MODELAGEM NUMÉRICA DE ONDAS E ANÁLISE DE QUEBRA- MARES COSTEIROS PARA DEFESA DOS IMPACTOS DE EVENTOS EXTREMOS EM SANTOS/SP

NUMERICAL WAVE MODELING AND ANALYSIS OF COASTAL BREAKWATERS FOR THE MITIGATION OF EXTREME EVENT IMPACTS IN SANTOS/SP

Rodrigo de Matos Ferreira, Fernando Alonso Martinez, Alexandra Franciscatto Penteado Sampaio, Regina de Souza Ferreira, Renan Braga Ribeiro, Paolo Alfredini, Matheus Souza Ruiz

Universidade Santa Cecília, Faculdade de Engenharia, Curso de Engenharia Civil
E-mail para contato: rodrigo.rmf2@gmail.com

RESUMO – Santos, por ser uma cidade litorânea de baixa elevação, sofre prejuízos com ressacas que impactam a orla e as atividades portuárias. Este estudo define características de eventos extremos de ondas usados como condição de contorno na modelagem numérica e avalia a mitigação de seus impactos por meio de cenários simulados na Baía de Santos, com e sem obra de proteção costeira. Os limiares críticos foram baseados no Plano Preventivo de Contingência para Ressacas e em eventos pretéritos. As simulações, com o modelo Delft3D, consideraram dois cenários: sem proteção e com quebra-mares emersos. Os resultados demonstraram a efetividade da modelagem como ferramenta preditiva e a viabilidade de obras de quebra-mar como medida robusta para mitigar impactos e aumentar a resiliência da orla.

Palavras-chave: Modelagem numérica; Evento extremo; Quebra-mares; Agitação marítima; Delft3D.

ABSTRACT – Santos, as a low-lying coastal city, suffers damages from storm surges that affect both the shoreline and port activities. This study defines the characteristics of extreme wave events used as boundary conditions in numerical modeling and assesses the mitigation of their impacts through simulated scenarios in Santos Bay, with and without coastal protection structures. The critical thresholds were based on the Santos's Plano Preventivo de Contingência para Ressacas and Coastal Flooding and on past events. Simulations using the Delft3D model considered two scenarios: without protection and with emerged breakwaters. The results demonstrated the effectiveness of numerical modeling as a predictive tool and the feasibility of breakwater structures as a robust measure to mitigate impacts and enhance shoreline resilience.

Keywords: Numerical modeling; Extreme event; Breakwaters; Sea agitation; Delft3D.

1 INTRODUÇÃO

As cidades litorâneas do Brasil estão suscetíveis a eventos meteoceanográficos extremos, intensificados pelas mudanças do clima globais (Church e White, 2006). Estes eventos incluem chuvas intensas, tempestades, inundações e alterações da morfologia costeira, resultando em graves prejuízos, como mortes, destruição de moradias e impactos na infraestrutura urbana dessas regiões (Resio e Westerink, 2008; Gutjahr et al., 2010).

Os municípios localizados no litoral do Estado de São Paulo possuem um histórico de eventos extremos, como enchentes, inundações e vendavais (Ruiz, 2020; Alfredini et al, 2025). A Baixada Santista, região litorânea que abrange nove municípios: Bertioga, Cubatão, Guarujá, Itanhaém, Mongaguá, Peruíbe, Praia Grande, São Vicente e Santos; é particularmente vulnerável a esses eventos. As ocorrências frequentes dos eventos extremos afetam a infraestrutura e as comunidades locais, bem como a economia nacional referente a logística de escoamento de carga de exportação e importação destinada ao maior porto em movimentação de carga da América Latina.

Existe uma correlação de efeitos mútuos entre as alterações morfológicas e a hidrodinâmica do clima de ondas e do campo de correntes que moldam os perfis de praia. Church e White (2006) afirmam que o aumento crescente do nível dos oceanos deve causar prejuízos nas zonas costeiras de todo o mundo.

Assim, com eventos extremos ocorrendo com maior intensidade e frequência, a engenharia costeira deve buscar soluções inovadoras a fim de proteger as linhas de costa mais vulneráveis e populosas, que estão sob o risco de maiores impactos erosivos. Dentre elas destacam-se os grandes centros urbanos e portos marítimos implantados próximos a essas localidades, os quais são responsáveis por diversas atividades, tais como pesca, turismo, indústria, tráfego marítimo e obras costeiras. Portanto, desenvolver soluções para defesa costeira, através de estudos marítimos para implementação de quebra-mares, são importantes para elevar a segurança da população litorânea, bem como minimizar os prejuízos econômicos gerados pelos impactos dos eventos meteoceanográficos extremos.

Santos é um município da Baixada Santista, que está incluído em zonas de baixa elevação costeira (LECZ – *Low Elevation Coastal Zones*), e por ter o maior porto em movimentação de carga do Hemisfério Sul, possui vários estudos observando problemas na logística de cargas

em seus acessos rodoviários e ferroviários, prejudicados durante os períodos de eventos extremos.

O município de Santos sofreu processos morfodinâmicos oriundos das atividades antrópicas na localidade, dentre eles destacando-se a erosão na linha praial do bairro da Ponta da Praia, processo que caracteriza a grande movimentação morfológica costeira na região da maior desembocadura do estuário santista (Moraes, Bernadino e Alfredini, 2021).

A hipótese central deste trabalho afirma que a implementação de quebra-mares costeiros na Baía de Santos são uma solução de engenharia eficaz para a defesa dos impactos da agitação marítima sobre a orla durante eventos extremos. A validação desta hipótese se baseia na premissa de que a presença da obra de proteção (quebra-mar emerso) altera a dinâmica de propagação das ondas, dissipando parte da sua energia e, consequentemente, reduzindo a altura e a força com que atingem as praias.

O presente estudo tem como objetivo avaliar, por meio da modelagem numérica de ondas, a eficácia de quebra-mares costeiros como solução de engenharia costeira para mitigar os impactos de eventos extremos de agitação marítima na orla de Santos/SP. Tendo como objetivos específicos: definir as características de um evento extremo de ondas (altura, período e direção) para serem empregadas como condição de contorno na modelagem numérica; simular a propagação de ondas na Baía de Santos para três cenários distintos empregando modelagem numérica: i) condição atual (sem obra de proteção); ii) simulação com quebra-mares submersos; iii) simulação com quebra-mares emersos; analisar e comparar os resultados dos cenários simulados para quantificar a atenuação na altura das ondas proporcionada pela obra e, assim, fornecer subsídios técnicos para a proposição de soluções de proteção costeira.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia envolveu a definição da grade numérica representativa do modelo, além da vetorização e conversão das coordenadas de profundidades (de UTM para Geográfica) atualizadas da Carta Náutica e a simulação numérica de propagação de ondas no Delft3D WAVE (Deltares, 2018), considerando as condições atual (sem obra de proteção) e com a eventual implementação de uma obra em segmentos (quebra-mares submersos e quebra-mares

emersos) projetados de acordo com as recomendações normativas. Isso possibilitou analisar condições ondulatórias que influenciam a região estudada em conjunto com o resultado da simulação dos quebra-mares, aferindo os resultados de agitação marítima e fatores que influenciam caso essa obra de proteção costeira fosse implementada futuramente.

Para efetuar a análise gráfica, a fim de comparar resultados de modelos numéricos e evidenciar as oscilações marítimas na Baía de Santos, foi empregado o software Delft Dashboard para elaboração da grade de modelo que engloba a região desse estudo.

Essa grade define a resolução espacial do modelo e serve como base para calcular e representar graficamente os parâmetros como: altura significativa das ondas, período, direção, energia e interação com o fundo marinho e obras costeiras. No módulo de ondas (Delft3D-WAVE), a grade é fundamental para resolver as equações de balanço de energia das ondas, permitindo prever como as ondas se propagam, refratam, dissipam e interagem com o ambiente físico, sendo essencial em estudos de hidrodinâmica costeira, erosão, impacto de obras marítimas e planejamento costeiro. Com isso, é possível avaliar, simultaneamente, as interações de ondas na região estudada com as obras costeiras proposta nessa simulação.

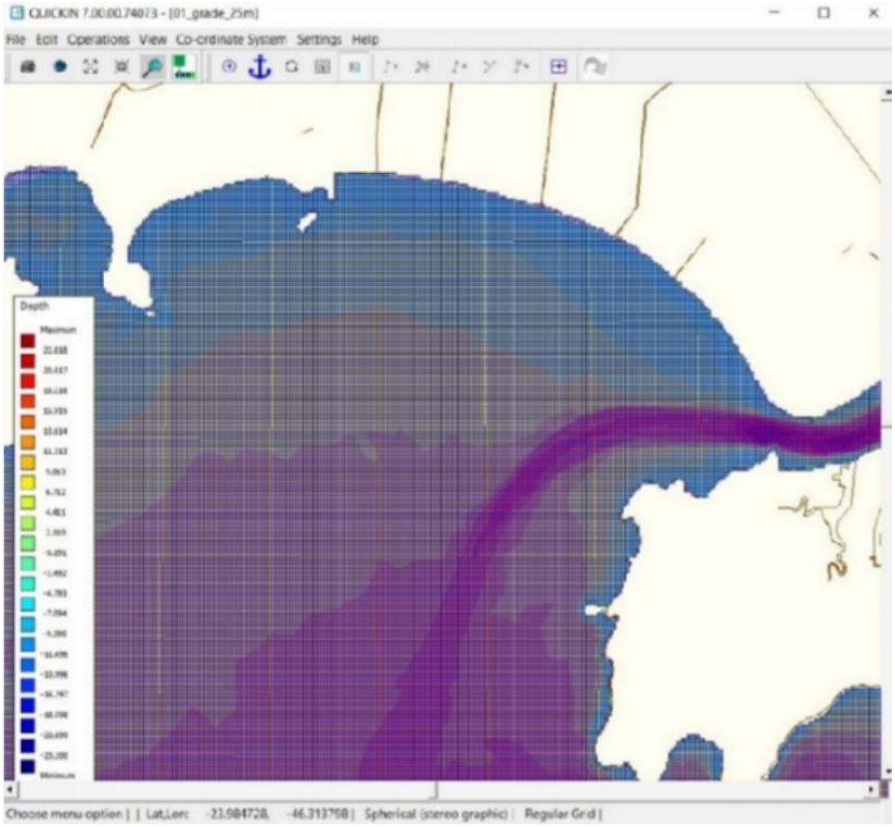
A análise do Deft3D-WAVE é realizada através de grades, portanto foram elaborados alguns modelos de grades com espaçamentos diferenciados empregando o software Delft Dashboard. Para equalizar a melhor resolução possível de grade, aliada ao melhor tempo de processamento e computação, adotou-se o tamanho da célula de (25mx25m).

Os limites adotados abrangeram a região definida para análise. Além disso, a grade computacional elaborada permitiu observar as interações em toda a Baía de Santos, as quais podem influenciar nos resultados com a onda projetada, também, a grade teve a abrangência da cota batimétrica de 30 m até a região da praia santista e todos os contornos geográficos da Ponta de Itaipu em São Vicente, Barra de São Vicente, toda orla de São Vicente e Santos, parte do canal interno de Santos até o Rio do Meio em Guarujá e fechando o contorno na Praia de Guaiúba no Guarujá.

Após a elaboração da grade computacional, integram-se a essa grade informações da superfície digital da Carta Náutica (vide Figura 1), e tais informações empregam-se na análise, computando em conjunto informações da onda tipo. Na modelagem numérica utilizando Delft3D-WAVE, o software permite a configuração dos obstáculos de acordo com as condições

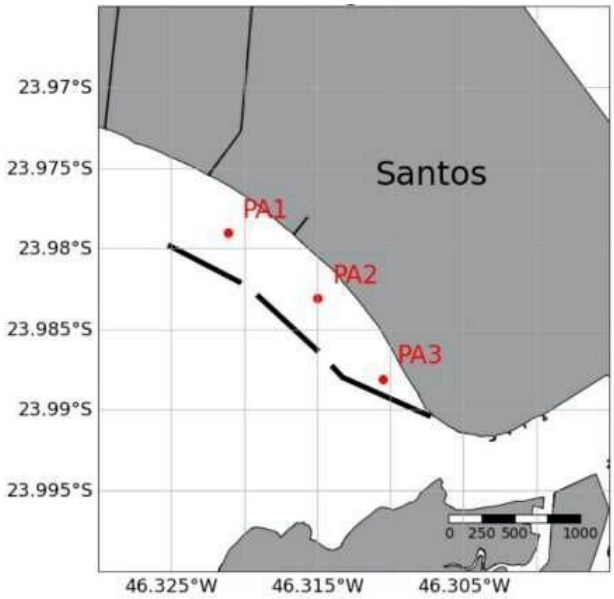
adotadas pelos autores: a) Definição das regiões de grade onde se localizarão os quebra-mares e a batimetria local de implementação; b) Configuração de condições como altura do talude, coeficientes de transmissão, reflexão e dissipação, para relacionar com as interações de ondas; e c) Estabelecimento das condições da superestrutura, sendo possível simular os impactos de ondas e observar os resultados que a adoção dos quebra-mares poderá produzir, através da análise dos cenários em planta da região.

Figura 1. Grade computacional integrada a batimetria no Delft3D. Fonte: Autor



Visando diminuir a intensidade das ondas nas praias Ponta da Praia, Aparecida e Embaré, projetou-se quebra-mares como trapezoidais hipotéticos com a localização adotada conforme apresentado na Figura 2, como também é evidenciado os Pontos de Amostragem (PA1, PA2 e PA3) dos resultados de modelo para validação da atenuação da onda nas praias do Embaré, Aparecida e Ponta da Praia

Figura 2: Localização dos quebra-mares propostos e pontos de amostragem (linhas em preto). Fonte: Autor.



Na Tabela 1, estão apresentados todos os parâmetros definidos paras as condições dos eventos de onda. Observa-se que, no presente estudo, as simulações foram exclusivamente de propagação de ondas, não sendo abordado nessa pesquisa análise de eventos meteorológicos.

Tabela 1. Características de onda identificadas como condição de contorno na modelagem.

Hs (m)	Tp (s)	Direção (°)	Cota do nível do mar (Marinha) (m)
Característica de onda adotada			
3,9	10	195	2,0

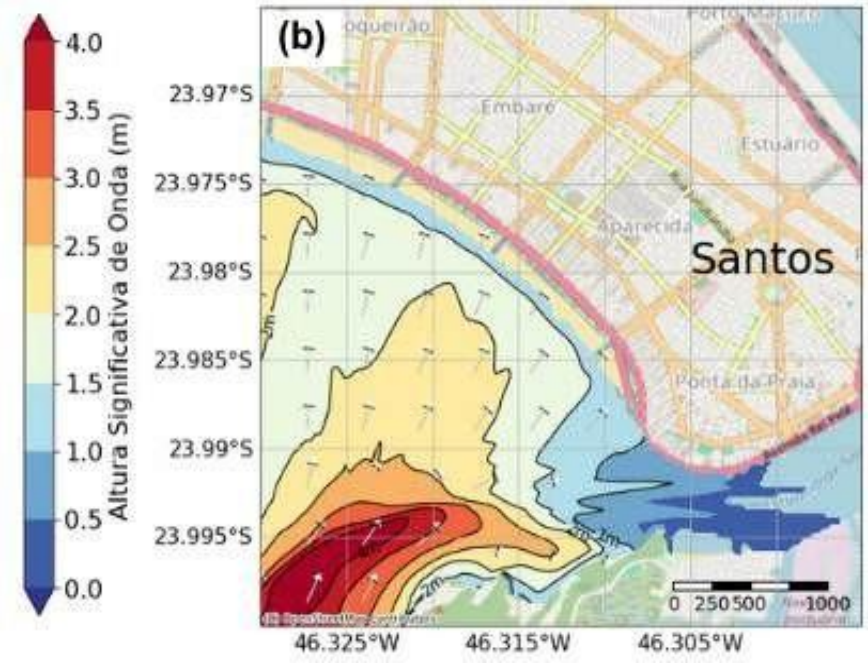
Para a análise final da dinâmica entre interações de onda e as praias mencionadas com e sem o posicionamento do quebra-mar para proteção costeira, dividiu-se as simulações em dois cenários, tomando como referência a direção de 195° da onda. Os cenários definidos foram, um com simulação do clima de ondas na Baía de Santos sem a representação da estrutura de proteção costeira e outro com simulação do clima de ondas na Baía de Santos com a representação da estrutura de proteção costeira emersa (4 m acima do nível zero DHN).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados de forma a avaliar comparativamente a propagação de ondas da Baía de Santos sob a influência de diferentes direções e considerando os cenários de proteção costeira propostos.

A simulação de propagação de ondas para a direção de 195° confirma a vulnerabilidade da orla de Santos, especialmente nas praias do Embaré, Aparecida e Ponta da Praia, a eventos extremos. No Cenário 1 (sem proteção costeira), as ondas chegam à costa com energia considerável, gerando as condições de agitação marítima que historicamente causam prejuízos nas praias e nas infraestruturas urbanas locais. A análise visual da Figura 3 demostra a mancha de cores quentes (amarelo a vermelho) indicando alturas significativas de onda (Hs) superiores a 2,0 m atingindo diretamente a linha de costa.

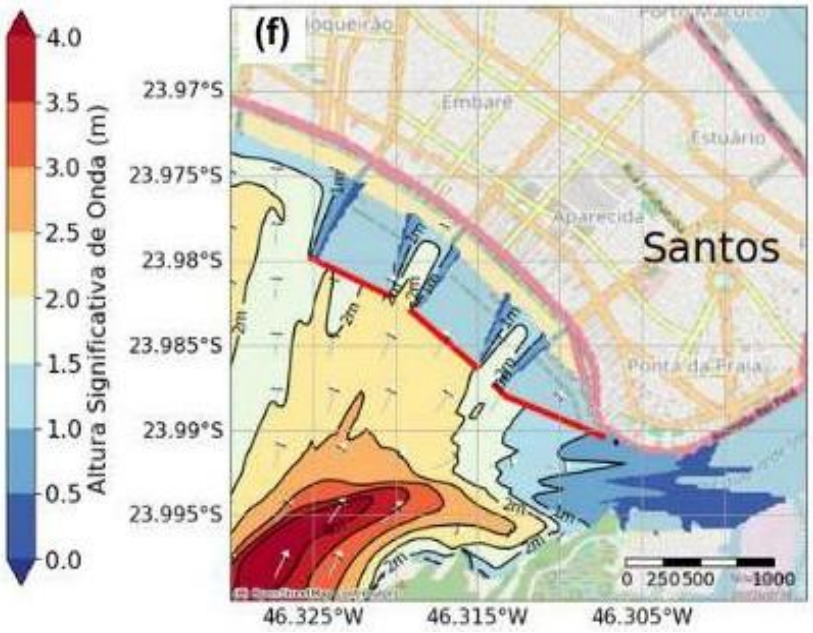
Figura 3: Resultado de simulação onda (Hs) para direção 195° - sem estrutura. Fonte: Autor.



A introdução de quebra-mares como obra de proteção costeira se demonstrou potencial para mitigação desses impactos, conforme detalhado na Figura 4. Neste cenário, a simulação com os quebra-mares revelou uma eficácia notável. Esse fenômeno físico reduziu efetivamente a altura das ondas entre os segmentos deles, chegando a ser superior a 96% da altura inicial. Essa expressiva atenuação não só diminuiu em muito a agitação, mas também reconfigurou o ambiente entre a estrutura e a praia, transformando uma área sujeita a alta energia das ondas em

um ambiente de baixa agitação e menor energia, protegendo eficientemente a linha de costa das condições mais adversas simuladas. Além do exposto, considerando a praia do Boqueirão, a simulação mostrou diminuição das alturas das ondas, mesmo em trecho onde não há proteção direta e projeção dos quebra-mares. Este resultado revela-se extremamente relevante, pois aponta para uma otimização na proteção, criando um ambiente mais protegido e seguro para atividades costeiras e para a própria estabilidade da linha de costa.

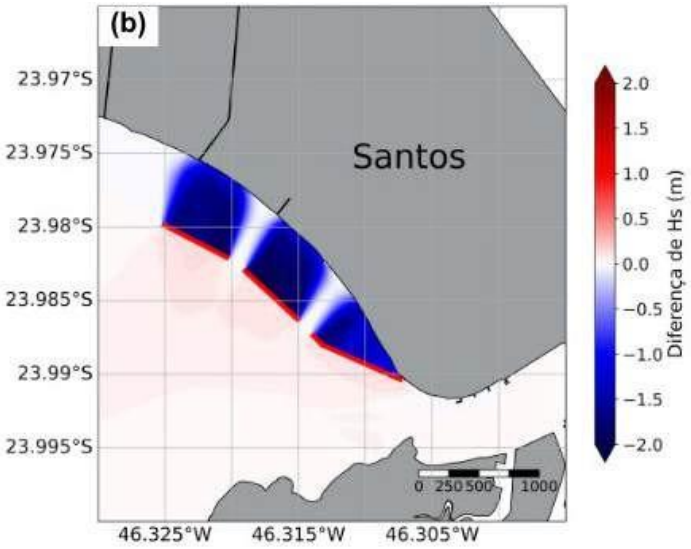
Figura 4: Resultado de simulação onda (Hs) para direção 195° - com estrutura.



É válido notar, que no trecho do quebra-mar que protege a praia da Ponta da Praia, a simulação do cenário com obra emersa demonstrou haver uma sobre-elevação de Hs no canal de navegação, propagando-se até o lado Oeste da Fortaleza da barra, na margem do Guarujá (Figura 4).

Analisando o resultado da diferença entre o cenário sem obra de proteção e com obra de proteção emersa (Figura 5), verificou-se atenuação de 1,79 m, representando 96% de atenuação no PA2 com direção 195°, sendo a atenuação mínima encontrada de 1,15 m, representando 98% de atenuação no PA3.

Figura 5: Diferença de Hs para cenário com obra emersa (195°). Fonte: Autor.



4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos das simulações, por meio da modelagem numérica, de propagação de ondas, fornecem uma base robusta para a compreensão dos impactos de eventos extremos de ondas na Baía de Santos e para a validação da eficácia de obras de proteção costeira. As simulações, que contemplaram a direção de onda 195° com e sem proteção costeira, demonstraram consistentemente que a implantação de obras de engenharia costeira como quebra-mares, são uma medida viável e altamente eficiente na atenuação da agitação marítima nas praias de Ponta da Praia, Aparecida e Embaré. A redução máxima de aproximadamente 1,7 m na altura significativa de onda (Hs), observada no tardoz dos quebra-mares, não apenas quantifica o benefício dessas intervenções, mas também reafirma seu papel fundamental como estruturas importantes para a mitigação dos prejuízos generalizados causados pelas ressacas na baía de Santos. Os resultados das simulações demonstram a robustez das soluções propostas frente a direção de propagação de ondas extremas. Adicionalmente, o resultado de atenuação da Hs na Praia do Boqueirão, mesmo em trechos sem proteção direta projetada, sugere um efeito de proteção indireto positivo e de alcance mais amplo da obra na dinâmica da Baía de Santos.

5 REFERÊNCIAS

Alfredini P, Arasaki E, Puia HL. **Hindcasting of extreme wave events in the fairway of Port of Santos (Brazil) over the last eighty years**. TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, v. 19, n.1, p. 269-274, 2025.

Church JA, White NJ. **A 20th century acceleration in global sea-level rise**. Geophys Res Lett. 2006;33(1).

Deltares. **SWAN - Simulating Waves Nearshore: An open-source code for simulating waves in coastal regions**. Versão 2.0. Deltares; 2018.

Gutjahr M, et al. **Changes in North Atlantic Deep-Water strength and bottom water masses during Marine Isotope Stage 3 (45–35 ka BP)**. Quat Sci Rev. 2010;29(19-20):2451-2461.

Moraes GM, Bernardino JCM, Alfredini P. **Erosão costeira e planejamento urbano: revisão histórica da ocupação da Ponta de Praia de Santos – SP**. XXIV SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2021.

Resio DT, Westerink JJ. **Modeling the physics of storm surges**. Phys Today. 2008;61(9):33-38.

Ruiz MS. **Modelagem de eventos extremos de nível do mar no Sistema Estuarino de Santos, São Vicente e Bertioga durante o ano de 2016**. [Dissertação de Mestrado]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2020.