modeling results. This practice should be encouraged as an important source of additional information to further enrich the debates and conclusions regarding the wave regime in ports.

Even for this relatively low complexity open coastal harbor, the use of SWAN to assess the wave regime within the sheltered zone showed limitations. Nevertheless, its use is highly recommended as a key component for wave modeling chain solutions to assess the wave regime near ports, providing accurate wave data to be applied as input to force high-resolution phase resolving wave models covering the harbors' area. Moreover, it is not feasible to apply phase-resolving models to the production of operational wave forecasts, due to the higher computational cost needed to simulate just a few hours of wave propagation. Therefore, it must be stressed that the SWAN is the proper tool for producing regional wave forecasts. Despite the restrictions verified inside the sheltered zone, the knowledge previously obtained through the application of XBEACH NH, and the differences identified between both wave models, may be used to better interpret the waves' forecast within the harbor basin. Furthermore, a local ANN model may be developed in the future, and the chain of models presented in this paper may be an important tool for validation purposes during the testing and training phases.

It is expected that the models' skill can be further improved by adding the currents' effects on the computations, and by using NWW3 spectral data as input to force the coarser SWAN grids boundaries.

Besides applying it as a short-term prediction tool, this chain of models may be useful to other aspects in the harbor's management process. It can be employed as a tool to test the effects that distinct engineering solutions would have on the wave parameters, such as varying the breakwater layout, or deepening a given region within the harbor or fairway. Furthermore, it can also be used to simulate extreme weather conditions.

The rather easy and cheap methodology described within this paper may be used by smaller harbors or other organizations with budget restrictions as a first step towards a better understating of the local wave transformation from deep to shallower water and its effects on coastal structures and ships' operations.

When using wave modelling for harbors' projects, besides the importance of applying both phase-averaged and phase-resolving models, it became clear that the results can be further improved by including the empirical insights from local seafarers in the discussions, allowing to reach conclusions that might not be evident when relying on the modeling results alone.

Acknowledgements

The authors thank Companhia Docas do Ceará (Mucuripe Port Authority) for providing wave ADCP field measurements for this research.

References

- ADYTIA, D., RAMDHANI, M., VAN GROESEN, E. Phase resolved and averaged Wave Simulations in Jakarta Harbour. 6th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics. Malaysia. 2012.
- ALABART, J., ARCILLA, A. S., VAN VLEDDER, G., 2014, Analysis of the performance of SWASH in harbor domains. Proc. 3rd IAHR Europe Congress, Porto, Portugal.
- ALONSO, L. G., MOURA, T. G. Z., ROIBAS, D. The effect of weather conditions on port technical efficiency. Marine Policy – Elsevier. Vol. 113. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.103816>
- ALTOMARE, C.; GIRONELLA, X.; SOSPEDRA, J. Wave reflection: small and large scale experiments on wave absorbing quay walls. A: Coasts, Marine Structures and Breakwaters. "From Sea to Shore – Meeting the Challenges of the Sea: (Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2013)". London: Institution of Civil Engineers (ICE), 2013, p. 1409-1417. doi:10.1680/fsts.59757.153
- ATAN, R., NASH, S., GOGGINS, J., (2017) Development of a nested local scale wave model for a 1/4 scale wave energy test site using SWAN, Journal of Operational Oceanography, 10:1, 59-78.
- BABANIN, A.V. et al. Advanced wave modeling, including wave-current interaction. Journal of Marine Research. Vol. 75, pp 239–262, 2017.
- BIOLCHI, L. G. FARINA, L. PEROTTO, H. The influence of seamounts on ocean surface wave propagation in Northeast Brazil. Deep-Sea Research Part I. Elsevier. 2019.

- BOOIJ, N. RIS, R. C., HOLTHUIJSEN, L. H., A third-generation wave model for coastal regions – 1 model description and validation. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 104, no. C4, pp. 7649-7666, 1999.
- COLLINS, J., 1972. "Prediction of shallow water spectra." *Journal of Geophysical Research* 77 (15): 2693–2707.
- COMPANHIA DOCAS DO CEARÁ. Reformulação do Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto de Fortaleza: Horizonte 2015-2030. Relatório Final. 2016.
- COSTA, C. E. B. Análise descritiva do padrão de ondas no litoral do Ceará através de dados observados. Undergraduate Thesis - Universidade Federal do Ceará. 2019.
- DELGADO, C. R., BERGILLOS, R. J. Wave energy assessment under climate change through artificial intelligence. *Science of the Total Environment* – Elsevier. Vol. 760, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144039>
- DELTARES, Delft3D – Wave — Simulation of short-crested waves with SWAN. User manual. Ver. 3.05.34160. Netherlands, 2014.
- HASSELMANN, *et al.*, 1973. "Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)." *Deutsche Hydrographische Zeitschrift* 8.
- HASTENRATH, S. Exploring the climate problems of Brazil's Nordeste: a review. *Clim. Change* 112, 243–251, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0227-1> (2012).
- HERNANDEZ, G. D., MENDEZ, F. J., LOSADA, I. J., CAMUS, P. MEDINA, R. A nearshore long-term infragravity wave analysis for open harbours. *Coastal Engineering*. Vol. 97, pp. 78-90, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.12.009>
- HOLTHUIJSEN, L. H. Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge University Press. 2007.
- HOLTHUIJSEN, L. H. HERMAN, A. BOOIJ, N. Phase decoupled refraction-diffraction for spectral wave models. Elsevier – *Coastal Engineering* 49. pp. 291-305. 2003. doi:10.1016/S0378-3839(03)00065-6
- LIU, Z., & BURCHARTH, H. F. (1999). *Port Engineering*. Aalborg: Aalborg Universitet, Inst. for Vand, Jord og Miljøteknik, Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning.
- LÓPES, I., LÓPES, M., IGLESIAS, G. Artificial neural networks applied to port operability assessment. *Ocean Engineering* – Elsevier. Vol. 109. pp. 298-308, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.09.016>
- MADSEN, O., Y.-K. POON and H. Graber, 1988. "Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory." In *Proceedings 21th International Conference Coastal Engineering*, ASCE, pages 492–504.
- MAKRIS, C. *et al.* Integrated modelling of sea-state forecasts for safe navigation and operational management in ports: Application in the Mediterranean Sea. *Applied Mathematical Modelling* – Elsevier. Vol. 89. pp. 1206-1234. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.08.015>
- MARCO, D. G., SIERRA, J. P., YBARRA, O. F., ARCILLA, A. S. Implications of long waves in harbor management: The Gijón port case study. *Ocean & Coastal Management* – Elsevier. Vol. 51. pp. 180-201, 2008. doi:10.1016/j.ocecoaman.2007.04.001
- MORTOLOCK, T.R., GOODWIN, I.D., TURNER, I.L.: Calibration and sensitivities of a nearshore swan model to measured and modelled wave forcing at Wamberal, New South Wales, Australia, p. 6. 2013.
- PIANCA, C., MAZZINI, P. L. F., SIEGLE, E., 2010. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography*. 58, 53–70.
- Pinheiro, L. S., de Moraes, J.O., Maia, L.P., 2016. The beaches of Ceará. In: Short, A.D., Klein, A.H. da F. (Eds.), *Brazilian Beach Systems*, Coastal Research Library. Springer International Publishing, pp. 175–199. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30394-9_7.
- RABINOVICH, A.B., 2009. Seiches and harbor oscillations .In:Kim, Y.(Ed.), *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. World Scientific Publishing, Singapore, pp. 193–236. http://dx.doi.org/10.1142/9789812819307_0009
- RIS, R. C., HOLTHUIJSEN, L. H. BOOIJ, N. A third-generation wave model for coastal regions – 2 verification. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 104, no. C4, pp. 7667-7681, 1999.
- ROELVINK, D. *et al.* (2015), XBeach Manual: Model description and reference guide to functionalities. Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology.
- ROLAND, A., ARDHUIN, F. On the development of spectral wave models: numerics and parameterizations for the coastal ocean. *Ocean dynamics*. Vol. 64. 2014. DOI: 10.1007/s10236-014-0711-z
- RUSU, E., SOARES, C. G. Modeling Waves in Open Coastal Areas and Harbors with Phase-Resolving and Phase-Averaged Models. *Journal of Coastal Research*. Vol 29 (6). pp. 1309-1325. 2013. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-11-00209.1
- RUSU, E., SOARES, C. G. Wave modeling at the entrance of ports. *Ocean Engineering*, 38(17–18), 2089–2109. 2011. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2011.09.002
- SCHNEIDER, T., BISCHOF, T., HAUG, G. Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. *Nature* 513(7516), 45–53, <https://doi.org/10.1038/nature13636> (2014).

- SIERRA, J. P. *et al.* Modelling the impact of climate change on harbour operability: The Barcelona port case study. *Ocean Engineering – Elsevier*. Vol. 141. pp. 64-78, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.06.002>
- SILVA, A. C. *et al.* Características das ondas “sea” and “swell” observadas no litoral do Ceará - Brasil: *Tropical Oceanography*, v. 39, n. 2, p. 123–132, 2011.
- SMIT, P. B. (2008). Non-hydrostatic modelling of large scale tsunamis. Delft, Delft University of technology. M.Sc. Thesis
- STELLING, G.S., ZIJLEMA, M., 2003 “An accurate and efficient finite-difference algorithm for non-hydrostatic free surface flow with application to wave propagation” *International journal for numerical methods in fluids*; 43:1-23 (DOI: 10.1002/d.595)
- The SWAN Team (2019). USER MANUAL SWAN Cycle III version 41.31: Delft University of Technology.
- The WAVEWATCH III Development Group (WW3DG), 2016: User manual and system documentation of WAVEWATCH III R version 5.16. Tech. Note 329, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 326 pp.
- THEIN, S. N. S., YANG, H. L., LIU, Z. B. Application of Numerical Wave Models for Prediction of Wave Characteristics at Deep Sea Ports of Myanmar. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*. Volume 4, Issue 4, pp. 21-27, 2019.
- THORESEN, C. A. *Port Designer’s Handbook*. ICE Publishing. London. 3 ed. 2014.
- THOMAS, T. J., DWARAKISH, G. S. Numerical wave modelling – A review. *Aquatic Procedia – Elsevier*. Vol. 4. pp. 443-448. 2015.
- UNITED NATIONAL CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT (UNCTAD), 2020. Review of Maritime Transport. https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2020_en.pdf
- VAN DER WESTHUYSEN, A.J., Zijlema, M., Battjes, J.A., 2007. Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water. *Coast. Eng.* 54, 151–170. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.08.006>.
- VAN MIERLO, F.A.J.M. (2014), Numerical modelling of wave penetration in ports, MSc thesis, Delft University of Technology.
- VAN VLEDDER, G. P., ZIJLEMA, M. Non-hydrostatically wave modelling in partly sheltered waters. 34th International Conference on Coastal Engineering. Seoul, Korea. 2014. DOI: 10.13140/2.1.2631.9682
- WILLIAMS, J. J., ESTEVES, L. S. Guidance on Setup, Calibration, and Validation of Hydrodynamic, Wave, and Sediment Models for Shelf Seas and Estuaries. Review Article. *Hindawi. Advances in Civil Engineering*. Vol. 2017. p. 25.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. *Physical Geography*, vol. 2, no. 2, pp. 184-194, 1981.
- WONG, A. L. Z. Wave hydrodynamics in ports: numerical assessment of XBeach. Delft University of Technology. MSc Thesis in Civil Engineering. pp. 135. 2016.
- WMO. 2018. Guide to wave analysis and forecasting. Draft to the 3rd. ed. Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization (WMO).
- YANG, Y. C., GE, Y. E. Adaptation strategies for port infrastructure and facilities under climate change at the Kaohsiung port. *Transport Policy – Elsevier*. Vol. 97. pp. 232-244, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.06.019>

3. SOLUÇÃO DE MODELAGEM APLICADA A DIFERENTES CENÁRIOS

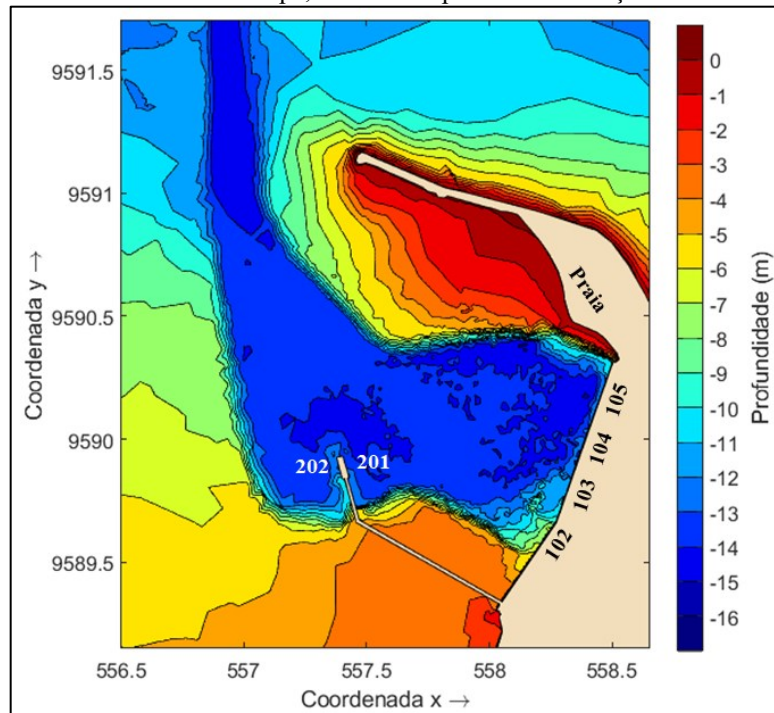
De posse dos modelos calibrados e da análise das condições atuais do porto, a solução de modelagem numérica foi aplicada para avaliar a dinâmica ondulatória dentro da bacia portuária em diferentes cenários. Inicialmente, o cenário atual foi comparado com o cenário anterior à construção do terminal de passageiros (berço 106), com o intuito de identificar possíveis alterações no padrão ondulatório resultantes da construção e dragagem do novo terminal. Posteriormente, o cenário atual foi comparado com duas opções de variação no atual layout do molhe do Titan, visando estimar o potencial que tais mudanças teriam para amenizar as condições de agitação dentro da área abrigada.

As condições de contorno do caso C-2 mencionado no conteúdo do artigo científico foram empregadas em todas as simulações, permitindo que os outputs obtidos pudessem ser comparados. Para fins desta análise, foram consideradas apenas as saídas do modelo XBEACH-NH. A batimetria do cenário prévio à construção do terminal foi adaptada com base em dados de versão passada da carta 701 da DHN, referente ao período anterior à inclusão do referido berço. Os cenários futuros simulados consideram a batimetria igual à atual, com inclusão dos obstáculos avaliados.

3.1 Cenário passado

Conforme mencionado no item anterior, a batimetria da região na qual está atualmente localizado o Terminal de Passageiros foi ajustada de modo a simular as condições existentes antes da construção do referido berço.

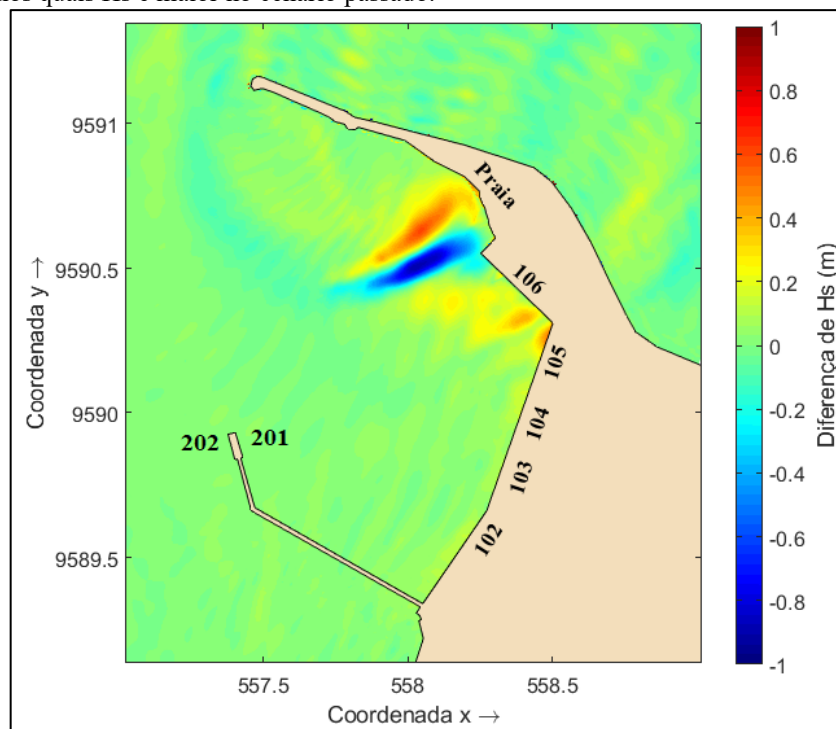
Figura 3: Batimetria do Porto do Mucuripe, em cenário prévio à construção do terminal de passageiros.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 3, é possível verificar que a Praia Mansa se estendia até o final do cais comercial, terminando em posição adjacente ao berço 105. Por apresentar uma natureza mais dispersiva, parte da energia que atualmente atinge o berço 106, sendo refletida de volta para a bacia, era dissipada no trecho adicional de praia. O efeito resultante deste padrão reflexivo do terminal, em comparação à condição previamente existente, pode ser verificado na Figura 4, que ilustra a diferença de Hs entre os cenários atual e prévio à construção do terminal. Segundo os resultados obtidos, nas condições consideradas, é perceptível o impacto que a presença do terminal tem em aumentar a altura significativa das ondas nas proximidades dos berços 105 e 106, tendo menor efeito sobre as alturas nos demais berços do porto. Ademais, também se destacam na Figura 4 dois padrões próximos à região remanescente da Praia Mansa, resultantes das alterações de profundidade por ocasião do projeto de dragagem realizado na área. A região positiva, indicada por uma coloração mais alaranjada, parece ser fruto de uma refração mais acentuada e interação construtiva verificada no cenário atual, enquanto a área negativa, assinalada em azul, demarca o início da região dragada, cuja profundidade foi ampliada de forma significativa, resultando em redução da altura das ondas.

Figura 4: Diferença de Hs (m) entre o cenário atual (com o berço 106) e o cenário prévio à construção e dragagem do referido terminal. Os valores positivos indicam pontos nos quais Hs é maior no cenário atual, e pontos negativos indicam pontos nos quais Hs é maior no cenário passado.



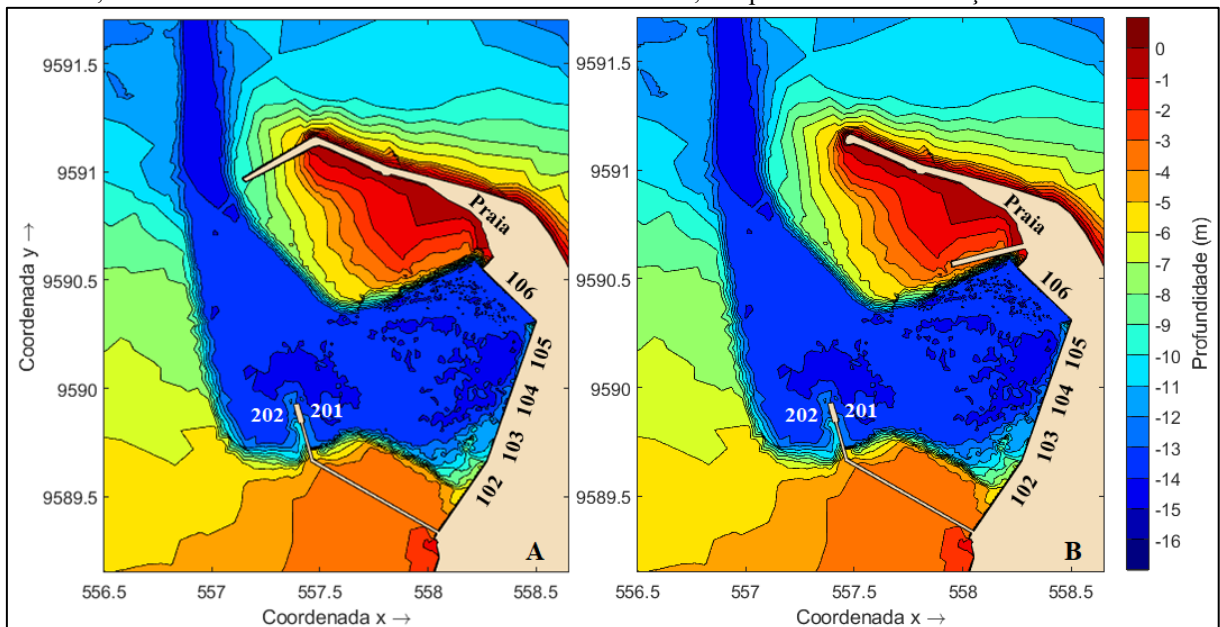
Fonte: Elaborada pelo autor.

Sendo assim, pode-se considerar que o novo berço do porto contribui para que parte da energia, que até então era dissipada na Praia Mansa, seja refletida de volta para a bacia de manobras. Tal condição propicia a formação de pontos com interação construtiva, resultando em ondas de maior altura, que por sua vez podem impactar negativamente as operações com navios que estejam atracados, principalmente nos berços 105 e 106, ou que estejam manobrando nas proximidades.

3.2 Potenciais cenários futuros

Visando avaliar o potencial impacto positivo que alternativas de alteração no layout do Molhe do Titan poderiam ter sobre a energia de onda que penetra no Porto do Mucuripe durante a ocorrência de chegadas dispersivas do Atlântico Norte, atingindo a bacia de manobras e os berços de atracação, 2 alternativas já propostas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Hidrográficas (2013 e 2014) para a Companhia Docas do Ceará foram simuladas. Conforme previamente mencionado, os cenários foram adaptados pela inclusão dos novos obstáculos, e o restante da batimetria foi mantida idêntica à condição atual.

Figura 5: Representação batimétrica do Porto do Mucuripe, considerando 2 variações possíveis para o molhe do Titan. Figura W.A: ilustração de alternativa proposta pelo INPH em 2013, com ampliação de cerca de 400m a partir da ponta do molhe do Titan, na direção sudoeste. Figura W.B: ilustração de alternativa proposta pelo INPH em 2014, com inclusão de um molhe interno com cerca de 350m, nas proximidades do berço 106.

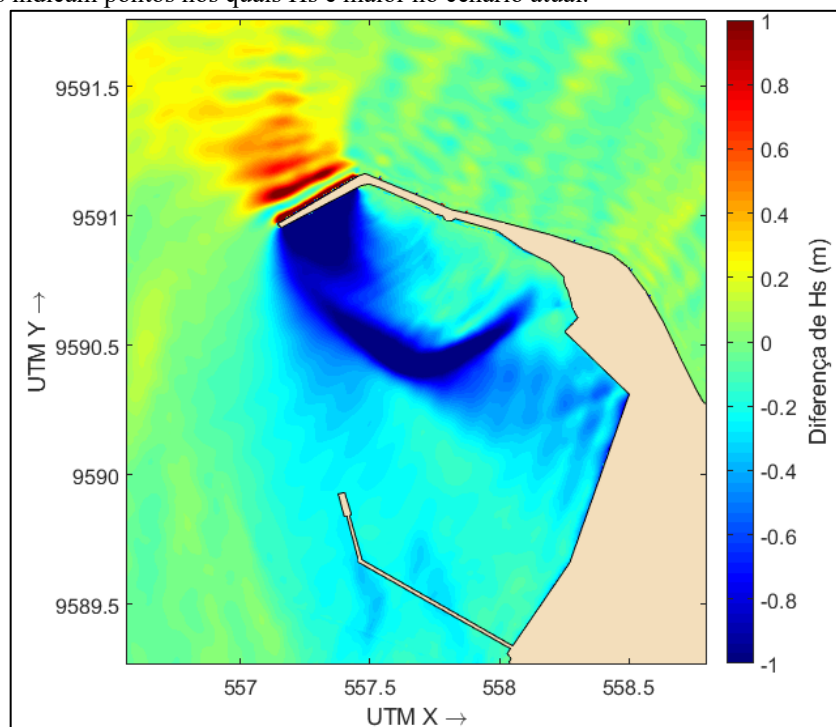


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na primeira alternativa, foi simulado o efeito que um aumento de cerca de 400m na ponta do molhe do Titan teria sobre o campo de ondas dentro da bacia do porto. Os resultados de Hs obtidos foram subtraídos pelas alturas verificadas com a simulação do cenário atual, e as diferenças estão ilustradas na Figura 6. Nela, as regiões azuladas fazem referência às áreas com redução de Hs pelo aumento do molhe, enquanto as avermelhadas indicam aumento de Hs em decorrência da variação proposta para a estrutura. É evidente o grande impacto positivo que tal alternativa traria à área abrigada do porto, com redução de Hs em todos os berços, inclusive nos do píer petroleiro (201 e 202). Os efeitos seriam mais significativos sobre os pontos adjacentes aos berços 104, 105 e 106, que são atualmente os mais afetados durante a ocorrência de chegadas dispersivas, segundo os resultados das modelagens e da pesquisa com marítimos locais, discriminados previamente no conteúdo do artigo científico. Há também, naturalmente, uma grande redução de Hs em determinados pontos da região de menor profundidade localizada na sombra do molhe.

Por outro lado, tal configuração pode propiciar o surgimento de padrão oscilatório, com ondas mais altas resultantes da interação construtiva entre as ondas que chegam de alto mar e as ondas refletidas pela estrutura. Tal região coincide com o trecho final do canal de acesso ao porto e, portanto, pode haver impacto negativo sobre o governo das embarcações. Ademais, seria fundamental avaliar o impacto que tal variação teria sobre a dinâmica sedimentar no porto. É possível que uma maior quantidade de sedimentos seja depositada na área dragada do canal, próximo à nova extremidade proposta para o molhe, podendo resultar, conseqüentemente, no estabelecimento de restrições operacionais, redução do calado máximo recomendado e elevação das despesas com obras de dragagem, que precisariam ser mais recorrentes.

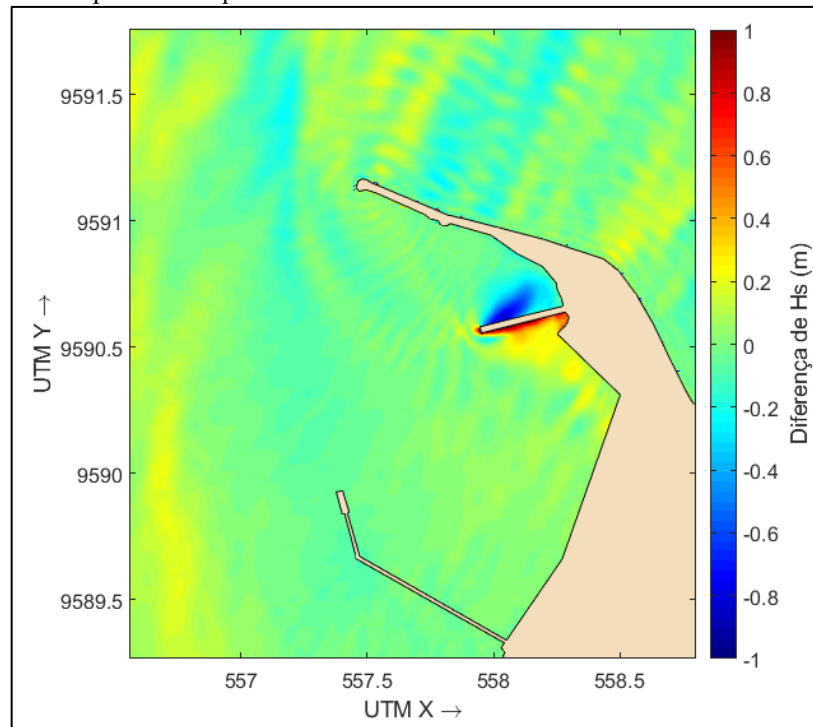
Figura 6: Diferença de Hs (m) entre o cenário atual e a alternativa de variação do molhe do Titan proposta pelo INPH em 2013. Os valores positivos indicam pontos nos quais Hs é maior no cenário com a inclusão do molhe, e pontos negativos indicam pontos nos quais Hs é maior no cenário atual.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a segunda alternativa, foi simulada a inserção de um molhe interno, com cerca de 350m, posicionado nas proximidades do terminal de passageiros. Assim como efetuado com a primeira alternativa, os resultados de Hs obtidos foram subtraídos pelas alturas verificadas com a simulação do cenário atual, e as diferenças estão ilustradas na Figura 7. Curiosamente, segundo os resultados obtidos, nas condições consideradas, a inclusão dessa estrutura poderia ter um resultado negativo sobre as condições ondulatórias na bacia do porto. Parte da energia das ondas que refrata sobre a região mais rasa localizada na parte interna do molhe do Titan atingiria a parte interna desta nova estrutura, sendo refletida na direção da bacia. Com isso, é possível verificar um aumento de Hs nas proximidades dos berços 105 e 106. Ou seja, os resultados obtidos com essa alternativa poderiam ter um efeito oposto ao esperado, agravando as condições de agitação. Nos demais berços do porto, o efeito parece ser pouco relevante.

Figura 7: Diferença de Hs (m) entre o cenário atual e a alternativa de variação do molhe do Titan proposta pelo INPH em 2014. Os valores positivos indicam pontos nos quais Hs é maior no cenário com a inclusão do molhe, e pontos negativos indicam pontos nos quais Hs é maior no cenário atual.

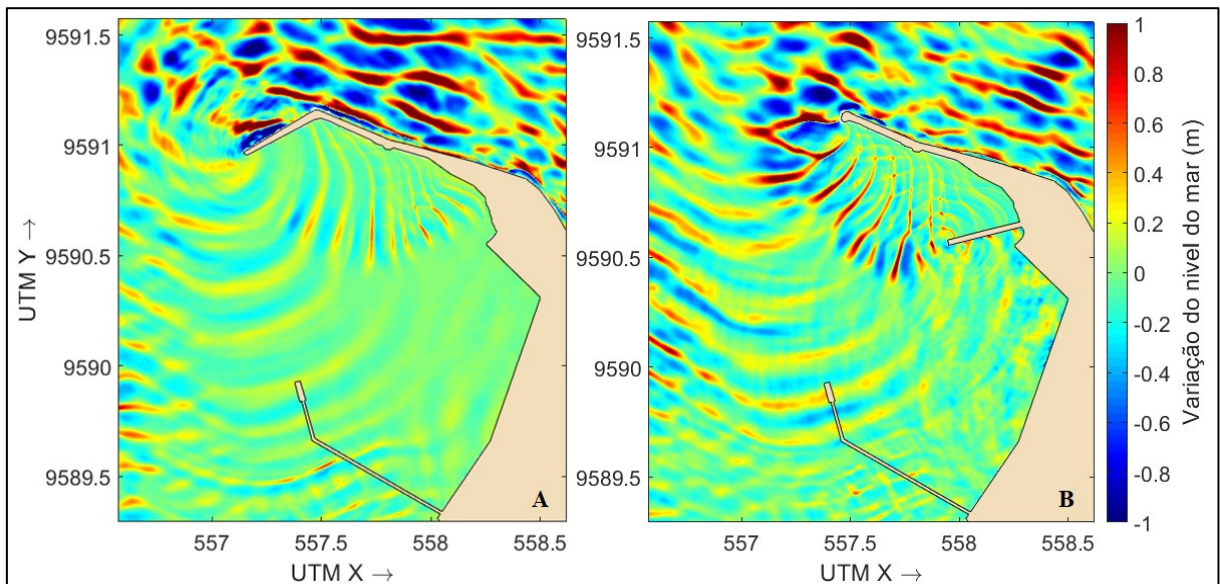


Fonte: Elaborada pelo autor.

É importante destacar que o INPH (2014), quando recomendou esta alternativa para a Companhia Docas do Ceará, incluiu também em suas considerações a questão da dinâmica sedimentar e assoreamento, que é naturalmente de grande relevância quando avaliando obras em áreas portuárias. Tal avaliação está fora do escopo do presente trabalho. Entretanto, no que diz respeito à análise das ondas, foi utilizada a ferramenta MIKE 21 SW, que se trata de um modelo espectral, assim como o SWAN. Apesar de ser uma ferramenta poderosa, aplicável a uma série de escalas e propósitos distintos, sendo inclusive recomendada para design de estruturas costeiras e portuárias (DHI, 2017), o modelo MIKE 21 SW também apresenta restrições semelhantes às descritas previamente para o modelo SWAN quando aplicado a áreas de geometria mais complexa, como bacias portuárias. Quando comparado aos resultados obtidos pela aplicação do modelo XBEACH NH, que neste caso particular apontam para uma conclusão oposta, fica evidente a importância de se trabalhar também com modelos de resolução de fase quando avaliando o impacto de obras portuárias sobre o regime de ondas local.

Para corroborar com as discussões, as Figuras 9.A e 9.B ilustram a variação do nível do mar nas simulações com as alternativas propostas pelo INPH. A amplitude de valores retratada nas figuras foi limitada entre -1m e 1m, no sentido de destacar de forma mais clara as variações de Hs dentro da bacia portuária. Portanto, pontos em azul e em vermelho escuro podem fazer referência, respectivamente, a variações abaixo de -1m ou acima de 1m. Conforme explicado nos parágrafos anteriores, fica evidente a condição bem mais degradada com a alternativa 2, em comparação ao abrigo propiciado pela extensão do molhe na alternativa 1.

Figura 8.A: Variação do nível do mar em um dado momento aleatório, considerando a primeira alternativa de variação do molhe do Titan. Figura 8.B: Variação do nível do mar em um dado momento aleatório, considerando a segunda alternativa de variação do molhe do Titan.



Fonte: Elaborada pelo autor.

É importante ressaltar que a análise conduzida nesta pesquisa está direcionada apenas à questão das ondas, e que uma série de outras variáveis e fatores precisam ser bem avaliados no processo de definição de uma solução otimizada para reduzir o impacto das ondas de provenientes de chegadas dispersivas sobre as operações no Porto do Mucuripe. Uma série de detalhes importantes, os quais fogem ao escopo do presente trabalho, tais como viabilidade técnica para realização da obra; análise do investimento financeiro necessário em relação ao orçamento disponível; impactos ambientais resultantes; consequência sobre a dinâmica de sedimentos e pontos de assoreamento; efeito das ondas refletidas sobre o governo dos navios que chegam e deixam o porto; entre outros, são fundamentais para garantir uma maior probabilidade de sucesso com relação às decisões tomadas.

3.3 Medidas complementares com potencial paliativo

Além do planejamento de novos projetos de obras portuárias para otimizar o abrigo propiciado aos berços de atracação e bacias de manobras, cabe ressaltar também que existem algumas ações e medidas complementares que podem ser adotadas com o intuito de minorar os efeitos negativos causados pelas ondas sobre os navios. Parte destas medidas são de mais simples aplicação, enquanto outras requerem maiores investimentos por parte da autoridade portuária.

A âncora dos navios, que tem a função principal de unhar no fundo e manter a embarcação ancorada em áreas de fundeio, fora dos portos, pode também ser um recurso importante a ser utilizado durante uma manobra de atracação, além de ser um dos principais dispositivos de emergência para reduzir o seguimento do navio durante situações de contingência. Apesar de não muito usual, seu uso em manobras ajuda a reduzir o seguimento

da embarcação e o diâmetro da sua curva de giro, além de possibilitar um aumento na eficiência do leme, por permitir o uso de maior potência na máquina sem que o navio aumente o seu seguimento (MACELREVEY e MACELREVEY, 2018). Em comunicação com os práticos locais, foi destacado que a âncora pode ter um papel importante também durante a estadia da embarcação. Segundo tais profissionais, durante a ocorrência de chegadas dispersivas que se propagam para dentro da bacia portuária, é prática corriqueira recomendar aos comandantes dos navios que façam uso da âncora, mantendo-a no fundo desde a atracação até o momento da saída. A âncora e sua amarra atuam, portanto, amortecendo os movimentos da embarcação, de modo a reduzir os riscos de avarias e de rompimento de cabos, assim como melhorando as condições para a operação da carga. Apesar da evidência empírica local de que tal medida é bastante eficaz, não foram identificados estudos que abordem o tema e avaliem o real impacto positivo que a manutenção da âncora e sua amarra no fundo podem ter na redução dos movimentos de um navio atracado em condições de chegadas dispersivas.

Figura 9: Defensas pneumáticas.



Fonte: Van der Molen *et al.* (2016)

Famosas por seu uso em manobras de transbordo, nas quais um navio atraca a contrabordo de outro para transferência de carga, as defensas pneumáticas (Figura 9) também podem ser úteis para melhorar as condições de navios atracados em portos durante a ocorrência de cenários mais adversos de agitação ondulatória. Tais equipamentos são flutuantes, e podem ser amarrados entre si e ao cais por meio de correntes. Estudos conduzidos por Sakakibara e Kubo (2008) com navios-tanque indicam que a eficiência da operação de carga é consideravelmente influenciada pelo tipo de defensas e sistema de amarração empregados, e atestam um ganho de eficiência quando defensas pneumáticas são aplicadas. Os resultados obtidos por Van der Molen *et al.* (2016) para embarcações atracadas com este tipo de defesa também são positivos, indicando que tende a haver uma redução nos movimentos dos navios, assim como também nos esforços sobre os cabos de amarração. Ainda segundo Van der Molen *et al.* (2016), os melhores resultados são obtidos quando empregando uma solução combinada de defensas pneumáticas e guinchos de amarração em terra com tensão constante em cabos de

través, utilizados em complemento aos cabos de amarração do navio. Tais cabos atuam puxando o navio junto às defensas, mantendo uma boa condição de atrito com as mesmas e reduzindo a amplitude dos movimentos causados pelas ondas.

O porto atualmente não conta com defensas pneumáticas, ou guinchos de amarração. Para avançar neste sentido, seria necessário realizar uma análise de viabilidade financeira para aquisição, manuseio e manutenção dos equipamentos. As defensas apresentam a vantagem de serem móveis, podendo ser deslocadas para diferentes berços, conforme a necessidade. Cabe ressaltar ainda que as atuais defensas do porto sofrem bastante durante a ocorrência de chegadas dispersivas. Portanto, é possível que a utilização de defensas pneumáticas minorasse o desgaste geral dos painéis das defensas atuais do porto, com possível redução nos seus custos de manutenção.

4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa foi conduzida com o intuito de avaliar as características do regime de ondas no Porto do Mucuripe durante a ocorrência de chegadas dispersivas provenientes do Atlântico Norte, fundamentando-se por resultados de modelagem numérica, dados de ondas locais e percepções empíricas de marítimos que trabalham na região. Como complemento, a performance e os resultados do modelo espectral SWAN na área portuária foram comparados com os resultados obtidos pela aplicação do modelo de resolução de fase XBEACH NH, visando avaliar as diferenças e aplicabilidades de um modelo espectral para portos costeiros abertos, com baixa complexidade geométrica. Por fim, foram testados diferentes cenários de obras portuárias, avaliando seus efeitos sobre a propagação de ondas na bacia portuária e canal de acesso ao porto.

A solução de modelagem fez uso de uma abordagem decrescente de ferramentas, iniciando com os dados de águas profundas do modelo global NWW3 como condição de contorno, passando pela transformação para regiões costeiras mais rasas com o modelo SWAN, e terminando com a propagação das ondas dentro da área do porto, com o XBEACH NH. Tal prática permite explorar os pontos fortes de cada modelo, e tende a ser mais eficaz do que aplicar somente uma única ferramenta de modelagem.

Ficou evidente que, mesmo para áreas portuárias com baixa complexidade, a interpretação de resultados obtidos por modelos de onda espectrais deve ser feita com cautela. Quando avaliando obras portuárias, é de extrema relevância utilizar também uma ferramenta de modelagem de ondas de resolução de fase. Dessa forma, pode-se afirmar que a primeira hipótese da presente pesquisa não foi atendida.

Mesmo com as limitações dentro da área abrigada, o modelo SWAN é considerado uma ferramenta de crucial relevância para propiciar inputs para modelos de resolução de fase, que por sua vez têm melhor capacidade de reproduzir a propagação das ondas dentro da bacia portuária, mesmo em condições de baixa complexidade.

Como em qualquer outra área da ciência, as observações empíricas têm grande importância e podem ter papel relevante quando discutindo e interpretando resultados. Mesmo que possam ter algum viés e certa subjetividade, as considerações dos marítimos locais ajudaram a compreender as características e padrões existentes na região, permitindo inclusive concluir certos fatores que talvez não fossem evidentes se a pesquisa estivesse debruçada apenas sobre os resultados da modelagem. Nessa linha, entende-se que a segunda hipótese estabelecida no início da presente pesquisa foi atendida.

Sobre a área de estudo, foi possível analisar o perfil de propagação das ondas no interior do porto, assim como verificar as regiões mais críticas, com maior tendência para desenvolver pontos de interação construtiva. Principalmente quando componentes de ondas de N ou NW estão presentes, uma quantidade relevante de energia difrata em torno da ponta do molhe do Titan, penetrando a bacia portuária. Os navios são mais afetados quando atracados nos berços 105, 104 ou 106, ou quando manobrando nas suas proximidades. Nos dois primeiros berços (104 e 105), as condições tendem a ser mais adversas devido ao fato de as ondulações atingirem os navios quase que de través. O pior cenário é geralmente verificado no berço 105, por ser

mais afetado que o 104 pelas ondas refletidas pelo berço 106. Sobre os berços do píer petroleiro (201 e 202), mesmo estando localizados em área menos abrigada, com incidência de ondas mais altas, o seu ângulo de ataque em relação ao eixo diametral dos navios atracados é pequeno, resultando em condição menos adversa para as embarcações neles atracadas. O maior efeito negativo em operações nesses berços é geralmente verificado durante algumas manobras, quando o navio está girando e os rebocadores ficam parcial ou totalmente expostos à ação das ondas, perdendo parte de sua efetividade.

Também foi possível atestar o efeito que as obras de construção e dragagem do terminal de passageiros tiveram sobre o regime de ondas no porto. Como era esperado, a estrutura contribui com a reflexão de parte da energia das ondas, que antes era dissipada na praia pré-existente, de volta para a baía, propiciando regiões de interação construtiva e maior H_s principalmente no entorno dos berços 105 e 106. O efeito sobre os demais berços do porto aparenta ser menos relevante.

Dentre as duas possibilidades de variação do molhe do Titan propostas pelo INPH (2013 e 2014) para a Companhia Docas do Ceará, a primeira opção (2013) apresenta grande potencial de abrigo para o porto, entretanto, outros detalhes importantes precisariam ser avaliados, tais como o impacto sobre a dinâmica de sedimentos e pontos de assoreamentos, assim como se a região com padrão oscilatório gerada pela nova estrutura teria algum impacto negativo sobre o governo das embarcações que navegam pelo canal de acesso. Tais questões estão fora do escopo do atual trabalho. Quanto à segunda opção (2014), foi verificado que ela é potencialmente ineficaz na missão de reduzir o impacto das ondas sobre os berços do porto, podendo inclusive ter um efeito oposto. Tal análise ratificou o fato de que modelos espectrais, como o usado na definição das obras citadas acima, têm restrições mesmo em portos costeiros abertos de baixa complexidade, e reforçou a importância de se utilizar ferramentas de modelagem de resolução de fase quando avaliando o impacto de obras portuárias sobre o regime ondulatório de um porto. Portanto, pode-se considerar que a terceira hipótese estabelecida no início dessa pesquisa foi parcialmente atendida, tendo em vista que somente uma das duas opções apresenta potencial positivo para reduzir as condições de agitação dentro do porto.

A solução de grades aninhadas preparadas com o modelo SWAN foi forçada com informações modeladas (ondas e ventos) ou previstas de forma harmônica (marés). Sendo assim, foram iniciados testes para aplicação do modelo como fonte de previsões locais de ondas para o porto (previsão para os 4 dias seguintes). Tendo em vista as limitações de se aplicar condições de contorno paramétricas durante a ocorrência de cenários de mar bimodal, as simulações de teste iniciais estão utilizando a ferramenta SpecGen, disponibilizada pela Universidade de Delft (<https://www.kennisbank-waterbouw.nl/Software/>), que consiste num script por meio do qual se pode informar as características de 2 componentes principais de ondas (*sea* e *swell*), e obter uma saída com o espectro bimodal composto pelas duas componentes mencionadas. Com isso, espera-se uma melhora na qualidade dos produtos propiciados pelo modelo, principalmente durante momentos com ocorrência simultânea de componentes relevantes de *sea* e *swell*. Os resultados com uso das condições de contorno geradas pelo SpecGen ainda precisam passar pelo processo de validação. Por fim, há uma expectativa de que os resultados podem ser melhorados pela inclusão do efeito das correntes, não consideradas na pesquisa atual.

Ainda em linha com o parágrafo anterior, é fundamental destacar que, para a finalidade de produzir previsões operacionais de ondas, o XBEACH NH acaba não sendo aplicável, tendo em vista o grande esforço computacional e tempo necessário para produzir previsões de ondas de poucas horas. Apesar disso, os resultados comparativos na presente pesquisa permitiram entender de forma mais detalhada os padrões e diferenças de resultados de ambos os modelos dentro da área abrigada, de modo que tal conhecimento gerado pode ser aplicado quando interpretando as previsões operacionais propiciadas pela ferramenta SWAN.

Apesar de sua grande relevância, os resultados obtidos por meio dos modelos de ondas consistem apenas em um dos vários fatores que norteiam o entendimento da eficiência das operações portuárias. O assunto é mais complexo, e as análises precisam continuar evoluindo para incluir a influência de fatores como o efeito do vento, maré e corrente de maré, condição de carga, tipos e quantidades de cabos empregados, características das defensas e seu efeito sobre o navio, entre outros.

O presente estudo pode ser encarado como o primeiro passo na construção de um entendimento mais robusto sobre o regime de ondas no porto e o seu impacto sobre as operações portuárias locais. Para o futuro, uma série de novos projetos podem abordar temas correlatos, dando continuidade ao processo de aprendizagem e produzindo mais conhecimento para a comunidade local, que por sua vez pode ser utilizado como base para aprimorar os modelos e sistemas existentes e, conseqüentemente, garantir maior previsibilidade para as operações do porto. Tais esforços podem resultar em ganho de eficiência para o porto, além de ter um potencial impacto positivo sobre a segurança da navegação e preservação do meio ambiente.

Espera-se que este trabalho possa servir como base inicial para outros projetos. Dentre as demandas e necessidades existentes, podem-se citar as seguintes possibilidades:

- Ampliar a grade na direção oeste, incluindo uma nova grade aninhada mais refinada na região do Terminal Portuário do Pecém, que fica localizado a aproximadamente 22 milhas náuticas do Porto do Mucuripe, de modo que seja possível produzir previsões de ondas para ambas as instalações portuárias. O porto do Pecém dispõe de dados de ondas passados, que poderiam ser obtidos para fins de calibração e validação dos resultados do modelo naquele terminal. Apesar de que o ideal seria contar com sensores oceanográficos medindo e compartilhando dados em tempo real, tal solução exige investimento e não está ainda disponível em nenhum dos dois portos. Portanto, espera-se que as previsões de modelagem, mesmo com suas limitações, possam servir de base para alertar os usuários do porto, assim como também para contribuir com tomadas de decisão sobre manobras e operação de carga em dias com previsões de chegadas dispersivas, as quais podem resultar em condições de agitação adversas dentro da região abrigada.
- Em linha com o item anterior, é de grande relevância estabelecer limites operacionais para condições adversas de agitação. Tanto o Porto do Mucuripe, como o Terminal Portuário do Pecém, não possuem limitações lastreadas nas condições de ondas. Seguindo as recomendações da publicação espanhola ROM 3.1-99 (*PUERTOS DEL ESTADO*, 2007), podem ser estabelecidos limites operacionais em 3 contextos distintos: limite para atracar; limite para interromper a operação de carga; e limite para que o navio permaneça atracado. Naturalmente, tal análise é mais complexa, já que as limitações tendem a variar para navios de diferentes tipos e portes, assim como também

para diferentes berços e equipamentos utilizados para operação da carga. Dessa forma, tal solução envolveria na verdade o estabelecimento de um conjunto de limites, englobando as diversas operações existentes nos portos estudados. Por fim, cabe ressaltar que, naturalmente, tal medida, para ser mais efetiva, precisaria ser implementada junto com algum sensor medindo dados de ondas em tempo real.

- Ainda em linha com itens anteriores, é crucial definir um conjunto de ações de contingência que possam ser recomendadas aos usuários para os momentos nos quais são esperadas condições de agitação adversas dentro da baía portuária, em decorrência de previsões de chegadas dispersivas do Atlântico Norte. Como exemplo, podem-se citar: ampliar a distância entre navios atracados (*PUERTOS DEL ESTADO*, 2007); aumentar a margem de segurança das janelas de maré, de modo a garantir maior folga abaixo da quilha durante as manobras, uma vez que as ondas tendem a aumentar o calado dinâmico dos navios; emprego da âncora dos navios durante as manobras de atracação, mantendo-as no fundo durante sua estadia; reforço na amarração; etc.
- Mais distante da realidade atual, é possível pensar também em soluções de aprendizagem de máquina e inteligência artificial para ajudar a prever se um conjunto de previsões pode, ou não, representar risco para uma determinada operação ou manobra. Tais soluções, entretanto, dependem primordialmente de uma grande quantidade de dados de qualidade. Seria necessário manter sensores meteorológicos e oceanográficos; utilizar dispositivos para calcular os movimentos dos navios atracados; e registrar momentos de interrupção das operações, assim como momentos nos quais a produtividade for reduzida.

Por fim, é importante sempre ratificar que, mesmo com todo o poder, capacidade e relevância das soluções de modelagem, seus produtos serão sempre uma tentativa de reproduzir, de forma aproximada, a realidade. Os modelos vão sempre depender de dados medidos *in situ* para fins de calibração e validação, e é fundamental que a prática de coleta de dados seja encorajada e incentivada. No Brasil, esta é uma área ainda muito pouco explorada, com poucas regiões contendo bons conjuntos de dados de campo. Espera-se que, no futuro, todos os portos nacionais possam manter seu conjunto de sensores meteorológicos e oceanográficos, armazenando séries temporais de dados e divulgando-os em tempo real.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADYTIA, D., RAMDHANI, M., VAN GROESEN, E. Phase resolved and averaged Wave Simulations in Jakarta Harbour. **6th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics**. Malaysia. p. 218-223, September, 2012.
- ALABART, J., ARCILLA, A. S., VAN VLEDDER, G. Analysis of the performance of SWASH in harbor domains. **Proc. 3rd IAHR Europe Congress**, Porto, Portugal, 2014
- ALFREDINI, P. Obras e Gestão de Portos e Costas: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental. 1. Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.
- ALONSO, L. G., MOURA, T. G. Z., ROIBAS, D. The effect of weather conditions on port technical efficiency. **Marine Policy – Elsevier**. Vol. 113. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.103816>
- ALTOMARE, C.; GIRONELLA, X.; SOSPEDRA, J. **Wave reflection: small and large scale experiments on wave absorbing quay walls. A: Coasts, Marine Structures and Breakwaters. "From Sea to Shore – Meeting the Challenges of the Sea: (Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2013)"**. London: Institution of Civil Engineers (ICE), 2013, p. 1409-1417. doi:10.1680/fsts.59757.153
- AQUINO, A. R. **Regime e variabilidade de ondas no Atlântico Tropical: Fortaleza**. 2016. TCC (Graduação em Oceanografia), Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2016.
- ATAN, R., NASH, S., GOGGINS, J. Development of a nested local scale wave model for a 1/4 scale wave energy test site using SWAN. **Journal of Operational Oceanography**, v. 10, n. 1, p. 59-78, 2017.
- BABANIN, A.V. et al. Advanced wave modeling, including wave-current interaction. **Journal of Marine Research**. v. 75, p 239–262, 2017.
- BIOLCHI, L. G. FARINA, L. PEROTTO, H. The influence of seamounts on ocean surface wave propagation in Northeast Brazil. **Deep-Sea Research Part I. Elsevier**. 2019.
- BOOIJ, N. RIS, R. C., HOLTHUIJSEN, L. H., A third-generation wave model for coastal regions – 1 model description and validation. **Journal of Geophysical Research**. v. 104, n. C4, p. 7649-7666, 1999.
- BOSHEK, M.R. **Reflection and Diffraction Around Breakwaters**. 2009. MSc Thesis in civil engineering. Delft University of Technology, Delft, 2009.
- BRASIL. Portaria nº 52/CPCE, de 19 de dezembro de 2013, Normas e Procedimentos da Capitania dos Portos do Ceará, Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, n. 55, p. 8, 21 mar. 2014, Seção 1, pt. 1.
- COLLINS, J. Prediction of shallow water spectra. **Journal of Geophysical Research**. v. 77, n. 15, p. 2693–2707, 1972.

- COMPANHIA DOCAS DO CEARÁ. Reformulação do Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto de Fortaleza: Horizonte 2015-2030. Relatório Final. 2016.
- COSTA, C. E. B. **Análise descritiva do padrão de ondas no litoral do Ceará através de dados observados**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) - Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará. 2019.
- DELGADO, C. R., BERGILLOS, R. J. Wave energy assessment under climate change through artificial intelligence. **Science of the Total Environment – Elsevier**. Vol. 760, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144039>
- DELTARES. Delft3D – Wave — Simulation of short-crested waves with SWAN. User manual. Ver. 3.05.34160. Netherlands, 2014.
- DHI. MIKE 21 – Spectral wave model – Scientific documentation. Denmark, 2017.
- DHN, Roteiro: Costa Norte – Da Baía do Oiapoque ao Cabo Calcanhar. Rios Amazonas, Jari e Trombetas. Rio Pará – 11. ed., 4. Reimp., atual. – Niterói, 2013.
- GARRISON, T. Essentials of Oceanography. 6th Canada: Cengag Learning, 2012.
- HASSELMANN, et al. Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). **Deutsche Hydrographische Zeitschrift** 8. 1973.
- HASTENRATH, S. Exploring the climate problems of Brazil's Nordeste: a review. **Clim. Change**. v. 112, p. 243–25, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0227-1>
- HERNANDEZ, G. D., MENDEZ, F. J., LOSADA, I. J., CAMUS, P. MEDINA, R. A nearshore long-term infragravity wave analysis for open harbours. **Coastal Engineering**. v. 97, p. 78-90, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.12.009>
- HOLTHUIJSEN, L. H. Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- HOLTHUIJSEN, L. H. HERMAN, A. BOOIJ, N. Phase decoupled refraction-diffraction for spectral wave models. **Elsevier – Coastal Engineering**, v. 49, p. 291-305, 2003.
- INPH. Anteprojeto de dragagem do futuro terminal de passageiros e adequação do acesso aquaviário ao porto de Mucuripe – Fortaleza / CE. Rev.03. SEP. Rio de Janeiro, 2014.
- INPH. Projeto da Expansão do molhe em 400m, com a finalidade de dar proteção ao Terminal de Passageiros – Porto de Fortaleza em Mucuripe - CE. SEP. Rio de Janeiro, 2013.
- LIU, Z., & BURCHARTH, H. F. Port Engineering. Aalborg: Aalborg Universitet, Inst. for Vand, Jord og Miljøteknik, Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning. 1999.
- LÓPES, I., LÓPES, M., IGLESIAS, G. Artificial neural networks applied to port operability assessment. **Ocean Engineering – Elsevier**. Vol. 109. pp. 298-308, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.09.016>
- MACELREVEY, D. E., MACELREVEY, D. H., Shiphandling for the Mariner. 5th Ed. USA: Cornell Maritime Press, 2018.

- MADSEN, O., Y.-K. POON, H. GRABER. Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory. In: **Proceedings 21th International Conference Coastal Engineering, ASCE**, p. 492–504, 1988.
- MAIA, L.P. **Processos Costeros y Balance Sedimentário a lo Largos de Fortaleza (NE-Brasil): Implicaciones para una gestion adecuada de la zona litorânea**. 1998. Tese (Doutorado em Geologia), Universitat de Barcelona, Barcelona, 1998.
- MAKRIS, C. et al. Integrated modelling of sea-state forecasts for safe navigation and operational management in ports: Application in the Mediterranean Sea. **Applied Mathematical Modelling – Elsevier**. Vol. 89. pp. 1206-1234. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.08.015>
- MANDAL, S., PRABAHARAN, N. Ocean Wave Prediction Using Numerical and Neural Network Models, **The Open Ocean Engineering Journal**, v. 3, p. 12-17, 2010.
- MARCO, D. G., SIERRA, J. P., YBARRA, O. F., ARCILLA, A. S. Implications of long waves in harbor management: The Gijón port case study. **Ocean & Coastal Management – Elsevier**. Vol. 51. pp. 180-201, 2008. doi:10.1016/j.ocecoaman.2007.04.001
- MORTOLOCK, T.R., GOODWIN, I.D., TURNER, I.L.: Calibration and sensitivities of a nearshore swan model to measured and modelled wave forcing at Wamberal, New South Wales, Australia. **Conference: Coast and Ports**, p. 6, 2013.
- PIANCA, C., MAZZINI, P. L. F., SIEGLE, E. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 58, p. 53–70, 2010.
- PINHEIRO, L. S., de MORAIS, J.O., MAIA, L.P. The beaches of Ceará. In: Short, A.D., Klein, A.H. da F. (Eds.), **Brazilian Beach Systems**, Coastal Research Library. Springer International Publishing, p. 175–199, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30394-9_7.
- PITOMBEIRA, E. S. Deformação das ondas por difração no molhe do Porto do Mucuripe (Fortaleza - Ceará - Brasil). **Arq. Cien. Mar**, v. 16, n. 1, p. 55 – 58, jun. 1976.
- PUERTOS DEL ESTADO. ROM 3.1-99: Recommendations for the Design of the Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Harbour Basins. Série 3. Madrid, 2007.
- RABINOVICH, A.B., 2009. Seiches and harbor oscillations. In: Kim, Y.(Ed.), **Handbook of Coastal and Ocean Engineering**. World Scientific Publishing, Singapore, pp. 193–236. http://dx.doi.org/10.1142/9789812819307_0009
- RIS, R. C., HOLTHUIJSEN, L. H. BOOIJ, N. A third-generation wave model for coastal regions – 2 verification. **Journal of Geophysical Research**. V. 104, n. C4, p. 7667-7681, 1999.
- ROELVINK, D. *et al.* XBeach Manual: Model description and reference guide to functionalities. Deltares, Netherlands, 2015.
- ROLAND, A., ARDHUIN, F. On the development of spectral wave models: numerics and parameterizations for the coastal ocean. **Ocean dynamics**. v. 64, 2014. DOI: 10.1007/s10236-014-0711-z

- RUSU, E., SOARES, C. G. Modeling Waves in Open Coastal Areas and Harbors with Phase-Resolving and Phase-Averaged Models. **Journal of Coastal Research**. v. 29, n. 6. p. 1309-1325, 2013. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-11-00209.1
- RUSU, E., SOARES, C. G. Wave modeling at the entrance of ports. **Ocean Engineering**, v. 38, n. 17–18, p. 2089–2109, 2011. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2011.09.002
- SAKAKIBARA, S.; KUBO, M. Effect of Mooring System on Moored Ship Motions and Harbour Tranquility. **Int. J. Ocean Syst. Manag.** v. 1, p. 84–99, 2008.
- SCHNEIDER, T., BISCHOF, T., HAUG, G. Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. **Nature**, v. 513, n. 7516, p. 45–53, 2014 <https://doi.org/10.1038/nature13636>
- SIERRA, J. P. et al. Modelling the impact of climate change on harbour operability: The Barcelona port case study. *Ocean Engineering – Elsevier*. Vol. 141. pp. 64-78, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.06.002>
- SILVA, A. C. et al. Características das ondas “sea” and “swell” observadas no litoral do Ceará – Brasil. **Tropical Oceanography**, v. 39, n. 2, p. 123–132, 2011.
- SMIT, P. B. Non-hydrostatic modelling of large scale tsunamis. 2008. MSc. Thesis in civil engineering. Delft University of technology, Delft, 2008.
- STELLING, G.S., ZIJLEMA, M. An accurate and efficient finite-difference algorithm for non-hydrostatic free surface flow with application to wave propagation. **International journal for numerical methods in fluids**; 43:1-23, 2003. (DOI: 10.1002/d.595).
- The SWAN Team. USER MANUAL SWAN Cycle III version 41.31: Delft University of Technology, 2019.
- The WAVEWATCH III Development Group (WW3DG). User manual and system documentation of WAVEWATCH III R version 5.16. Tech. Note 329, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 2016.
- THEIN, S. N. S., YANG, H. L., LIU, Z. B. Application of Numerical Wave Models for Prediction of Wave Characteristics at Deep Sea Ports of Myanmar. **International Research Journal of Advanced Engineering and Science**. v. 4, n. 4, p. 21-27, 2019.
- THOMAS, T. J., DWARAKISH, G. S. Numerical wave modelling – A review. **Aquatic Procedia – Elsevier**. v. 4, p. 443-448. 2015.
- THORESEN, C. A. Port Designer’s Handbook. 3rd Ed. London: ICE Publishing, 2014.
- UNITED NATIONAL CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT (UNCTAD), 2020. Review of Maritime Transport. https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2020_en.pdf
- VAN DER MOLEN, W.; SCOTT, D.; TAYLOR, D.; ELLIOTT, T. Improvement of Mooring Configurations in Geraldton Harbour. **J. Mar. Sci. Eng.** v. 4, n. 3, 2016. doi:10.3390/jmse4010003
- VAN DER WESTHUYSEN, A.J., Zijlema, M., Battjes, J.A. Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water. **Coast. Eng.** v. 54, p. 151–170, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.08.006>.

- VAN MIERLO, F.A.J.M. **Numerical modelling of wave penetration in ports**. 2014. MSc thesis in civil engineering, Delft University of Technology, Delft, 2014.
- VAN VLEDDER, G. P., ZIJLEMA, M. Non-hydrostatically wave modelling in partly sheltered waters. **34th International Conference on Coastal Engineering**. Seoul, Korea. 2014. DOI: 10.13140/2.1.2631.9682
- VIEIRA, M. D. P. **Identificação de ciclones extratropicais geradores de ondas swell na costa oeste do Ceará**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) - Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2016.
- WILLIAMS, J. J., ESTEVES, L. S. Guidance on Setup, Calibration, and Validation of Hydrodynamic, Wave, and Sediment Models for Shelf Seas and Estuaries. Review Article. Hindawi. **Advances in Civil Engineering**. p. 25, 2017.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.
- WONG, A. L. Z. **Wave hydrodynamics in ports: numerical assessment of XBeach**. 2016. MSc Thesis in Civil Engineering. Delft University of Technology, Delft, 2016.
- WMO. Guide to wave analysis and forecasting. Draft to the 3rd. ed. Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization (WMO), 2018.
- YANG, Y. C., GE, Y. E. Adaptation strategies for port infrastructure and facilities under climate change at the Kaohsiung port. **Transport Policy – Elsevier**. Vol. 97. pp. 232-244, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.06.019>

APÊNDICES

APÊNDICE A - SET-UP SWAN

Computational mode	Quasi-Stationary	Physical parameters	
Computational grids	Cartesian Coordinates	Depth-induced breaking	Activated
Currents	Not considered		$\alpha = 1; \gamma = 0.73$
Spectral space		Non-linear triad interactions	Activated
Directional space	Circle		$\alpha = 0.1; \beta = 2.2$
Number of direction bins	36	Bottom friction	Activated
Lowest frequency	0.04 Hz	Formula	JONSWAP ($0.038 \text{ m}^2/\text{s}^3$)
Highest frequency	1 Hz	Diffraction	Activated
Number of frequency bins	24	Smoothing coefficient	0.2
Boundaries		Smoothing steps	5
Boundaries with input data	NE and SE	Adapt propagation	Activated
Boundaries forcing type	Wavecon - time varying	Wind growth	Activated
Specification of spectra	Parametric - JONSWAP	Quadruplets	Activated
Peak enhancement factor	3.3	Whitecapping	Activated
Numerical parameters		Formula	Van der Westhuysen
Directional space (CDD):	0.5	Refraction	Activated
Frequency space (CSS):	0.5	Frequently shift	Activated
Relative change Hs-Tm01	0.02	Wave Set-up	Deactivated
Relative change w.r.t. Hs	0.02	Constants	
Relative change w.r.t. Tm01	0.02	Gravity	9.81 m/s^2
Percentage of wet grid points	98%	Water density	1028 kg/m^3
Max number of iterations	40	Convention	Nautical
		Minimum depth	0.05 m

APÊNDICE B - SET-UP XBEACH NH

%% %%%XBeach parameter settings input file %%%
%% %%%Paper Porto do Mucuripe - Case 2 (From PNBOIA)%%

nonh = 1

arc = 1

instat = swan

bcfile = filelist

secorder = 1

alfa = 0

bedfriction = manning

thetamin=-90

thetamax=90

dtheta=10.0

thetanaut=1

front = nonh_1d

left = neumann

right = neumann

back = abs_2d

gridform = delft3d

xyfile = xbeachgrid.grd

depfile = xbeachgrid.dep

zs0 = 0

outputformat = netcdf

posdwn = 1

rt = 7200

CFL = 0.7

dtbc = 1

tintg = 1

tintm = 7200

tstart = 0
tstop = 7201

%%%Physicalprocesses %%%%%%%%%%

swave = 0

lwave = 0

sedtrans = 0

morphology = 0

nonh=1

flow=1

%%%Outputvariables %%%%%%%%%%

nglobalvar = 2

zb

zs

nmeanvar = 2

zb

zs

APÊNDICE C - PESQUISA APLICADA JUNTO AOS MARÍTIMOS LOCAIS

1. Sabe-se que as características das ondas na região variam sazonalmente ao longo do ano. Tendo em vista sua experiência com operações no porto, quais os meses que geralmente apresentam condições mais adversas de agitação de ondas dentro da bacia portuária? (é possível selecionar mais de uma opção)
 - a. Janeiro
 - b. Fevereiro
 - c. Março
 - d. Abril
 - e. Maio
 - f. Junho
 - g. Julho
 - h. Agosto
 - i. Setembro
 - j. Outubro
 - k. Novembro
 - l. Dezembro
2. Tendo em vista sua experiência com operações no porto, classifique os berços do Porto do Mucuripe em ordem, desde o mais afetado até o menos afetado pela ação das ondas durante a ocorrência de condições adversas de swell.
 - a. 102
 - b. 103
 - c. 104
 - d. 105
 - e. 106
 - f. 201
 - g. 202
3. Qual a sua opinião sobre a relação entre a condição de carga dos navios e os efeitos sentidos durante a ocorrência de swell?
 - a. A condição de carga não aparenta ter efeito significativo sobre o comportamento dos navios durante a ocorrência de swell.
 - b. Navios descarregados tendem a ser mais afetados durante a ocorrência de swell.
 - c. Navios carregados tendem a ser mais afetados durante a ocorrência de swell.
4. Na sua visão, o efeito das ondas sobre a embarcação varia também conforme o tipo navio? Caso positivo, quais os tipos de navios que costumam ser mais afetados em condições adversas de swell? (é possível marcar mais de uma opção).
 - a. Navios de container
 - b. Navios de granel sólido
 - c. Navios de carga geral
 - d. Navios-tanque
 - e. Navios LPG
 - f. Navios de passageiros
 - g. Outros (navios de pesquisa, de guerra, PSVs, etc.)
 - h. O tipo de embarcação é um parâmetro de menor importância na análise do efeito das ondas sobre as embarcações.

5. Há, na sua visão, alguma relação entre o porte do navio e o seu comportamento dentro do porto do Mucuripe durante a ocorrência de swell?
 - a. Ambos os navios de maior e menor porte são afetados de forma semelhante.
 - b. Quanto menor o porte da embarcação, maior o efeito causado pela ação das ondas.
 - c. Quanto maior o porte da embarcação, maior o efeito causado pela ação das ondas.
6. Em uma escala de 1 a 4, onde 1 é discordo totalmente e 4 é concordo totalmente, a condição de maré pode ter grande influência sobre o regime de ondas dentro do Porto do Mucuripe?
 - a. Discordo totalmente
 - b. Discordo parcialmente
 - c. Concordo parcialmente
 - d. Concordo totalmente
7. Com base na sua experiência, em relação à situação da maré, as condições de onda tendem a se deteriorar em que momento?
 - a. Durante a baixa-mar.
 - b. Durante a enchente.
 - c. Durante a preamar.
 - d. Durante a vazante.
8. Em uma escala de 1 a 4, onde 1 é discordo totalmente e 4 é concordo totalmente, o bordo de atracação pode ter grande influência no comportamento do navio em condições de swell.
 - a. Discordo totalmente
 - b. Discordo parcialmente
 - c. Concordo parcialmente
 - d. Concordo totalmente
9. Em uma escala de 1 a 4, onde 1 é discordo totalmente e 4 é concordo totalmente, o ângulo de ataque das ondas em relação ao navio (pelo través, pela proa, pela alheta, etc.) tem grande influência sobre o comportamento do navio em condições de swell.
 - a. Discordo totalmente
 - b. Discordo parcialmente
 - c. Concordo parcialmente
 - d. Concordo totalmente
10. Com base na sua experiência, ordene do pior caso ao menos adverso (de cima para baixo) no que diz respeito ao ângulo de ataque das ondas em relação ao navio (considerando o navio atracado, ou próximo do berço).
 - a. Ondas pela proa
 - b. Ondas pela popa
 - c. Ondas pelo través
 - d. Ondas pela alheta
 - e. Ondas pela bochecha