

## MODELO NUMÉRICO DE PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS EM PRAIAS E PRÓXIMO A OBRAS HIDRÁULICAS MARÍTIMAS

*Rodrigo Amado Garcia Silva<sup>1</sup> ; Paulo Cesar Colonna Rosman<sup>2</sup> & Marcos Nicolás Gallo<sup>3</sup>*

**RESUMO** – Ao longo de todo o litoral brasileiro observa-se a presença de obras hidráulicas marítimas. Entretanto, as mudanças ocasionadas no transporte de sedimentos pela implantação de tais obras nem sempre são estudadas com a atenção necessária. Neste contexto, este trabalho apresenta um modelo numérico para simulação de processos hidro-sedimentológicos na zona de arrebentação de ondas. Apresentam-se aplicações do sistema de modelagem SisBaHiA na simulação das correntes hidrodinâmicas e do transporte de sedimentos ocasionado pela quebra de ondas nas proximidades de um espigão e de um quebra-mar, obras hidráulicas marítimas típicas. Apresenta-se ainda a simulação de um episódio de ressaca na Praia de Piratininga, Niterói – RJ, que apresenta certa vulnerabilidade durante episódios de ressaca.

**ABSTRACT** – Along the entire Brazilian coastline one observes the presence of maritime hydraulic structures. However, the changes caused in sediment transport by the implantation of such structures are not always studied with the necessary attention. In this context, this paper presents a numerical model for simulation of hidro-sedimentological nearshore processes. Applications of the modeling system SisBaHiA are presented, such as the simulation of hydrodynamic currents and sediment transport caused by breaking waves in the vicinity of a groyne and a breakwater, typical maritime hydraulic structures. One also presents a simulation of storm waves condition in Piratininga Beach, Niterói – RJ, a beach which presents a certain level of vulnerability under storm waves.

**Palavras-Chave** – Transporte de Sedimentos; Estruturas Hidráulicas Marítimas; Modelagem Numérica.

---

1) Engenheiro pesquisador na Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica (Programa de Engenharia Oceânica) da COPPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro. Email: rodrigoamado@oceanica.ufrj.br.

2) Professor Titular do Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (Escola Politécnica) e da Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica (Programa de Engenharia Oceânica – COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Email: pccrosman@ufrj.br.

3) Professor Adjunto da Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica (Programa de Engenharia Oceânica) da COPPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro. Email: marcosgallo@oceanica.ufrj.br.

## INTRODUÇÃO

A zona de arrebentação de ondas é uma região na qual os processos hidrossedimentológicos apresentam grande complexidade. O conhecimento e a capacidade de representar adequadamente esses processos é importante para fins como gestão portuária, projetos de obras hidráulicas marítimas e diagnóstico do impacto ambiental destas obras. Embora o transporte de sedimentos ocasionados pela ação de ondas possa ser importante em rios e reservatórios com grande espelho de água, sua ação é geralmente mais relevante na região costeira.

Estruturas hidráulicas como molhes e quebra-mares são muitas vezes implantadas para a criação de regiões abrigadas em portos, para impedir o assoreamento nos canais de acesso de um porto, ou supostamente, para conter a erosão de trechos da linha de costa. Entretanto, as mudanças ocasionadas por tais estruturas no transporte de sedimentos nem sempre são estudadas com a devida atenção. Uma vez que o transporte sólido longitudinal à costa é interrompido, o sedimento que se deposita nas proximidades da estrutura possivelmente fará falta em outra região, ocasionando erosão de linha de costa.

A Figura 1 ilustra o caso da região da foz do Rio Paraíba do Norte. A deriva litorânea de leste em direção à foz do rio é barrada pelo molhe do Porto de Cabedelo, diminuindo a sedimentação no canal de acesso portuário. Segundo Guedes (2002), essa interrupção no transporte de sedimentos longitudinal gerou avanço da linha de costa na praia situada à leste do molhe e erosão no trecho da costa situado no lado oeste do rio. Outro caso de erosão costeira originada pela implementação de molhes portuários é o da cidade de Fortaleza. Conforme se observa na Figura 2, os molhes do Porto de Mucuripe bloqueiam parcialmente o transporte de sedimentos que seria direcionado não apenas para o canal de navegação, mas também para toda a costa situada à oeste do porto. Esta interrupção no transporte de sedimentos fez com que, ao longo do tempo, houvesse sedimentação e avanço da linha de costa na praia do futuro, e erosão nas praias à oeste do porto (Valentini, 1994). Nota-se na Figura 2a que o estoque de areia disponível na Praia do Futuro é consideravelmente mais maior do que o observado nas praias à oeste do porto. Notam-se na Figura 2b e na Figura 2c a existência de campos de espigões, que são estruturas de enrocamento transversais à linha de costa com o objetivo de barrar o transporte de sedimentos, contendo assim a erosão. Entrando, o problema é assim transferido cada vez mais para o oeste.

Outro desafio relacionado à morfodinâmica de praias diz respeito à ocorrência de erosão durante ressacas, ocasionada por transporte de sedimentos transversal à zona de arrebentação. A Figura 3 apresenta um caso de erosão da linha de costa observado após a ocorrência de um episódio de ressaca na Praia de Piratininga, Niterói-RJ, no ano de 2016.

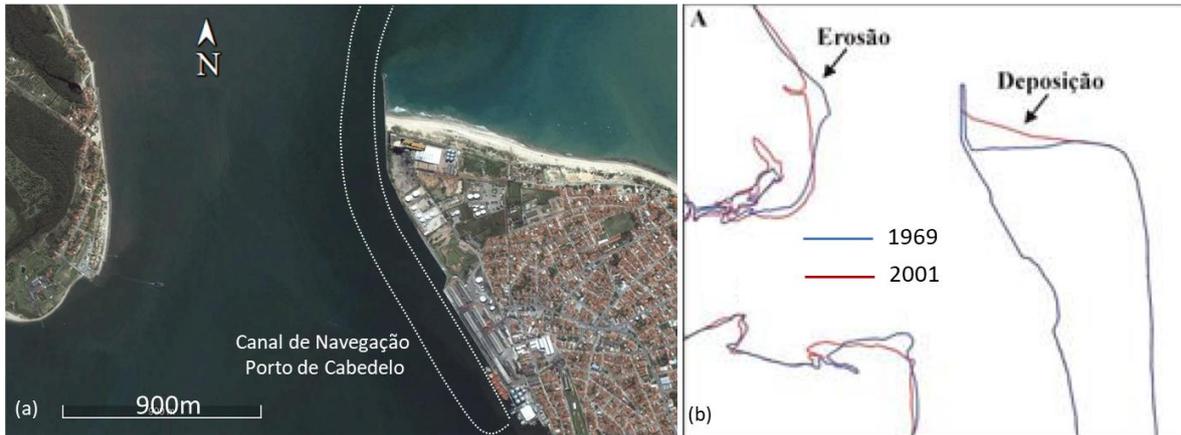


Figura 1: Erosão e deposição na Foz do Rio Paraíba do Norte. Adaptado de Googleearth e Guedes (2002)



Figura 2: Porto de Mucuripe e costa da cidade de Fortaleza. Adaptado do Googleearth.



Figura 3: Erosão observada na Praia de Piratininga, Niterói - RJ, após a ocorrência de ressaca no ano de 2016. Fonte: Pereira et al. (2017).

As mudanças ocasionadas no transporte de sedimentos pela implantação de obras hidráulicas marítimas nem sempre são estudadas com a atenção necessária. Neste contexto, este trabalho apresenta um modelo numérico para simulação de processos hidro-sedimentológicos na zona de arreben-tação de ondas, uma ferramenta que pode ser aplicada em casos como os citados anteriormente. Apresentam-se aplicações do sistema de modelagem SisBaHiA na simulação das correntes hidrodinâmicas e do transporte de sedimentos ocasionado pela quebra de ondas nas proximidades de um espigão e de um quebra-mar, obras hidráulicas marítimas típicas. Apresenta-se ainda a simulação de um episódio de ressaca em uma praia em costa aberta.

## METODOLOGIA

O SisBaHiA (<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>) é um sistema de modelos computacionais destinados a análises de hidrodinâmica ambiental de corpos de água naturais com superfície livre. Este sistema de modelagem está em constante desenvolvimento na COPPE/UFRJ. Nesta pesquisa utilizaram-se modelos hidrodinâmicos bidimensionais promediados na vertical (2DH), modelos de transporte de sedimentos e modelos de propagação de ondas. Estes três módulos do SisBaHiA roda-ram acoplados, interagindo entre si em cada cenário. Desta forma, a circulação calculada pelo modelo hidrodinâmico é alterada por conta da propagação e arreben-tação das ondas. As ondas influenciam não apenas as correntes, mas também a mobilização de sedimentos. Para a modelagem da deriva litorânea de sedimentos o SisBaHiA utilizou a fórmula de Van Rijn (2007), que calcula o transporte total na coluna d'água, considerando a ação conjunta de ondas e correntes. O transporte de sedimentos transversal à costa, principal responsável pela modificação dos perfis de praia durante a ocorrência de ressacas, foi simulado com a fórmula de Kriebel & Dean (1984), incorporada no modelo recente-mente por Silva (2019). O transporte transversal é forçado não apenas pelas correntes litorâneos, mas principalmente por ação direta das ondas. As análises apresentadas buscam enfatizar as diferenças observadas ao considerar-se ou não a ação do transporte transversal, que depende do uso de uma equação adicional e é geralmente a forçante principal da erosão de praias durante ressacas.

Simularam-se dois cenários de evolução morfológica, um nas proximidades de um espigão e outro nas proximidades de um quebra-mar, ambos casos idealizados de obras costeiras típicas em uma praia idealizada. A Figura 4 apresenta a batimetria e a malha de elementos finitos utilizada na discretização espacial do domínio de modelagem. Ambos os casos consideraram ondas constantes altura de 1,90 m na zona de arreben-tação e inclinação entre 10° e 5° em relação à linha de costa.

Simulou-se ainda a evolução morfodinâmica da Praia Piratininga em resposta a uma ressaca ocorrida em 2016.

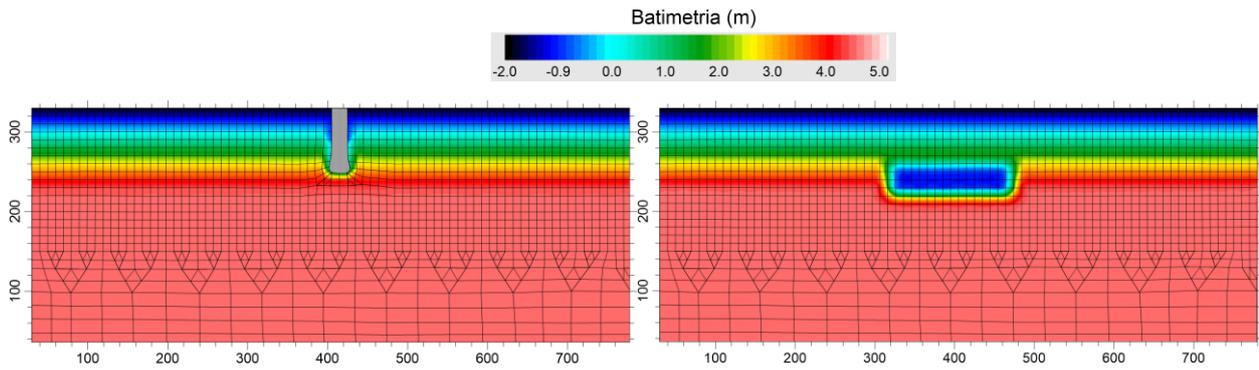


Figura 4: Batimetria e malha e elementos finitos utilizada na modelagem da praia com espigão, à esquerda, e da praia com quebra-mar, à direita.

## RESULTADOS

A Figura 5 apresenta as correntes longitudinais calculadas, cujo perfil transversal apresenta velocidade máxima igual 0,95 m/s. O espigão interrompe o fluxo litorâneo, direcionando as correntes litorâneas para ao largo. A Figura 6 apresenta a batimetria inicial e após 48 horas. Nota-se a deposição de sedimentos a montante do espigão e a erosão a jusante.

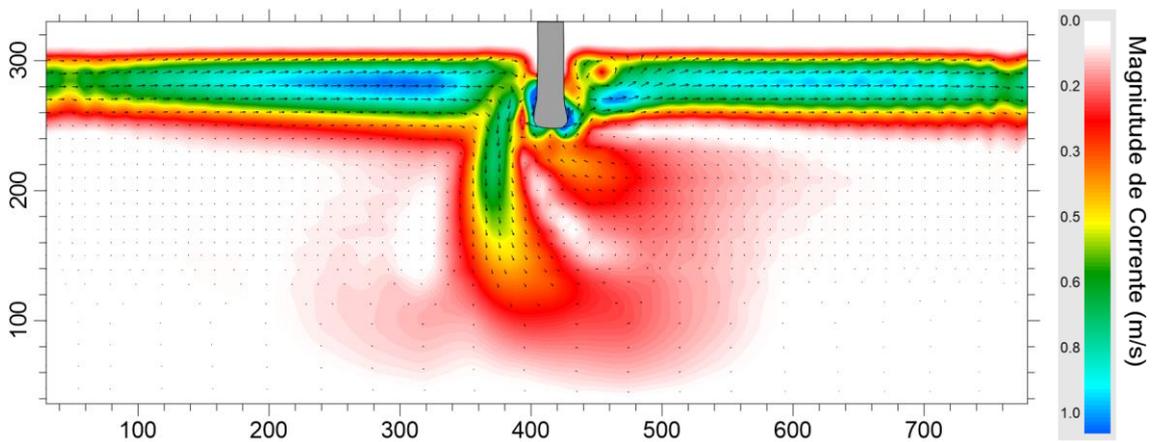


Figura 5: Correntes litorâneas próximo ao espigão. Nota-se a interrupção do fluxo causada pela estrutura.

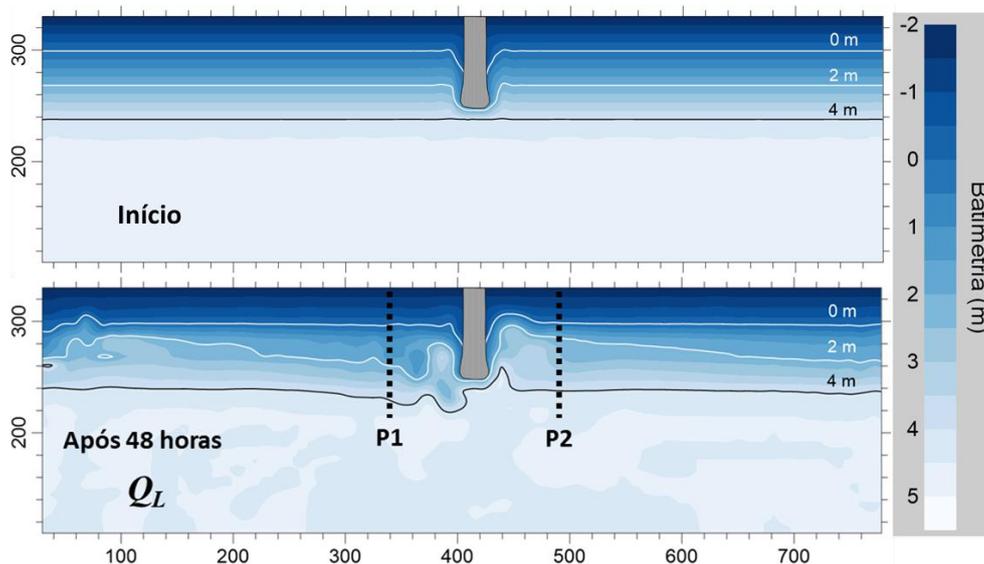


Figura 6: Batimetria inicial e após 48 horas de uma praia idealizada com um espigão.

A Figura 7 apresenta os perfis de praia P1 e P2, indicados na Figura 6 após 48 horas. Nota-se avanço do perfil de praia P1 em direção ao largo. A deposição de sedimentos observada na parte mais elevada da praia se deu por conta da interrupção do fluxo litorâneo, enquanto que o banco de areia ao largo da zona de arrebenção formou-se devido às correntes que ocorrem da praia para o mar à esquerda do espigão. Observa-se ainda erosão do perfil P2, gerada pela retomada do fluxo litorâneo longitudinal à direita do espigão, que gera gradientes de transporte sólido positivos na região erodida.

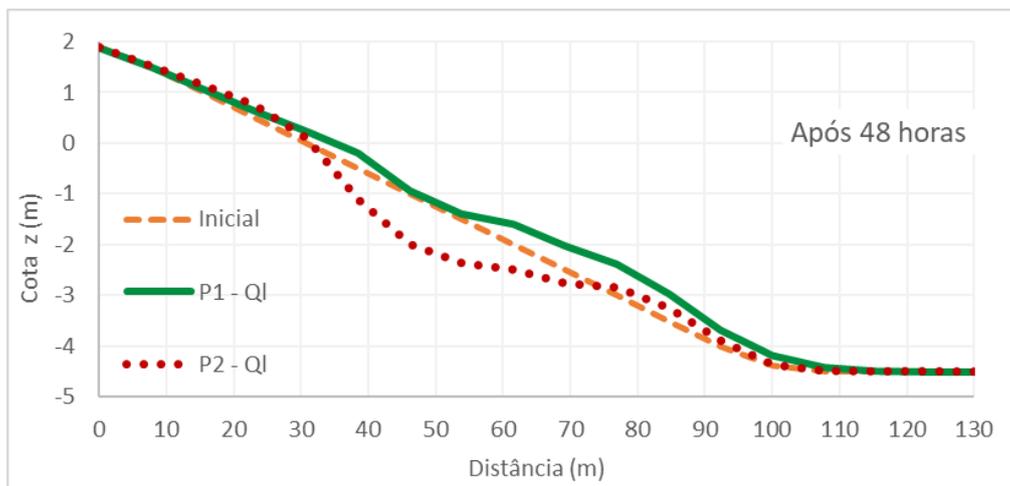


Figura 7: Perfis de praia P1 e P2 iniciais e após 48 horas para o cenário com espigão.

A Figura 8 apresenta as correntes litorâneas geradas para o cenário com quebra-mar. As correntes apresentam velocidades máximas de até 1,5 m/s na região imediatamente a montante do quebra-mar. A inclinação de 5° com que as ondas arrebenam gera as correntes longitudinais observadas e o padrão assimétrico de circulação na região em torno do quebra-mar. A estrutura interrompe parcialmente o fluxo litorâneo, gerando uma recirculação direcionada para ao largo. Parte do fluxo litorâneo segue ainda na direção longitudinal nas regiões mais rasas atrás do quebra-mar. A desaceleração do fluxo litorâneo nessas regiões gera um gradiente negativo de transporte longitudinal, que tende a causar sedimentação entre o quebra-mar e a linha de costa.

Apresentam-se na Figura 9 a batimetria inicial e após 48 horas para o cenário com quebra-mar. Nota-se erosão nas regiões próximas às extremidades do quebra-mar, onde a circulação se intensifica, sendo que a região à direita foi mais erodida em virtude da interrupção parcial do transporte longitudinal. A recirculação observada à esquerda transporta o sedimento erodido das proximidades do quebra-mar e o deposita ao largo, em ambos os cenários.

A Figura 10 apresenta os perfis de praia P1 e P2 após 48 horas. Ambos os perfis foram erodidos. Entretanto, a maior erosão ocorreu no perfil P2, devido à interrupção no transporte sólido.

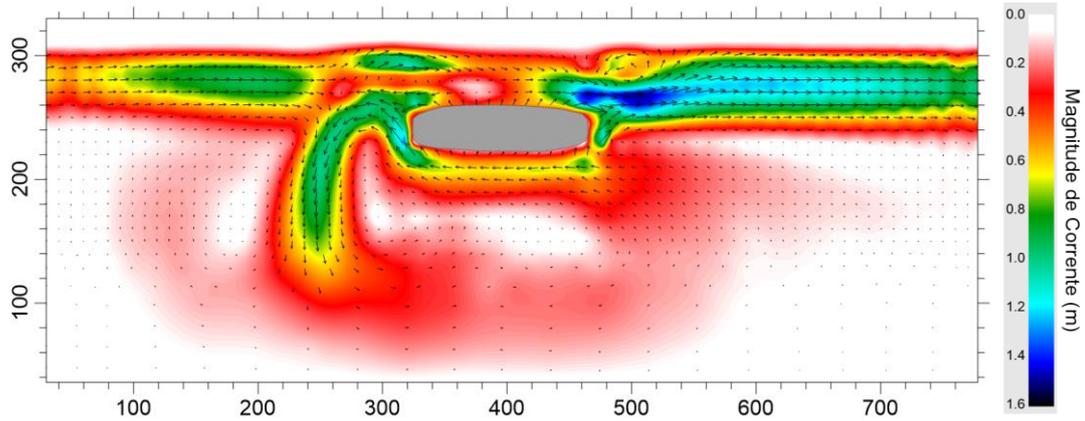


Figura 8: Correntes litorâneas geradas para o cenário com quebra-mar.

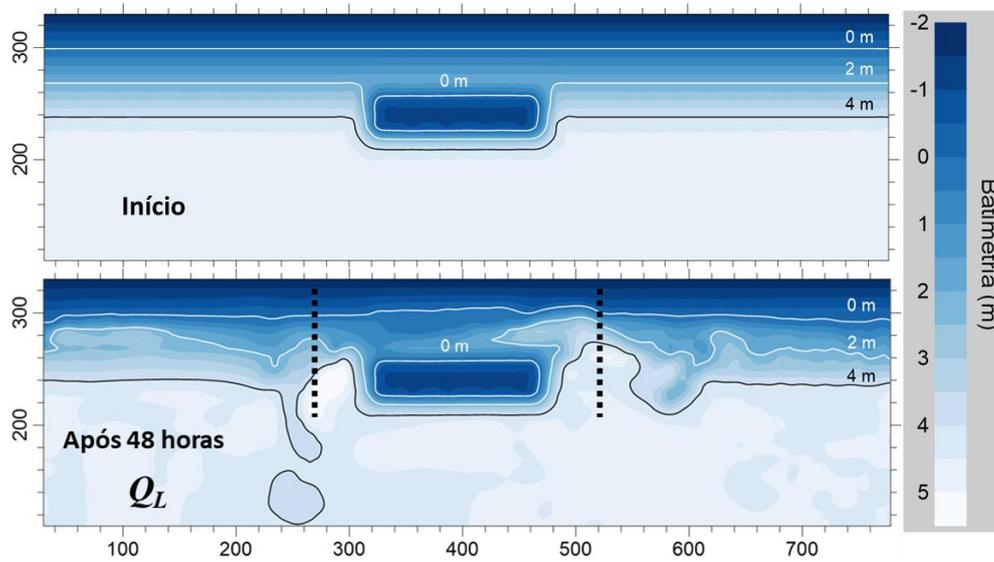


Figura 9: Batimetria inicial e após 48 horas do cenário com quebra-mar.

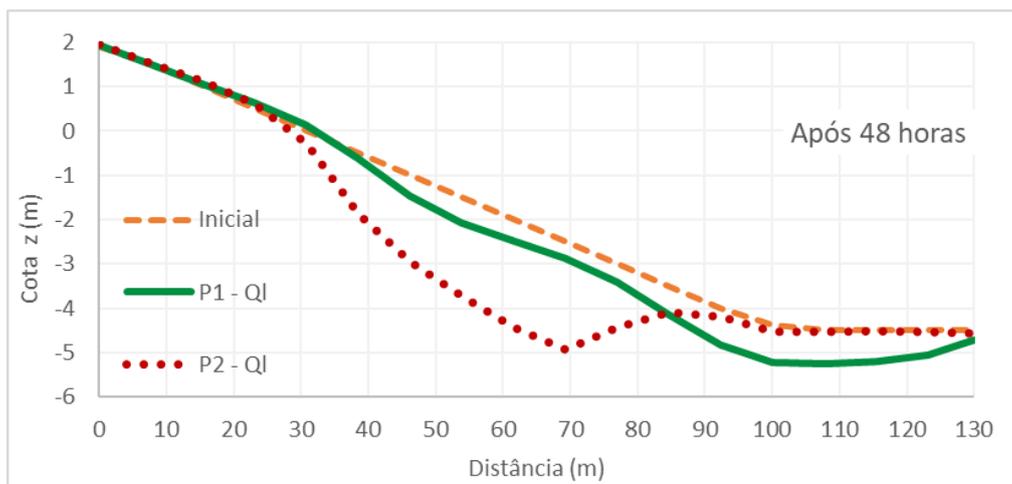


Figura 10: Perfis de praia P1 e P2 iniciais e após 48 horas para o cenário com quebra-mar.

### Incorporação de transporte transversal à zona de arrebenção

A Figura 11 apresenta uma comparação entre os perfis P1 e P2 obtidos após 48 horas no cenário com cálculo de transporte longitudinal apenas ( $Q_L$ ) apenas e com cálculo conjunto de transporte longitudinal e transversal ( $Q_L + Q_T$ ). Por conta do transporte transversal em direção ao largo, observa-se a formação de um banco de areia, tanto a esquerda, quanto à direita do espigão no cenário com  $Q_L + Q_T$ . Por conta da interrupção do transporte longitudinal devido ao espigão, o banco de areia observado no perfil P2 é menor que o banco observado no perfil P1. O perfil P1 é alimentado ainda pelo fluxo litorâneo da terra para o mar à esquerda do espigão. Apesar da formação do banco de areia, não se observa erosão da face de praia do perfil P1, uma vez que essa região é alimentada pelo transporte longitudinal barrado pelo espigão.

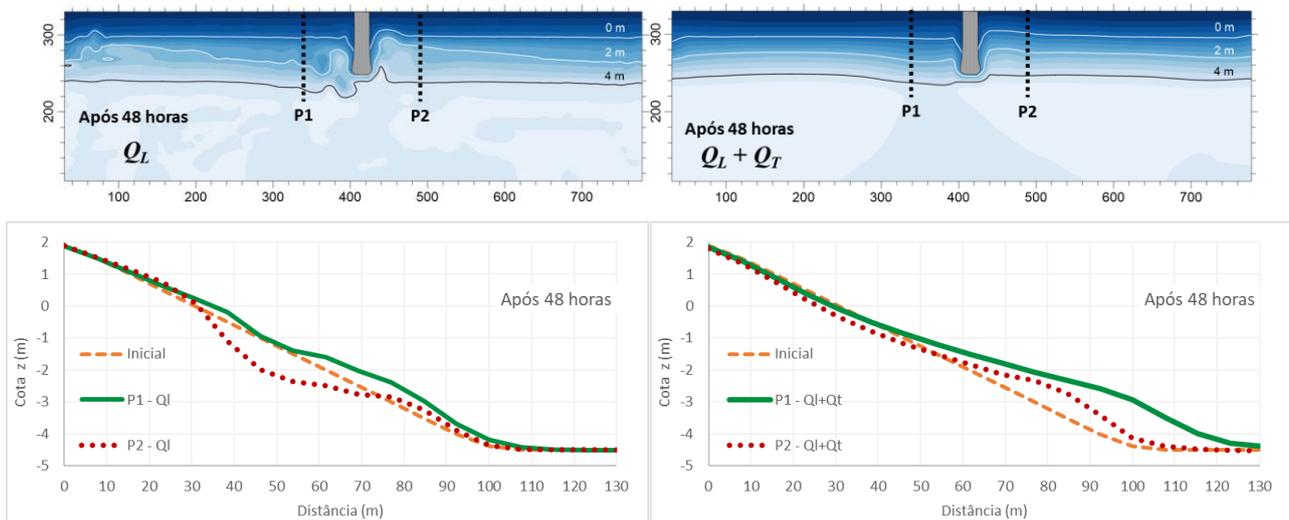


Figura 11: Batimetria e perfis de praia após 48 horas com cálculo apenas de  $Q_L$ , à esquerda, e cálculo conjunto de  $Q_L + Q_T$ , à direita.

Apresenta-se na Figura 12 uma comparação entre os perfis P1 e P2 obtidos após 48 horas no cenário com cálculo de  $Q_L$  apenas e com cálculo conjunto de  $Q_L + Q_T$ . No Perfil P1 nota-se a formação de um banco de areia ao largo da zona de arrebenção, forçada tanto pelo transporte transversal, quanto pela célula de recirculação (Figura 5) que transporta sedimentos em direção ao largo. Assim como no cenário com  $Q_L$  apenas, o perfil P2 foi também erodido, mas o volume de erosão se distribui melhor ao longo do perfil de praia. A face da praia foi erodida pelo efeito de onda de tempestade e o sedimento se depositou mais ao largo, na região que aparece erodida na Figura 10.

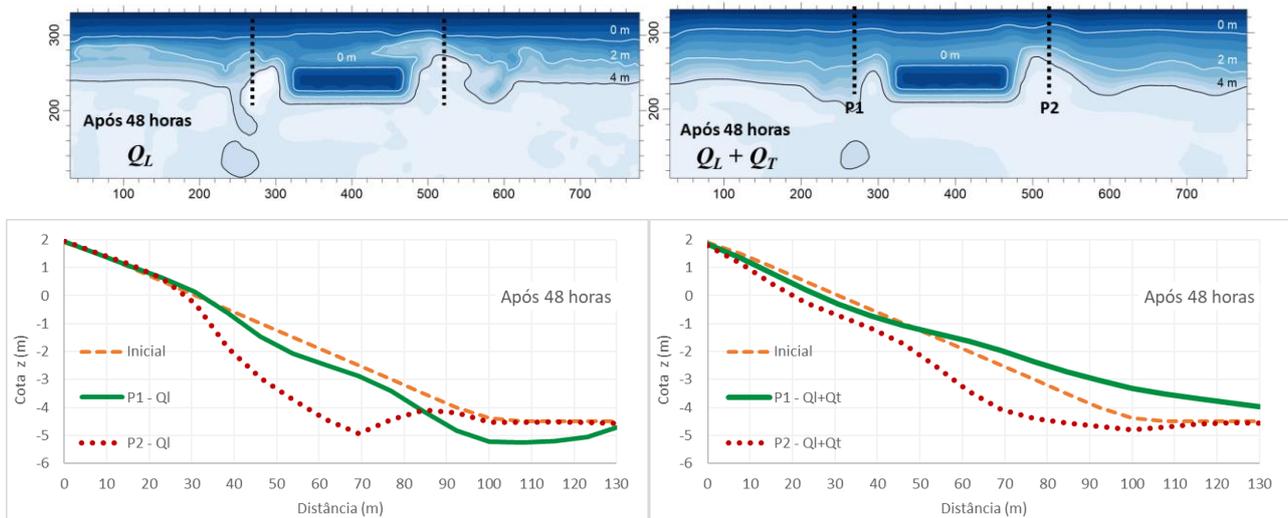


Figura 12: Batimetria e perfis de praia após 48 horas com cálculo apenas de  $Q_L$ , à esquerda, e cálculo conjunto de  $Q_L + Q_T$ , à direita.

### Caso da Praia de Piratininga

A Figura 13 apresenta a batimetria da Praia de Piratininga antes do evento de ressaca simulado, ocorrido em junho de 2016, e após o evento. A linha vermelha indica a posição original da linha de costa, enquanto a linha preta indica a situação pós-ressaca. A maior erosão pós-ressaca ocorreu na região oeste da Praia, com recuo da linha de costa de aproximadamente 50 m. Na porção mais a leste o recuo foi de cerca de 15 m. Este resultado é coerente com o observado em campo por Pereira *et al.* (2017). A Figura 14 mostra as isolinhas de variação batimétrica após a ressaca e as correntes litorâneas durante a ressaca. Nota-se que o sedimento erodido da faixa de areia depositou-se ao largo, como esperado, formando um banco de areia típico de tempestade. A porção leste apresentou maior banco de areia, uma vez que as correntes litorâneas durante a ressaca ocorrem de oeste para leste.

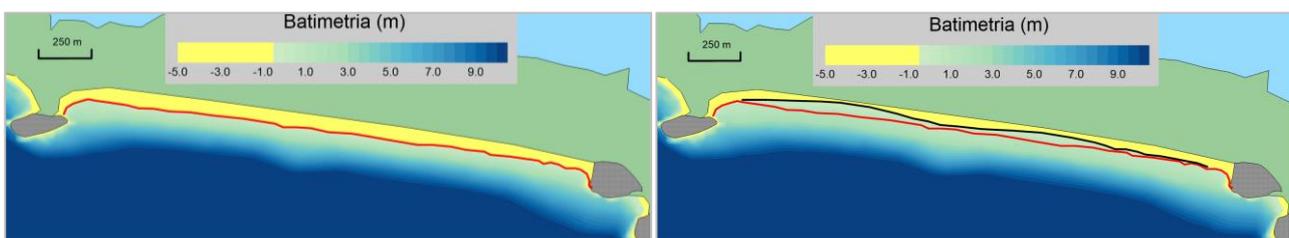


Figura 13: Batimetria da praia antes da ressaca, à esquerda, e após a ressaca, à direita. Cotas batimétricas negativas indicam áreas secas, correspondentes à faixa de areia.

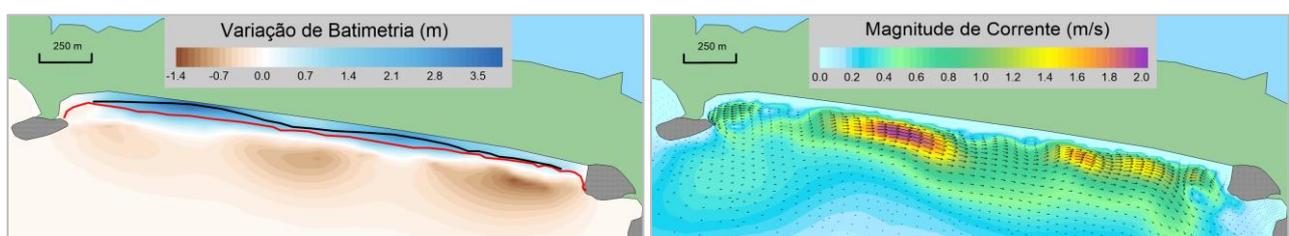


Figura 14: Correntes litorâneas durante a ressaca, à esquerda, e variação de batimetria após a ressaca. Variações positivas indicam erosão, enquanto variações negativas indicam assoreamento.

## CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou aplicações de um modelo numérico para simulação de processos hidrossedimentológicos em praias e nas proximidades de obras hidráulicas marítimas. O modelo representou os padrões esperados de erosão e assoreamento, bem como de correntes litorâneas nas proximidades de um espigão e de um quebra-mar, ambos posicionados em uma praia idealizada. Observou-se os padrões típicos de assoreamento a montante das estruturas, causados pela interrupção do transporte de sedimentos, e consequente erosão a jusante. A incorporação de transporte transversal mostrou-se importante para a representação da morfodinâmica praias, pois gerou bancos de areia típicos de ressaca, feições de fundo não observadas na simulação com transporte longitudinal apenas.

A aplicação do modelo na simulação de erosão e sedimentação pós-ressaca na Praia de Piratininga gerou resultados coerentes com os observados em campo em termos de recuo da linha de costa. Observou-se erosão de parte da faixa de areia e formação de bancos ao largo. Para isto, foi necessário o acionamento do módulo de transporte transversal, importante para a simulação de eventos de ressaca.

## REFERÊNCIAS

- GUEDES, L. S. (2002). *“Monitoramento geoambiental do estuário do Rio Paraíba do Norte – PB por meio da cartografia temática digital e de produtos de sensoriamento remoto”* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte.
- KRIEBEL, D. L.; DEAN, R. G. (1984) *“Beach and Dune Response to Severe Storms”*. Coastal Engineering Proceedings, v. 1, n. 19.
- PEREIRA, T. G.; OLIVEIRA FILHO, S. R. DE; MORAES, C. P. R. DE A.; LESSA, A. C. P. (2017). *“Impacto das tempestades de 2016 em orla urbanizada: arco praias de Piratininga, Niterói – RJ”*. Revista do Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, Volume Especial, p. 75 - 27.
- SILVA, R. A. G. (2019) *“Modelo morfodinâmico com transporte litorâneo longitudinal e transversal para aplicações de engenharia”* Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- VALENTINI, E. M. S. (1994). *“Avaliação de processos litorâneos e consequências para o gerenciamento costeiro no Ceará”* Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- VAN RIJN, L. C. (2007a) *“Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. I: Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-Load Transport”*. Journal of Hydraulic Engineering, v. 133, n. 6, p. 649–667.
- VAN RIJN, L. C. (2007b) *“Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. II: Suspended Transport”*. Journal of Hydraulic Engineering, v. 133, n. 6, p. 668–689.