

MODELAGEM NUMÉRICA DA CIRCULAÇÃO COSTEIRA E DAS CORRENTES LITORÂNEAS NA COSTA DE FORTALEZA - CE

Rodrigo Amado Garcia Silva ^{1*} ; Silvano Porto Pereira ² ; Paulo Cesar Colonna Rosman ³

Resumo –Este trabalho tem como objetivo analisar a circulação hidrodinâmica na região costeira da cidade de Fortaleza, considerando a ação das marés, dos ventos locais e das ondas que incidem na costa. As análises realizadas neste trabalho utilizaram modelos do SisBaHiA[®] - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. Os cenários simulados consideraram os meses de novembro de 2011 e abril de 2012, períodos nos quais se dispunha de dados de vento e correntes marítimas medidas simultaneamente. Os resultados revelaram que a hidrodinâmica dessa região é fortemente influenciada pelos ventos alísios, que direcionam as correntes costeiras quase que persistentemente para oeste, acompanhando o traçado da costa. O modelo reproduziu bem a tendência observada nos dados medidos. A modelagem realizada considerou ainda o efeito das ondas nas correntes litorâneas geradas nas praias da região estudada. Na Praia do Futuro, as correntes longitudinais mudam de sentido com frequência no mês de abril, o que não ocorre no mês de novembro. Na costa norte de Fortaleza, as correntes litorâneas são mais intensas e ocorre com frequência a formação de células de recirculação. No mês de novembro as correntes litorâneas são mais fracas e tendem a acompanhar a tendência das correntes costeiras sobre a plataforma continental.

Palavras-Chave – Hidrodinâmica costeira, Fortaleza, Modelagem numérica.

NUMERICAL MODELLING OF THE COASTAL CIRCULATION AND NEARSHORE CURRENTS ON THE COAST OF FORTALEZA - CE

Abstract – This work aims to analyze the coastal hydrodynamics in the region of the city of Fortaleza, considering the action of tides, winds and waves. The analysis were made with models of SisBaHiA[®] - Base System of Environmental Hydrodynamics. The simulated scenarios considered the months of November 2011 and April 2012, periods in which measured data on winds and currents were available. The results revealed that the hydrodynamics of this region is strongly affected by the trade winds, which direct the currents towards west., following the coastline orientation. The model reproduced well the measured data. The modeling represented also the effect of the waves on the nearshore circulation. At Praia do Futuro, the direction of the longshore currents changes frequently in April, what does no occur in November. On the other regions of the coast of Fortaleza, the longshore currents become more intense only when northeast waves reach the coast, forming vortices. In November the longshore currents presented low intensity and direction towards west, the same direction of the coastal currents.

Keywords – Coastal hydrodynamics, Fortaleza, Numerical modeling

^{1*} Doutorando e pesquisador da Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica (Programa de Engenharia Oceânica) da COPPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro e Professor da Universidade Salgado de Oliveira (UNIVERSO). Email: rodrigoamado@oceanica.ufrj.br.

² Coordenador de Projetos de Inovação na Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE). Email: silvano.pereira@cagece.com.br

³ 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.

INTRODUÇÃO

A cidade de Fortaleza, localizada três graus ao sul do equador, ocupa uma faixa central da zona litorânea do Estado do Ceará localizada. As belas praias deste trecho do litoral nordestino atraem quantidades significativas de turistas ao longo de todo o ano. Além do turismo, a atividade portuária, através do Porto de Mucuripe, também tem importância relevante na economia na economia local, possibilitando que o município seja um dos principais polos econômicos da Região Nordeste do Brasil.

Fortaleza está inserida em uma região semiárida, cujo clima é fortemente influenciado pelos processos de deslocamento, ou migração, da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e pelas condições meteorológicas do hemisfério norte, havendo apenas duas estações bem definidas. Entre os meses de agosto e dezembro, período de inverno e primavera, predomina uma estação com poucas chuvas, onde os ventos locais são mais intensos. Já entre os meses de janeiro e julho, verão e outono, caracteriza-se uma época chuvosa, onde os ventos locais são menos intensos (LIMA 2002). A ZCIT é caracterizada pela confluência dos ventos alísios de nordeste e sudeste, que apresenta forte influência na circulação hidrodinâmica ao longo de toda a costa cearense, de acordo com Maia (1998). Amarante *et al.* (2001) destaca também a ocorrência de brisas terrestres e marinhas, que no Ceará é intensa e alinhada aos alísios. No período seco, as ondas predominantes que incidem na plataforma continental cearense são geradas pelos ventos alísios, apresentando direção mais frequente de leste. Já no período chuvoso, predominam ondas geradas em função de eventos meteorológicos ocorridos no hemisfério norte, apresentam direção mais frequente de quadrante nordeste.

O conhecimento da hidrodinâmica de ambientes costeiros é relevante para o processo de tomada de decisão no que diz respeito à gestão integrada desses ambientes. A modelagem do campo de correntes marítimas dá subsídios, por exemplo, a estudos de modelagem de qualidade de água, possibilitando análises de diagnóstico e prognóstico sobre transporte poluentes e constituintes em geral no meio aquático. O estudo da hidrodinâmica possibilita também inferir tendências relativas a processos sedimentológicos. A caracterização dos padrões de circulação costeira dá subsídios também, muitas vezes, para a gestão e operação portuária. Neste contexto, esta pesquisa analisa a hidrodinâmica da região marítima próxima à Fortaleza.

OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo caracterizar a circulação hidrodinâmica na região costeira da cidade de Fortaleza, de forma a detalhar as principais tendências das correntes sobre a plataforma continental e das correntes litorâneas nas praias da cidade. Para isto, considerou-se a ação das marés, dos ventos locais e das ondas que incidem na costa da região de interesse em dois diferentes cenários: um mês característico do período seco e um mês característico do período chuvoso, com suas respectivas condições de vento e ondulação.

METODOLOGIA

Para as análises realizadas neste trabalho utilizou-se modelos do SisBaHiA[®] - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. Maiores informações sobre o SisBaHiA[®] estão disponíveis em sua referência técnica, em Rosman (2017). Nesta pesquisa foram utilizados modelos hidrodinâmicos bidimensionais promediados na vertical (2DH) e modelos de propagação de ondas. Os dois modelos foram executados simultaneamente e acoplados, interagindo entre si. Desta forma, a circulação calculada pelo modelo hidrodinâmico considera a influência das ondas que incidem no domínio de modelagem. Ao se aproximarem do litoral, as ondas geradas remotamente interferem na circulação

da zona costeira, podendo gerar correntes litorâneas longitudinais à linha de costa e células de recirculação. A batimetria da região de interesse e a malha de elementos finitos utilizada na discretização do domínio de modelagem estão mostradas na Figura 1 e na Figura 2, respectivamente. A existência de diversos molhes e espigões tornou necessário o maior refinamento da malha na região entre o Porto de Mucuripe e o Rio Ceará.

Os cenários simulados são característicos dos meses novembro de 2011 e abril de 2012, períodos nos quais se dispunha de dados de vento e correntes marítimas, que foram medidos simultaneamente pela Companhia de Água e de Esgoto do Ceará. O modelo foi calibrado em função das séries temporais de correntes marítimas para esses meses, que foram obtidas por meio de um perfilador acústico de correntes (ADCP) fundeado nas proximidades dos difusores do emissário submarino de Fortaleza, a cerca de 14 m de profundidade (Figura 1). Além da calibração das correntes, os níveis d'água foram também calibrados em função da previsão de maré para os períodos simulados. A previsão da maré foi feita considerando as constantes harmônicas da estação maregráfica do Porto de Mucuripe, disponibilizadas pela Fundação de Estudos do Mar – FEMAR.

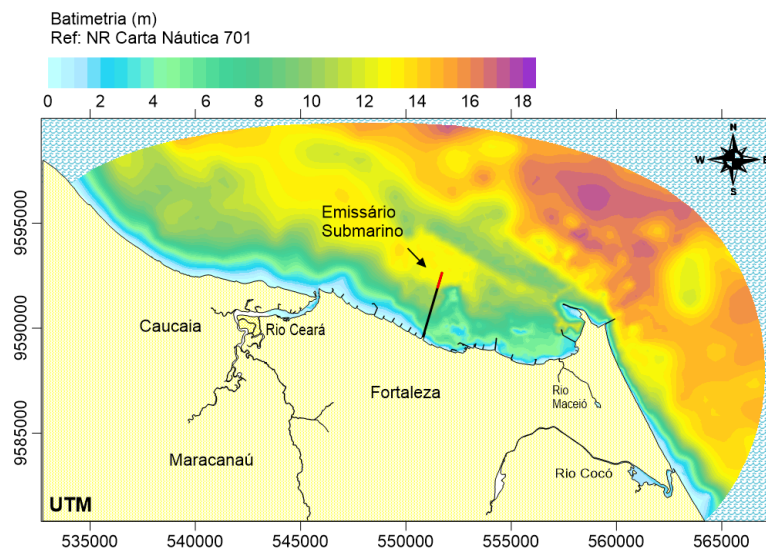


Figura 1: Contornos batimétricos da região costeira de Fortaleza, obtidos da carta náutica 701. O ADCP utilizado para medição das correntes foi fundeado na proximidades da linha difusora (em vermelho) do emissário submarino de Fortaleza.

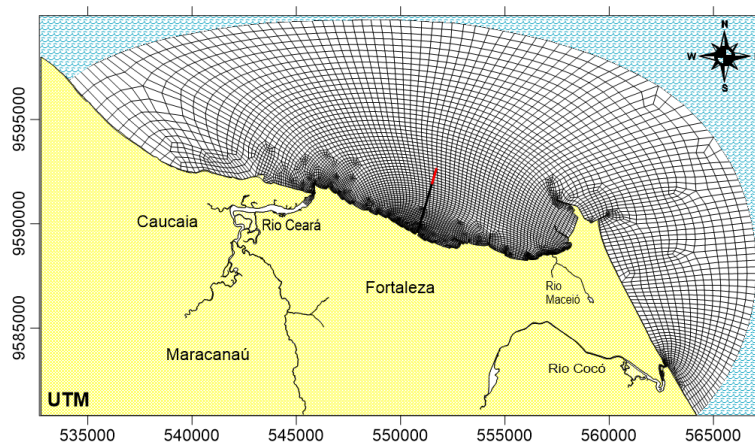


Figura 2: Malha de elementos finitos utilizada pelo modelo hidrodinâmico do SisBaHiA®.

Os dados de ondas utilizados nas simulações foram obtidos da base de dados do Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil), que utiliza dados de reanálise do clima de ondas em diferentes pontos ao longo da costa brasileira por um período de 60 anos (1948 – 2008). A série temporal de ondas foi obtida para um ponto na plataforma continental do Ceará, localizado nas coordenadas [3.4° S, 37.9° W] e profundidade 1490 m. Essas ondas foram propagadas até a costa com o modelo de propagação de ondas. A cada passo tempo, o modelo hidrodinâmico absorve os dados de tensões de radiação calculados pelo modelo de propagação de ondas. A Tabela 1 mostra a caracterização dos dados de onda utilizados na modelagem modelo. No mês novembro as ondas mais frequentes, ou reinantes, são ondas de leste, que apresentam um percentual de ocorrência de 69,37 % e altura média de 1,80 m. Essas ondas são geradas pelos ventos alísios no oceano atlântico sul. No mês de abril, as ondas reinantes são vindas de leste – nordeste, com um percentual de ocorrência de 39,74 % e altura média de 1,73 m. Pouco mais de 50 % das ondas do mês de abril são vindas ou de leste – nordeste ou de nordeste. Essas ondas, que normalmente são geradas no Oceano Atlântico Norte e se propagam até a costa norte do Brasil, são as mais frequentes no cenário do mês de abril, época pouco depois do final do inverno no hemisfério norte, quando ainda ocorrem tempestades mais severas naquele hemisfério.

Tabela 1: Caracterização do clima de ondas utilizado pelo modelo para os meses de Abril e Novembro.

Novembro			Abril		
Direção	H _{média} (m)	f(%)	Direção	H _{média} (m)	f(%)
N	-	0	N	-	0
NNE	-	0	NNE	-	0
NE	1.96	1.85	NE	1.63	10.33
ENE	1.80	13.72	ENE	1.73	39.74
E	1.80	69.37	E	1.64	34.50
ESE	1.73	15.07	ESE	1.53	15.43
Total	-	100.00		-	100.00

Reinante

RESULTADOS

Conforme se observa na Figura 3 e na Figura 4, que mostram os níveis d'água calculados pelo modelo no cais do Porto de Mucuripe, a maré na região é semi-diurna com pouca desigualdade diurna. As séries temporais de nível d'água calculadas pelo modelo para os dois cenários se mostraram coerentes com a previsão da maré para os mesmos períodos.

A Figura 5, a Figura 6 e a Figura 7 ilustram alguns resultados obtidos para as correntes marítimas em todo o domínio de modelagem. A hidrodinâmica costeira do litoral de Fortaleza é fortemente influenciada pelos ventos alísios, vindos de quadrante leste, que tendem a manter as correntes paralelas ao litoral, quase sempre direcionadas para quadrante oeste. Próximo à linha de costa, o comportamento das correntes litorâneas é bastante sensível à incidência das ondas. A partir da isóbata de 8,0 m as ondas passam a ter pouca influência sobre as correntes, que tendem a ser mais influenciadas pelos ventos alísios do que pelas ondas.

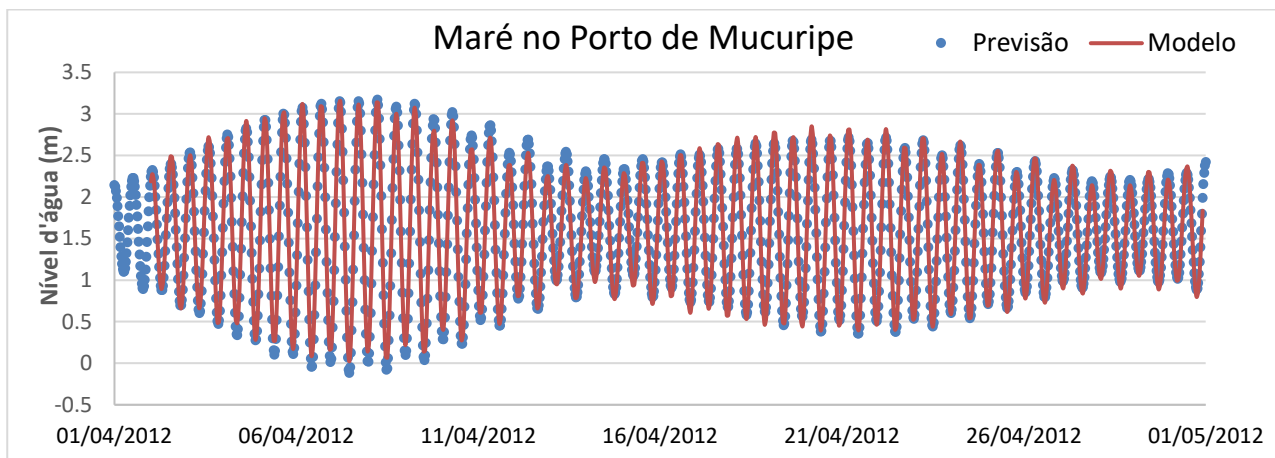


Figura 3: Maré próxima à estação maregráfica do Porto de Mucuripe para mês de abril de 2012. Os níveis d'água calculados pelo modelo se mostraram coerentes com a previsão de maré para o mesmo período.

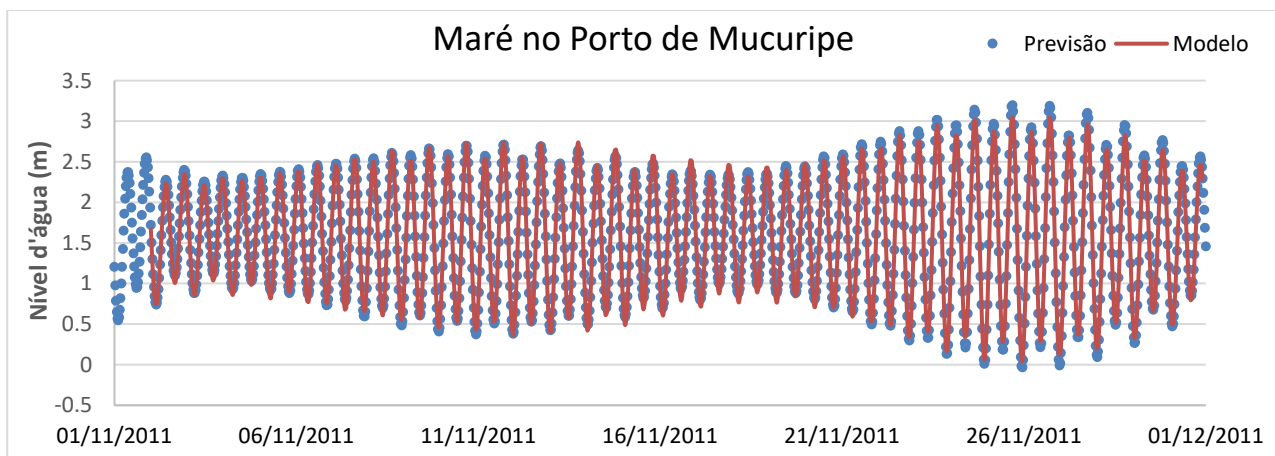


Figura 4: Maré próxima à estação maregráfica do Porto de Mucuripe para mês de novembro de 2011. Os níveis d'água calculados pelo modelo se mostraram coerentes com a previsão de maré para o mesmo período.

As correntes litorâneas na Praia do Futuro (Figura 5) predominam no sentido norte na maior parte do tempo, acompanhando o padrão das correntes costeiras sobre a plataforma continental. Isso ocorre em função da ocorrência de ondas vindas de leste (E) e leste-sudeste (ESSE), que são mais frequentes ao longo do ano. Este padrão predomina entre os meses de maio a dezembro. Ondas vindas de Nordeste (NE) e Leste-Nordeste (ENE), ao arrebentarem, geram correntes litorâneas com sentido sul na Praia do Futuro. Essa dinâmica está ilustrada na Figura 5.

Em todo o trecho entre o Porto de Mucuripe e a foz do Rio Ceará (Figura 6 e Figura 7), a circulação perto da linha de costa se intensifica nos períodos em que ocorrem ondas vindas de NE e ENE. Nestas situações, por conta da arrebentação dessas ondas, observa-se a formação de células de recirculação em toda essa região. Já quando há incidência de ondas vindas de E e ESE, há menor formação de vórtices e as correntes são menos intensas que na situação anterior. Isto ocorre devido à existência do molhe do Porto de Mucuripe, que protege toda essa região das ondas de E.

As elipses de correntes mostradas na Figura 8 e na Figura 9 permitem comparação entre as correntes calculadas pelo modelo e as correntes medidas nas proximidades da linha difusora do emissário submarino (Figura 1). No cenário de novembro (Figura 8), o espalhamento da nuvem dos pontos calculados pelo modelo é menor do que no caso dos dados medidos. Esse comportamento se inverte no cenário do mês de abril (Figura 9). De modo geral, as correntes calculadas pelo modelo

são coerentes com os dados medidos, pois tanto o modelo, como os dados, indicam correntes com direção predominante para nordeste. Esse padrão foi observado também por Pereira *et al.* (2015). Dessa forma, pode-se dizer que o modelo conseguiu representar bem o padrão de correntes esperado para a região.

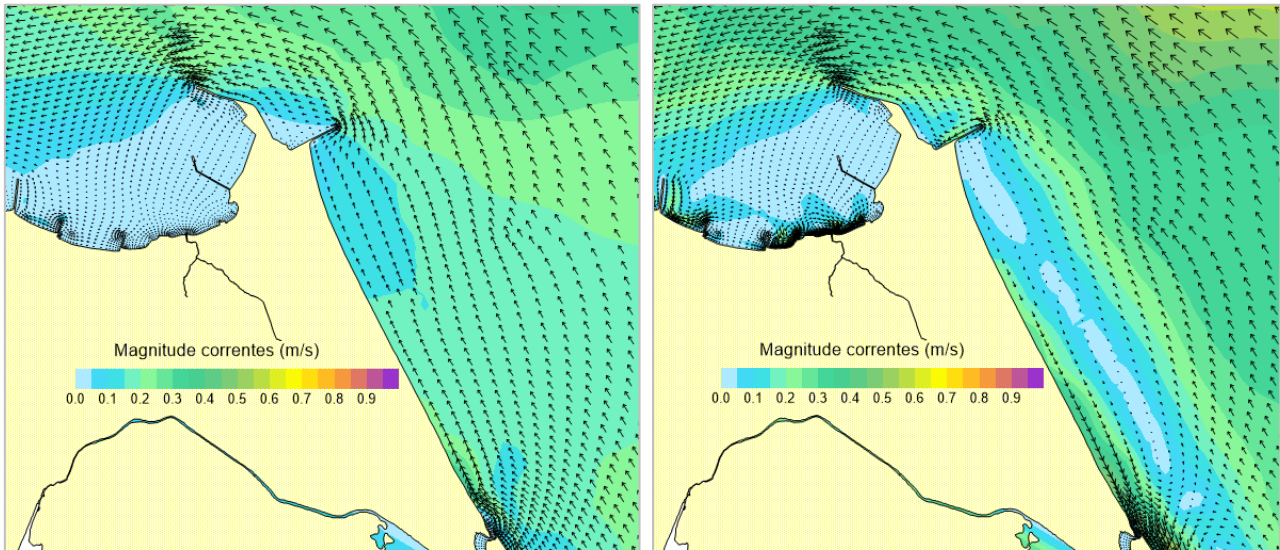


Figura 5: Correntes costeiras na Praia do Futuro e no Porto de Mucuripe. À esquerda, correntes no mês de novembro, em um instante em que incidem na costa ondas vindas de leste. Nessa situação, nota-se que as correntes litorâneas na Praia do Futuro têm sentido para norte, acompanhando as correntes costeiras. À direita, correntes no mês de abril, em um instante em que incidem na costa ondas vindas de nordeste. Nessa situação, nota-se que as correntes litorâneas na Praia do Futuro têm sentido para sul, enquanto as correntes costeiras têm sentido oposto.

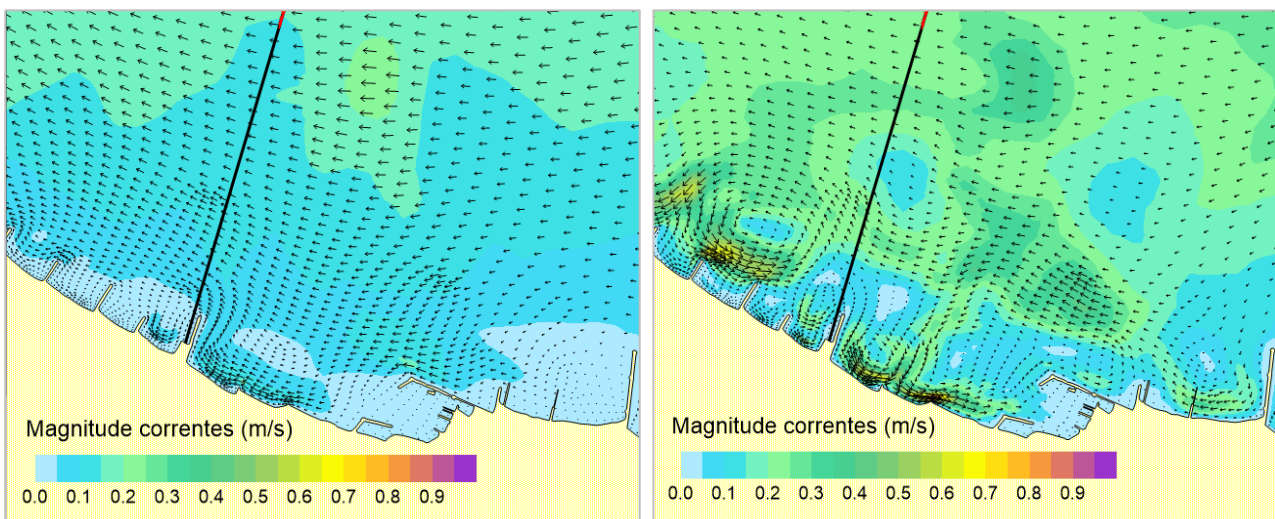


Figura 6: Correntes costeiras na região entre o Porto de Mucuripe e a foz do rio Ceará. À esquerda, correntes no mês de novembro, em um instante em que incidem na costa ondas vindas de leste. As correntes litorâneas apresentam magnitudes menores que 0,1 m/s e tendem a acompanhar a direção das correntes costeiras. À direita, correntes no mês de abril, em um instante em que incidem na costa ondas vindas de nordeste. As correntes litorâneas apresentam magnitudes de até 0,8 m/s. Observa-se a formação de células de recirculação.

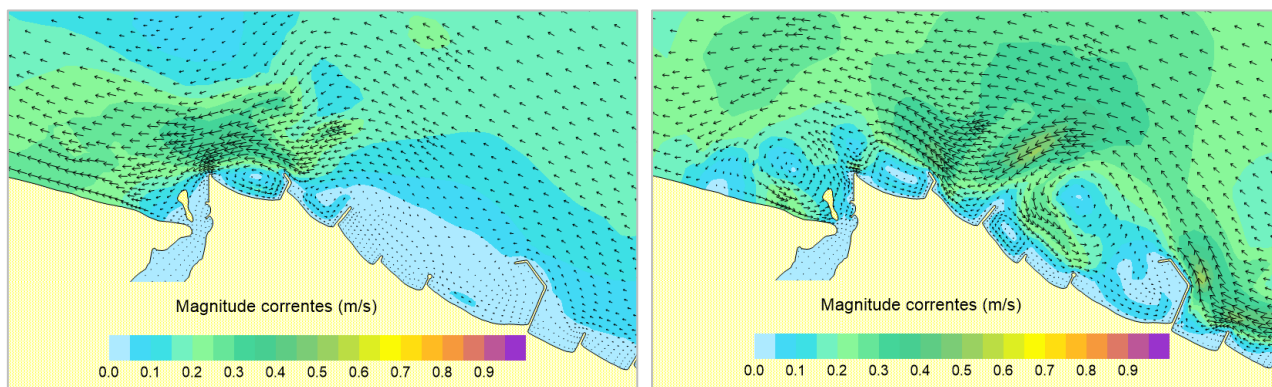


Figura 7: Correntes costeiras no litoral Oeste de Fortaleza, próximo à foz do rio Ceará. À esquerda, correntes no mês de novembro, em um instante em que incidem na costa ondas vindas de leste. As correntes litorâneas apresentam magnitudes entre 0,1 m/s e 0,4 m/s e tendem a acompanhar a direção das correntes costeiras. À direita, correntes no mês de abril, em um instante em que incidem na costa ondas vindas de nordeste. As correntes litorâneas apresentam magnitudes de até 0,5 m/s. Observa-se também a formação de algumas células de recirculação

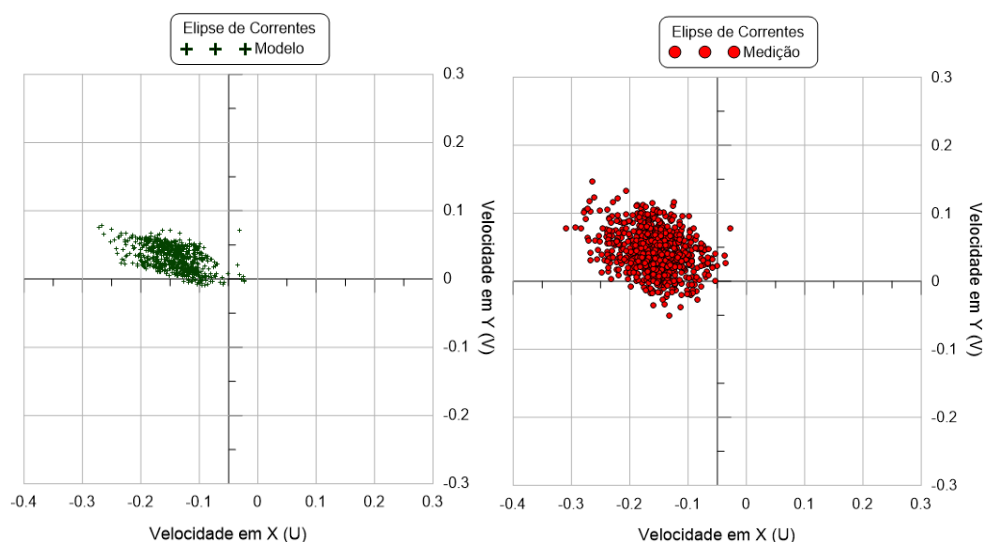


Figura 8: Elipses de correntes calculadas pelo modelo, (esquerda) e correntes medidas (direita) para novembro de 2011.

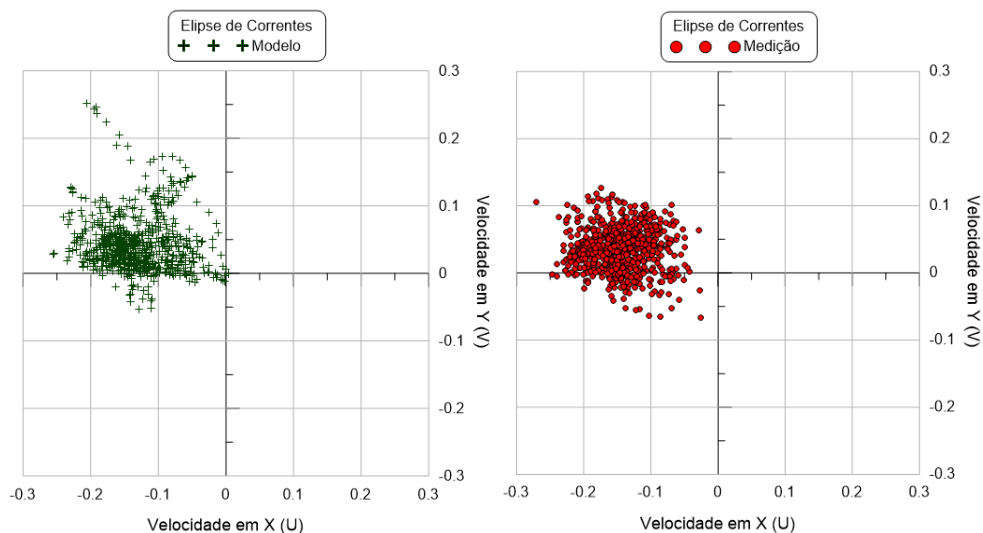


Figura 9: Elipses de correntes calculadas pelo modelo (esquerda) e correntes medidas (direita) para abril de 2012.

CONCLUSÕES

Este trabalho analisou os padrões da circulação hidrodinâmica na região costeira da cidade de Fortaleza. Foram considerados dois cenários: mês de novembro de 2011, característico do período seco, em que ocorrem ventos locais mais intensos e ondas reinantes direção de leste, geradas pelos ventos alísios; mês de abril de 2012, característico do período úmido, quando ocorrem ventos locais mais brandos e clima de ondas mais severo. Nesse período ocorrem ondas com direção de nordeste ou leste – nordeste, oriundas do hemisfério norte, em 50 % do tempo.

Os resultados revelaram que a hidrodinâmica dessa região é fortemente influenciada pelos ventos alísios, que direcionam as correntes quase que persistentemente para oeste, acompanhando o traçado da costa. O modelo reproduziu bem essa tendência, que foi também observada nos dados medidos. A modelagem realizada considerou ainda a incidência de ondas geradas em águas profundas, que, ao arrebentarem na costa, influenciam de forma significativa as correntes litorâneas. Enquanto as correntes costeiras na plataforma continental em frente à Praia do Futuro tendem para nordeste durante todo o tempo, as correntes litorâneas podem mudar de sentido em função da onda incidente. Nos demais trechos da costa observou-se a ocorrência de correntes litorâneas mais intensas e a formação de células de recirculação sempre que ocorrem ondas de nordeste e leste – nordeste, que não são barradas pelo molhe do Porto de Mucuripe. Durante a ocorrência de ondas de leste, que são barradas pelo molhe, as correntes litorâneas na costa norte de Fortaleza são mais fracas e apresentam a mesma tendência das correntes costeiras, direcionadas predominantemente para oeste.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARANTE, O.A.C.; ZACK, M.B.J.; SÁ, A.L. *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. Eletrobrás, Ministério de Minas e Energia, Brasília – DF, 2001.

LIMA, S.F. Modelagem Numérica da Evolução da Linha de Costa das Praias Localizadas a Oeste da Cidade de Fortaleza, Ceará – Trecho Compreendido entre o Rio Ceará e a Praia do Cumbuco. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

MAIA, L. P. Procesos Costeros y Balance sedimentario a lo largo de Fortaleza (NE-Brasil): Implicaciones para una Gestión Adecuada de la Zona Litoral. Universitat de Barcelona, 1998.

PEREIRA, S. P.; ROSMAN, P. C. C.; ALVAREZ, C.; SCHETINI, C. A. F.; SOUZA, R. O.; VIEIRA, R. H. S. F. Modeling of Coastal Water Contamination in Fortaleza (Northeastern Brazil). *Water Science and Technology*, v. 72 (6), pp. 928-936, 2015.

ROSMAN, P. C. C. Referência Técnica do SisBaHiA[®]. COPPE/, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017. Disponível em: http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/Sis-BAHIA_RefTec_V9b_.pdf. Acesso em 9 jun. 2017.