



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR - LABOMAR**  
**CURSO DE OCEANOGRAFIA**

**GABRIELE DOS SANTOS SILVA**

**VARIABILIDADE DA MORFODINÂMICA DA PRAIA DO ICARAÍ – CE,  
UTILIZANDO MODELAGEM NUMÉRICA IDEALIZADA.**

**FORTALEZA**

**2016**

GABRIELE DOS SANTOS SILVA

**VARIABILIDADE DA MORFODINÂMICA DA PRAIA DO ICARAÍ – CE,  
UTILIZANDO MODELAGEM NUMÉRICA IDEALIZADA.**

Monografia apresentada ao Curso de Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Oceanografia

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Rui Simões de Menezes

---

S58v Silva, Gabriele dos Santos.

Variabilidade da morfodinâmica da Praia do Icaraí – Ce, utilizando modelagem numérica idealizada  
/ Gabriele dos Santos Silva – 2016.

51 p. : il. color., enc. ; 30 cm.

Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso  
Bacharelado em Oceanografia, 2016.

Orientação: Profº. Drº. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

1. Erosão – Praia do Icaraí (CE). 2. Morfodinâmica praial. 3. Espigões. I. Título.

CDD 551.36

---

GABRIELE DOS SANTOS SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DA MORFODINÂMICA DA PRAIA DO ICARAÍ – CE,  
UTILIZANDO MODELAGEM NUMÉRICA.**

Monografia apresentada ao Curso de Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Oceanografia

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

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

---

Prof. Dr. Lidriana de Souza Pinheiro  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

MSc. Samuel Soares Valentim  
Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

## **AGRADECIMENTO**

À minha família, por todo apoio e incentivo durante minha vida escolar e acadêmica.

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira por todos os ensinamentos e dedicação durante meus anos de graduação e, principalmente, na fase final de conclusão do curso.

A todos os professores que contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional durante o período de graduação.

À minha banca examinadora constituída pela Professora Doutora Lidriana de Souza Pinheiro e pelo Mestre Samuel Soares Valentim por todas as sugestões para melhoria do trabalho.

Aos meus amigos de graduação pelo convívio e amizade durante todos esses anos de estudos.

## RESUMO

Morfodinâmica praial é o resultado da interação da dinâmica de fluídos e morfologia praial, envolvendo o transporte de sedimentos. A compreensão desta é de fundamental importância para determinar os fatores atuantes nas variações naturais da linha costeira e suas possíveis alterações. Erosão costeira é um processo onde a taxa de entrada de sedimentos é menor que a taxa de saída, ocasionando um recuo da linha de costa em direção ao continente. Obras de contenção a erosão costeira são largamente utilizadas para reestabelecer o equilíbrio dinâmico do ambiente. Para o sucesso destas, é indispensável o desenvolvimento de estudos que analisem as características hidrodinâmicas e morfológicas da área de estudo. Neste trabalho, a modelagem numérica idealizada foi a ferramenta utilizada para analisar os agentes atuantes na Praia do Icaraí – Ceará com o objetivo de entender a morfodinâmica local e suas modificações após a construções de espigões na linha de costa. Para isso, foram desenvolvidos seis cenários envolvendo os agentes vento, maré e onda do tipo sea e onda do tipo swell. Desta forma, foi possível avaliar as variações na profundidade da coluna d'água, altura significativa da onda, velocidade da corrente, velocidade orbital do fundo, direção de propagação da onda e na morfologia praial – erosão e sedimentação. Os resultados mostraram que os fatores vento e maré atuando isoladamente ou em conjunto não são capazes de modificar a morfologia praial, caracterizando o fator onda como o agente principal nos processos erosivos da Praia do Icaraí. Além disso, as simulações mostraram a eficiência da implantação de espigões na contenção a erosão e nos processos de sedimentação em torno destas obras.

**Palavras-chave:** Morfodinâmica praial. Erosão. Espigões.

## **ABSTRACT**

Beach morphodynamic is the result of interaction between fluids dynamic and beach morphology, involving the transport of sediments. The understanding of that is important to determine active factors in shoreline and its possible changes to the system. Coastal erosion is a process where entry rate of sediment is lower than exit rate, causing coastline retreat toward the continent. Coastal erosion defense structures are widely used to restore the dynamic balance of the environment. To these success, is indispensable to develop studies that analyze hydrodynamic and morphological characteristics of study site. In this study, a numerical modeling was used as a tool to analyze active agents at Icaraí Beach - Ceara with the goal of understanding morphodynamic and its modifications after breakwaters constructions on the coastline. For this purpose, six scenarios were developed involving agents such as wind, tidal, sea and swell wave. Thus, it was possible to evaluate the changes of water depth, hsing wave height, current velocity, orbital velocity near bottom, directional spreading and beach morphology – erosion and sedimentation. Results showed that factors like wind and tidal alone and together are not able to modify beach morphology, featuring wave factor as the main agent in erosive processes of Icaraí Beach. In addition, simulations showed the efficiency of breakwaters implantation to content erosion and sedimentation processes around these breakwaters.

**Keywords:** Beach morphodynamic. Erosion. Breakwaters.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Localização da área de estudo.....	13
Figura 2. Grade utilizada na modelagem.....	17
Figura 3. Localização dos espigões incluídos na grade de modelagem. ....	19
Figura 4. Representação das seções analisadas no estudo.....	21
Figura 13. Taxas de erosão e sedimentação (em metros) na seção 8 no cenário ONDA SEA no 1º (linha azul), 15º (linha vermelha) e no último dia (linha preta) de simulação. ....	27
Figura 15. Taxas de erosão e sedimentação (em metros) na seção 48 no cenário ONDA SEA no 1º (linha azul), 15º (linha vermelha) e no último dia (linha preta) de simulação. ....	28
Figura 16. Profundidade da coluna d'água (em metros) na seção 48 no cenário ONDA SEA no 1º (linha azul), 15º (linha vermelha) e no último dia (linha preta) de simulação. ....	28
Figura 17. Taxas de erosão e sedimentação (em metros) na seção 8 no cenário ONDA SWELL no 1º (linha azul), 15º (linha vermelha) e no último dia (linha preta) de simulação..	30
Figura 18. Taxas de erosão e sedimentação (em metros) na seção 23 no cenário ONDA SWELL no 1º (linha azul), 15º (linha vermelha) e no último dia (linha preta) de simulação..	30
Figura 19. Taxas de erosão e sedimentação (em metros) na seção 48 no cenário ONDA SWELL no 1º (linha azul), 15º (linha vermelha) e no último dia (linha preta) de simulação..	31
Figura 20. Profundidade da coluna d'água (em metros) na seção 8 no cenário ONDA SWELL no 1º (linha azul), 15º (linha vermelha) e no último dia (linha preta) de simulação..	31
Figura 21. Profundidade da coluna d'água (em metros) na seção 23 no cenário ONDA SWELL no 1º (linha azul), 15º (linha vermelha) e no último dia (linha preta) de simulação..	32
Figura 22. Profundidade da coluna d'água (em metros) na seção 48 no cenário ONDA SWELL no 1º (linha azul), 15º (linha vermelha) e no último dia (linha preta) de simulação..	32
Figura 23. Taxas de erosão/ sedimentação (em metros) do cenário ONDA SEA COM ESPIGÕES. ....	33
Figura 24. Comparação das taxas de erosão e sedimentação (em metros) na seção 8 entre o cenário ONDA SEA (linha azul) e ONDA SEA COM ESPIGÃO (linha preta) no último dia de simulação. ....	34
Figura 26. Comparação das taxas de erosão e sedimentação (em metros) na seção 48 entre o cenário ONDA SEA (linha azul) e ONDA SEA COM ESPIGÃO (linha preta) no último dia de simulação. ....	35

Figura 28. Comparação da velocidade da corrente na seção 23 (em m/s) entre o cenário ONDA SEA (linha azul) e ONDA SEA COM ESPIGÃO (linha preta) ) após xx dias de simulação. ....	36
Figura 31. Comparação da velocidade orbital próxima ao fundo (em m/s) na seção 23 entre o cenário ONDA SEA (linha azul) e ONDA SEA COM ESPIGÕES (linha preta).....	39
Figura 32. Comparação da velocidade orbital próxima ao fundo (em m/s) na seção 48 entre o cenário ONDA SEA (linha azul) e ONDA SEA COM ESPIGÕES (linha preta).....	39
Figura 34. Comparação da altura significativa da onda (em metros) na seção 23 entre o cenário ONDA SEA (linha azul) e ONDA SEA COM ESPIGÕES (linha preta).....	41
Figura 35. Comparação da altura significativa da onda (em metros) na seção 48 entre o cenário ONDA SEA (linha azul) e ONDA SEA COM ESPIGÕES (linha preta).....	41
Figura 44. Comparação da velocidade orbital próxima ao fundo (em m/s) na seção 23 entre o cenário ONDA SWELL (linha azul) e ONDA SWELL COM ESPIGÕES (linha preta). ....	46
Figura 46. Comparação da altura significativa da onda (em m) na seção 8 entre o cenário ONDA SWELL (linha azul) e ONDA SWELL COM ESPIGÕES (linha preta).....	47
Figura 48. Comparação da altura significativa da onda (em m) na seção 48 entre o cenário ONDA SWELL (linha azul) e ONDA SWELL COM ESPIGÕES (linha preta). ....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Configuração dos parâmetros de entrada no modelo ONDA SEA.....	19
Tabela 2. Configuração dos parâmetros de entrada no modelo ONDA SWELL. ....	20

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Área de estudo.....	12
1.1.2	<i>Variáveis climáticas</i> .....	14
1.1.3	<i>Variáveis oceanográficas</i> .....	14
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	Objetivo geral.....	16
2.2	Objetivos específicos.....	16
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	16
3.1	O modelo DELFT3D.....	16
3.2	RGFGRID.....	17
3.3	A grade.....	17
3.4	Batimetria e declividade.....	17
3.5	Composição granulométrica.....	17
3.6	Implementação do modelo.....	18
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
4.1	Cenário MARÉ.....	21
4.2	Cenário VENTO.....	23
4.3	Cenário ONDA SEA.....	25
4.4	Cenário ONDA SWELL.....	29
4.5	Cenário ONDA SEA COM ESPIGÕES.....	33
4.6	Cenário ONDA SWELL COM ESPIGÕES.....	41
5	CONCLUSÃO.....	49
	REFERÊNCIAS.....	50

## 1 INTRODUÇÃO

O ambiente praial é altamente dinâmico e está constantemente sofrendo alterações morfológicas devido a interações com o regime de ondas incidente, a variação do nível de água e o desequilíbrio no suprimento sedimentar local (SHORT, 1999).

O termo morfodinâmica praial pode ser definido como o resultado das interações entre as ondas, o sedimento e a morfologia antecedente da praia, formando um ciclo fechado e retroalimentado, no qual as ondas incidentes irão atuar sobre os sedimentos modificando a morfologia da praia que por sua vez modificará as ondas incidentes (SHORT, 1999).

Segundo Maia (1998), o transporte de sedimentos na zona costeira é resultado da ação de diversos agentes propulsores que ao fornecerem energia ao sistema, no caso de ambientes sedimentares não consolidados, movimentam os sedimentos e modificam o litoral.

O balanço sedimentar de um sistema pode ser definido como a quantificação das taxas de transporte, deposição e erosão presentes em determinado local que ocorra a troca de sedimentos (MAIA, 1998). O conhecimento deste é de extrema importância para compreensão da morfodinâmica praial a partir da posse de dados de acreção e erosão das praias.

Erosão costeira pode ser definida como um balanço sedimentar negativo dentro de uma célula sedimentar litorânea (NUBER, 2008). Dentre os fatores naturais responsáveis por esse processo, pode-se citar: o ângulo de incidência das ondas na costa e a variação da sua energia, o sedimento característico do local, a ação de tempestades, as correntes de maré, processos de deflação, a relação de entrada e saída de sedimentos desbalanceada e o aumento do nível médio dos oceanos (ARAUJO, 2008).

Além destes, fatores antrópicos como a ocupação desordenada, devastação e exploração de ambientes costeiros como mangues e dunas e obras de engenharia também podem afetar o balanço sedimentar da praia, ocasionando erosão marinha na zona costeira.

Estudos revelam que a 40% do litoral brasileiro está gravemente erodido e este fenômeno pode ser explicado pelo padrão de transporte de sedimentos na zona costeira e pela construção de obras de engenharia ou pelo uso inadequado do solo, resultantes de atividades antrópicas (MEDEIROS, 2014).

Os processos erosivos no estado do Ceará foram desencadeados a partir do crescimento da população de Fortaleza, onde se fez necessário a construção de um novo porto que atendesse a maior demanda comercial da região. Assim, as construções do Molhe do Titã, localizado na ponta do Mucuripe, foram iniciadas na década de 40 (MEDEIROS, 2012).

Como consequência, o recuo da linha de costa no litoral de Fortaleza se tornou um problema para as autoridades que optaram por construir um campo de espigões, a partir da década de 70, entre o Molhe do Mucuripe e a embocadura do Rio Ceará (MEDEIROS, 2012).

Entre as décadas de 1990 e 2000, os processos erosivos observados na zona litorânea de Fortaleza já haviam sido minimizados com as construções dos diversos espigões. Entretanto, a erosão costeira foi transferida para as praias próximas situadas no sentido leste-oeste, atingindo a Praia do Icarai (MEDEIROS, 2012).

Um estudo realizado por Valentin e Rosman (1993) concluíram que a erosão costeira afetou cerca de 30 km as praias situadas a oeste do Porto do Mucuripe, erodindo em média 6 milhões de m<sup>2</sup> de terrenos. Farias (2008) estimou uma taxa de erosão para a Praia do Icarai com média de -0.88 m/ano e máximo de -3,3 m/ano, caracterizando tendência uniforme.

A erosão costeira na Praia do Icarai é caracterizada pelo recuo de linha de costa devido a esta ser constituída por sedimentos arenosos, onde estes são removidos pelas ondas e transportados pelas correntes de deriva litorânea (MEDEIROS, 2012). Além disso, fatores antrópicos como ocupação desordenada também são responsáveis pelo cenário erosivo da área de estudo. Dentre as consequências do processo erosivo, pode-se relatar diversos problemas ambientais e a destruição do patrimônio público e privado.

A modelagem numérica é uma ferramenta largamente utilizada para analisar o comportamento do oceano mediante medições e teorias para que seja possível simular e prever os processos que nele ocorrem como, por exemplo, a circulação marítima e o transporte de sedimentos (HARARI, 2008).

O Delft3D é um sistema de modelagem que realiza análises multidisciplinares em zonas costeiras, lagos, rios e estuários. Esse sistema abrange diversos módulos que integrados permitem a execução de simulações hidrodinâmicas, através de forçantes como maré, vento, gradientes de densidade e correntes de ondas induzidas; propagação de ondas sobre batimetrias irregulares; advecção e dispersão de efluentes; evolução morfológica; transporte de sedimentos coesivos e não-coesivos; modelagem de qualidade de água e processos ecológicos (OLPE, 2012).

Olpe (2012) realizou um estudo dos processos dinâmicos ocorrentes na Enseada do Itapocorói – Santa Catarina aplicando o modelo numérico Delf3D com o objetivo de analisar a resposta ambiental à implementação de obras de engenharia como a construção de espigões e alimentação artificial de praia. Os resultados obtidos a partir o uso de modelagem numérica foram satisfatórios e condizentes com estudos anteriores.

Em outro estudo de análise das características hidrodinâmicas da Baía de Guanabara – Rio de Janeiro, Oliveira (2009) validou qualitativa e quantitativa o modelo hidrodinâmico Delft3D, mostrando-o satisfatório para as condições de simulação adotadas.

A adoção de um modelo idealizado utilizando o Delft3D foi executado na Praia do Cassino – Rio Grande do Sul com o intuito de examinar a deposição de lama sobre a plataforma interna da praia. Conclui-se que a deposição de lama é governada por eventos de erosão e recirculação barotrópica. Este estudo apresentou algumas limitações, como por exemplo, a não modelagem das taxas pequenas de sedimentação devido à exclusão dos processos de trocas de fundo. Porém, os resultados se mostraram úteis na análise dos maiores agentes forçantes da movimentação de sedimentos na Praia do Cassino (VIZON et al, 2009).

O uso do modelo Delft3D de forma idealizado é uma importante ferramenta que possibilita a análise individual e em conjunto dos agentes forçantes em determinado local. Estudos com essa finalidade podem determinar a variável dominante na morfodinâmica praial, podendo estimar a dimensão dos efeitos destes agentes e suas possíveis modificações no ambiente afetado.

De acordo com Wiegert (1975) e Jorgensen (1994) os modelos matemáticos são importante no preenchimento de lacunas de informações disponíveis, análise de fluxos dentro de diferentes compartimentos e no estudo de processos ambientais. Outra vantagem é o baixo custo e elevado potencial na geração de estimativa de fluxo e dispersão de partículas. Além disso, o modelo também pode ser utilizado com o objetivo de simular as possíveis consequências de ações antrópicas no local de estudo (PEREIRA, 2003).

Nesse estudo, o modelo numérico Delft3D foi utilizado de forma idealizada com o intuito de analisar as principais variáveis envolvidas nos processos hidrodinâmicos que ocorrem na Praia do Icarai para que seja possível a compreensão da dinâmica local. Este pode ser um efetivo instrumento utilizado no suporte à decisão entre as alternativas da gestão ou uso da zona costeira.

### 1.1 Área de estudo

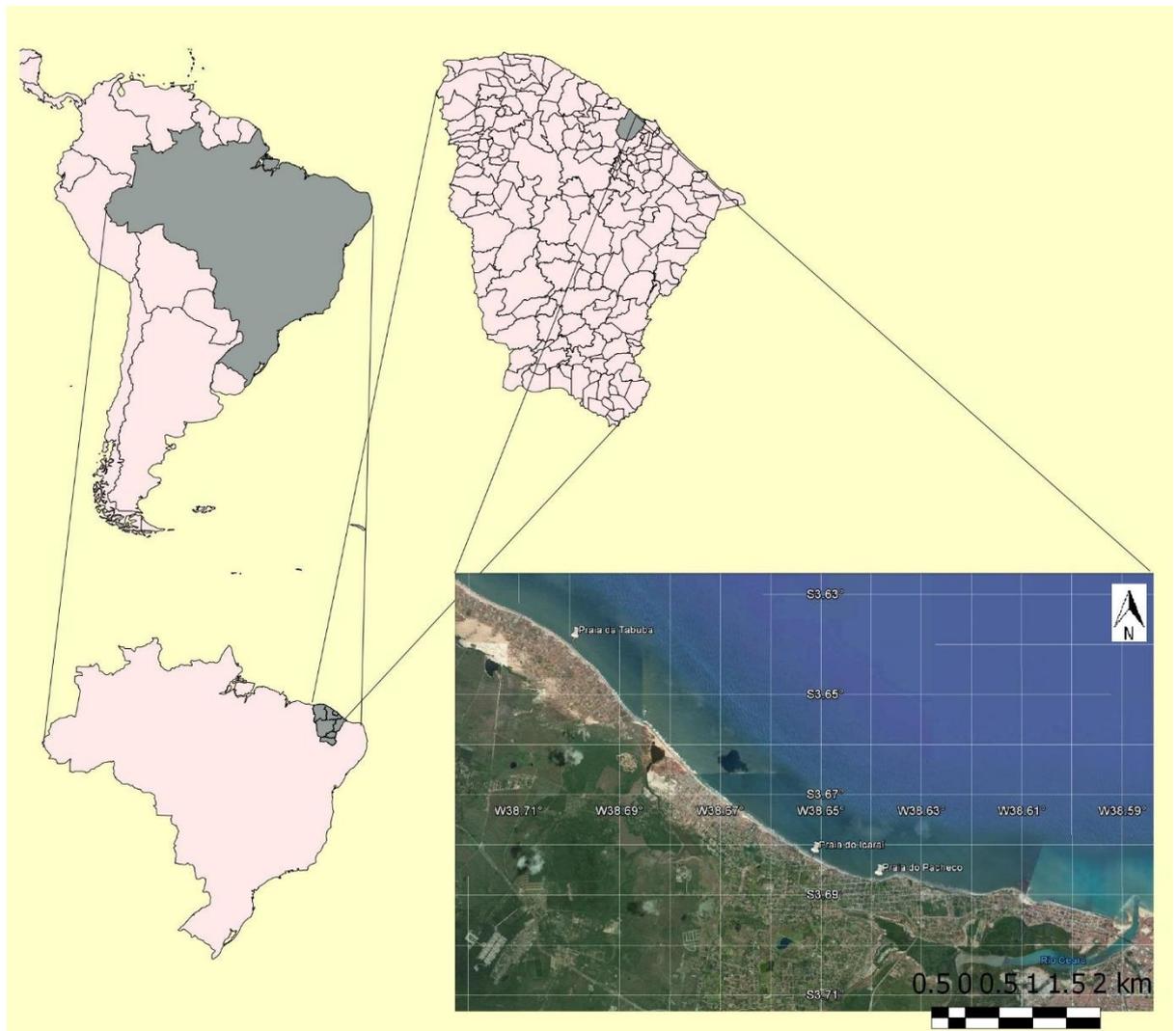
O presente trabalho utilizou um modelo idealizado da Praia do Icarai que se localiza no município de Caucaia, na porção norte do estado do Ceará, pertencente à Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). O local de estudo é de grande interesse por interligar aos principais polos

turísticos do estado, Fortaleza e Caucaia, e o responsável pelo Complexo Industrial e Porto do Pecém, São Gonçalo do Amarante (MEDEIROS, 2012).

A Praia do Icaraí está situada entre as coordenadas  $3^{\circ}40'47''$  de Latitude Sul e  $38^{\circ}39'14''$  de Longitude Oeste, estando compreendida entre as praias do Pacheco, a leste, e a desembocadura do Rio Barra Nova, a oeste (FIGURA 1). Esta apresenta aproximadamente 5,7 km de extensão, sendo caracterizada pela presença de uma faixa de areia branca, dunas e lagoas.

Figura 1. Localização da área de estudo.

F



Fonte: Google Earth

Segundo Dantas (2006), a partir dos anos de 1970, a ocupação urbana se iniciou na região por veranistas e turistas devido ao crescimento econômico registrado em Fortaleza,

modificando o cenário local que atualmente abriga diversos condomínios residenciais, casas de veraneio, barracas de praia, escolas, farmácias, entre outros.

Esta ocupação ocorreu de forma desordenada, onde residências foram construídas em cima de campos de dunas e locais muito próximos ao limite de faixa de praia devido à carência de uma legislação específica e o desconhecimento da dinâmica do local.

Paralelamente a urbanização da Praia do Icaraí, a construção de obras de contenção à erosão costeira no litoral de Fortaleza iniciou-se em resposta ao recuo de linha de costa observado após a construção do Porto do Mucuripe. Porém, esses processos erosivos atingiram as praias localizadas a oeste de Fortaleza, afetando a Praia do Icaraí.

O processo de erosão costeira prejudica economicamente a população local devido à praia ser referência para a prática de esportes terrestres e náuticos, além do turismo recreativo. A partir disso, as autoridades procuram maneiras de recuperar o espaço degradado, promovendo a construção de obras de contenção à erosão costeira.

#### *1.1.2 Variáveis climáticas*

As condições climáticas observadas no Nordeste do Brasil são diretamente relacionadas aos parâmetros meteorológicos como velocidade e direção dos ventos, precipitação, insolação, umidade e temperatura atmosférica (FARIAS, 2008).

A área de estudo está localizada na Região Nordeste Setentrional do Brasil, sendo controlada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). A ZCIT é uma região onde os ventos alísios de nordeste no Hemisfério Norte e sudeste no Hemisfério Sul convergem, sendo caracterizada por uma zona de baixa pressão e intensa precipitação. A posição da ZCIT é dominante determinação do padrão de ventos e da abundância e deficiência de chuvas no setor norte do nordeste do Brasil.

Devido à sua localização, a área de estudo é caracterizada pela presença de ventos alísios durante quase todo o ano com direção principal entre as diretrizes NE-SE (MEDEIROS, 2012). Observou-se que a zona costeira cearense possui ventos com velocidade média anual de 4,53 m/s, intensificando-se a partir do mês de Julho até o mês de Novembro, podendo atingir picos de 9 m/s (FARIAS, 2008).

#### *1.1.3 Variáveis oceanográficas*

O conhecimento dos fatores climáticos e oceanográficos é de extrema relevância para que seja possível um melhor entendimento da dinâmica costeira observada no local de interesse.

A partir da análise dos dados maregráficos da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN), pode-se concluir que a área de estudo apresenta um regime de mesomarés e com periodicidade semi-diurna. Além disso, Maia (1998) concluiu que a altura máxima de maré é de 3,23 m enquanto a mínima é de 75 cm em um estudo realizado com registros analógicos mensais obtidos com o uso de um mareógrafo LNG-15.

O estudo realizado por Moura (2012) entre os anos de 2010 e 2011 relatou que 58% das ondas ocorridas no litoral de Caucaia possuem um período de onda que varia de 6 a 9 s, caracterizando-as como ondas do tipo sea. As ondas do tipo swell foram mais frequentes nos meses entre Janeiro e Maio, constituindo 29% do total de ocorrência. A direção das ondas está estreitamente relacionada com a direção dos ventos incidentes na região, variando entre os quadrantes E, ENE e ESE.

Lima (2002) realizou uma medição de ondas no Porto do Pecém com o auxílio de um ondógrafo do tipo Waverider fixado a 18 metros de profundidade no local e estabeleceu uma média de altura de onda de 1,45 m com amplitude de 1,88 m e um período médio de 7,82 s.

O litoral nordestino apresenta duas configurações de perfil de praia bem definidas que se alteram ao longo do ano: um perfil de deposição e outro de retirada de sedimentos. De acordo com Medeiros (2012), entre os meses de Agosto e Dezembro observa-se uma maior intensidade de ventos ocasionando a incidência de ondas com alturas mais elevadas, caracterizando um perfil mais erodido e com declividade mais acentuada.

Em contrapartida, nos meses de verão são observados ventos moderados e a incidência de ondas menores, determinando um transporte transversal no sentido do continente. Assim, entre os meses de Fevereiro a Abril, o perfil de praia apresenta-se com caráter deposicional e com declividade mais suave (MEDEIROS, 2012).

No litoral cearense as ondas são determinantes no transporte de sedimentos, possuindo direção semelhante à incidência de ventos, definindo assim, um fluxo de sedimentos unidirecional no sentido de leste para oeste (LIMA, 2002). Além disso, existe uma quebra do suprimento de sedimentos da praia devido a uma sequência de espigões a leste do litoral de Caucaia, ocasionando uma constante retirada de material e o recuo da linha de costa (MEDEIROS, 2012).

Medeiros (2014) realizou um estudo no Município de Caucaia que mapeou as declividades no território com o objetivo de que estas poderiam ser consideradas fatores

limitantes ao uso de ocupação da terra e parâmetro para delimitação de áreas de preservação permanente. A Praia do Icarai apresentou declividade entre 0 a 3%, classificando o relevo como plano e com pequenos desnivelamentos.

Segundo Silva (1993), a Praia do Icarai apresenta sedimentos de areia fina a média, definindo uma praia com perfil de praia dissipativo. Este estimou o diâmetro médio dos sedimentos como 0,40 mm ao longo da zona de arrebenção.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O presente trabalho tem como principal objetivo analisar os principais forçantes hidrodinâmicos atuantes na morfodinâmica local da Praia do Icarai, com base num modelo numérico idealizado.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Analisar os efeitos dos ventos, ondas e marés na morfologia da área de estudo.
- Analisar as modificações na morfologia praias em resposta à construção de obras de engenharia costeira.

## **3 MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1 O modelo DELFT3D**

O Delft3D é um sistema de modelagem desenvolvido pela Deltares juntamente com a *Delft University of Technology* com o intuito de realizar análises multidisciplinares para áreas costeiras, rios, lagos e estuários. O Delft3D é composto por diversos módulos agrupados na mesma interface, podendo alternar entre o campo 2D e 3D, sendo capazes de realizar simulações de fluxos, transporte de sedimentos, ondas, qualidade de água, desenvolvimento morfológico e ecologia (DELFT3D, 2011).

Os módulos utilizados neste trabalho foram o módulo hidrodinâmico (Delft3D-FLOW) e o módulo de ondas (Delft3D-WAVE). O módulo hidrodinâmico (Df) é um módulo de simulação hidrodinâmica multidimensional que calcula fluxos não-estacionários e transporte resultantes da ação das marés e das forçantes meteorológicas (DELFT3D, 2011).

O módulo de onda (Dw) é uma excelente ferramenta utilizada para simular a evolução de ondas geradas pelo vento em águas costeiras. Este módulo utiliza dois modelos de onda, HISWA ou SWAN, objetivando computar a propagação de onda, ondas geradas pelo vento, interações não lineares entre onda-onda e dissipação de energia, para uma determinada topografia de fundo, campo de vento, nível de água e campos de correntes, em águas rasas intermediárias e profundas (DELFT3D, 2014).

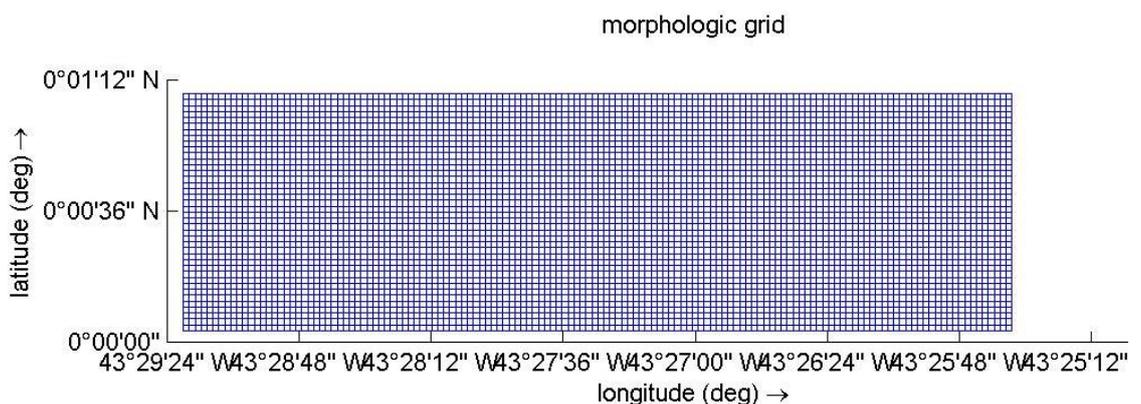
### 3.2 RGFGRID

O RGFGRID é uma ferramenta de pré-processamento presente no modelo numérico Delft3D que tem como objetivo criar, modificar e visualizar as grades utilizadas na modelagem. Estas podem ser ortogonais ou curvilíneas, apresentando dois sistemas de coordenadas: cartesianas (em metros) ou esféricas (em décimos de graus).

### 3.3 A grade

A grade numérica utilizada no modelo foi gerada e editada em coordenadas esféricas no módulo RGFGRID, com resolução de 50x50 m e extensão de 7 km ao longo da costa e 2 km na direção transversal à costa (FIGURA 2). A grade apresenta três bordas abertas (Leste, Norte e Oeste) e uma borda fechada (Sul), representando idealizadamente a Praia de Icaraí.

Figura 2. Grade utilizada na modelagem



Fonte: a autora.

### 3.4 Batimetria e declividade

A batimetria local pode ser calculada a partir do uso dos dados de declividade obtidos através de referências bibliográficas. De acordo com Medeiros (2014) a declividade da Praia do Icaraí varia entre 0% e 3%, caracterizando uma praia de relevo plano. Utilizando uma variação máxima de declividade de 3% a cada 100 metros de praia, resultamos em uma

mudança de 3 metros de profundidade a cada 1000 metros de praia. Esta batimetria foi aplicada de forma homogênea na grade do modelo.

### 3.5 Composição granulométrica

A área de estudo é composta por sedimentos de areia fina e média, onde no modelo idealizado utilizou-se somente areia média com grãos de diâmetro médio de 0,40 milímetros em todo o domínio. Esta escolha se deve a uma limitação computacional das simulações realizadas.

### 3.6 Implementação do modelo

A aquisição de dados para a modelagem foi realizada a partir de uma revisão bibliográfica, onde os três forçantes considerados nesse trabalho foram: intensidade e direção do vento, altura, período e direção de ondas e altura das marés. Outros dados importantes como dados sedimentológicos e morfológicos também foram obtidos através de estudos regionais e locais.

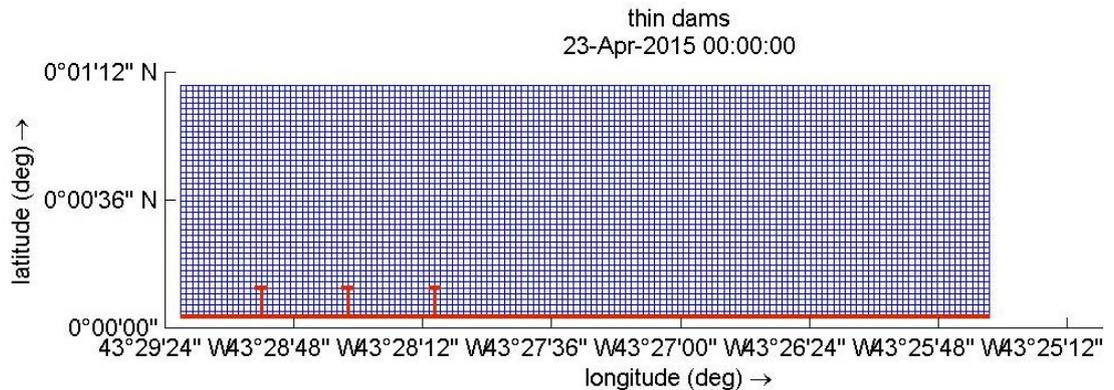
O módulo hidrodinâmico Df foi utilizado para modelar a circulação devido ventos e maré, enquanto a variável onda pode ser analisada usando o módulo Dw. No módulo Dw foram simuladas ondas do tipo sea e swell separadamente. As três variáveis foram analisadas individualmente e em conjunto com o intuito de avaliar o forçante dominante no transporte de sedimentos.

A simulação foi realizada durante o período de 30 dias, porém a partir da utilização do fator de aceleração morfológica, neste estudo sendo 12, foi possível gerar resultados referentes à 360 dias de simulação. Desta forma, foram produzidos seis cenários: MARÉ, VENTO, ONDA SEA, ONDA SWELL, ONDA SEA COM ESPIGÕES E ONDA SWELL COM ESPIGÕES.

O cenário MARÉ apresenta somente a ação da maré como forçante no transporte sedimentar, enquanto o cenário VENTO é caracterizado pela ação do vento e maré acoplados atuando na região de estudo.

Os cenários referentes às ondas, ONDA SEA, ONDA SWELL, ONDA SEA COM ESPIGÃO E ONDA SWELL COM ESPIGÃO apresentam os três forçantes em análise (vento, maré e ondas) e os dois últimos cenários incluem espigões como obras de engenharia costeira, onde estes apresentam 250 m de extensão e 100 metros de largura de cabeça (FIGURA 3).

Figura 3. Localização dos espigões incluídos na grade de modelagem.



Fonte: a autora.

O cenário MARÉ foi configurado utilizando as componentes harmônicas de maré M2 e S2 como condição de contorno com amplitude 0.97 m e 0.31 m e fase 328° e 356°, respectivamente. O cenário hidrodinâmico VENTO foi configurado a partir dos dados de MARÉ incluindo os dados de vento com velocidade de 7 m/s, atingindo a região de estudo com direção de 112.5°.

Os parâmetros de entrada utilizados na configuração do cenário ONDA SEA e ONDA SEA COM ESPIGÕES foram: altura significativa da onda ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ), direção ( $H_{dir}$ ) e espalhamento do espectro direcional [-]. A tabela a seguir apresenta os dados de entrada do modelo:

Tabela 1. Configuração dos parâmetros de entrada no modelo ONDA SEA.

PARAMÊTRO	VALOR
Altura significativa da onda (m)	1,5
Período de pico (s)	7,8
Direção ( $H_{dir}$ )	90°
Espalhamento [-]	4
Velocidade do vento (m/s)	7
Ângulo de incidência do vento (°)	112.5
Amplitude de maré (m)	0.91(M2) e 0.31(S2)
Fase de maré (°)	328 (M2) e 356 (S2)

Fonte: a autora.

O cenário ONDA SWELL e ONDA SWELL COM ESPIGÕES foram configurados a partir dos dados de entrada presentes na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2. Configuração dos parâmetros de entrada no modelo ONDA SWELL.

<b>PARAMÊTRO</b>	<b>VALOR</b>
Altura significativa da onda (m)	1
Período de pico (s)	15
Direção (Hdir)	30°
Espalhamento [-]	4
Velocidade do vento (m/s)	7
Ângulo de incidência do vento (°)	112.5
Amplitude de maré (m)	0.91(M2) e 0.31(S2)
Fase de maré (°)	328 (M2) e 356 (S2)

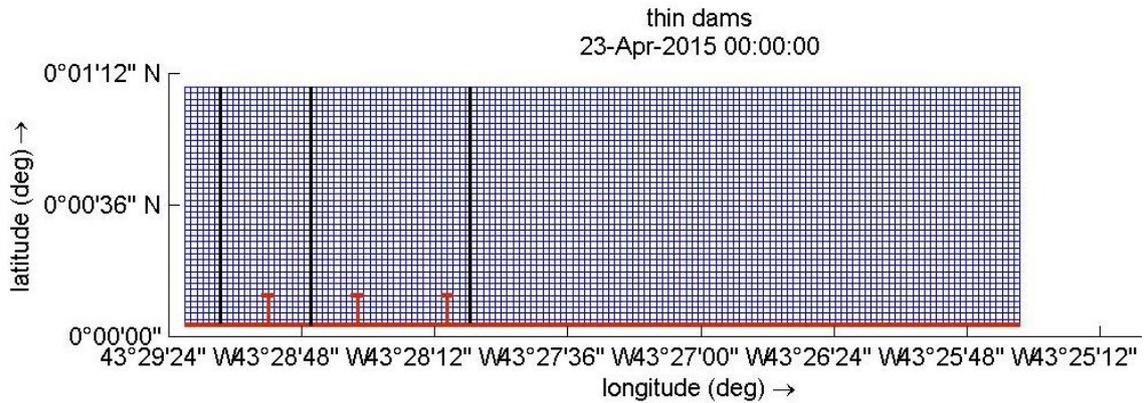
Fonte: a autora.

#### **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados das simulações do transporte de sedimentos são apresentados a seguir, nos seis cenários: cenário MARÉ, cenário VENTO, cenário ONDA SEA, cenário ONDA SWELL, cenário ONDA SEA COM ESPIGÕES e cenário ONDA SWELL COM ESPIGÕES.

Para melhor visualização dos resultados, os gráficos apresentem três tempos de simulação, no primeiro dia de simulação (linha azul), no 15° dia de simulação (linha vermelha) e no último dia de simulação (linha preta). Além disso, as análises foram realizadas em três seções da grade, nos 0.4 km a partir do contorno oeste antes da implantação do primeiro espigão (m=8), nos 1.1 km (m=23) e nos 2.4 km do contorno (m=48).

Figura 4. Representação das seções analisadas no estudo.

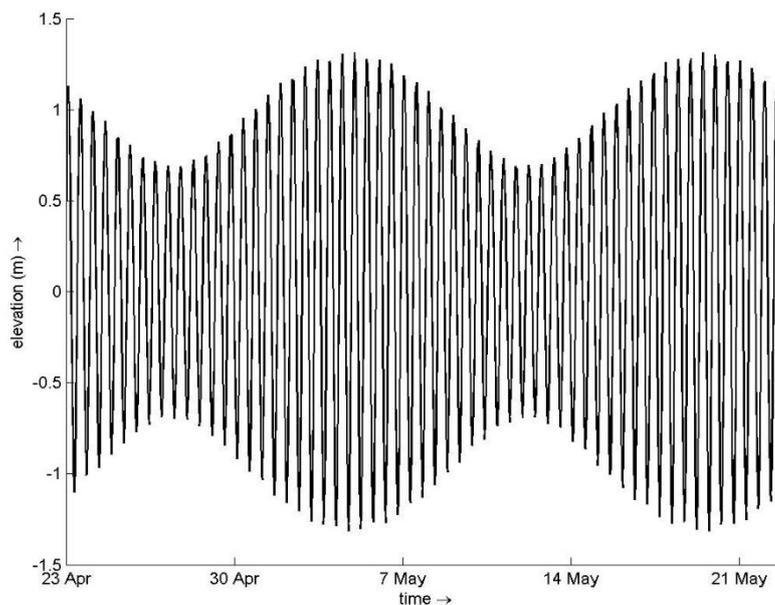


Fonte: a autora.

#### 4.1 Cenário MARÉ

Os resultados mostraram que a elevação do nível do mar varia aproximadamente entre 1.3 e -1.3 metros durante os períodos de sizígia, ou seja, amplitude de 2.6 m. Maia (1998) analisou 14 registros analógicos mensais em um marégrafo instalado no Porto do Mucuripe e concluiu que na região a amplitude máxima de máre foi de 3.23 m e a mínima registrada foi de 75 cm. Assim a amplitude de maré modelada é inferior ao observado no Porto de Mucuripe, o que pode ser atribuído à homogeneidade da batimetria usada no modelo.

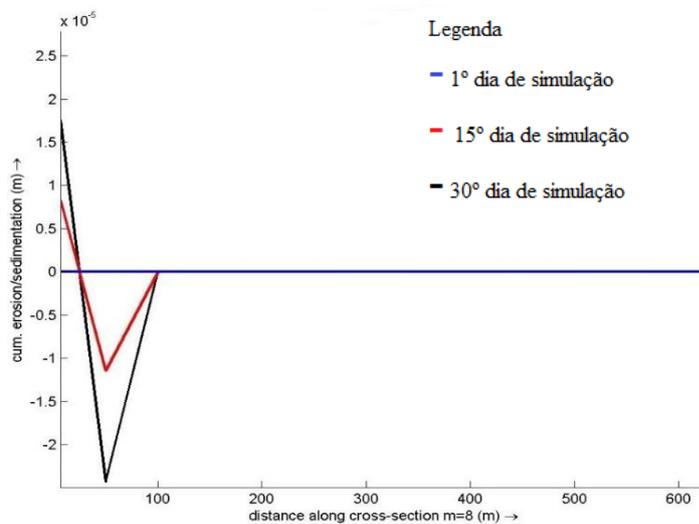
Figura 5. Elevação do nível do mar (em metros) para o cenário MARÉ.



Fonte: a autora.

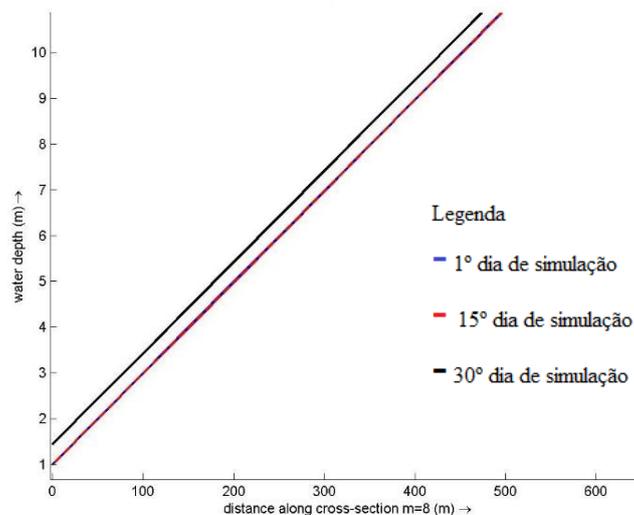
Os resultados obtidos no cenário onde o único agente atuante é a maré se mostraram iguais nas três seções da grade (FIGURA 6), onde razão sedimentação/ erosão foi muito pequena e no máximo  $2.5 \times 10^{-5}$  m nos 50 m da praia. Nota-se que o sedimento depositado junto a linha de costa (valores positivos) é erodido a 50 m da praia (valores negativos). O perfil de profundidade nas três seções da grade também não foi diferente, onde é possível observar que a profundidade inicial de aproximadamente 1.5 m junto a praia foi alterada em poucos centímetros (FIGURA 7).

Figura 6. Taxas de erosão e sedimentação (em metros) na seção 8 no cenário MARÉ.



Fonte: a autora.

Figura 7. Perfil de profundidade (em metros) na seção 8 no cenário MARÉ.

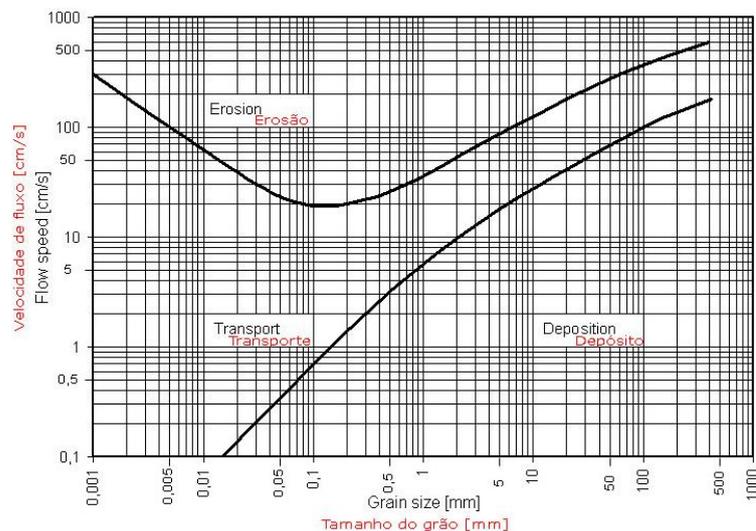


Fonte: a autora.

Através da análise dos resultados acima é possível observar a ação da maré atuando diariamente no local de estudo por um período de 360 dias. Entretanto, percebe-se que somente a componente maré não é capaz de gerar um quadro erosivo devido a velocidade das correntes de marés perante o tipo de sedimento encontrado na área de estudo.

A curva de Hjustrom (FIGURA 8) é uma ferramenta largamente utilizada na análise do transporte de sedimentos, apresentando como parâmetros a velocidade do fluxo e o diâmetro das partículas. No atual estudo, o valor da velocidade máxima da corrente de marés encontrada foi 12 cm/s, o que caracteriza apenas o transporte de sedimentos presentes na coluna d'água. Com esta velocidade máxima e com o diâmetro de sedimento usado no estudo (0,40 mm) não é possível haver remobilização de sedimentos.

Figura 8. Curva de Hjustrom

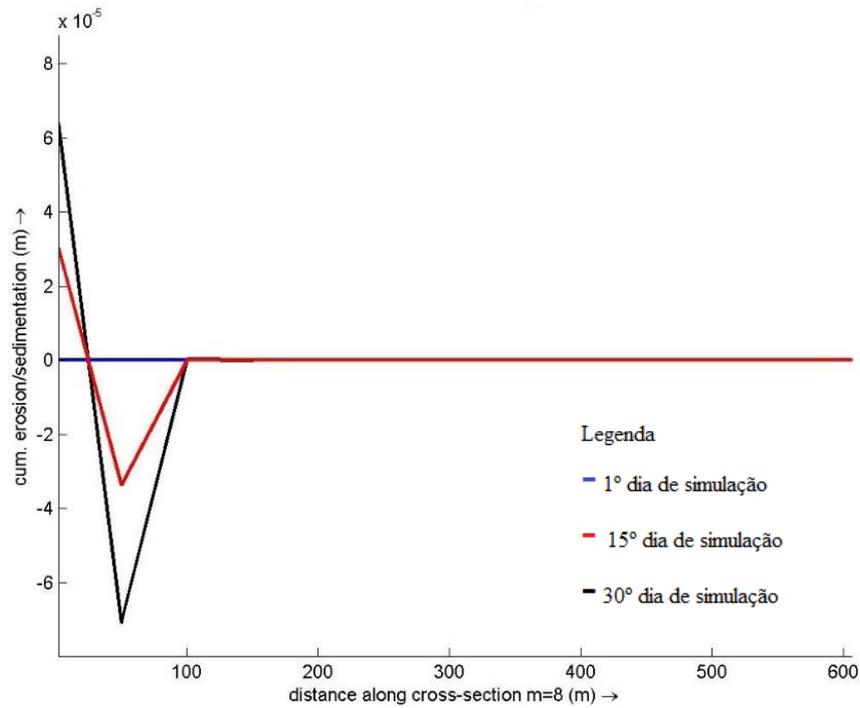


Fonte: Geocaching ([https://www.geocaching.com/geocache/GC3D4G7\\_meandros-do-cavado-cavados-meanders](https://www.geocaching.com/geocache/GC3D4G7_meandros-do-cavado-cavados-meanders)).

#### 4.2 Cenário VENTO

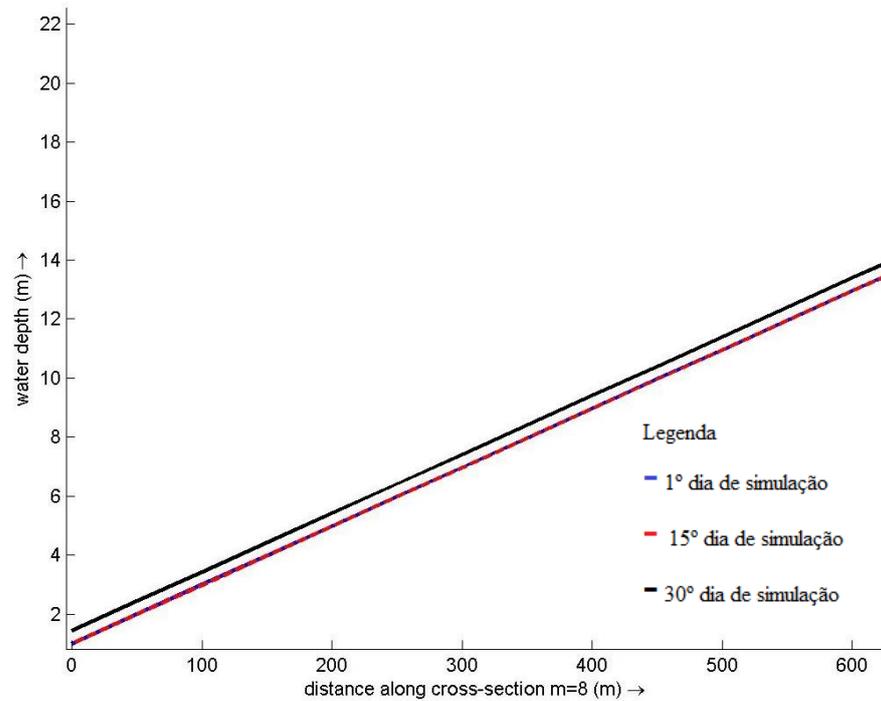
Ao analisar os resultados obtidos no cenário VENTO, onde o modelo é forçado pelo vento constante de 7 m/s mais o efeito das marés, observou-se que a razão sedimentação/erosão (FIGURA 9) e o perfil de profundidade (FIGURA 10) permanecem próximos a  $6.6 \times 10^{-5}$  m e aproximadamente 1 m, respectivamente, nas três localizações da grade.

Figura 9. Taxas de erosão e sedimentação (em metros) na seção 8 no cenário VENTO.



Fonte: a autora.

Figura 10. Profundidade da coluna d'água (em metros) na seção 8 no cenário VENTO.



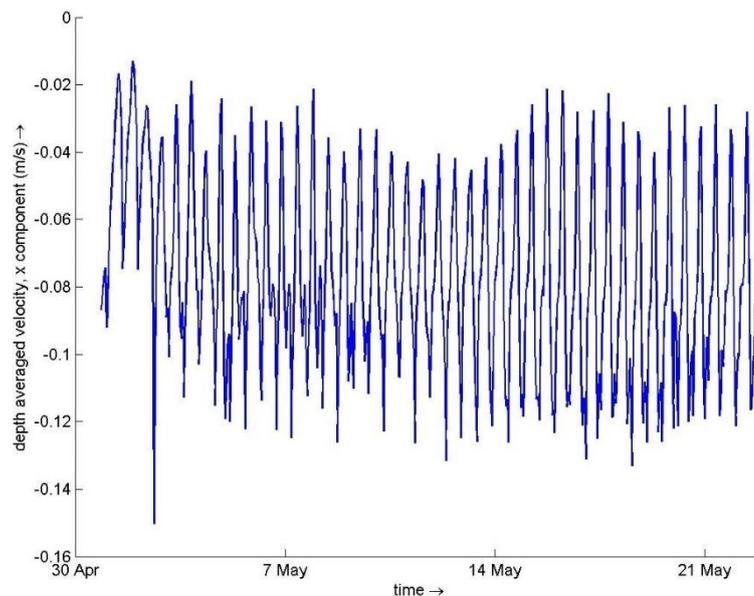
Fonte: a autora.

Estudos realizados na região costeira do Ceará exaltaram o vento como a variável mais importante para a dispersão de materiais e substâncias (PARENTE, 2013), na caracterização do transporte de sedimentos, sendo predominantemente longitudinal, e na formação de correntes e ondas na região (MAIA, 1998). Neste estudo assim, como no cenário de maré o vento não foi capaz de gerar erosão na região.

#### 4.3 Cenário ONDA SEA

A velocidade da corrente na componente x (FIGURA 11), paralela à costa, de um ponto próximo a costa variou entre aproximadamente -0,01 e -0.15 m/s enquanto Parente (2013) também achou resultados próximos a 0, não ultrapassando - 0,05 m/s.

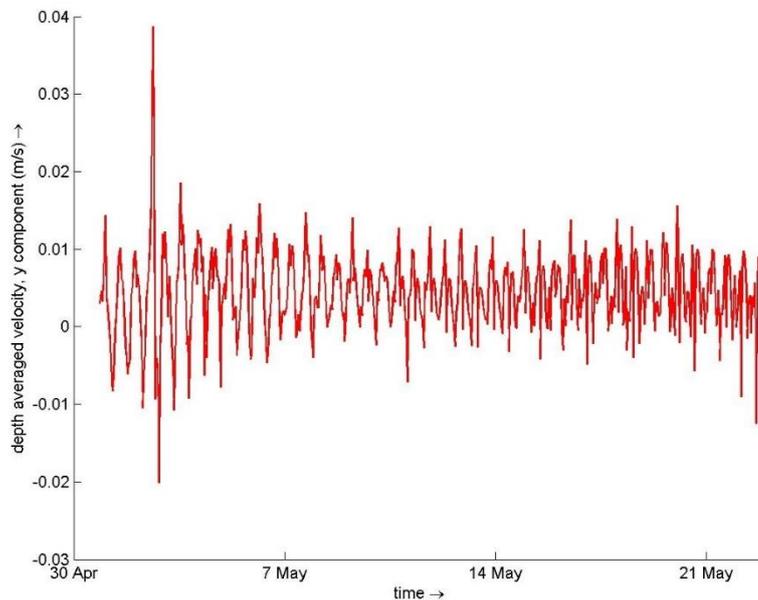
Figura 11. Dados de velocidade na componente x (em m/s) em um ponto próximo a costa para a simulação ONDA SEA.



Fonte: a autora.

A velocidade da corrente na componente y (FIGURA 12), perpendicular à costa, em um ponto próximo a costa varia entre aproximadamente 0.015 e -0.010 m/s. Estes valores próximos a zero são semelhantes aos valores encontrados por Parente (2013), entre 0.020 e -0.020 m/s, quando este também analisou a velocidade da corrente em dois pontos próximos a linha de costa.

Figura 12. Dados de velocidade na componente y (em m/s) em um ponto próximo a costa para a simulação ONDA SEA.



Fonte: a autora.

Os resultados referentes à erosão e sedimentação acumulada (FIGURA 13, 14 e 15), assim como o perfil de profundidade da coluna d'água (FIGURA 16), ao longo da área de estudo, mostram um padrão de deslocamento de sedimentos, onde há uma sedimentação na linha de costa e logo nos primeiros metros de profundidade, inicia-se o processo de erosão. Após os 200 m de praia, ocorre o equilíbrio dinâmico.

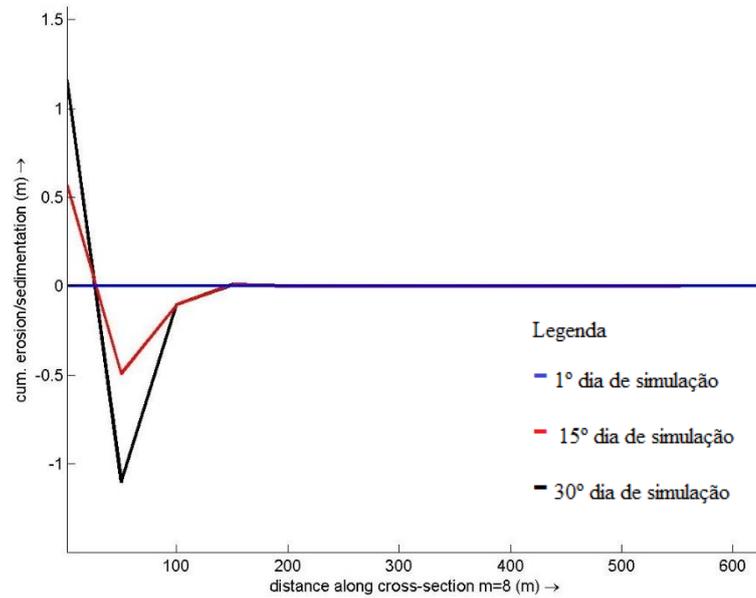
Na seção inicial do grid ( $m=8$ ) (FIGURA 13) observa-se um acúmulo de 1.2 metros sedimentos em média perto da linha de costa e uma erosão máxima de aproximadamente 1.1 metros nos primeiros 50 m de praia ao final de 30 dias de simulação.

Na seção  $m=23$  (FIGURA 14) apresenta resultados semelhantes a anterior, onde existe uma sedimentação de 0.8 metros junto a costa e, em seguida, inicia-se um processo erosivo que alcança 1.3 m nos primeiros 50 m da grade.

Na última seção analisada ( $m=48$ ) (FIGURA 15) ocorre uma sedimentação inicial de aproximadamente 0.7 m e a erosão calculada foi de 1.6 m nos 50 m de praia.

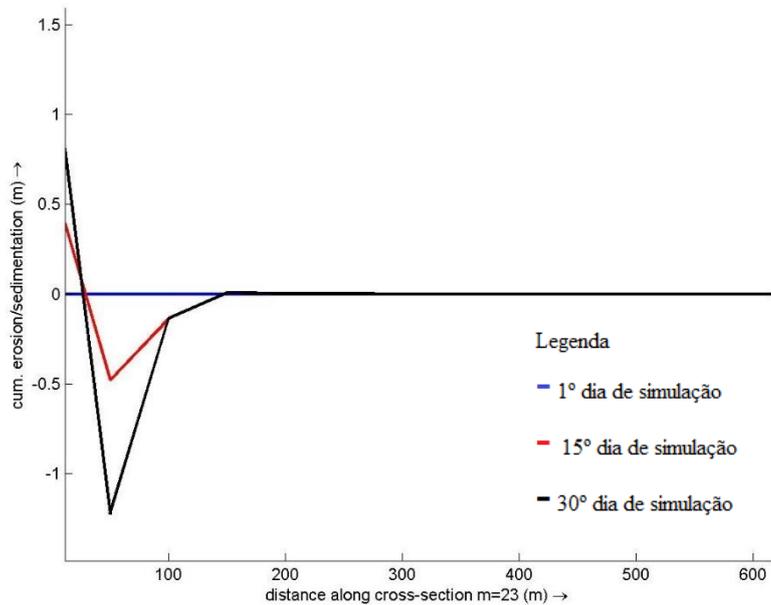
A profundidade da coluna d'água nas três seções (FIGURA 16) de estudo foram extremamente semelhantes, observando-se uma máxima de 4 m de profundidade nos 2.4 km de extensão.

Figura 13. Taxas de erosão e sedimentação (em metros) na seção 8 no cenário ONDA SEA..



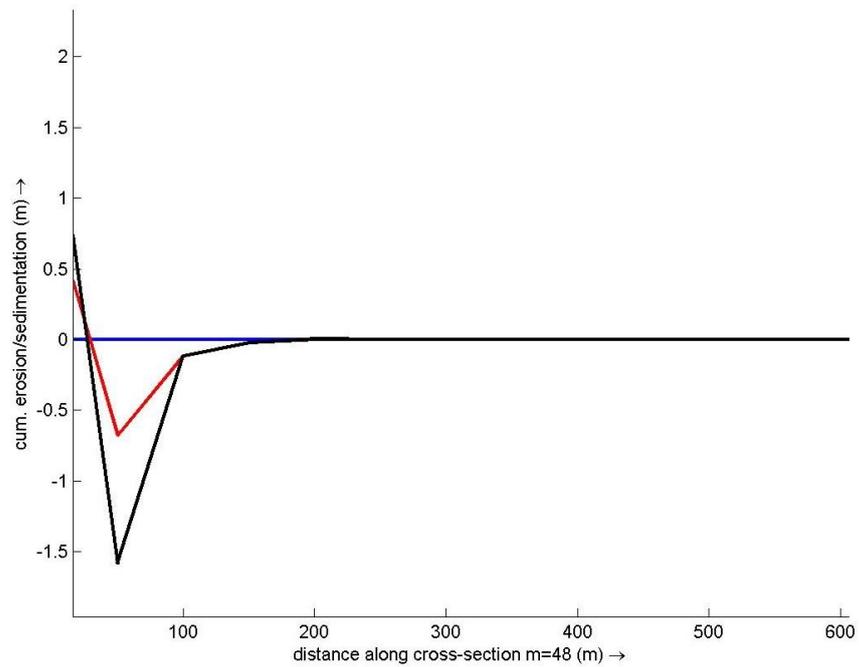
Fonte: a autora.

Figura 14. Taxas de erosão e sedimentação (em metros) na seção 23 no cenário ONDA SEA.



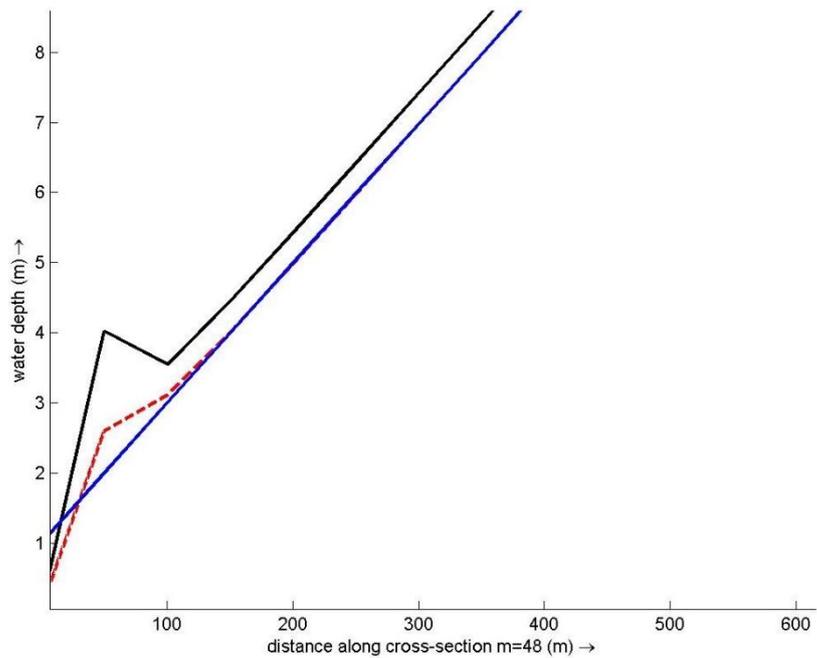
Fonte: a autora.

Figura 15. Taxas de erosão e sedimentação (em metros) na seção 48 no cenário ONDA SEA.



Fonte: a autora.

Figura 16. Profundidade da coluna d'água (em metros) na seção 48 no cenário ONDA SEA.



Fonte: a autora.

Com a inclusão da variável onda no cenário antes caracterizado somente pela ação de vento e maré, podemos observar que o cenário se diferencia dos anteriores, principalmente pelo aumento na profundidade da coluna d'água. Isso demonstra que o agente onda, acompanhado pelas variáveis vento e maré, é capaz de gerar erosão e uma maior mudança na morfologia praial.

De acordo com Maia (2014), a componente onda é responsável pelas características morfológicas e energéticas da zona costeira, influenciando diretamente na extensão desta zona e no tipo de praia. Maia (1998) e Valentini et al. (1992) concluíram que o fator onda, assim como o transporte eólico, são os dois principais responsáveis pela alta dinâmica no transporte de sedimentos na Praia do Icaraí.

Lima (2002) em um estudo mais atualizado determinou que o agente onda é predominante no transporte de sedimentos, tendo direção concordante com a incidência de ventos no local, possuindo um fluxo de sedimentos unidirecional no sentido leste oeste. Este ainda estimou taxas de transporte longitudinal de aproximadamente  $1.000.000 \text{ m}^3/\text{ano}$ .

#### 4.4 Cenário ONDA SWELL

O cenário com ondas do tipo swell se mostrou um pouco diferente do cenário ONDA SEA. O processo de sedimentação iniciou-se nos primeiros metros de profundidades e estendeu-se até pelo menos os primeiros 100 m (FIGURA 17, FIGURA 18, FIGURA 19). Os valores das taxas de sedimentação também foram maiores do que no cenário com ondas do tipo sea.

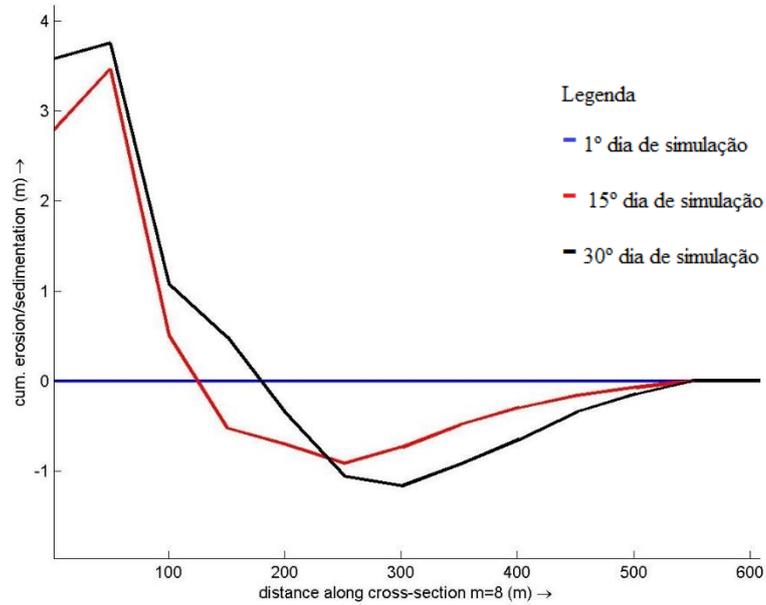
As taxas de erosão foram semelhantes ao cenário ONDA SEA em valores, porém estas foram máximas a partir dos 200 metros de praia (FIGURA 17, FIGURA 18, FIGURA 19). As profundidades da coluna d'água também foram muito maiores que o cenário anterior, alcançando o ápice juntamente com máximas taxas de erosão (FIGURA 20, FIGURA 21, FIGURA 22).

Na seção  $m=8$  (FIGURA 17) o acúmulo de sedimentos na costa foi de 3.5 m no último dia de simulação e a erosão alcançou o pico de aproximadamente 1.3 m aos 300 m de praia. A profundidade da coluna d'água nos 300 metros foi de 8 m de profundidade.

Na seção  $m=23$  (FIGURA 18) houve uma sedimentação de 4 m na linha da praia, erosão de 1.3 m aos 300 m de praia enquanto a profundidade chegou a 8 m nessa mesma profundidade.

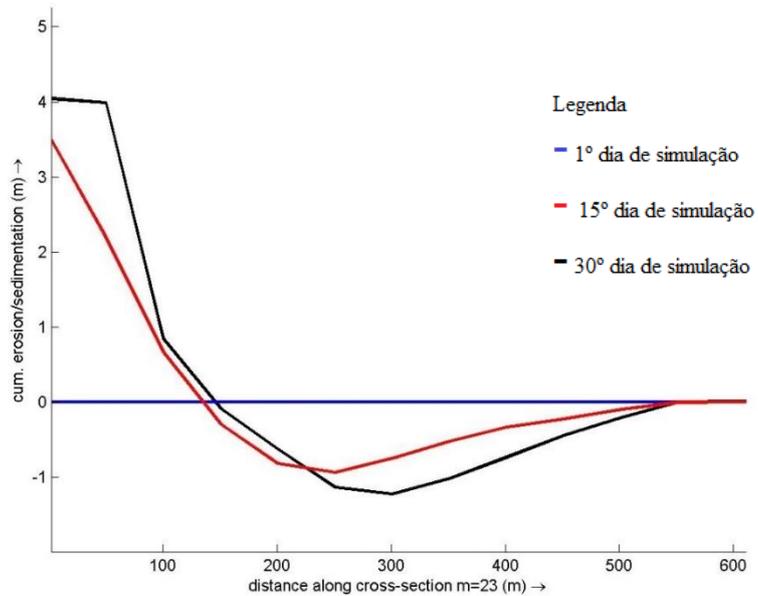
Na seção m=48 (FIGURA 9) a taxa de sedimentação costeira foi de 3 m, enquanto erodiu 1.4 m aos 300 de praia. Nessa mesma profundidade a profundidade da coluna d'água chegou a 7 m.

Figura 17. Taxas de erosão e sedimentação (em metros) na seção 8 no cenário ONDA SWELL..



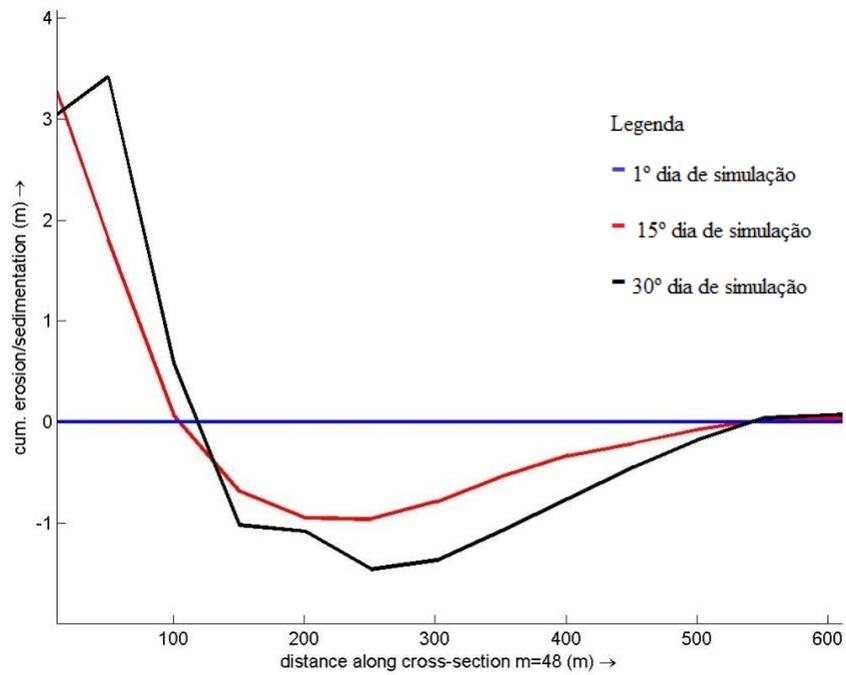
Fonte: a autora.

Figura 18. Taxas de erosão e sedimentação (em metros) na seção 23 no cenário ONDA SWELL.



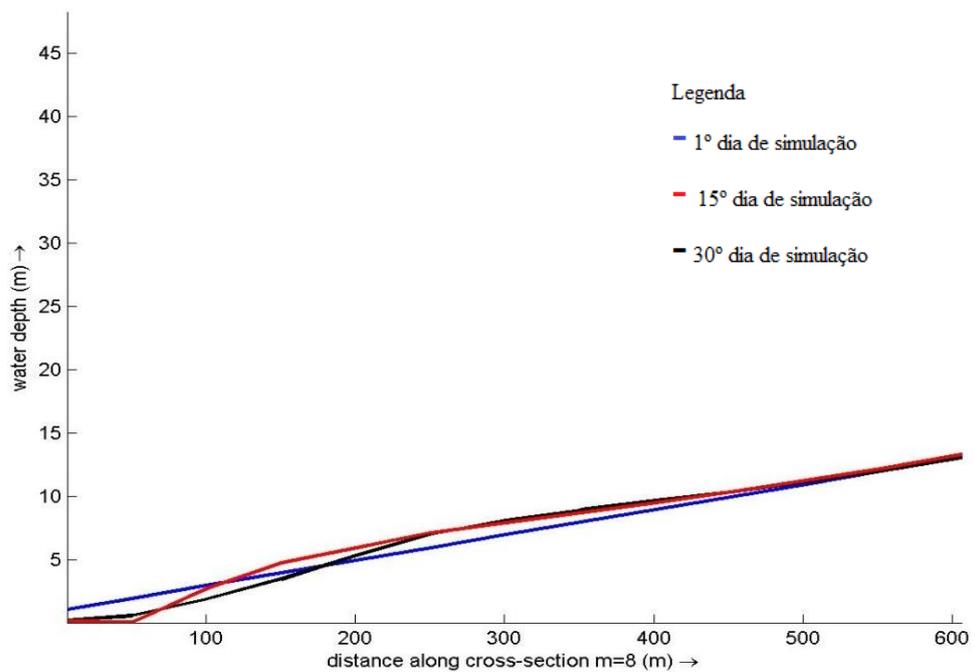
Fonte: a autora.

Figura 19. Taxas de erosão e sedimentação (em metros) na seção 48 no cenário ONDA SWELL..



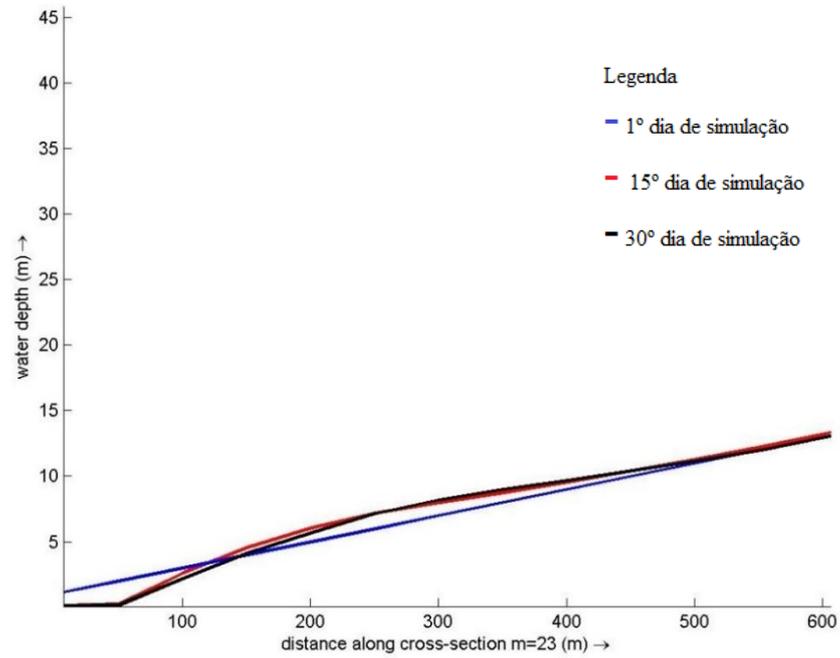
Fonte: a autora.

Figura 20. Profundidade da coluna d'água (em metros) na seção 8 no cenário ONDA SWELL.



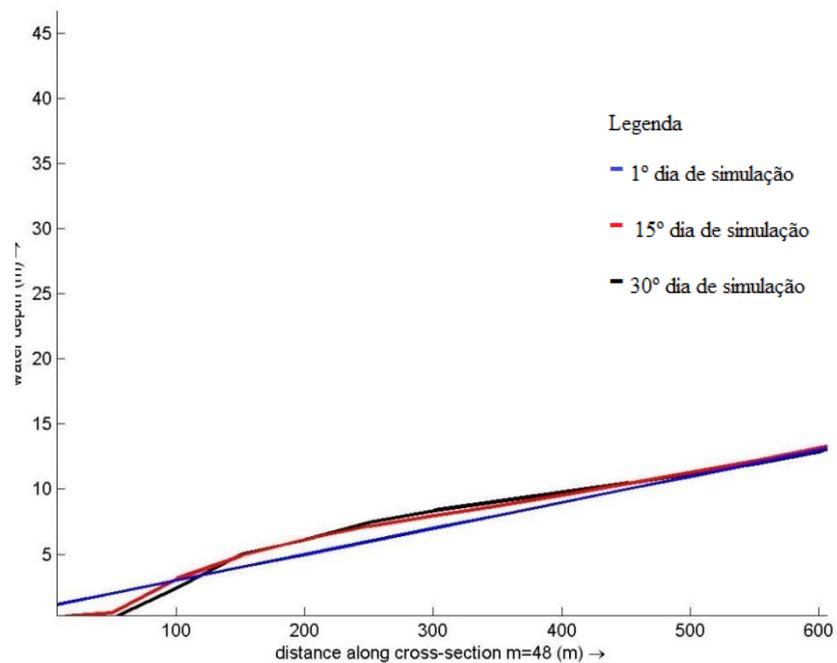
Fonte: a autora.

Figura 21. Profundidade da coluna d'água (em metros) na seção 23 no cenário ONDA SWELL



Fonte: a autora.

Figura 22. Profundidade da coluna d'água (em metros) na seção 48 no cenário ONDA SWELL.



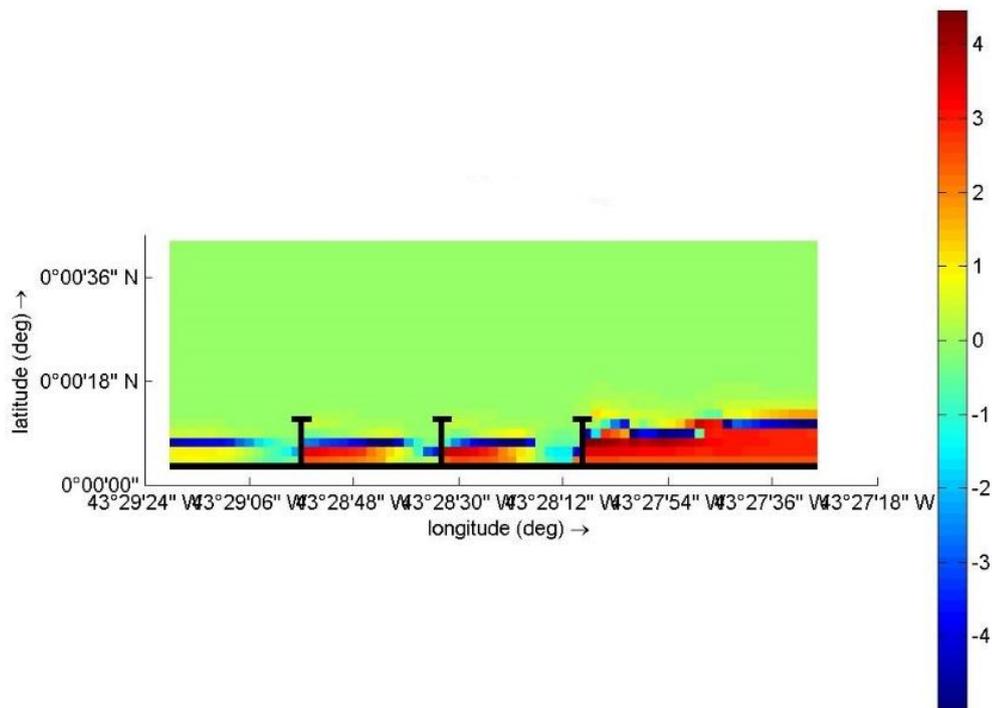
Fonte: a autora.

#### 4.5 Cenário ONDA SEA COM ESPIGÕES

A implantação de obras de engenharia costeiras como espigões é uma alternativa muito utilizada na contenção à erosão costeira. Espigões construídos cruzando a zona de surfe são eficientes estruturas que bloqueiam parte ou totalmente o transporte longitudinal de sedimentos, acumulando sedimentos na sua região à barlar e apresentando um déficit de sedimentos na porção à sotamar.

Esses fatos podem ser observados nos resultados obtidos com a simulação incluindo espigões na linha de costa, onde os valores positivos representam sedimentação e os negativos configuram as áreas com déficit de sedimentos (FIGURA 23).

Figura 23. Taxas de erosão/ sedimentação (em metros) do cenário ONDA SEA COM ESPIGÕES.



Fonte: a autora.

Analisando os gráficos produzidos na simulação, podemos relatar que o cenário sofre uma grande mudança após a inclusão dos espigões no local de estudo. Nas figuras 24 a 35 são apresentados a comparação entre o cenário antes (linha azul) e depois (linha preta) da inserção dos espigões.

Na primeira seção da grade ( $m=8$ ) (FIGURA 24) pode-se observar que a taxa de sedimentação antes dos espigões era um pouco maior nos primeiros metros de profundidade do

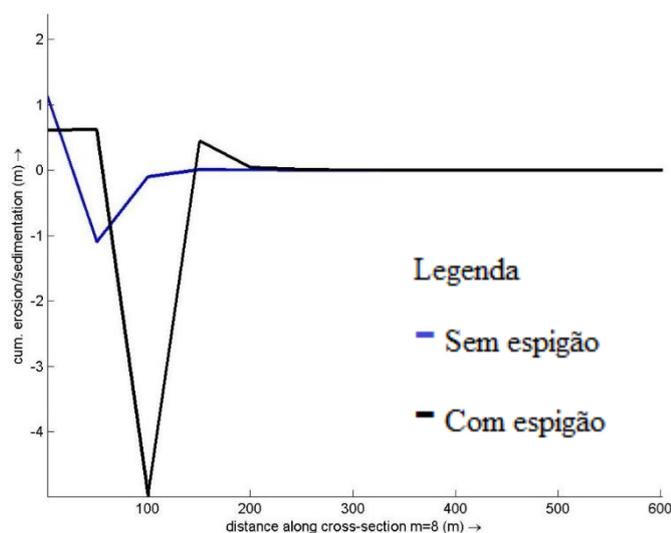
que após espigão. As taxas de erosão no cenário sem espigões apresentou máxima de 1 m nos 50 m de profundidade, enquanto no cenário com espigão essa taxa foi de 5 m nos 100 m de profundidade.

Esse quadro pode ser explicado pela falta de suprimentos de sedimentos nessa parte da praia devido a presença de dois espigões anteriores a este que contendo grande parte dos sedimentos transportados na corrente longitudinal no sentido leste-oeste.

A figura 25 apresenta a seção 23, onde mostra que a implantação dos espigões se mostrou eficiente no controle da erosão costeira, onde a sedimentação na linha de costa foi maior que o dobro das taxas de sedimentação antes dos espigões até os 50 m de profundidade. Nos 100 m de praia observamos o pico do processo erosivo com 5 m, seguido de uma leve sedimentação e depois não há mudanças no cenário.

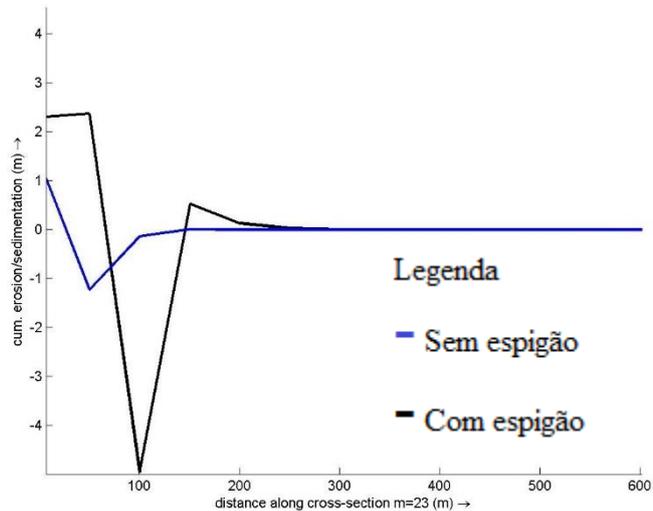
A seção ao primeiro espigão (m=48) (FIGURA 26) se mostrou satisfatória com taxas de acumulação de sedimentos chegando a 3.8 m e mantendo-se significativa até os 180 m de profundidade. A erosão foi máxima com 5 m aos 200 m de profundidade. Isso se deve ao fato de uma maior disponibilidade de sedimentos vindo com a deriva litorânea.

Figura 24. Comparação das taxas de erosão e sedimentação (em metros) na seção 8 entre o cenário ONDA SEA e ONDA SEA COM ESPIGÃO no último dia de simulação.



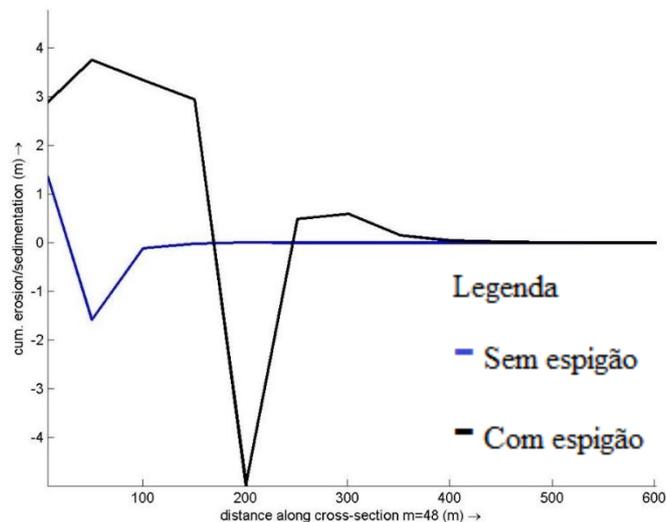
Fonte: a autora.

Figura 25. Comparação das taxas de erosão e sedimentação (em metros) na seção 23 entre o cenário ONDA SEA e ONDA SEA COM ESPIGÃO no último dia de simulação.



Fonte: a autora.

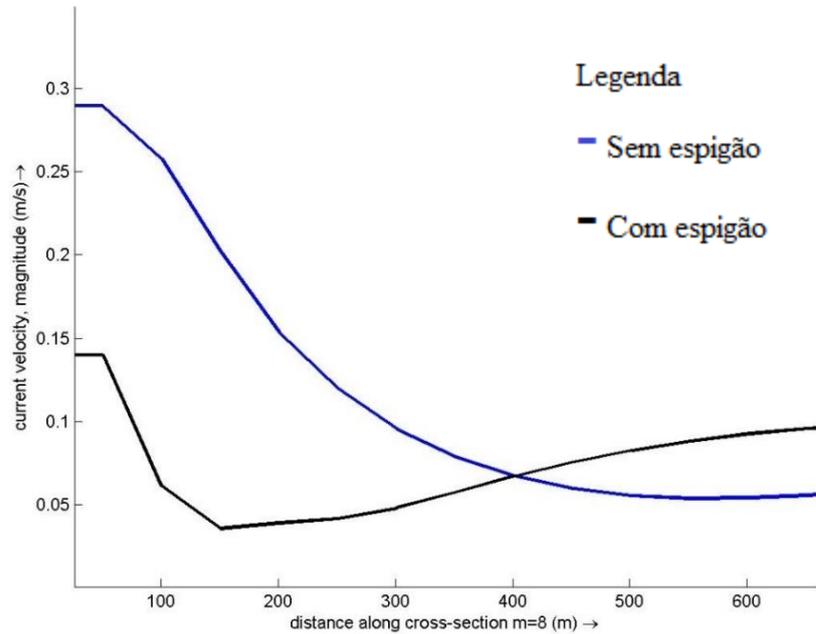
Figura 26. Comparação das taxas de erosão e sedimentação (em metros) na seção 48 entre o cenário ONDA SEA e ONDA SEA COM ESPIGÃO no último dia de simulação.



Fonte: a autora.

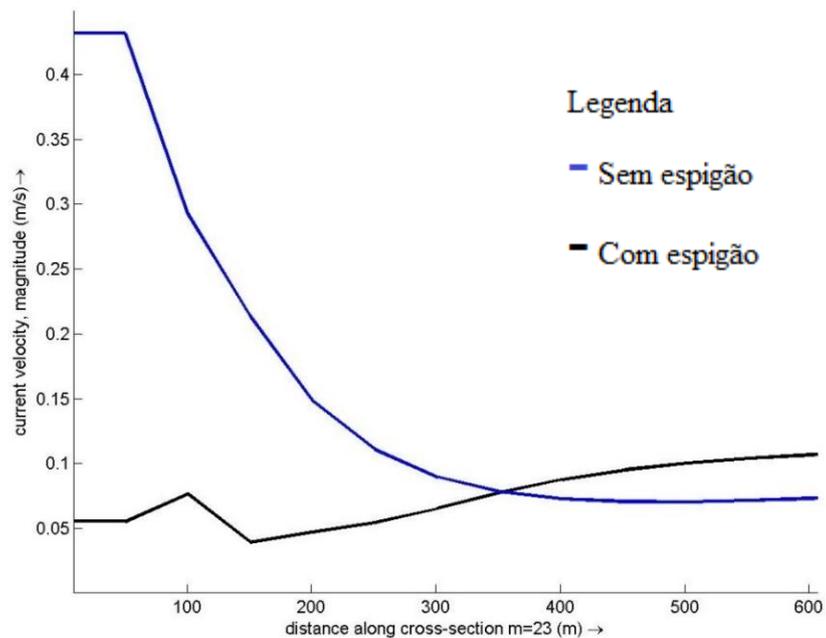
A velocidade das correntes nas três seções da grade (FIGURA 27, FIGURA 28 e FIGURA 29) mostra um padrão de diminuição na velocidade da corrente após a implantação do espigão. Isto já era esperado devido a interferência que as obras costeiras geram na circulação longitudinal das correntes atuantes na área de estudo.

Figura 27. Comparação da velocidade da corrente (em m/s) na seção 8 entre o cenário ONDA SEA e ONDA SEA COM ESPIGÃO após xx dias de simulação.



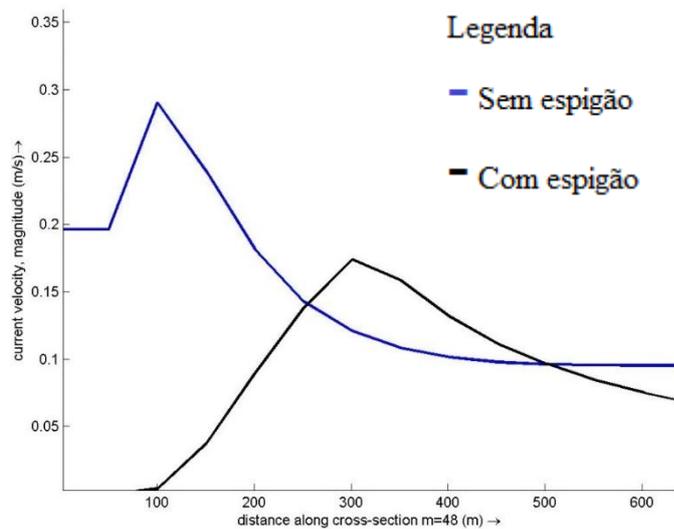
Fonte: a autora.

Figura 28. Comparação da velocidade da corrente na seção 23 (em m/s) entre o cenário ONDA SEA e ONDA SEA COM ESPIGÃO após xx dias de simulação.



Fonte: a autora.

Figura 29. Comparação da velocidade da corrente (em m/s) na seção 48 entre o cenário ONDA SEA e ONDA SEA COM ESPIGÃO após xx dias de simulação..



Fonte: a autora.

As velocidades da corrente encontradas anteriormente a implantação dos espigões estão de acordo com resultados obtidos pelos projetos EQUALANT I e GATE (METCALF; STALCUP, 1967; LEUDMANN; PEREIRA, 1976; COCHRANE, 1983), onde as velocidades da corrente presente na plataforma continental do nordeste do Brasil variaram entre 0,23 e 0,35 m/s.

Outros estudos como o de Maia (1998) e Morais (1981) concluíram através de flutuadores que as velocidades das correntes atuantes na linha de costa cearense variam entre 0,24 a 0,31 m/s.

Parente (2013) também relatou taxas de variação de velocidade anteriores as obras costeiras semelhantes as dos projetos EQUALANT I e GATE. Este ainda observou uma diminuição no campo de velocidade local próximo a linha de costa devido à interferência de obras costeiras no litoral cearense.

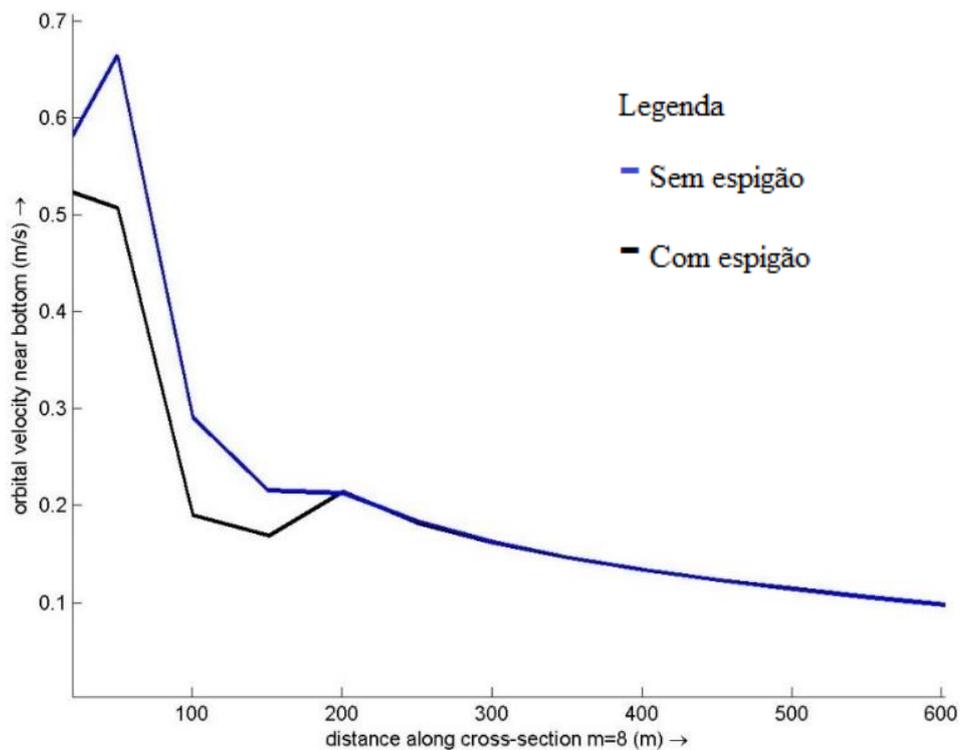
A velocidade orbital da onda é um termo utilizado para descrever um movimento cíclico realizado pelas moléculas de água abaixo das ondas que se propagam em direção a costa. As moléculas abaixo da crista da onda possuem a mesma direção da propagação da onda, enquanto as moléculas embaixo do vale entre duas ondas se propagam em direção contrária.

A velocidade orbital da água é inversamente proporcional à profundidade, onde em águas rasas o movimento aumenta, tornando-se mais elíptico que circular devido ao atrito com o fundo restringir o movimento de subida e descida.

A velocidade orbital da onda próximo ao fundo nas três seções estudadas (FIGURA 30, FIGURA 31, FIGURA 32) confirmam o que foi explicado anteriormente, onde com a presença de espigões houve um aumento de velocidade orbital.

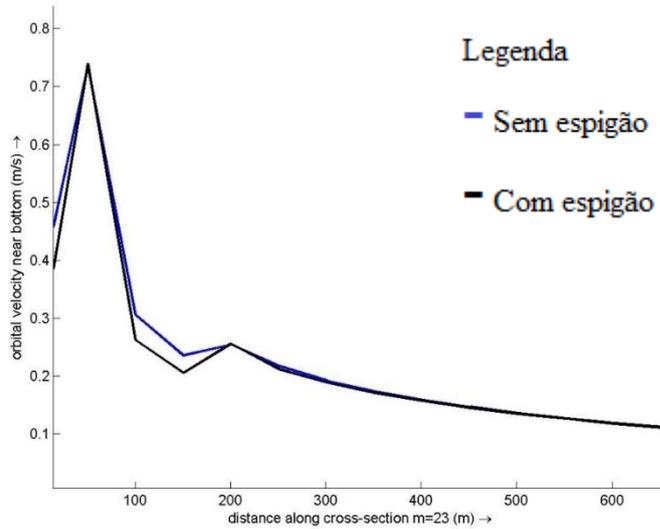
Na seção 8 (FIGURA 30) a velocidade anterior era de aproximadamente 0.4 m/s e após os espigões se tornou 0.52 m/s ao nível do mar. Na seção 23 (FIGURA 31) a velocidade orbital se mostra maior após os espigões nos 50 m de profundidade, passando de 0.45 m/s para 0,71 m/s. Na última seção  $m=48$  (FIGURA 32), a velocidade orbital no cenário após os espigões se torna maior que o dobro da velocidade orbital no cenário sem espigões logo nos 100 m de profundidade.

Figura 30. Comparação da velocidade orbital próxima ao fundo (em m/s) na seção 8 entre o cenário ONDA SEA e ONDA SEA COM ESPIGÕES.



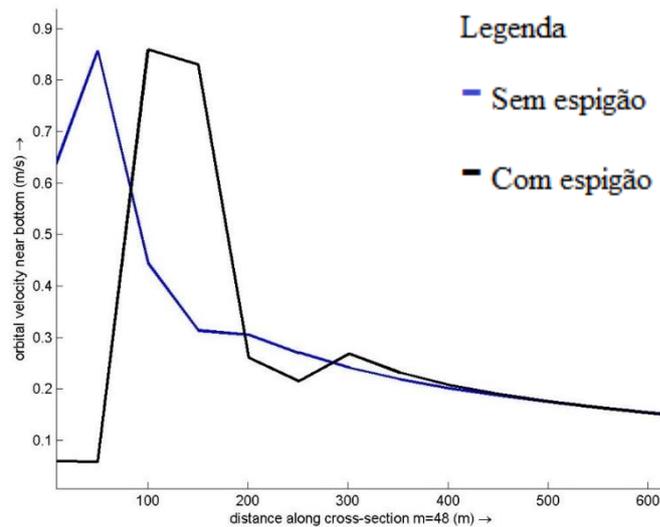
Fonte: a autora.

Figura 31. Comparação da velocidade orbital próxima ao fundo (em m/s) na seção 23 entre o cenário ONDA SEA e ONDA SEA COM ESPIGÕES (linha preta)



Fonte: a autora.

Figura 32. Comparação da velocidade orbital próxima ao fundo (em m/s) na seção 48 entre o cenário ONDA SEA e ONDA SEA COM ESPIGÕES.



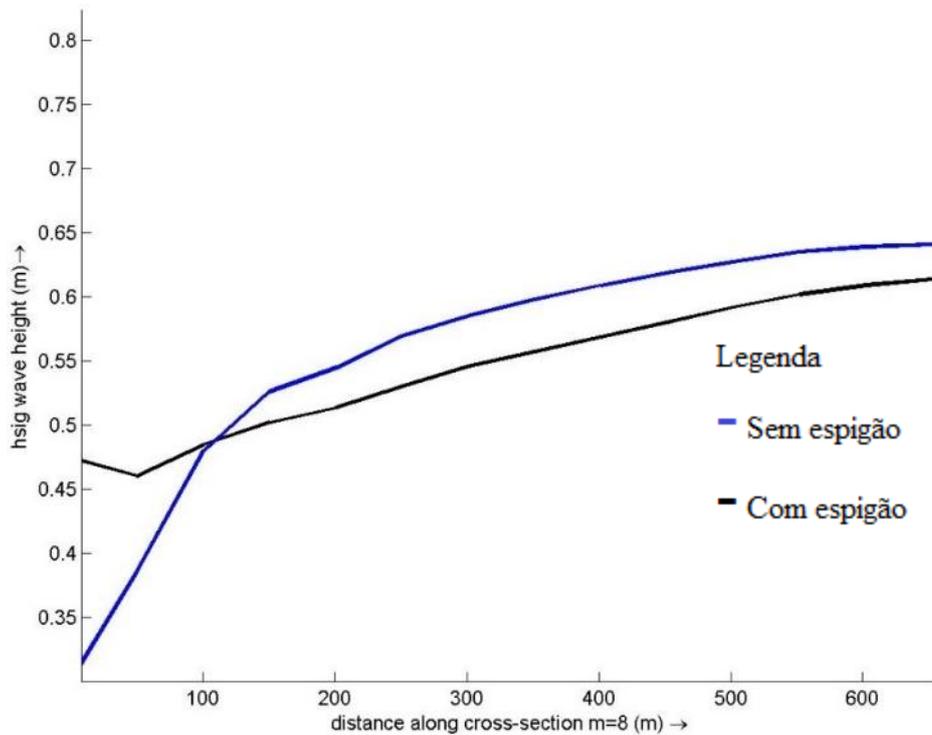
Fonte: a autora.

Em relação as mudanças ocorridas na altura significativa da onda após a inclusão dos espigões (FIGURA 33, FIGURA 34, FIGURA 35) pode-se observar que houve um

aumento na altura na seção  $m=8$ , enquanto nas outras duas seções houve uma diminuição na altura significativa da onda devido ao efeito da presença dos espigões.

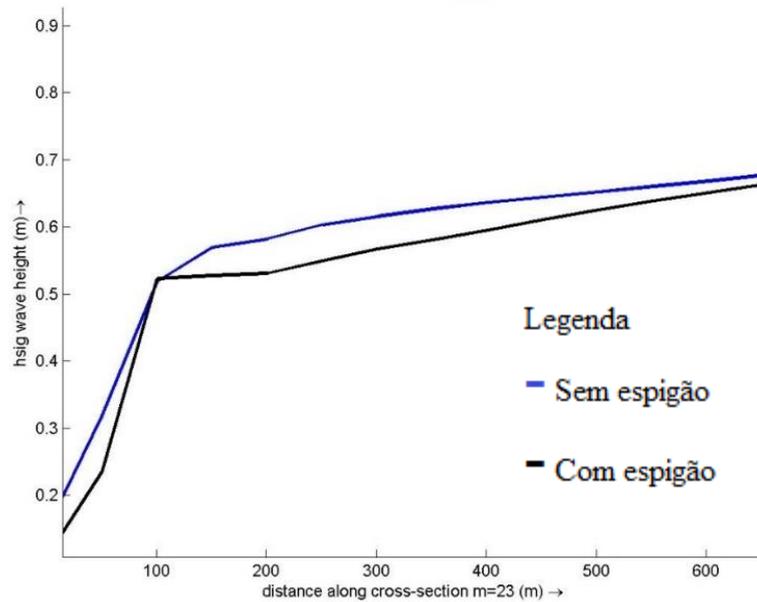
Desta forma, na figura 33 comparamos a altura da onda antes e depois da presença dos espigões, onde anteriormente essa era 0,37 m e logo após os espigões se tornou 0,47 m. A seção 23 (FIGURA 34) possui o mesmo padrão, antes com ondas com altura 0,41 m e depois com 0,51 m. Da mesma forma a seção 48 (FIGURA 35) que apresentava ondas com alturas de 0.51 m se tornaram maiores com 0.58 m aos 150 m de profundidade.

Figura 33. Comparação da altura significativa da onda (em metros) na seção 8 entre o cenário ONDA SEA e ONDA SEA COM ESPIGÕES.



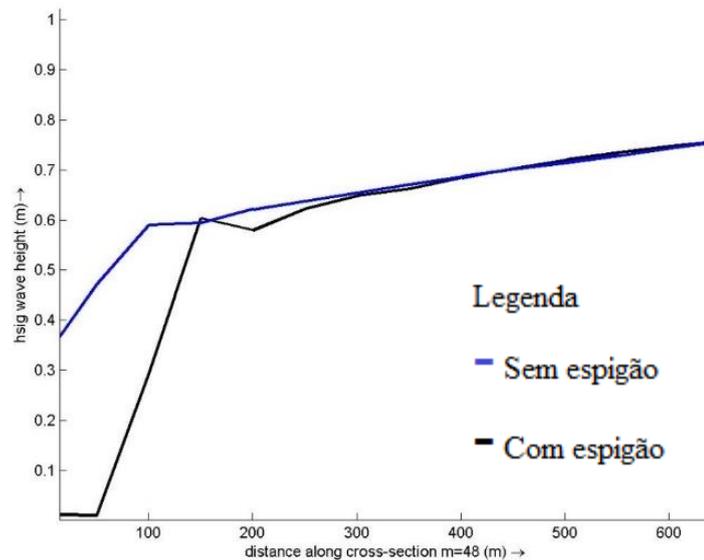
Fonte: a autora.

Figura 34. Comparação da altura significativa da onda (em metros) na seção 23 entre o cenário ONDA SEA e ONDA SEA COM ESPIGÕES.



Fonte: a autora.

Figura 35. Comparação da altura significativa da onda (em metros) na seção 48 entre o cenário ONDA SEA e ONDA SEA COM ESPIGÕES..



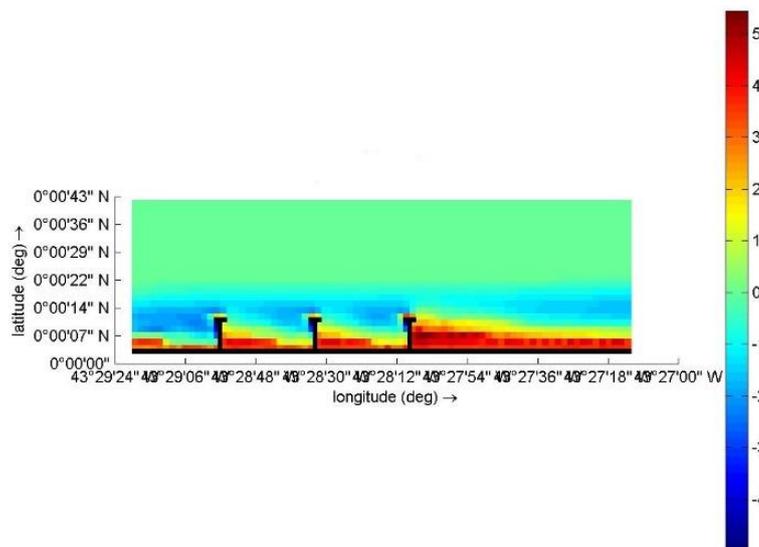
Fonte: a autora.

#### 4.6 Cenário ONDA SWELL COM ESPIGÕES

O cenário com onda swell incluindo espigões também apresentou resultados de acordo com os padrões anteriores, acumulando sedimento na região a barlar devido a deriva litorânea no sentido leste-oeste na região e apresentando uma falta de sedimentos a sotamar.

Nesse cenário as taxas de sedimentação (FIGURA 37, FIGURA 38, FIGURA 39) foram superiores e as taxas de erosão foram inferiores ao cenário com ondas do tipo sea em todas as seções, caracterizando um quadro com excelente resposta a implantação dos espigões. Nota-se também que os picos de erosão acontecem após os 200 metros de profundidade, ocorrendo acreção da praia nos primeiros metros.

Figura 36. Profundidade (em metros) do cenário ONDA SWELL COM ESPIGÕES.



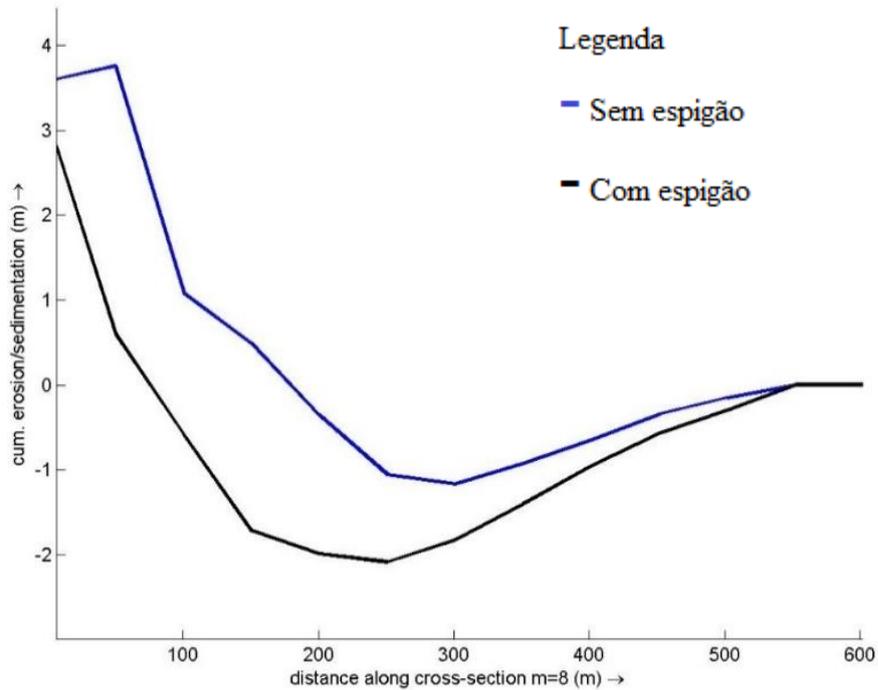
Fonte: a autora.

Na seção 8 (FIGURA 37) o cenário sem espigões o valor de sedimentação passou de 3.7 m para 3 m na faixa litorânea após os espigões. A erosão máxima era 1 m aos 300 m de profundidade, se tornando 2 m aos 250 m de profundidade.

Na seção 24 (FIGURA 38) as taxas de sedimentação anteriormente e posteriormente a construção dos espigões foram similares, 4 m e 3.8 m, respectivamente. Já as taxas de erosão após os espigões foi maior, com máxima de 1.8 m.

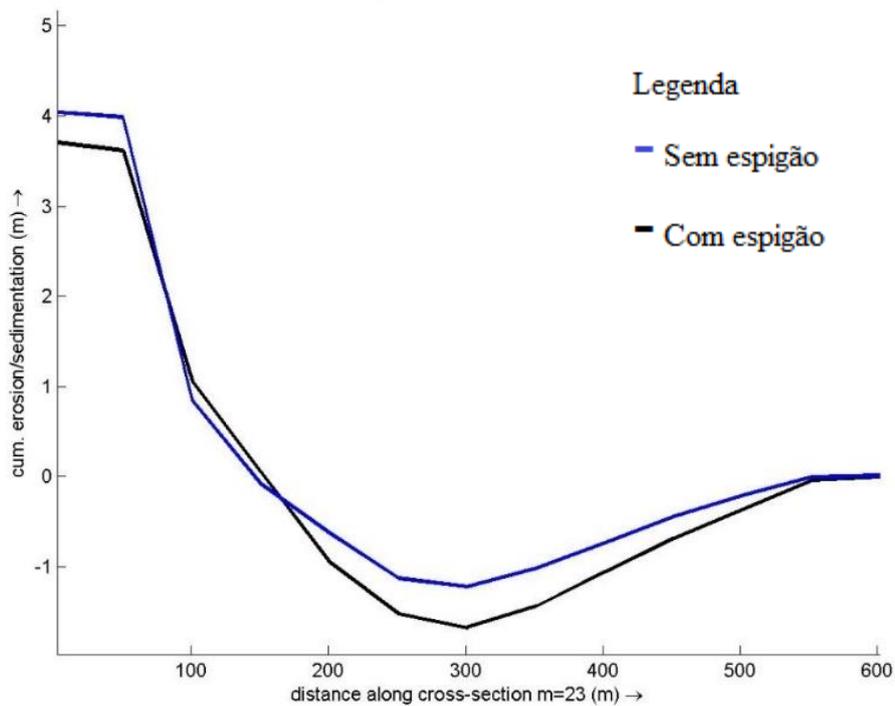
Na seção 48 (FIGURA 39) o quadro é diferente dos demais, onde a sedimentação no cenário com espigões é mais expressiva que a do cenário sem espigões, com máxima de 5.5 m. As taxas de erosão foram menores no cenário com espigões, erodindo no máximo 0.8 metros nos 400 m de profundidade.

Figura 37. Comparação das taxas de erosão e sedimentação (em metros) na seção 8 entre o cenário ONDA SWELL e ONDA SWELL COM ESPIGÃO.



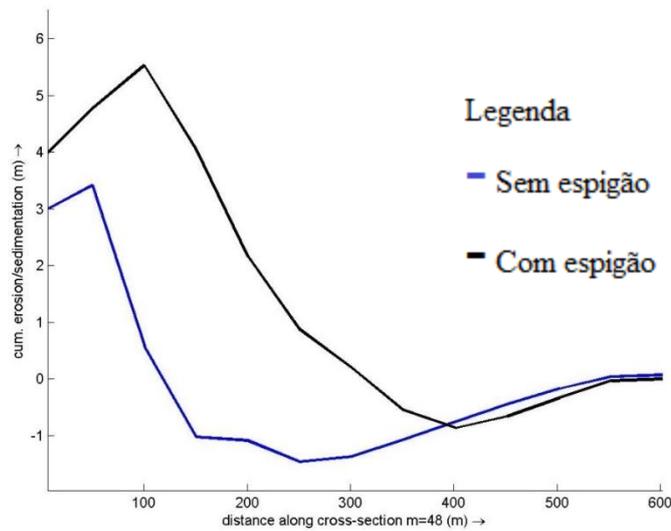
Fonte: a autora.

Figura 38. Comparação das taxas de erosão e sedimentação (em metros) na seção 23 entre o cenário ONDA SWELL e ONDA SWELL COM ESPIGÃO.



Fonte: a autora.

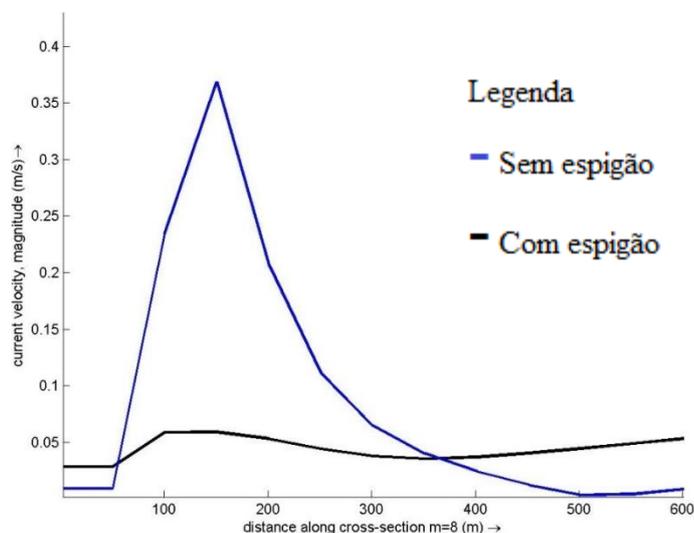
Figura 39. Comparação das taxas de erosão e sedimentação (em metros) na seção 48 entre o cenário ONDA SWELL e ONDA SWELL COM ESPIGÃO.



Fonte: a autora.

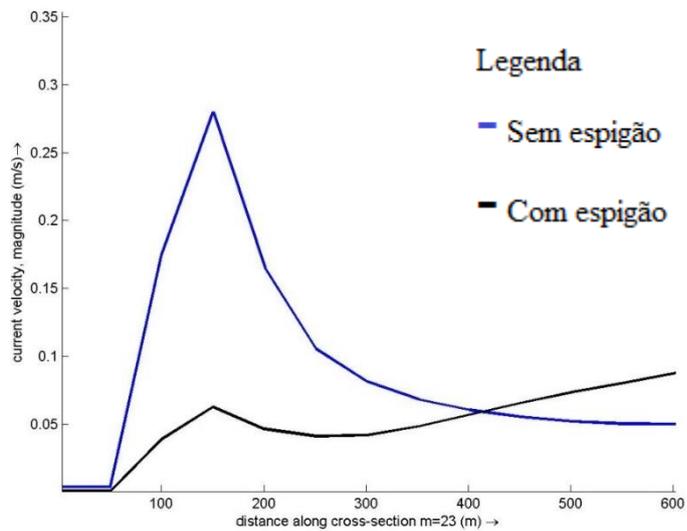
Os resultados a seguir mostram o que já era esperado, a diminuição da velocidade da corrente ao longo do campo de espigões implantados. As velocidades da corrente longitudinal tem o mesmo padrão do cenário onda sea com espigões, onde esta tem sua magnitude diminuída bruscamente, variando entre 0.27 a 0.37 m/s nos cenários sem espigões e variando entre 0 e 0.15 m/s nos cenários com espigões nas três seções da grade.

Figura 40. Comparação da velocidade da corrente (em m/s) na seção 8 entre o cenário ONDA SWELL e ONDA SWELL COM ESPIGÃO.



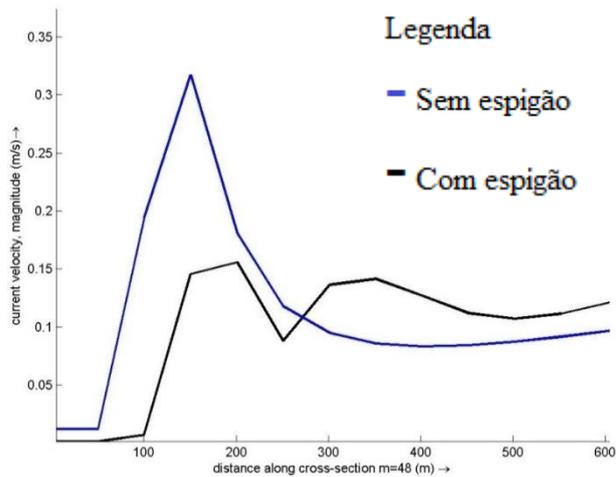
Fonte: a autora.

Figura 41. Comparação da velocidade da corrente (em m/s) na seção 23 entre o cenário ONDA SWELL e ONDA SWELL COM ESPIGÃO.



Fonte: a autora.

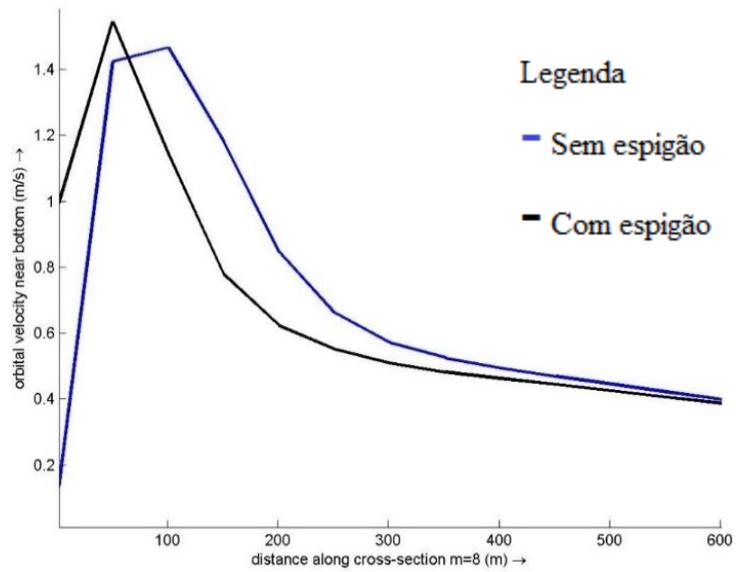
Figura 42. Comparação da velocidade da corrente (em m/s) na seção 48 entre o cenário ONDA SWELL e ONDA SWELL COM ESPIGÃO.



Fonte: a autora.

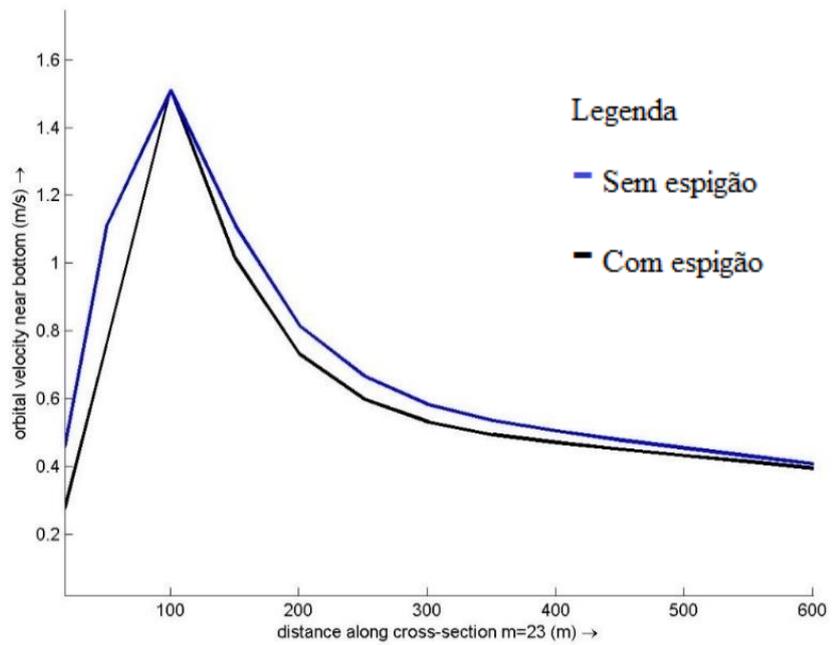
A velocidade orbital próxima ao fundo apresenta um padrão muito semelhante entre os cenários com e sem espigões. Apenas na seção 48 (FIGURA 45) podemos observar uma variação mais expressiva, onde antes a máxima era de 1.5 m/s nos 100 metros de profundidade e no cenário com espigões esta máxima está presente nos 150 metros de profundidade.

Figura 43. Comparação da velocidade orbital próxima ao fundo (em m/s) na seção 8 entre o cenário ONDA SWELL e ONDA SWELL COM ESPIGÕES.



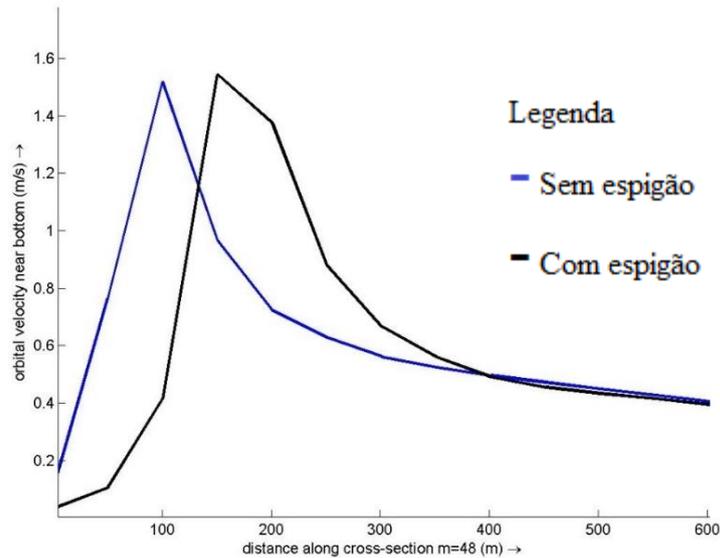
Fonte: a autora.

Figura 44. Comparação da velocidade orbital próxima ao fundo (em m/s) na seção 23 entre o cenário ONDA SWELL e ONDA SWELL COM ESPIGÕES.



Fonte: a autora.

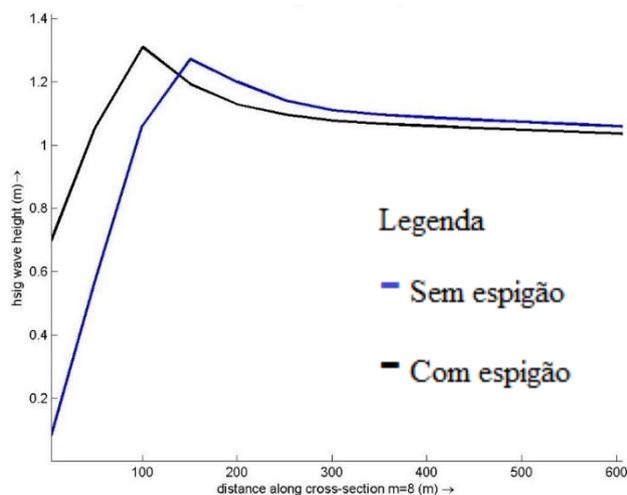
Figura 45. Comparação da velocidade orbital próxima ao fundo (em m/s) na seção 48 entre o cenário ONDA SWELL e ONDA SWELL COM ESPIGÕES..



Fonte: a autora.

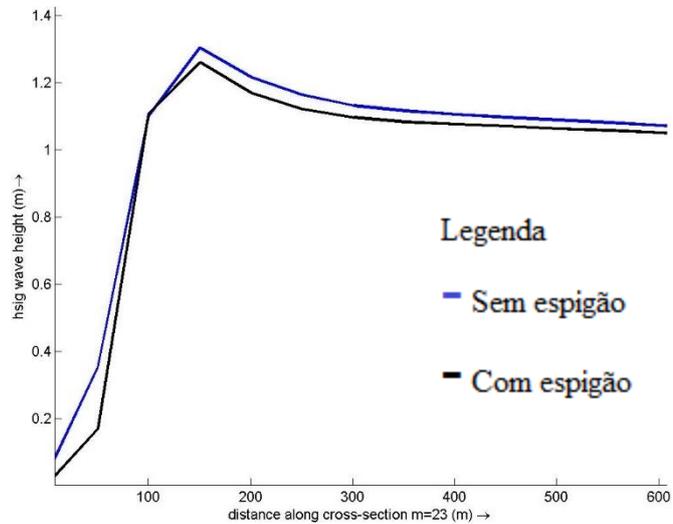
Nos cenários modelados com a presença dos espigões na linha de costa, os resultados de distribuição dos campos de altura significativa de onda ( $H_s$ ) são semelhantes em todas as seções da grade. As alturas significativas máximas ficam em torno de 1.3 metros, permanecendo quase iguais antes e depois da implantação dos espigões, onde a diferença é apenas a profundidade aonde a máxima está presente, se diferenciando em aproximadamente 50 m de profundidade.

Figura 46. Comparação da altura significativa da onda (em m) na seção 8 entre o cenário ONDA SWELL e ONDA SWELL COM ESPIGÕES..



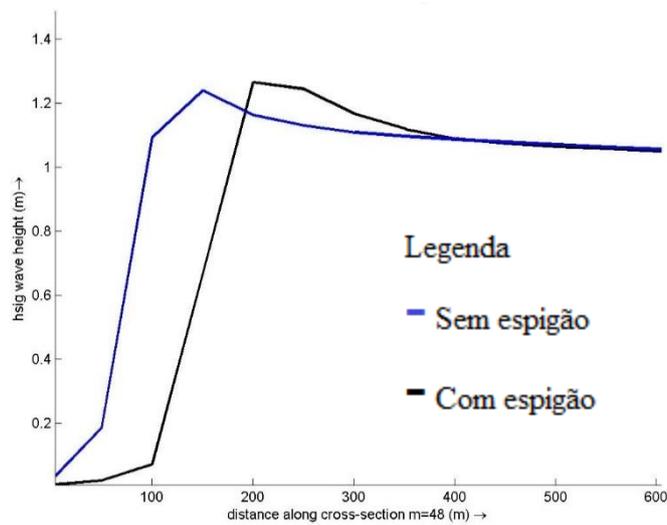
Fonte: a autora.

Figura 47. Comparação da altura significativa da onda (em m) na seção 23 entre o cenário ONDA SWELL e ONDA SWELL COM ESPIGÕES.



Fonte: a autora.

Figura 48. Comparação da altura significativa da onda (em m) na seção 48 entre o cenário ONDA SWELL e ONDA SWELL COM ESPIGÕES..



Fonte: a autora.

As alturas significativas das ondas no cenário com onda swell com espigões são maiores que o dobro das alturas significativas das ondas no cenário com onda sea com espigões. As taxas de sedimentação ao redor das obras de engenharia costeira também são maiores nos cenários simulados com ondas do tipo swell.

Hanson e Kraus (1990) afirmam que a modelação da linha de costa em resposta a implantação de obras costeiras está intimamente relacionada a altura, período e direção da onda

incidente. De acordo com estes, quanto maior a altura da onda, maior será a quantidade de areia transportada para área atrás dos espigões, concordando com os resultados obtidos neste cenário.

## 5 CONCLUSÃO

O uso do modelo numérico Delft3D na análise das características hidrodinâmicas de um cenário idealizado da Praia do Icaraí se mostrou satisfatório, tendo valores de elevação e intensidade de correntes próximos aos encontrados na região.

Os cenários MARÉ e VENTO mostraram que os agentes maré e vento isolados ou em conjunto não são suficientes para gerar um processo erosivo ou de sedimentação relevante em um local composto pela presença de sedimentos de areia média utilizando o regime de ventos e maré característico da Praia do Icaraí. Desta forma, é possível concluir que o fator predominante na erosão local e assim na configuração da morfologia praial é a variável onda. É importante notar que o vento e marés são importantes no transporte de sedimentos mobilizados.

Apesar de mostrar que os espigões protegem a linha de costa sobre a sua influência, o estudo indicou um acúmulo de sedimentos a barlar das obras e uma área de déficit de sedimentos a sotamar, caracterizando um processo erosivo a jusante dos espigões que, ao longo do tempo, será transferido para regiões adjacentes.

Este trabalho é um esforço inicial e simplificado da modelagem morfodinâmica e de transporte de sedimentos da área de costeira do estado do Ceará. Em estudos futuros é essencial usar uma morfologia real da região modelada e diferentes granulometrias de sedimento. Os resultados também devem ser validados com dados hidrodinâmicos locais.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, R. S.; **Morfologia do Perfil, Sedimentologia e Evolução Histórica da Linha de Costa das Praias da Enseada do Itapocorói – Santa Catarina**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2008.

COCHRANE, J. Equatorial undercurrent and related currents off Brazil in March and April 1963. **Science**, v. 142, p. 669–671, 1983.

DELFT3D. **Manual do usuário**, v. 3.15.14499, The Netherlands, 2011.

DELFT3D. **Manual do usuário**, v. 3.05.34160, The Netherlands, 2014.

FARIAS, E. G. G.; **Aplicação de técnicas de geoprocessamento para a análise da evolução da linha de costa em ambientes litorâneos do estado do Ceará**. 2008. Dissertação (Pós-graduação em Ciências Marinhas Tropicais) – Instituto de Ciências do Mar - LABOMAR - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

HANSON, H.; KRAUS, N.C.; Shoreline response to a single transmissive detached breakwater. **Coastal engineering**, p. 2034- 2046, 1990.

HARARI, J. **Apostila da disciplina Modelos Numéricos Aplicados a Processos Costeiros e Estuarinos**. Pós-graduação em Oceanografia Física do Instituto Oceanográfico da USP. São Paulo, p. 217, 2008.

JORGENSEN, S. E. **Fundamentals of Ecological Modelling**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 1994.

LEUDMANN, E. F.; PEREIRA, S. G. *Some results of the drift-bottle releases in the western equatorial waters during gale, 1974*. **Boletim do Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo**, v. 4, p. 22, 1976.

LIMA, S. F.; **Modelagem numérica da evolução da linha de costa das praias localizadas a oeste da cidade de Fortaleza, Ceará**. 2002. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de

Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2002.

MAIA, L. P.; **Procesos costeros y balance sedimentário a lo largo de Fortaleza (NE-BRASIL): Implicaciones para uma gestão adecuada de la zona litoral.** 1998. Tese de doutorado, Universidade de Barcelona, Barcelona, 1998.

MAIA, G. G. O.; **Vulnerabilidade e riscos naturais a eventos de alta energia nas praias semi-urbanas e naturais do litoral de Aquiraz, Ceará.** 2014. Dissertação (Pós-graduação em Ciências Marinhas Tropicais) – Instituto de Ciências do Mar - LABOMAR - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

METCALF, W. G.; STALCUP, M. C. Origin of the atlantic undercurrent. **Journal of Geophysics Research.** v. 72, p. 4959–4975, 1967.

MEDEIROS, E. C. S.; **A capacidade de carga e percepção ambiental da Praia do Icaraí.** 2012. Dissertação (Pós-graduação em Ciências Marinhas Tropicais) – Instituto de Ciências do Mar - LABOMAR - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

MEDEIROS, C. N.; **Vulnerabilidade socioambiental do Município de Caucaia (CE): SUBSÍDIOS AO ORDENAMENTO TERRITORIAL.** 2014. Dissertação (Pós-graduação em Geografia) - Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2014.

MORAIS, J. O. **Evolução Sedimentar da Enseada do Mucuripe.** Arq. Ciências do Mar. Fortaleza, CE, 21 (1/2): p. 20-32, 1981.

MOURA, M. R.; **Dinâmica costeira e vulnerabilidade à erosão do litoral dos municípios de Caucaia e Aquiraz.** 2012. Tese (Doutorado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

NUBER, E.; **Evolução morfológica e sedimentológica do arco praiial de Massaguaçu, litoral norte de São Paulo.** 2008. 143 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

OLPE, C. A.; **Avaliação de dois tipos de obras de engenharia costeira como alternativas de contenção/mitigação do processo erosivo na Enseada do Itapocorói – SC, utilizando modelagem numérica.** 2012. Monografia (Graduação em Oceanografia) - Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar – CTTMar – Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2012.

OLIVEIRA, H. A.; **Aplicação do modelo numérico hidrodinâmico Delft3D na Baía de Guanabara**. 2009. Monografia (Graduação em Oceanografia) - Centro Universitário Monte Serrat, Unimonte, Santos, 2009.

PARENTE, F. T. F.; **Dispersão de materiais na região costeira de Fortaleza, CE - Brasil**. 2013. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Instituto de Ciências do Mar - LABOMAR - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

PEREIRA, R. S.; **Processos que regem a qualidade de água da Lagoa dos Patos, segundo o modelo Delft3D**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2003.

SEMACE. **Plano de manejo da área de proteção ambiental (APA) do Rio Pacoti**. 2005. Instituto de Estudo Pesquisa e Projeto da Uece – IEPRO. Fortaleza, Ceará, 2005.

SILVA, A. C. 1984. Estabilidade e morfologia dos contornos litorâneos a partir de levantamento sedimentológico na região de Fortaleza - CE. Afro-ameirca gloss news, São Paulo, Edicao 3(2), 1999. Disponível em : <http://www.mares.io.usp.br/aagn/41o5.html>. Acesso em 03 de Abril de 2015.

SILVA, C. P.; **Potencialidades dos estudos de Percepção para o Planejamento**. Departamento de Geografia e Planejamento Regional. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 1993.

SHORT, A.D. **Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics**. London: Jhon Wiley & Sons, 1999. 379 p.

VALENTINI, E.; ROSMAN, P. C. C.; Erosão costeira em Fortaleza. **Revista Brasileira de Engenharia – Cadernos de Recursos Hídricos**, v. 10, n.1, p. 373 - 381, 1993.

VIZON, S.B *et al.* Mud deposit formation on the open coast of the larger Patos Lagoon – Cassino Beach system. **Continental Shelf Research**. [S.l.], v. 29, pp572-588, 2009.

WIEGERT, R.G.; Simulation models of ecosystems. **Annual Review of Ecology and Systematics**. p. 311 – 338, 1975.