



ANÁLISE EM MODELO CFD DA COMBINAÇÃO ENTRE QUEBRA-MAR SUBMERSO E ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL DE PRAIA: ESTUDO DE CASO DO TRECHO DA PONTA DA PRAIA DE SANTOS (SP)

Palavras-Chave: EROSÃO COSTEIRA, ENGORDAMENTO DA PRAIA, SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Autores(as):

MARIA LAURA N. SIQUEIRA, FECFAU – UNICAMP

Prof. Dr. TIAGO ZENKER GIRELI (orientador), FECFAU – UNICAMP

ADRIANO HENRIQUE TOGNATO (coautor), FEC-UNICAMP

INTRODUÇÃO:

A Baía de Santos, situada no litoral do estado de São Paulo, no município de Santos, enfrenta desafios graves na infraestrutura da orla devido à erosão costeira progressiva. Essa perda de areia compromete a proteção costeira, resultando na invasão frequente das avenidas e edifícios pelo mar durante ressacas e tempestades (SCHELTINGA et al., 2022), cuja frequência aumentou com as mudanças climáticas. Além disso, o Porto de Santos, o maior e mais importante da América Latina, também sofre com a intensificação do balanço sedimentar negativo na Baía, o que afeta suas operações e infraestrutura (GIRELI; VENDRAME, 2012; DOS SANTOS, 2022).

Este estudo tem como objetivo analisar a eficácia do quebra-mar de geotubos submerso do projeto de Garcia, Gireli e Venâncio (2018), combinado com uma alimentação artificial de praia, utilizando um modelo de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) para o trecho da Ponta da Praia em Santos. A pesquisa busca compreender como essa interação influencia o comportamento das correntes e ondas na região costeira, avaliando a configuração sedimentar volumétrica de areia para impedir o avanço do mar, bem como a eficácia na redução da erosão costeira e estabilização da praia. A análise dos resultados obtidos por meio do modelo CFD visa fornecer informações técnicas para a implementação de medidas de gerenciamento costeiro e estratégias de adaptação às mudanças climáticas.

METODOLOGIA:

A metodologia da pesquisa baseia-se na utilização de modelos computacionais de dinâmica de fluidos (CFD) para simular a interação entre ondas e estruturas costeiras. O software Flow-3D® foi selecionado por sua capacidade de resolver as equações de Navier-Stokes com alta precisão no comportamento hidrodinâmico dos fluidos, pois sua modelagem tridimensional cria uma representação numérica das superfícies e estruturas do domínio de estudo em formato de malha (“mesh”), adequada para geometrias complexas e variações temporais como a adotada na pesquisa. A FECFAU-UNICAMP possui uma licença educacional do Flow-3D®, obtida através dos esforços do coautor e do orientador em anos anteriores, facilitando a condução deste estudo.

A definição das condições de contorno começou com a geração dos sólidos no AutoCAD Civil 3D® (operando sob licença educacional), que incluiu o perfil praial com enrocamento de pedra, a mureta e o calçamento da orla, a localização do quebra-mar submerso e a alimentação artificial de areia. Esses modelos foram exportados em formato STL para o Flow-3D®. Componentes específicos, como a mureta da calçada e os bags do quebra-mar, foram modelados no SketchUp®, com autoria de Tognato (2020) e Venâncio (2018), respectivamente. É também da autoria de Tognato a elaboração do tanque de ondas numérico, em modelo CFD integrado ao CAD.

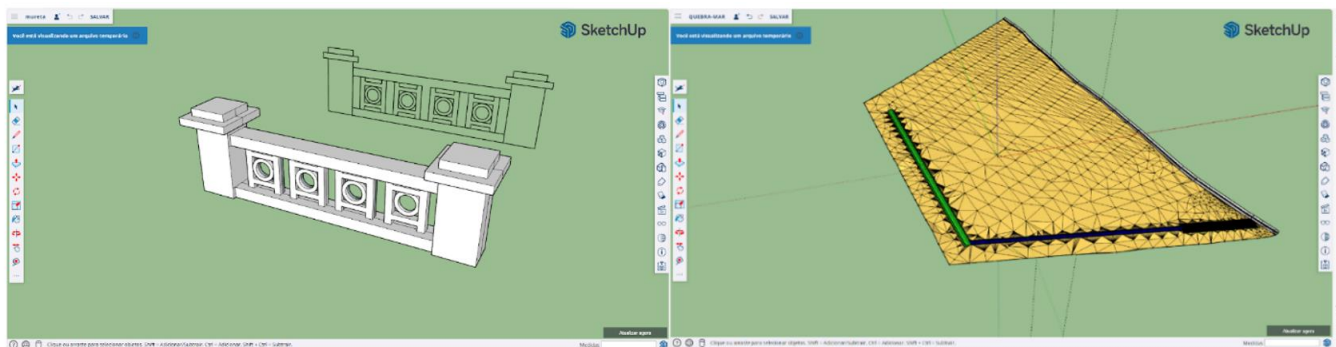


Figura 1: detalhes da mureta da calçada da orla e do perfil da praia elaborados e concedidos por Tognato (2020).

A modelagem incluía inicialmente toda a Baía de Santos, mas devido a problemas com o Flow3D® instalado em uma das máquinas do laboratório do Departamento de Recursos Hídricos, foi necessário reduzir o número de células comportadas no mesmo, fazendo com que o trabalho incluísse apenas a Seção 0 como parâmetro principal. Dessa forma, foi gerada uma faixa de simulação a partir dessa seção, com 5 metros para esquerda e para direita. As cotas das seções adjacentes, como Santos 23 e Seção 1, foram integradas à Seção 0 para auxiliar na geração de cenários de alimentação artificial, ajustando e rotacionando os sólidos para compensar diferenças de altura. Esse ajuste permite criar um perfil que reflete as áreas com maior acúmulo de areia que sofreram menos erosão e são mais estáveis aos efeitos das ressacas.

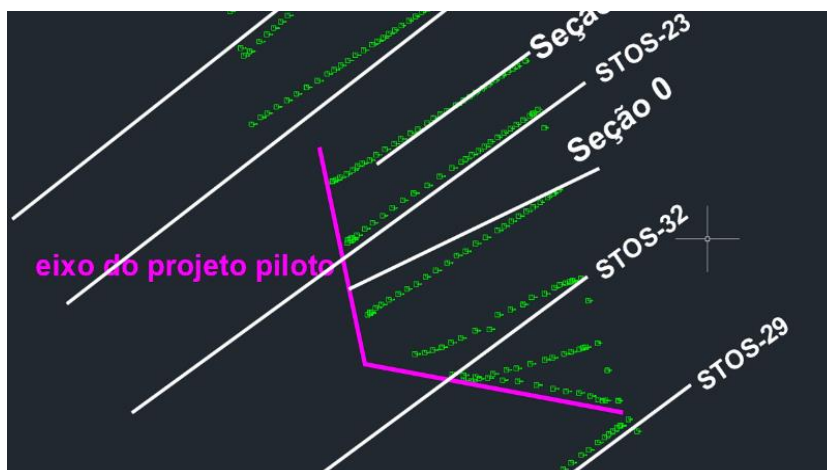


Figura 2: detalhe das seções da Ponta da Praia, em especial a Seção 0 e a Santos 23 (STOS-23).

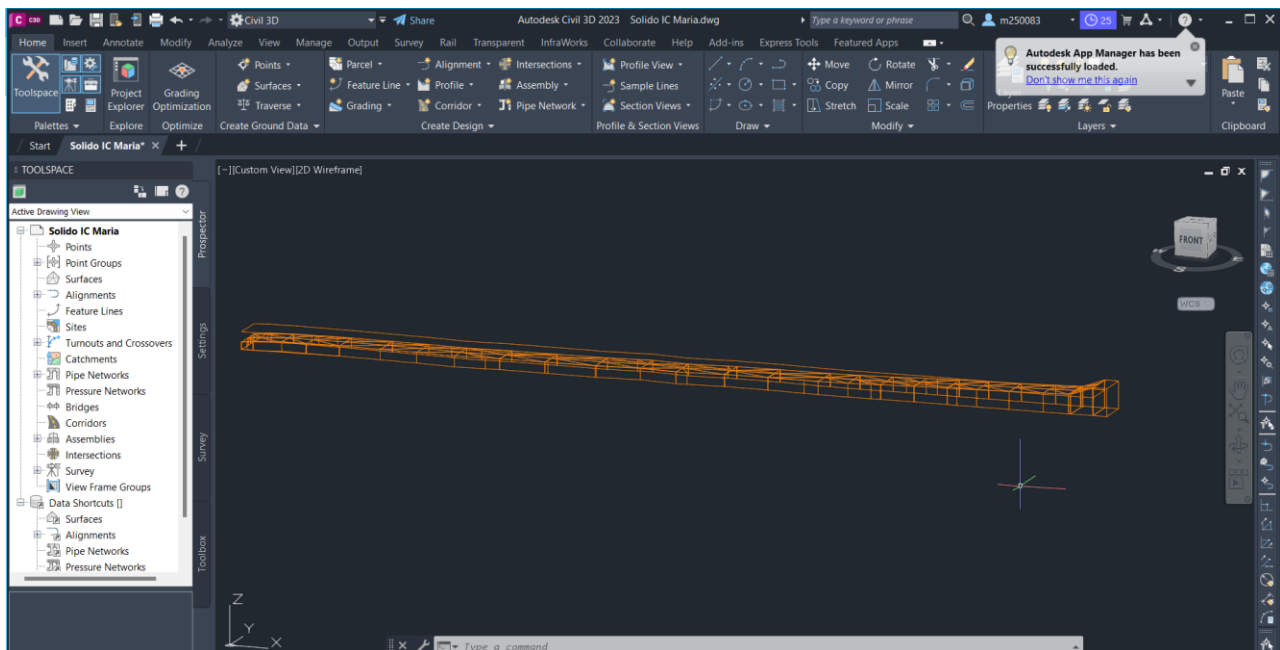


Figura 3: sólido da faixa de simulação rotacionado e com eixo alinhado ao do software de CFD empregado; inclui batimetria, enrocamento e calçada.

Serão simulados cenários de alimentação artificial da praia, elevando o perfil batimétrico do modelo. Para isso, será avaliada a evolução natural do perfil com a inserção da obra, o comportamento dos perfis emersos protegidos pela estrutura (VENÂNCIO, 2018) e, se necessário, aplicadas equações clássicas de perfil praial, como a de Bernabeu et al. (2003). Cada cenário variará na quantidade de sedimentos adicionados e na combinação com a estrutura de quebra-mar submerso. O objetivo é identificar a configuração que melhor previne a invasão do mar na infraestrutura urbana da orla.

O modelo CFD foi configurado importando a geometria para o Flow-3D® e estabelecendo as condições iniciais e de contorno, como altura e período das ondas e direção das correntes. Características adicionais das ondas, como período e fase, foram consideradas na simulação. O período das ondas não varia significativamente ao se propagar, mas a altura varia. A equação da onda foi aplicada para modelar ondas senoidais e ondas de Stokes-equinoidais, com a última sendo capaz de reproduzir irregularidades na altura e comprimento das cristas das ondas. O Flow-3D® pode simular essas ondas, embora ajustes na altura das ondas fossem necessários, calibrados com base em filmagens e registros de campo da ressaca de 28 de outubro de 2018, e que validam os dados registrados em campo nos dias 24 e 25 de outubro do mesmo ano.

As características da porosidade e rugosidade das pedras também foram integradas ao Flow-3D® para uma simulação mais precisa (DENTALE, 2018). A porosidade foi ajustada utilizando métodos numéricos para representar como a pedra influencia a altura da onda e a dissipação de energia. A rugosidade superficial será ajustada de acordo com uma escala de rugosidade. A calibração desses parâmetros será realizada com base na literatura existente e em dados específicos sobre as pedras de granito utilizadas, que têm aproximadamente 100 kg. Esse ajuste é crucial para simular corretamente a interação das ondas com as estruturas costeiras.

As simulações numéricas serão realizadas para diferentes cenários, variando a altura e o período das ondas, a porosidade e a rugosidade das pedras. A análise do comportamento das ondas e das correntes deverá avaliar a resposta às alterações na estrutura costeira.

Para garantir a precisão das simulações, são necessárias calibração e validação comparando os resultados com dados de campo e literatura existente. O processo inclui a definição de dados de entrada no Flow-3D®, a configuração das simulações, a definição de unidades e a configuração dos modelos físicos e dos fluidos. Ajustes na malha numérica foram feitos para otimizar a precisão e eficiência das simulações.

RESULTADOS ESPERADOS E DISCUSSÃO:

Os resultados esperados das simulações, de acordo com a metodologia descrita, indicam que a combinação de quebra-mar submerso e alimentação artificial de praia pode efetivamente reduzir a erosão costeira na área de estudo. Com a presença do quebra-mar submerso, a energia das ondas que atingem a costa deve ser reduzida. Além disso, a alimentação artificial pode contribuir para a estabilização da faixa de areia ao adicionar sedimentos na área afetada, acelerando a recuperação de uma configuração que proteja a costa.

Também é esperado que a análise espectral das ondas mostre variações na altura e no comprimento das ondas ao longo do tempo. Tal complexidade capta as nuances do comportamento das ondas e, conseqüentemente, permite a avaliação da eficácia da intervenção proposta. Simulações para diferentes cenários de altura e período das ondas devem fornecer dados sobre a influência das variáveis na eficiência da solução.

Ademais, os ajustes na malha numérica e a incorporação de novas variáveis contribuem para a precisão das simulações, pois ajustes finos nas condições refletem de maneira mais fiel o ambiente real. Portanto, a calibração desses parâmetros será crucial para garantir que os resultados obtidos sejam realistas e úteis para futuras implementações na orla santista.

CONCLUSÕES:

A análise prevista usando o modelo CFD sugere que a combinação do quebra-mar submerso com alimentação artificial de praia pode ser uma abordagem eficaz para mitigar a erosão costeira na Ponta da Praia de Santos. A presença do quebra-mar deve reduzir a energia das ondas que atingem a costa, enquanto a alimentação artificial de estabiliza a faixa de areia, protegendo assim a infraestrutura costeira.

Faz-se necessário realizar mais simulações e calibrações para validar a eficácia da solução em diferentes condições ambientais, dando campo para mais pesquisas sobre a Ponta da Praia da Baía de Santos. A validação completa exigirá testes adicionais para garantir que a solução funcione sob diversas situações. Se bem-sucedido, o projeto piloto pode servir como modelo para outras regiões costeiras que enfrentam problemas similares.

BIBLIOGRAFIA

BERNABEU, A. M.; MEDINA, R.; VIDAL, C. **A morphological model of the beach profile integrating wave and tidal influences**. *Marine Geology, Espanha*, v. 197, p. 95-116, 2003.

DENTALE, F. et al. **A CFD approach to rubble mound breakwater design**. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, v. 10, n. 5, p. 644–650, 2018.

GIRELI, T. Z.; GARCIA, P. D.; TRABANCO, J. L. A.; VENÂNCIO, K. K.; KLEIN-GUNNEWIEK, A. F.; TOGNATO, A. H.; GOLLINO, L. S.; SILVA, M. B. **RELATÓRIO PARCIAL 08 – MONITORAMENTO DO PROJETO PILOTO - SANTOS (SP)**. Relatório Técnico, 2021.

SANTOS, I. A.; GARCIA, P. D. **Análise das taxas de evolução dos fundos no trecho 1 do canal do Porto de Santos**. Projeto de Iniciação Científica (PIBIC), Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais, Campinas, SP, Brasil, 2022.

SCHELTINGA, P. S.; KLEIN-GUNNEWIEK, A. F.; GARCIA, P. D.; GIRELI, T. Z. **Análise dos efeitos de obras de proteção costeira nas correntes longitudinais litorâneas**. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FECFAU) - Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) – Campinas, Brasil, 2022.

TOGNATO, A. H. **Modelagem CFD da interação entre hidrodinâmica costeira e quebra-mar submerso: estudo de caso da Ponta da Praia em Santos, SP**. 2020. 1 recurso online (115 p.). Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1638695>. Acesso em: 15 mai. 2023.

VENÂNCIO, Kelly Kawai et al. **Evolução hidromorfodinâmica da região da Ponta da Praia em Santos-SP, no período entre 2009 e 2017**. 2018. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/331424>. Acesso em: 18 abr. 2020.