

4.1.12 Oceanografia e Hidrodinâmica Costeira

4.1.12.1 Descrição dos Fatores Meteorológicos Marinhos

Entre os fatores que influenciam a evolução dos litorais, os fatores meteorológicos certamente têm o maior peso, regulando a capacidade erosiva do mar e o relativo transporte de sedimentos. Os principais fatores são:

- Ventos;
- Movimento das ondas;
- Correntes litorâneas;
- Marés e variações do nível do mar.

Vento

Os ventos influenciam a evolução do litoral direta e indiretamente. Eles têm, de fato, ação direta, erodindo as partes emergidas, levantando, transportando e acumulando seletivamente sedimentos leves para formar dunas costeiras, e ação indireta sobre a água do mar, atuando essencialmente como "motor" das ondas e de alguns tipos de correntes marítimas.

O vento mais comum em uma dada localidade é definido como o vento "reinante", enquanto o termo "dominante" refere-se ao vento que atinge mais fortemente a costa.

Movimento de Onda

Defini-se movimento de onda o conjunto de ondulações originadas pelo vento, que se propagam na superfície do mar. Os principais parâmetros utilizados para a caracterização de cada uma das ondas são:

- ponto mais alto do perfil da onda,
- ponto mais baixo do perfil da onda,
- altura distância vertical do cabo à crista,
- amplitude metade da altura da onda,
- comprimento de onda - distância horizontal entre duas cristas ou dois cabos consecutivos,
- relação de inclinação entre altura e comprimento de onda,
- período de tempo entre a passagem de duas cristas sucessivas para um ponto fixo,
- taxa de velocidade da fase entre comprimento e período de onda.

A figura 4.1.12.1.1, demonstra que o movimento das ondas, naturalmente, é apresentado como uma sucessão de ondas cujas características podem ser representadas através de grandezas paramétricas, como:

- H Altura significativa da onda (média de 1/3 das ondas mais altas), s
- H Altura da onda espectral significativa, mo
- T Período significativo (média do período de 1/3 das ondas mais altas), s
- T Período de pico, p
- T Período médio, m
- D Direção média de origem. m

As dimensões das ondas geradas pelo vento dependem principalmente dos seguintes fatores: velocidade do vento; duração do vento e comprimento do fetch.

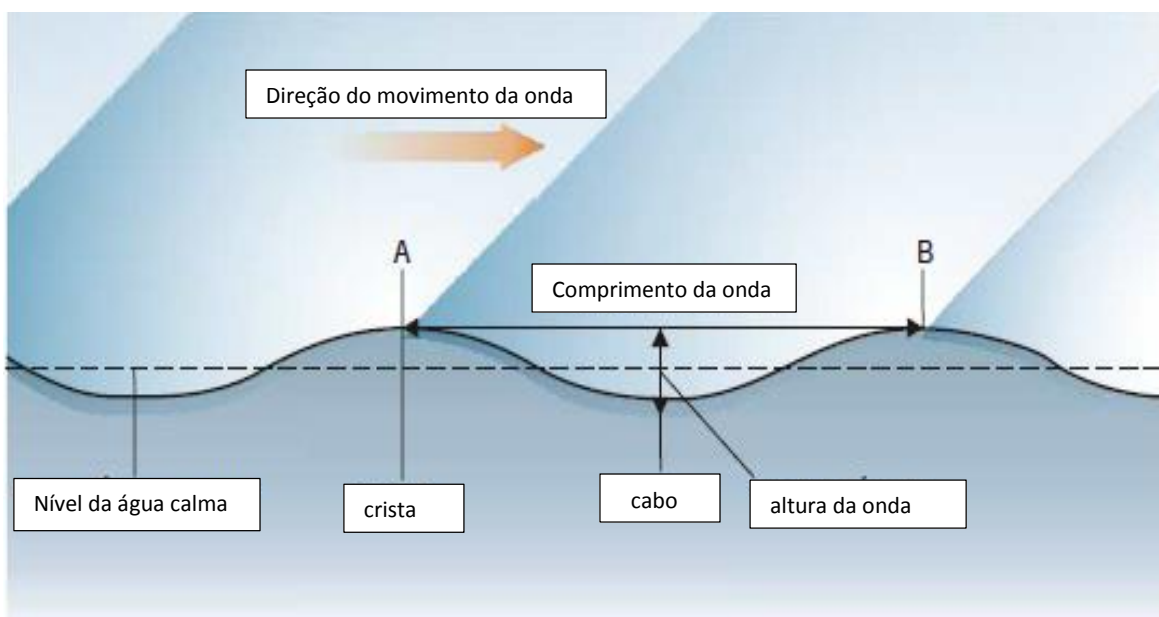


O nome fetch é dado à extensão longitudinal do trecho do mar em que o vento, expirando por um certo período em uma direção constante, gera o movimento das ondas.

Quando não sofrem mais a ação dos ventos que os geraram, as ondas se propagam em direção à costa na forma de trens de ondas longas (ondas do mar "mortas").

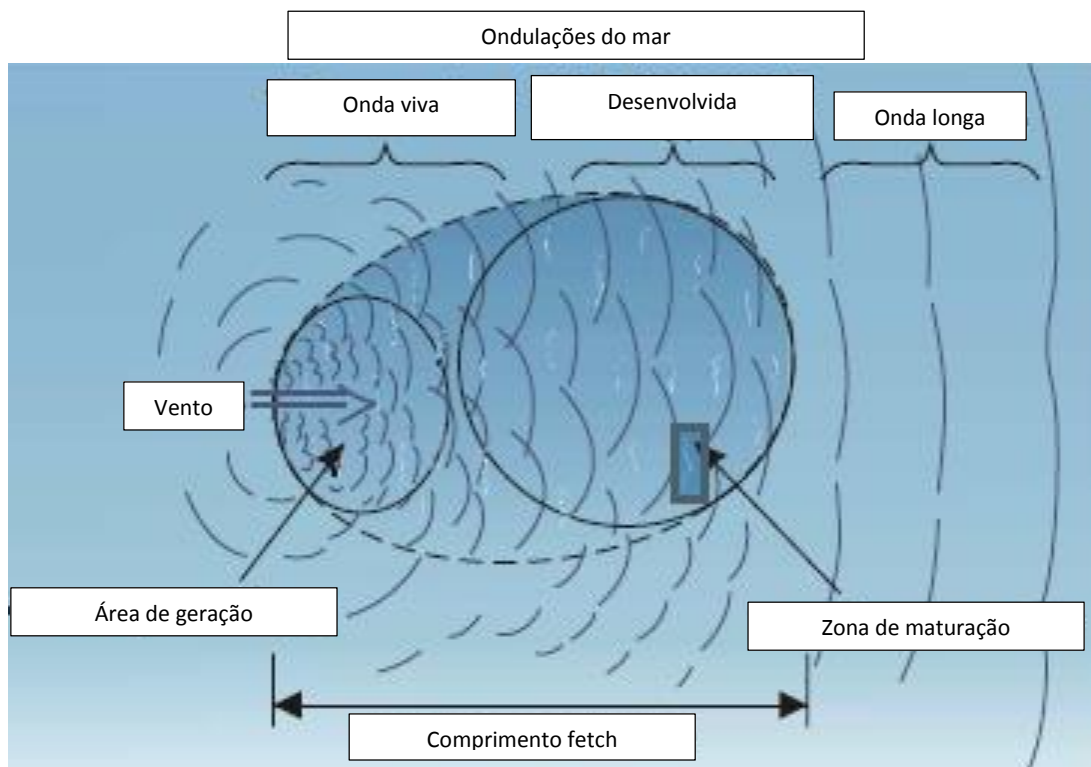
Na área de geração, as ondas permanecem com dimensões modestas, enquanto que na zona de maturação, as ondas são completamente desenvolvidas e podem atingir as dimensões máximas compatíveis com o vento que as elevou em termos de velocidade e duração (Figura 4.1.12.1.2).

Figura 4.1.12.1.1 - Representação gráfica dos principais parâmetros do movimento das ondas.



Fonte : Adaptado de APAT, 2007.

Figura 4.1.12.1.2 – Dimensões das ondas.



Fonte : Adaptado de APAT, 2007.

O comportamento da onda depende da relação entre as dimensões lineares da onda e a profundidade da água na qual ela se move.

Falamos de "ondas de água alta " quando a razão entre a profundidade e o comprimento de onda é maior que $1/2$, de "ondas de profundidade intermediárias" quando essa proporção está entre $1/2$ e $1/20$ e, finalmente, de "ondas de água baixa" quando é inferior a $1/20$.

Quando uma onda se propaga do oceano para a costa em fundos íngremes, suas características mudam devido ao fenômeno de refração.

A refração deve-se ao fato de a velocidade de propagação diminuir à medida que a profundidade diminui. Portanto, uma frente de onda pode ter, ao mesmo tempo, seções que prosseguem em velocidades diferentes; a parte localizada em águas rasas fica mais lenta, enquanto a parte em águas mais profundas mantém sua velocidade original. Por esse motivo, a frente da onda tende a girar e a se posicionar

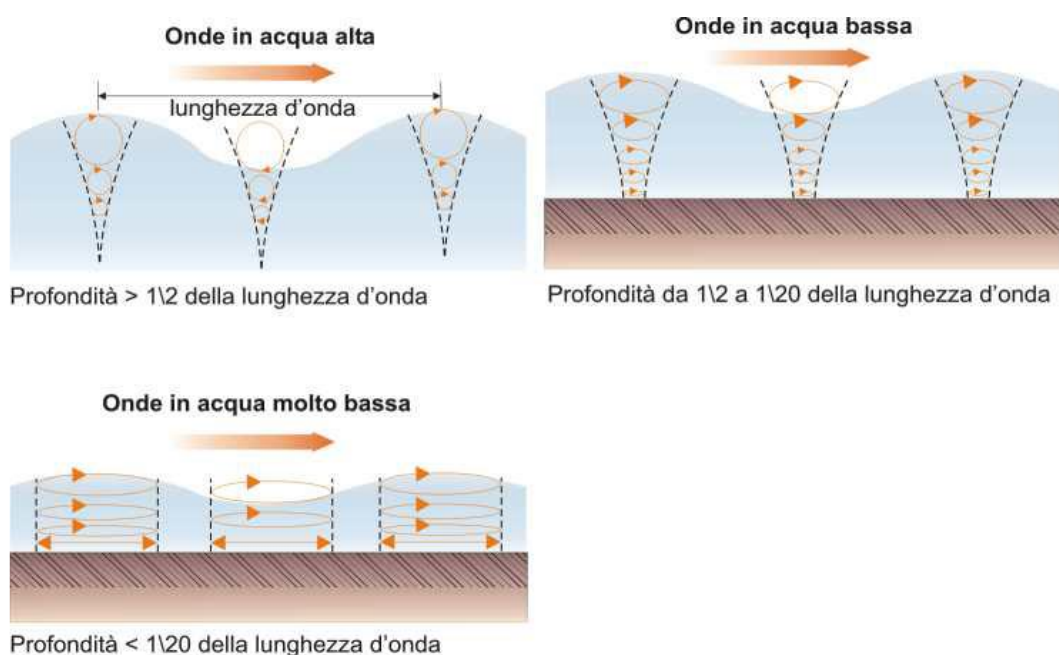
paralela às isobatas. Este fenômeno é acompanhado por mudanças na altura das ondas devido ao princípio de conservação do fluxo de energia.

Em águas profundas, as partículas de fluido se movem com órbitas aproximadamente circulares, de dimensões decrescentes com profundidade. Aproximando-se da costa, as órbitas descritas pelas partículas de água assumem uma forma elíptica. Em águas rasas, as elipses tendem a esmagar cada vez mais e o movimento das partículas de água torna-se translacional (Figura 4.1.12.1.3).

O espaçamento das ondas ortogonais (normais às linhas de crista) é indicativo da distribuição da energia das ondas perto da costa. As ondas ortogonais em direção a um promontório se aproximam, indicando uma concentração de energia na costa. Em direção à baía eles se afastam e o impacto das ondas é atenuado. O resultado dessa distribuição de energia é a tendência do movimento das ondas para regularizar as costas, desmontando os promontórios e enchendo as entradas (Figura 4.1.12.1.4).

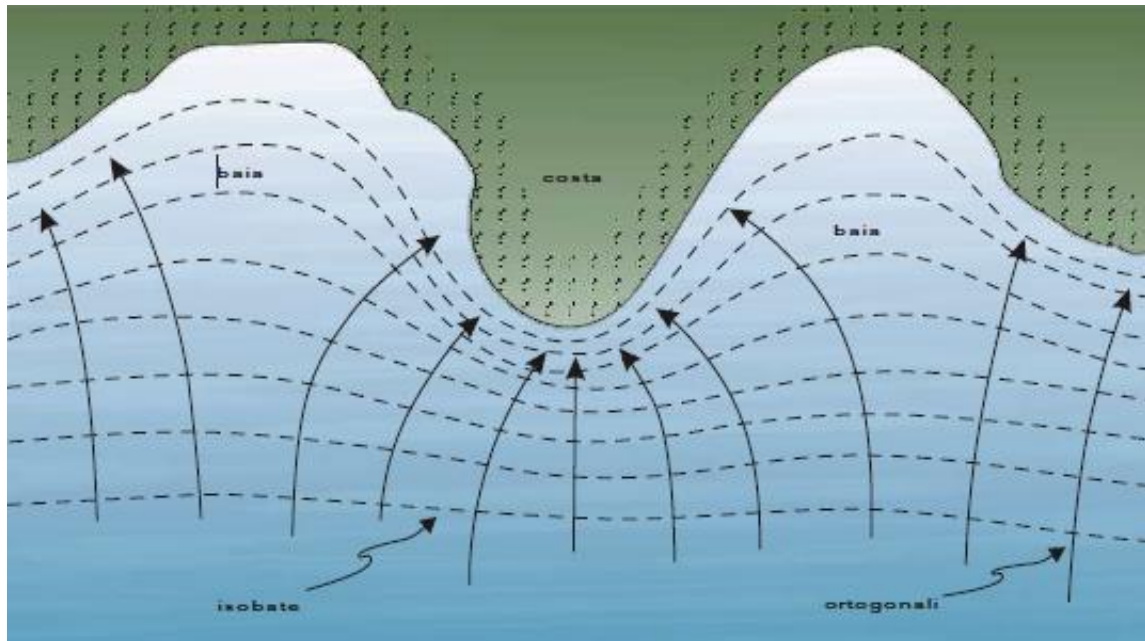
O movimento das ondas, propagando-se em profundidades decrescentes, passa por uma transformação substancial. Quando a inclinação da onda (relação entre altura e comprimento) atinge um valor crítico, a onda se torna instável e a quebra ocorre.

Figura 4.1.12.1.3 – Movimento em diferentes profundidades.



Fonte : Adaptado de APAT, 2007.

Figura 4.1.12.1.4 – Espaçamento das ondas.



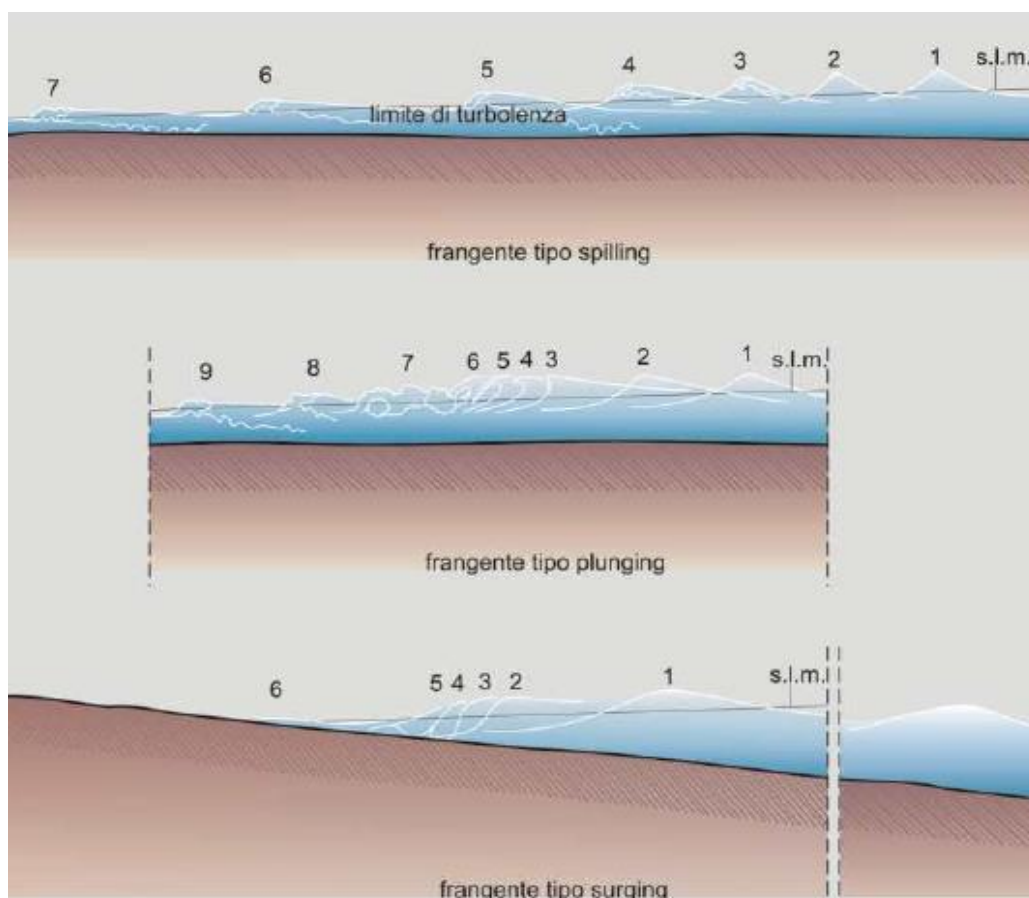
Fonte : Adaptado de APAT, 2007.

As três formas básicas que as ondas se quebrando podem assumir são:

- o tipo deslizante (spilling);
- o tipo mergulhante (plunging);
- o tipo frontal (surging).

No tipo spilling, a quebra da onda ocorre gradualmente: a crista vira para frente, formando uma massa de água branca e borbulhante. Manifesta-se em correspondência com inclinações fracas do fundo, com uma área de franja estendida em diferentes comprimentos de onda. No tipo plunging, a ruptura é abrupta e ocorre com descolamento da crista; a liberação da energia das ondas é violenta. Isso ocorre devido à maior inclinação do fundo. A área de quebra é reduzida. Nas praias com uma inclinação muito alta, o tipo predominante é o surging, com uma área de quebra estreita ou quase inexistente (Figura 4.1.12.1.5).

Figura 4.1.12.1.5 - Três tipos de quebra.



Fonte : Adaptado de APAT, 2007.

Correntes Marinhas

As correntes marítimas são fluxos de água, impulsionados por movimentos quase contínuos na direção predominante. Eles podem ser divididos esquematicamente nos seguintes tipos:

- Correntes induzidas pelo movimento das ondas: afetando tanto a área de quebra quanto a faixa externa, representando uma grande importância para a dinâmica da praia e o transporte de sedimentos;
- Correntes de maré: são importantes nas áreas afetadas por fortes excursões de maré, principalmente quando o efeito da oscilação a longo prazo é acentuado por condições geométricas particulares do fundo do mar e da costa;

- Correntes geradas pelo vento: são o efeito das tensões tangenciais exercidas pelo vento nas camadas superficiais do mar;
- Correntes de densidade: são geradas pela diferença de temperatura e salinidade das massas de água.

Maré

A maré é uma deformação da superfície do mar produzida pela ação gravitacional de um ou mais corpos celestes. Em particular para a Terra, a oscilação do nível do mar é causada pela atração gravitacional combinada do Sol e da Lua.

A atração lunissolar na massa de água produz uma deformação periódica e regular que, em geral, se manifesta pela repetição ao longo de um período de cerca de 24 horas e 50 minutos, correspondente ao dia lunar médio, de duas elevações (vazão ou maré alta) e duas reduções (maré baixa) do nível do mar.

Os dois fluxos e os dois refluxos se alternam a cada seis horas, gerando duas correntes de direção oposta (correntes de maré).

As marés podem ser consideradas ondas estendidas com um período de 12h e 25m e um comprimento de onda igual a cerca de um semicírculo da Terra.

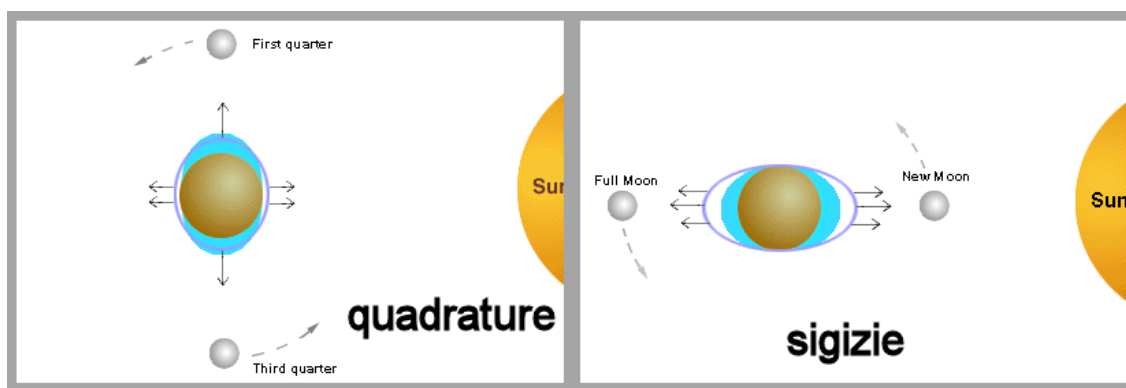
A altura da onda das marés, ou o alcance das marés é dado pela diferença de altura entre a maré alta e a baixa e depende das recíprocas posições Terra-Lua-Sol: atinge o valor máximo quando os três corpos celestes estão alinhados em conjunto e em oposição (syzygies: fases da lua nova (New Moon) e lua cheia (Full Moon); está no mínimo quando a Lua está em 90 ° com o alinhamento Terra-Sol (quadratura: fases do primeiro trimestre (First Quater) e do último trimestre (Third quater) (Figura 4.1.12.1.6).

De acordo com a importância dos múltiplos componentes das marés nas várias partes da superfície da Terra, a tendência da maré apresenta diferentes configurações que, por simplicidade, podem ser reduzidas a três tipos básicos: marés diurnas, caracterizadas por uma única maré alta e baixa na Curso de 24 horas; marés semidiurnas, com duas marés altas e duas baixas de largura aproximadamente igual;

marés mistas, sempre com duas marés altas e duas baixas, mas com largura diferente, dependendo da prevalência da tendência semidiurna ou diurna. As marés mais frequentes são aquelas do tipo semi-diurno ou semi-diurno misto.

As marés semidiurnas se desenvolvem nas costas atlânticas européias, africanas e sul-americanas, da Venezuela ao Brasil, ao longo de parte das costas atlânticas norte-americanas, na Baía de Bengala e ao longo da costa sudeste da África. Ao longo de quase todas as outras costas, existem marés mistas, enquanto as marés diurnas de caráter puro se manifestam apenas em algumas áreas restritas, como o Golfo de Tonkin, o Mar de Ohotsk, o Golfo do México e perto da ponta sudoeste da Austrália.

Figura 4.1.12.1.6 - Marés em relação às fases da lua.



Fonte UAI, 2019.

4.1.12.2 Fatores Climáticos Marinhos nas Áreas da Planta.

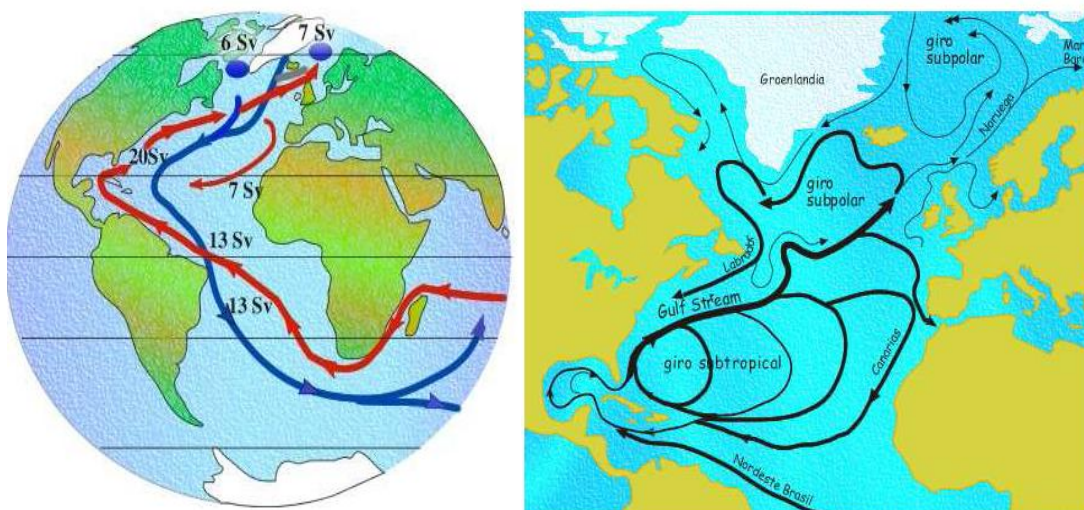
Especifica-se a partir de agora que os parâmetros que caracterizam os fatores oceanográficos e hidrodinâmicos, não sofrem variações em períodos de tempo restritos e permanecem constantes em áreas geograficamente próximas, mesmo na ordem de centenas de quilômetros.

Por exemplo, as marés variam principalmente em função de aspectos astronômicos, que são constantes em períodos de tempo muito grandes (até séculos), e determinam a natureza cíclica do fenômeno.

Corrente Atlântica

A área afetada pelo projeto em exame é investida pela corrente equatorial brasileira (Corrente Guaiana); essa corrente se desloca ao longo da costa com uma velocidade média de cerca de 50-75 cm / s [1-1,5 nós] (Figura 4.1.12.2.1 e 4.1.12.2.2).

Figura 4.1.12.2.1 - Circulação Geral das Correntes Atlânticas



Fonte: Modelo Dinâmico Vultaggio, 2019.

Figura 4.1.12.2.2 - Circulação corrente no norte do Brasil.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Raoni Ceci

Correntes de Maré

Na corrente atlântica da Guiana, uma corrente de maré semi-diurna é sobreposta (que apresenta dois máximos e dois mínimos).

A variação do nível da maré ao longo do tempo pode ser considerada um fenômeno oscilante resultante da interação de um grande número de termos periódicos simples (marés parciais), cada um com períodos, amplitudes e fases constantes.

Na representação harmônica das marés, a evolução do nível é a soma de muitas ondas senoidais simples do tipo:

$$h=A*\cos(\omega t+\phi)$$

onde ω , a pulsação da maré, depende das condições astronômicas consideradas e, portanto, é constante ao longo do tempo para cada localidade, enquanto "A" e " ϕ ", respectivamente a amplitude e a fase, representam as constantes harmônicas, não astronomicamente previsíveis, variável de um lugar para outro e dedutível apenas da análise de longas séries de observações.

Uma vez conhecidas as constantes harmônicas, é possível prever (previsão de marés harmônicas) o padrão das marés ao longo do tempo para cada local. A maré evolui com a sobreposição de ritmos diurnos e semidiurnos devido aos efeitos dos inúmeros componentes envolvidos no fenômeno.

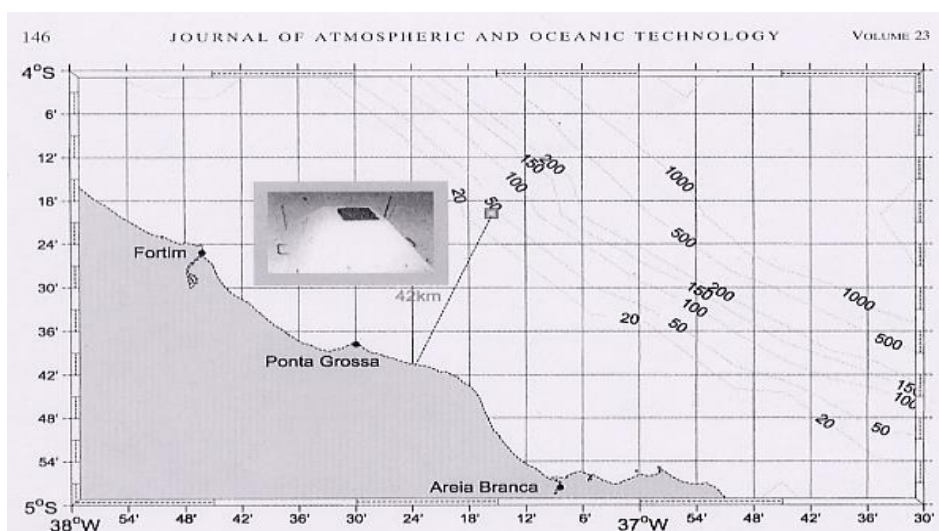
Mesmo os componentes em um período mais alto podem ter uma certa importância, como os semestrais, com um período médio de 14,16 dias, vinculado ao intervalo entre as marés da primavera, com um período de 13,66 dias, denominado lunar quinzenal, em relação à tempo necessário para a Lua mudar a declinação de zero para o máximo e vice-versa, o lunar mensal, com um período de 27,55 dias (mês anomalístico), ligado à elipticidade da órbita lunar, a solar semestral, com um período de 182,6 dias, ligado à variável declinação do Sol, etc.

A maré geral deriva da interação dos componentes acima mencionados (e muitos outros, mas de menor efeito), que conferem à variação no nível da superfície

do mar o padrão rítmico característico, com duas marés altas e duas baixas por dia, de largura variável com período de cerca de 14 dias.

Para a área sob exame, a maré registrada é dada pelos principais harmônicos representados abaixo (avaliados perto da área da planta de Ponta Grossa).

Figura 4.1.12.2.3 - Estação de medição de marés.



Fonte: Modelo Dinâmico Vultaggio, 2019.

Vários harmônicos foram, portanto, medidos que caracterizam as marés nas áreas da planta (Figura 4.1.12.2.4).

Figura 4.1.12.2.4 - Parâmetros harmônicos para caracterização das marés.

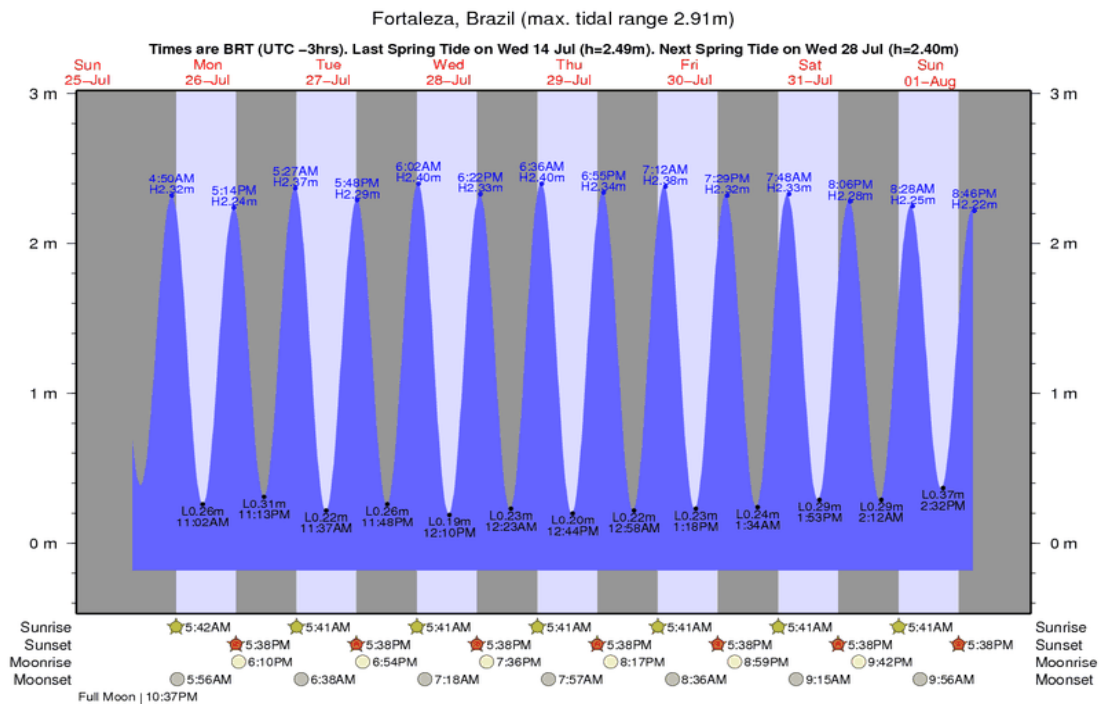
Armonica	vel(cm/s)	fase(°)
M2	34.7	350
S2	13	266
K2	5.9	76
MKS2	16.2	160

Fonte: Modelo Dinâmico Vultaggio, 2019.

Raoni Ceci

O principal harmônico que caracteriza as marés da área de exame é o M2, representada pela figura 4.1.12.2.5.

Figura 4.1.12.2.5 - Representação gráfica das harmônicas das marés



Fonte: Modelo Dinâmico Vultaggio, 2019.

Como mencionado no parágrafo anterior, a velocidade dessa corrente de maré varia com as fases da lua. Em particular, durante a fase sizígia (lua nova e lua cheia) a velocidade atinge valores máximos de cerca de 50 cm / s [1 nó], enquanto durante a fase de quadratura (primeiro trimestre e último trimestre) a velocidade atinge valores máximos de aproximadamente 35 cm / s [0,7 nós].

Ventos e Ondas

Para essas duas correntes também é necessário considerar as correntes produzidas pelas ondas geradas pelos ventos permanentes e persistentes (ventos alísios).

As características dessas ondas são caracterizadas por uma altura média de 2,5 m; as cristas das ondas afetam toda a camada do mar até o fundo, gerando transporte. Em particular, as ondas geradas pelos ventos alísios, cuja direção é paralela à costa brasileira devido ao fenômeno de refração, transformam as frentes da onda paralelas à costa.

O Aliseo vem principalmente do leste e sul-sudeste, com valores variando entre 10 a 20 nós.

As ondas geradas pelo vento são classificadas como ondas curtas (razão comprimento de onda / profundidade); ao se aproximar da costa, essa relação varia, transformando as ondas em ondas longas instáveis; a aproximação das frentes de onda, devido às baixas profundidades em relação ao comprimento típico das ondas para a costa, estas se tornam instáveis, gerando quebra-mares com consequente geração de correntes abaixo da costa que geram transporte

A velocidade com base no tipo de onda é calculada como:

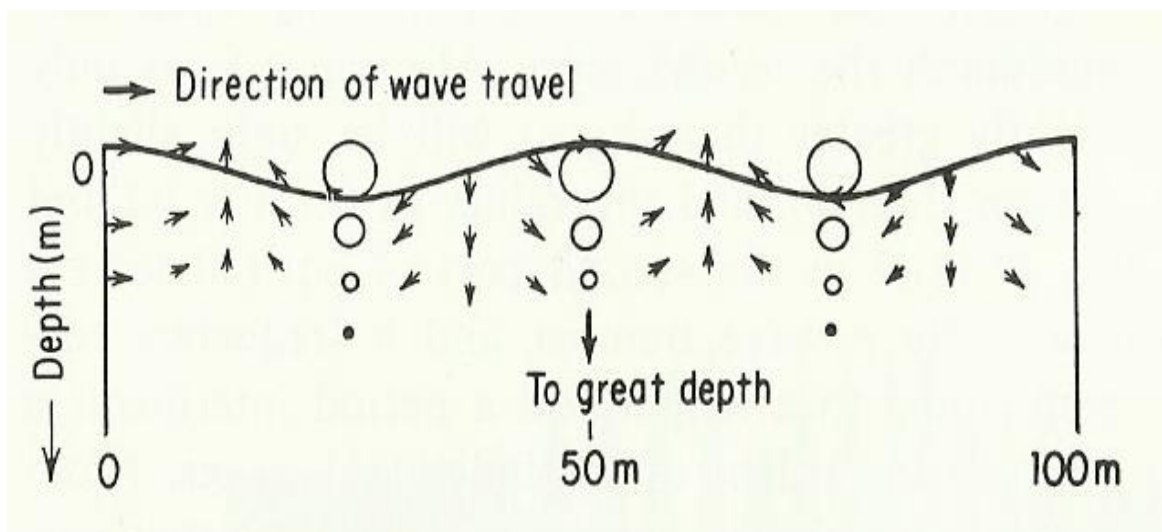
- Velocidade das ondas curtas ou ondas em mar profundo V (m / s); T Período (s)

$$v = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \quad T = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}}$$

Onde λ = amplitude do comprimento de onda.

Vetores de velocidade instantânea mostrados no tempo e caminhos orbitais de partículas de fluido em um movimento de onda em águas profundas. As velocidades são muito pequenas a uma profundidade igual à metade do comprimento de onda (Figura 4.1.12.2.6).

Figura 4.1.12.2.6 – Velocidade instantânea.



Fonte: Modelo Dinâmico Valtaggio, 2019.

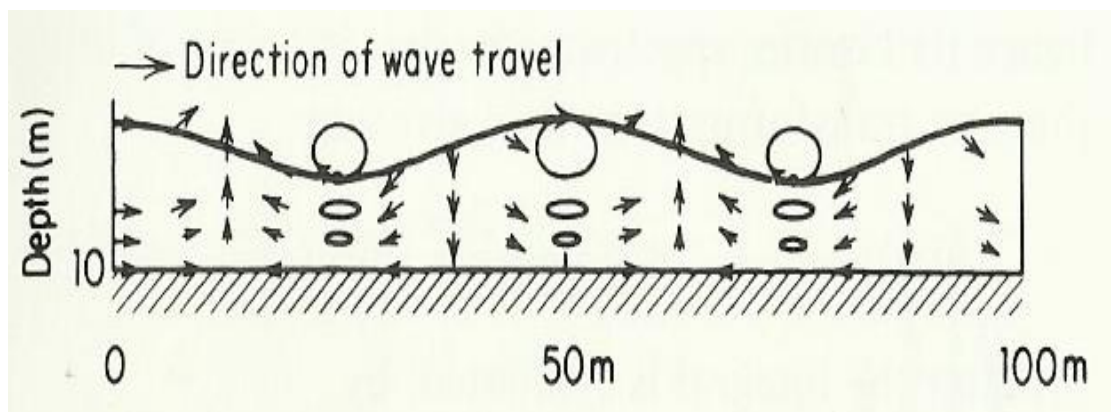
- *Velocidade das ondas longas ou ondas em águas rasas (m / s)*

$$v = \sqrt{gh}$$

Vetores de velocidade instantânea mostrados no tempo e caminhos orbitais para um ciclo de partículas de fluido em um movimento de onda em águas profundas constantes (Figura 4.1.12.2.7).

As condições aproximadas são mostradas para uma onda com largura de 2,5 metros e comprimento de 50 metros em água com 10 metros de profundidade.

Figura 4.1.12.2.7 – Velocidade instantânea.



Fonte: Modelo Dinâmico Valtaggio, 2019.

Existe uma maneira de determinar a altura de uma onda se o mesmo vento sopra sobre a superfície do mar por um determinado período de tempo, principalmente porque é esse último que determina a evolução da camada da superfície do mar.

O Fetch nada mais é do que uma área da superfície do mar mais ou menos extensa na qual o vento sopra com uma direção constante ou, pelo menos, quase estacionária. Se essa área existir, é possível calcular a altura e a duração de uma onda marinha.

As correntes de maré são adicionadas às correntes produzidas pelas ondas geradas pelos ventos permanentes (alísios) persistentes; estas ondas são caracterizadas por uma altura média de 2,5 m.

As cristas de ondas, ao longo da faixa costeira (quebra-linhas de costa) afetam toda a camada do mar até o fundo, gerando o transporte de sedimentos do fundo do mar (areias). Em particular, as ondas geradas pelos ventos alísios, cuja direção é paralela à costa brasileira, devido ao fenômeno de refração, transformam as frentes de onda que chegam paralelas à costa.

Essas ondas geradas pelo vento são classificadas como ondas curtas (razão comprimento / profundidade da onda); ao se aproximar da costa, essa relação varia, transformando as ondas em ondas longas instáveis; a aproximação das frentes de onda à costa, devido às profundidades baixas em relação ao comprimento típico das ondas, estas se tornam instáveis e geram quebra das ondas (cristas) com

consequente geração de correntes abaixo da costa; a ação produzida pelas cristas de ondas afeta toda a camada (fundo do mar), com o consequente transporte de material arenoso.

4.1.12.3 Parâmetros Físicos nas Áreas da Planta.

Os parâmetros físicos das águas costeiras (Temperatura, Salinidade e Densidade) podem ser obtidos na Literatura Oceanográfica relacionada à circulação geral das águas atlânticas e em pesquisas in loco.

Para a área em questão, temos que:

- As temperaturas médias anuais variam entre 26°C e 27°C, apresentando máximas de 31°C e 32°C, com a média mensal mais elevada de 28°C no mês de dezembro, podendo atingir uma média de 26,3°C no mês de julho (Centec)
- A salinidade varia na faixa de 35 a 36 ‰ com uma variação sazonal de ± 1 ‰;
- os valores de temperatura e salinidade permitem calcular a densidade da água costeira do Atlântico de 1.024 g / cm³.

Esses parâmetros físicos, durante a fase de desenvolvimento e aplicação do projeto (temperatura, salinidade), foram medidos por medições diretas na área marinha em estudo.

Com referência ao parâmetro de turbidez da água do mar, o mesmo nos indica a presença de material orgânico e inorgânico em suspensão e modifica as propriedades físicas e químicas da água, principalmente em termos de penetração da luz, com consequências na produção primária. A turbidez pode ser provocada por causas naturais ou por descargas decorrentes de atividades humanas. É expresso em NTU (Unidade Nefelométrica de Turbidez). Este parâmetro, de natureza biológica, deve, em qualquer caso, ser avaliado por medições ad hoc na área em estudo, em um estágio avançado do projeto.

Este parâmetro, no entanto, não inclui material arenoso de origem fluvial e / ou erosão costeira das faixas arenosas.

4.1.12.4 Balanço dos Sedimentos

O estudo da tendência evolutiva de uma costa é realizado considerando, para cada unidade fisiográfica identificada, o balanço costeiro, referente a um período de tempo suficientemente longo.

Uma unidade fisiográfica é definida como um trecho de costa ao longo do qual os sedimentos são transportados, permanecendo confinados dentro dos limites extremos da unidade; dentro desses limites, portanto, as trocas entre unidades fisiográficas adjacentes devem ser consideradas nulas.

O balanço de sedimentos também pode ser aplicado às áreas de controle que fazem parte de uma unidade fisiográfica e fornece informações úteis sobre o estado e o futuro previsível da própria costa, destacando acima de tudo a importância relativa dos itens do balanço ativo e passivo (Figura

Os suprimentos terrestres são fornecidos por vias navegáveis e / ou transportados pelo vento, o que mostra sua ação erosiva em promontórios, falésias e dunas nas costas.

Os suprimentos marítimos são transportados principalmente para a costa pelas correntes transversais.

As remoções no solo devem-se à ação erosiva dos ventos e ondas além das linhas de possível retorno ou nos corpos d'água internos.

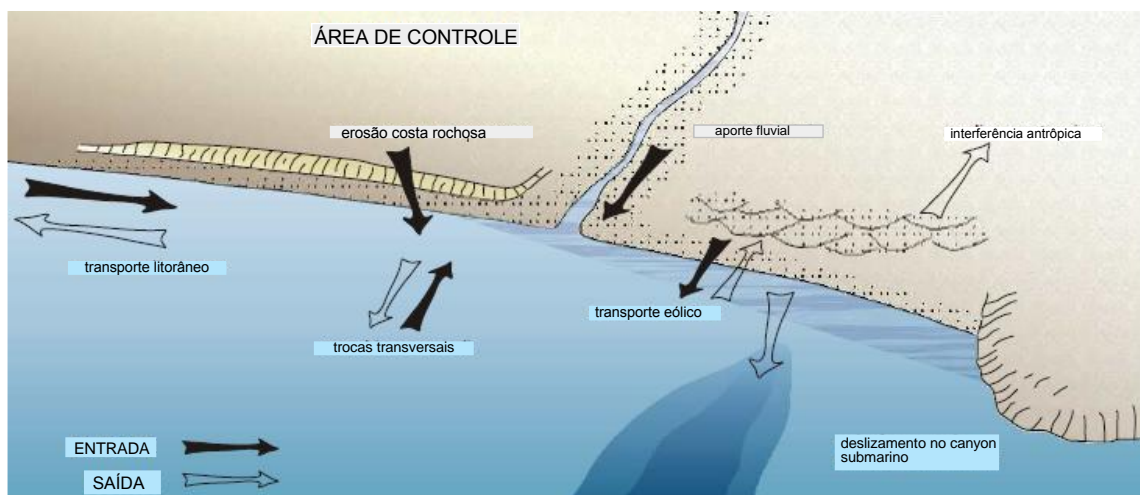
As remoções para o mar são geradas pelo transporte de sedimentos mais finos que são dispersos no mar em correntes de retorno ou em sulcos submarinos (canyons).

As remoções para bacias internas devem-se ao transporte de material para as bocas portuárias e da lagoa.

Diz-se que uma praia está em equilíbrio se a posição da costa permanecer constante ao longo do tempo, mesmo através de flutuações sazonais; o saldo é

equilibrado se a remoção do material for equivalente às contribuições. A praia é instável se predominar a erosão ou o crescimento.

Figura 4.1.12.4.1 - Esquema de entradas e remoções de sedimentos para uma área específica de controle costeiro.



Fonte : APAT, 2007.

4.1.12.5 Fenômeno Erosivo no Litoral de Caucaia

O litoral sul de Caucaia, de frente para a área do parque offshore (entre Icarari e Iparana), está sujeito a um forte e progressivo fenômeno de erosão.

Conforme mencionado no parágrafo anterior, os suprimentos na costa são fornecidas por vias navegáveis e / ou transportadas pelo vento, o que mostra sua ação erosiva em promontórios, falésias e dunas de praia.

Em particular, o principal meio de suprimento de material que alimentava o litoral de Caucaia era proveniente do Rio do Ceará.

A erosão no litoral de Caucaia é de fato causada por um bloqueio no transporte sólido costeiro, devido a intervenções antrópicas em Mucuripe (construção dos molhes) e, principalmente, pela forte urbanização nas áreas estuarinas e interiores do Rio do Ceará, que não alimenta mais as áreas costeiras. O regime anemológico também promove ações erosivas.

Portanto, o projeto em análise decorre precisamente de considerações sobre o fenômeno erosivo e, portanto, sobre o potencial anemológico do local.

Já em junho de 2011, entre o proponente, a Prefeitura de Caucaia e o INPH, nasce um acordo de cooperação técnica com o objetivo de combinar um projeto para o desenvolvimento de um parque eólico offshore, na área marinha, com vista para a costa do município de Caucaia, com a identificação de medidas compensatórias destinadas a combater o forte fenômeno de erosão costeira e a implementação de projetos para o desenvolvimento sustentável da zona costeira do município.

A execução do acordo de colaboração técnica ocorreu por meio da implementação de programas, projetos e ações, como:

- um projeto de proteção do litoral do município de Caucaia, concentrado no aterro e no espessamento da praia, considerando também o decreto n. 128, de 7 de janeiro de 2010, em que é declarada uma situação anômala, caracterizada por uma situação de emergência, referente à área do município atingida pela erosão marinha, limitando o efeito negativo ao meio ambiente e às comunidades locais;
- um projeto para o desenvolvimento de um parque eólico offshore na área marinha em frente ao mesmo litoral do município de Caucaia, promovendo ações e desenvolvendo estudos para o bom uso das energias renováveis;
- um projeto para o desenvolvimento do turismo local, respeitando os padrões ambientais e as medidas de controle aplicáveis aos programas ambientais;

Dessa forma, como decorrência dos resultados encontrados pelo estudo desenvolvido serão construídos 11 espigões (molhes) na extensão de abrangência do projeto, que coincide com a área mais afetada pelo processo erosivo, que foram desenvolvidos a partir de estudos especializados de um modelo cinético onde foram simulados os efeitos do movimento das ondas e os efeitos das obras de defesa costeira (Figura 4.1.12.5.1).



Figura 4.1.12.5.1 – Distribuição dos molhes na para do Icaraí.



Fonte : Elaborado pelo autor, 2019.

4.1.12.6 Modelo Matemático

Após a definição da unidade de intervenção fisiográfica, o estudo e a construção dos molhes exigem uma análise aprofundada das condições naturais e ambientais em que o trabalho será realizado, a fim de limitar as incertezas no momento da idealização da intervenção.

Os projetos marítimos precisam de uma análise minuciosa, pois intervêm em um ambiente de equilíbrio altamente dinâmico, onde as consequências podem ter repercussões em uma área significativamente mais ampla do que aquela diretamente afetada pelo trabalho hipotetizado.

Nos últimos anos, com base em experiências com trabalhos semelhantes, amadureceu uma nova maneira de lidar com os problemas relacionados a projetos de engenharia costeira, com a obrigatoriedade de fornecer estudos e testes preventivos em modelos matemáticos, que atualmente atingiram um alto nível de confiabilidade.

O projeto e a construção de obras costeiras devem incluir uma avaliação adequada do movimento das ondas, dos processos hidrodinâmicos na faixa costeira e dos procedimentos de construção.

A primeira etapa do procedimento de projeto é a identificação das necessidades do mesmo, que resulta dos resultados relativos dos estudos socioeconômicos e de uma análise de custo-benefício obtida a partir da realização do projeto.

A aquisição dos dados de base ocorre nos quatro principais setores: morfológico, meteorológicos marinhos, territorial e ambiental. A projeção dos trabalhos é dividido, em sequência, nos seguintes temas fundamentais:

- Estudos e pesquisas preparatórios preliminares;
- Modelagem;
- Escolha dos tipos de intervenção.

De forma preliminar, portanto, os parâmetros meteorológicos marítimos foram identificados com base nos quais o modelo aplicado para a definição dos molhes descritos abaixo foi adotado.

Na fase executiva, o modelo será aperfeiçoado, com investigações detalhadas e dimensionamentos precisos.

Nesta fase, o modelo serve para definir a melhor forma dos molhes, tendo em vista os dados climáticos marinhos estimados e avaliados, foi definido o “modelo dinâmico” dos molhes, definindo o número e a forma dos mesmos que, além de resolver o problema da erosão não causará impactos nas áreas circundantes à intervenção; portanto, é definida a forma que não causa a projeção do fenômeno erosivo nas áreas limítrofes.

Para o estudo dos processos hidrodinâmicos e dinâmica dos sedimentos, são utilizados:

- Modelos matemáticos;
- Modelos físicos;



Modelos matemáticos descrevem os fenômenos através de equações que são formuladas com base em hipóteses apropriadas resolvidas pelo uso de computadores. Nestes modelos, a morfologia da área e as condições de contorno são descritas por esquematizações numéricas apropriadas.

Os modelos matemáticos comumente usados no campo hidráulico-marítimo podem ser amplamente divididos em modelos dinâmico-hidrodinâmicos e modelos morfológicos.

Os modelos hidrodinâmicos levantam a hipótese de que o fundo do mar é rígido e são adotados com o objetivo de avaliar as mudanças no movimento das ondas na propagação do mar até a proximidade de obras costeiras ou da costa, para serem utilizados na avaliação do comportamento das obras de estabilização ou reconstrução de praias ou na presença de obras de proteção. Esses modelos são capazes de levar em consideração todos os fenômenos mais importantes, como refração, difração, reflexão e dissipação por quebras (franjas).

Também estão disponíveis modelos hidrodinâmicos que podem descrever as faixas de velocidade das massas de água em movimento sob a ação do vento, maré e as diferenças de densidade e temperatura. Esses modelos também permitem simular as características dos processos de dispersão em tais massas de elementos sólidos ou fluidos presentes ou liberados por efluentes no corpo d'água.

No caso em questão na fase preliminar do projeto, é utilizado um modelo matemático dinâmico, descrito abaixo.

4.1.12.6.1 Modelo Dinâmico

O "modelo dinâmico" apresentado é o resultado da aplicação da equação de movimento e da equação de continuidade. Cada modelo, mesmo o mais simples, ao aplicar as equações citadas, precisa do conhecimento orográfico do fundo do mar dentro da área levada em consideração e do perfil da costa.

O aspecto mais interessante e vinculativo para o sucesso da circulação na área afetada pelo modelo são as condições de contorno do próprio modelo.

O desenvolvimento do modelo é baseado nos dados do vento (direção e velocidade), da corrente (velocidade e direção), incluindo a maré e a altura da maré (diurna e / ou semidiurna).

O modelo de circulação, sem esses dados iniciais, pode ser considerado uma mera aplicação matemática das equações que regulam a circulação.

O conhecimento dessas condições é, portanto, essencial para a comparação com as observações reais observadas.

No nosso caso, foram utilizados dois modelos numéricos de camada única (espessura da camada superficial - fundo do mar); o segundo modelo foi aninhado a partir do primeiro; o último, partindo das condições conhecidas dos seguintes parâmetros físicos (temperatura, salinidade) e circulação geral ao longo da faixa costeira, permitiu definir como input as condições de contorno do modelo para o estudo da ação produzida pelos quebra-mares; a presença das estruturas introduzidas permitiu ao modelo obter informações sobre o fluxo das correntes dentro dos quebra-mares.

Para obter resultados reais, são necessárias medições diretas de parâmetros físicos, medições de marés, correntes de maré e profundidade da área em estudo; esses parâmetros, associados ao vento predominante (Alísios) (persistente e influenciado pela ação da brisa local: dia e noite) na área de interesse, podem ter como premissa a obtenção de um modelo de circulação muito próximo ao observado.

Além disso, o modelo pode ser usado para o estudo do transporte de materiais presentes na área do modelo envolvido no estudo.

O modelo dinâmico foi elaborado pelos pesquisadores da Universidade de Nápoles Parthenope, relacionados ao Departamento de Ciências Ambientais da Faculdade de Ciências e Tecnologia.

O objetivo do modelo numérico foi estudar os efeitos da introdução de quebra-mares ao longo da faixa costeira do município de Caucaia na circulação costeira representada pela circulação geral da corrente equatorial ao longo das costas norte-norte do Brasil, conhecida como Corrente da Guaiana.



Os parâmetros físicos das águas costeiras (temperatura, salinidade e densidade) foram derivados da literatura oceanográfica relacionada à circulação geral das águas atlânticas.

A área afetada por fraca variação sazonal seja para a temperatura (27 ° C de fevereiro a 25 ° C de agosto com uma variação de $\pm 0,5$ ° C); as águas atlânticas são caracterizadas por uma salinidade variável de 35 a 36 ° / °° com uma variação sazonal de ± 1 ° / °°; os valores de temperatura e salinidade permitem calcular a densidade da água costeira do Atlântico de ~ 1.024 g / cm³.

- Temperatura 25-27°C;
- Salinidade 35 – 36°/°°
- Densidade 1.024 g/cm³;
- Velocidade da corrente geral média 70 cm/s;
- Velocidade da corrente de maré 35 - 50 cm/s.

O modelo dinâmico, em geral, é baseado na circulação na área em frente à região de estudo de Caucaia na aplicação de um modelo monostático ao qual as condições de contorno foram aplicadas:

- vento estacionário do leste;
- maré medida em fortaleza (julho 2010);
- corrente de maré em relação à harmonica lunar semidiurna;
- grade de integração 12,5 m.

Com base no suporte batimétrico fornecido, foram construídos dois domínios, um dentro do outro; o maior domínio foi usado para definir as condições de contorno do menor domínio que coincidem com a área de interesse.



Os dois domínios foram construídos com base em informações estatísticas sobre o vento (Alísios), a maré (Fortaleza) e o levantamento batimétrico, e em relação aos quebra-mares cuja forma foi realizada de acordo com o projeto (Anexos 1.1-1.2 e 1.3 anexados ao estudo).

Na primeira fase do estudo, para definir as condições de contorno necessárias para o desenho do modelo de circulação, foram considerados os dois modelos de circulação que relatam as variações de circulação causadas pela modificação do perfil da costa na área afetada pelo litoral de Fortaleza. Você pode ver a mudança na circulação produzida pelo novo perfil da costa.

O modelo adotado é o Princeton Ocean Model (POM), um dos sistemas gráficos mais difundidos para a síntese do fenômeno.

POM é um modelo sigma-coordenado de equações primitivas 3D, originalmente desenvolvido para estudos sobre a circulação nas costas, baseado no estudo aplicado à oceanografia das equações de Navier_stokes.

Entre as muitas características interessantes do POM, a possibilidade de discretização vertical da borda da costa permite simular uma camada limite inferior bastante realista.

Sem entrar nos detalhes dos parâmetros resolutivos aplicados ao modelo, o mesmo permite ter uma visão do desenvolvimento do movimento.

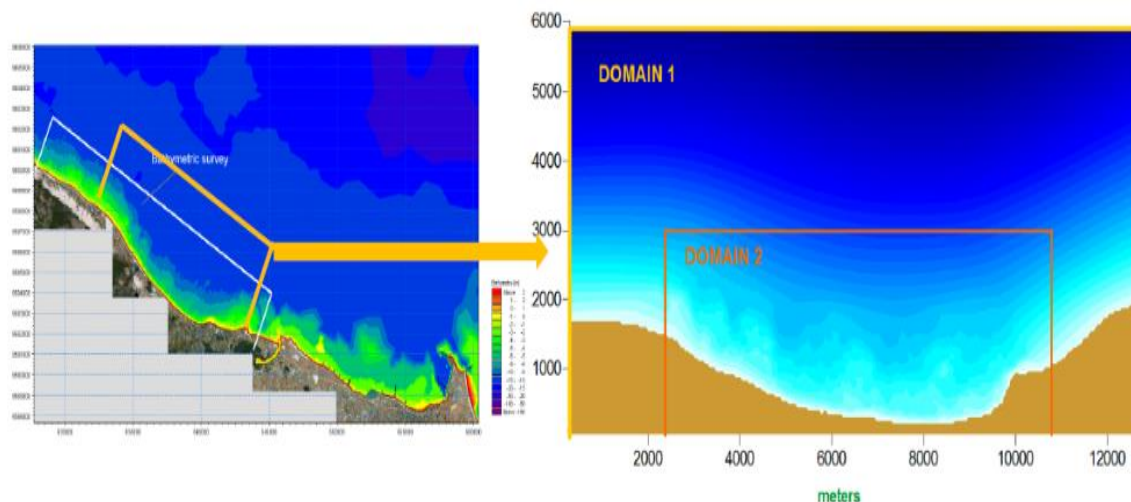
Após o desenvolvimento do modelo, prevê-se uma análise detalhada com base nos dados meteorológicos marítimos disponibilizados por diferentes fontes.

O modelo, conforme detalhado a seguir, também é aplicado ao estudo dos quebra mares a serem inseridas na costa para mitigar o fenômeno da erosão marítima.

A partir dos dados atualmente disponíveis (que já estão sendo integrados), o perfil do litoral e a batimetria foram reconstruídos para dois domínios diferentes.

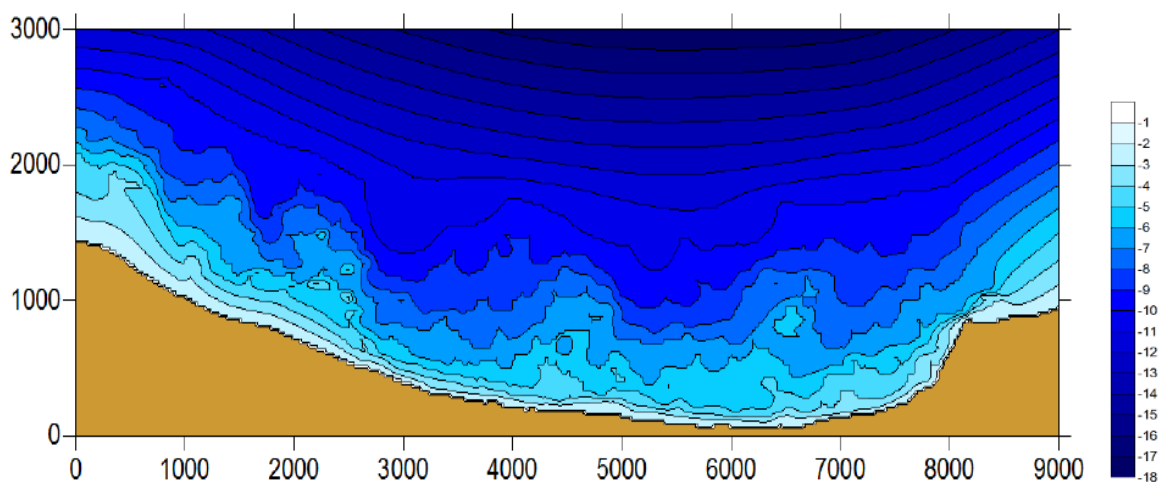
O domínio 1 (13 km x 6 km com resolução espacial horizontal de 50 m) também foi usado para as condições de contorno a serem impostas ao longo dos limites subsequentes do domínio 2 (9 km x 3 km com uma resolução de 12,5 m). Este domínio 2 está aninhado no domínio 1.

Figura 4.1.12.6.1.1 - Definição dos domínios de cálculo do modelo



Fonte: Modelo Dinâmico Vultaggio, 2019.

Figura 4.1.12.6.1.2 - Batimetria utilizada no modelo.



Fonte: Modelo Dinâmico Vultaggio, 2019.

As simulações no Domínio 1 representam o passo necessário para a implementação do modelo na área de interesse Domínio 2, em relação a qual a área da planta é realizada.

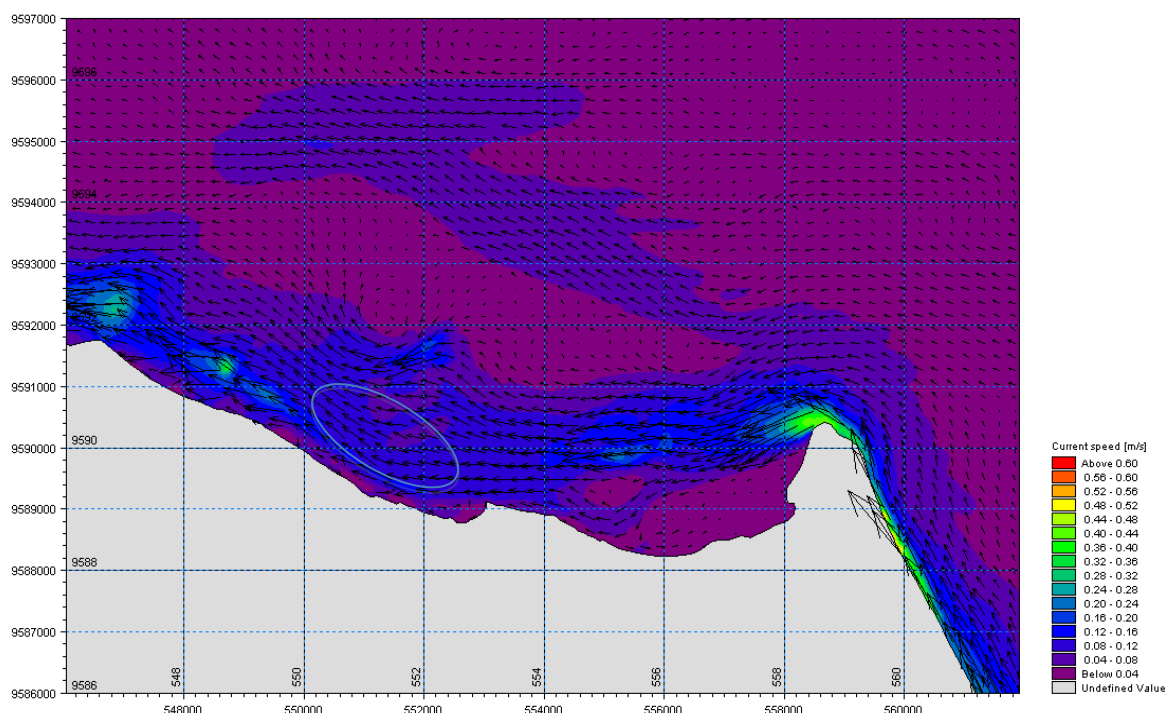
Elas são essencialmente úteis para:

Raoni Ceci

1. Simular o fluxo médio com base nos ventos predominantes;
2. Simular o efeito das marés;
3. Manter as condições no entorno da área do domínio 2;

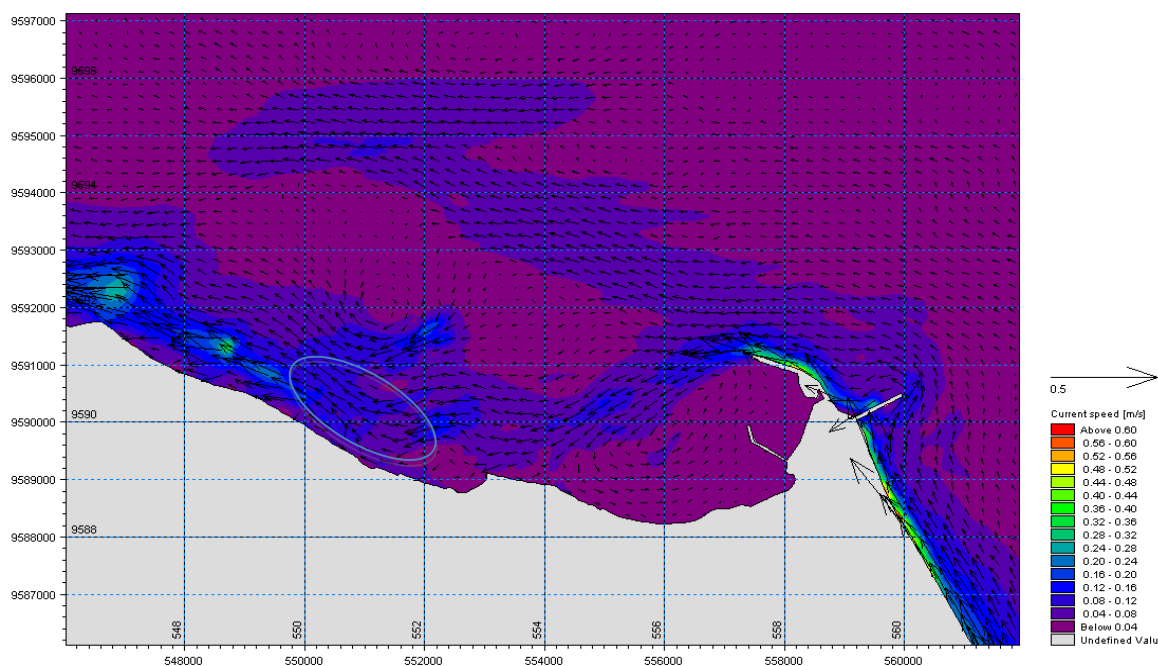
Então, o movimento esperado da onda é estimado na área de interesse. Ressalta-se que o modelo foi estimado também considerando que a construção do porto de Mucuripe, em Fortaleza, trouxe importantes mudanças, a serem consideradas na área de estudo, sendo que a circulação característica nesta área varia com a inserção do projeto.

Figura 4.1.12.6.1.3 - Característica do modelo de onda antes da construção do porto.



Fonte: Modelo Dinâmico Vultaggio, 2019.

Figura 4.1.12.6.1.4 Característica do modelo de onda – Após realização do Molhe do Titã do Espigão da Praia do Futuro em Mucuripe



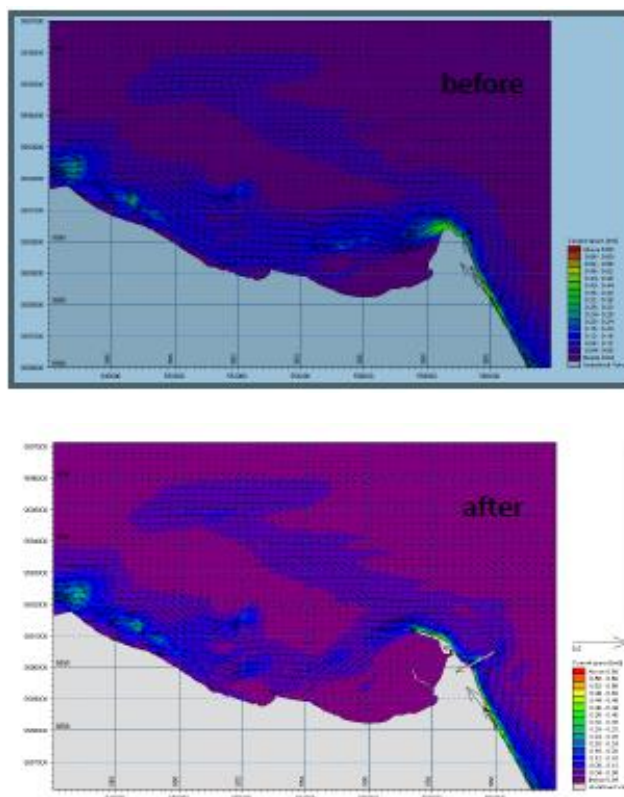
Fonte: Modelo Dinâmico Vultaggio, 2019.

Ao observarmos a área do projeto após a construção do Molhe do em Mucuripe (Fortaleza), percebemos como ela sofre variações demonstrando assim como o litoral está sujeito a fenômenos evolutivos, mesmo que muito rápidos.

A questa situazione si aggiunge anche la forte urbanizzazione sulla foce del Rio Do Ceará che contribuisca in maniera sostanziale alla diminuzione di apporto di sabbia nell'area costiera di Caucaia.

Raoni Ceci

Figura 4.1.12.6.1.5 - Comparação das correntes após a construção dos molhes em Fortaleza



Fonte: Modelo Dinâmico Vultaggio, 2019.

A forma do alongada do molhe de Fortaleza (Mucuripe), no ponto específico, determinou a alteração das correntes nas áreas vizinhas.

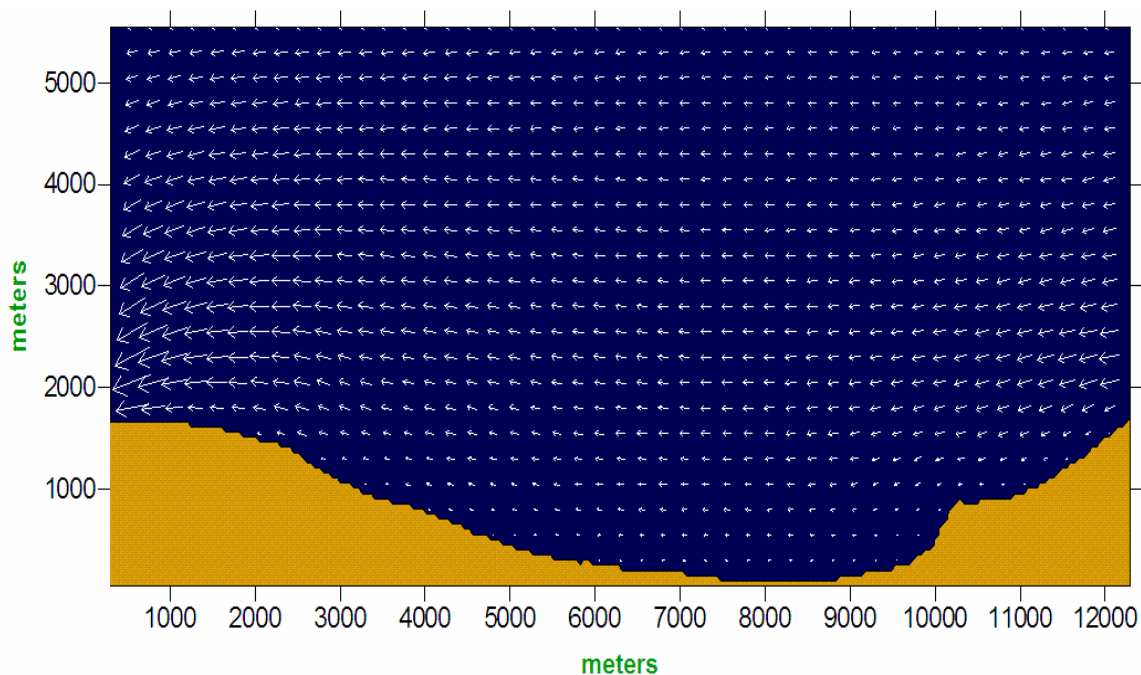
Como será observado na área de Caucaia, foi escolhida uma forma específica de molhe em “S” que, além de favorecer a nutrição nas áreas internas, não causará efeitos externos significativos fora das áreas de interesse, enquanto que as dimensões dos molhes não serão estendidas e criarão correntes artísticas localizadas; já fora dos molhes a corrente retornará às suas condições iniciais. Portanto, fora das áreas dos molhes, seus efeitos não são presentes.

É apresentado agora o curso das correntes, antes da construção do molhe em Mucuripe.

A partir da análise realizada, são deduzidas as informações sobre o movimento das ondas.

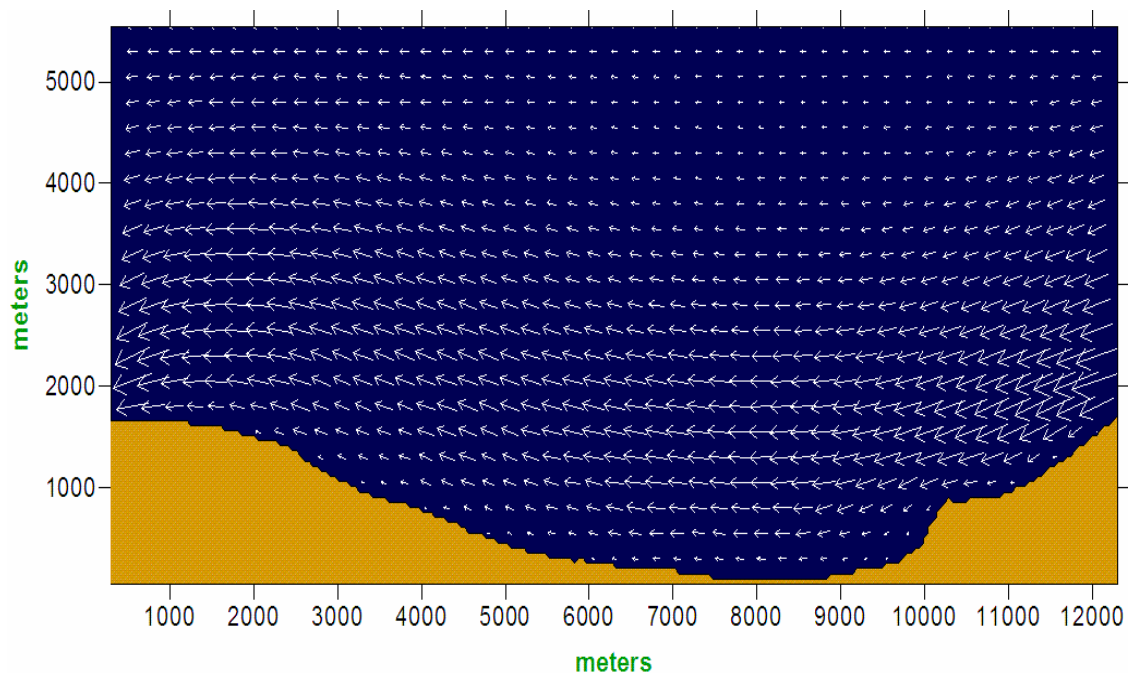
Raoni Ceci

Figura 4.1.12.6.1.6 - Movimento das ondas anterior a realização do Molhe do em Mucuripe



Fonte: Modelo Dinâmico Valtaggio, 2019.

Figura 4.1.12.6.1.7 - Movimento das ondas após a realização do Molhe do em Mucuripe



Fonte: Modelo Dinâmico Valtaggio, 2019.

Raoni Ceci

Observa-se que atualmente o movimento das ondas é mais constante na área de interesse, porém o padrão de onda mostrado na figura anterior após a construção do Molhedo, favorece o fenômeno da erosão costeira, que portanto necessita de intervenções urgentes de restauração.

4.1.12.6.2 Modelagem com e sem a Inserção dos Molhes

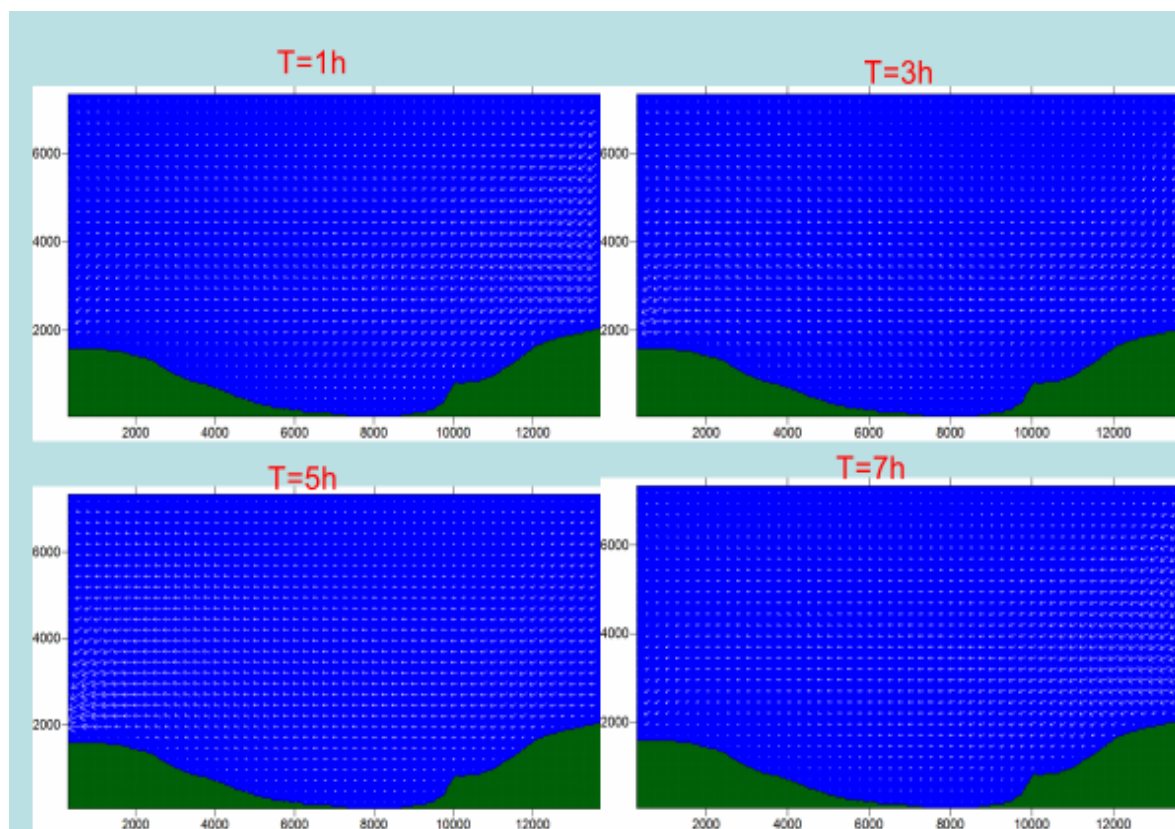
Abaixo são apresentados os gráficos do modelo de circulação obtido, sem a introdução das estruturas (quebra-mares). Pode-se observar como a circulação das águas voltadas para a área de estudo é homogênea em sua forma vetorial com correntes do leste em direção ao oeste, sendo mais intensa fora da área de estudo.

Foi avaliada a tendência das correntes e dos fluidos ao longo de 12 horas em intervalos regulares, observando que o fluxo é estacionário. As correntes sem a presença dos molhes são paralelas à costa e são elas que determinam a erosão.

A figura 4.1.12.6.2.1 contempla o modelo dinâmico de circulação das águas na área em frente ao Caucaia_fluxo estacionário.

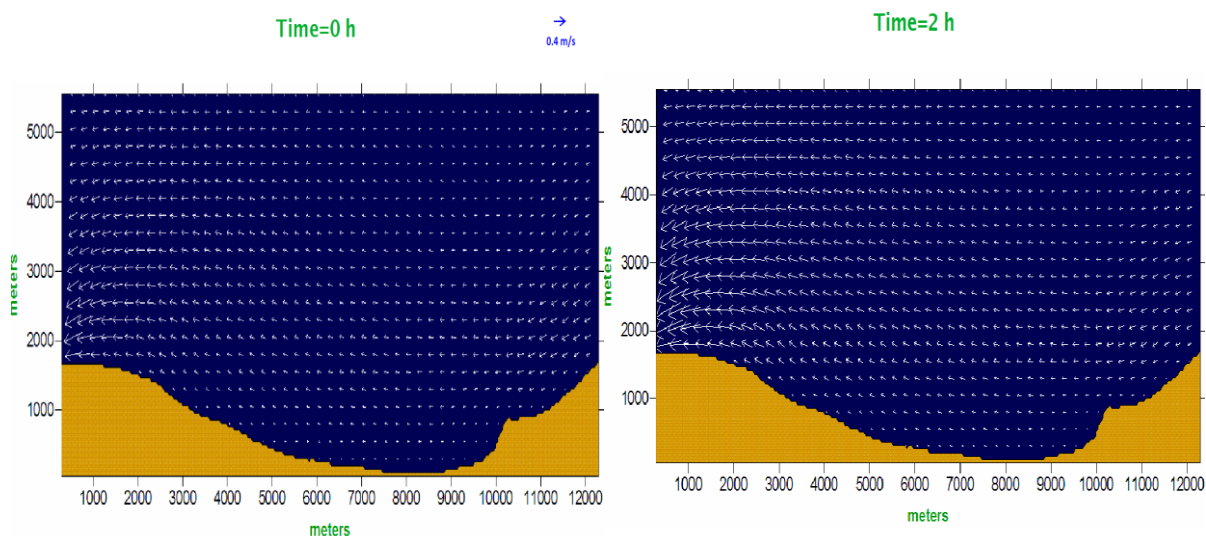
A figura 4.1.12.6.2.2 mostra o detalhe do modelo dinâmico da circulação das águas em frente a Caucaia_Fluxo estacionário, por intervalos temporários de duas a 12 horas, na ausência dos molhes.

Figura 4.1.12.6.2.1 - Modelo dinâmico de circulação das águas na área em frente a Caucaia_fluxo estacionário.



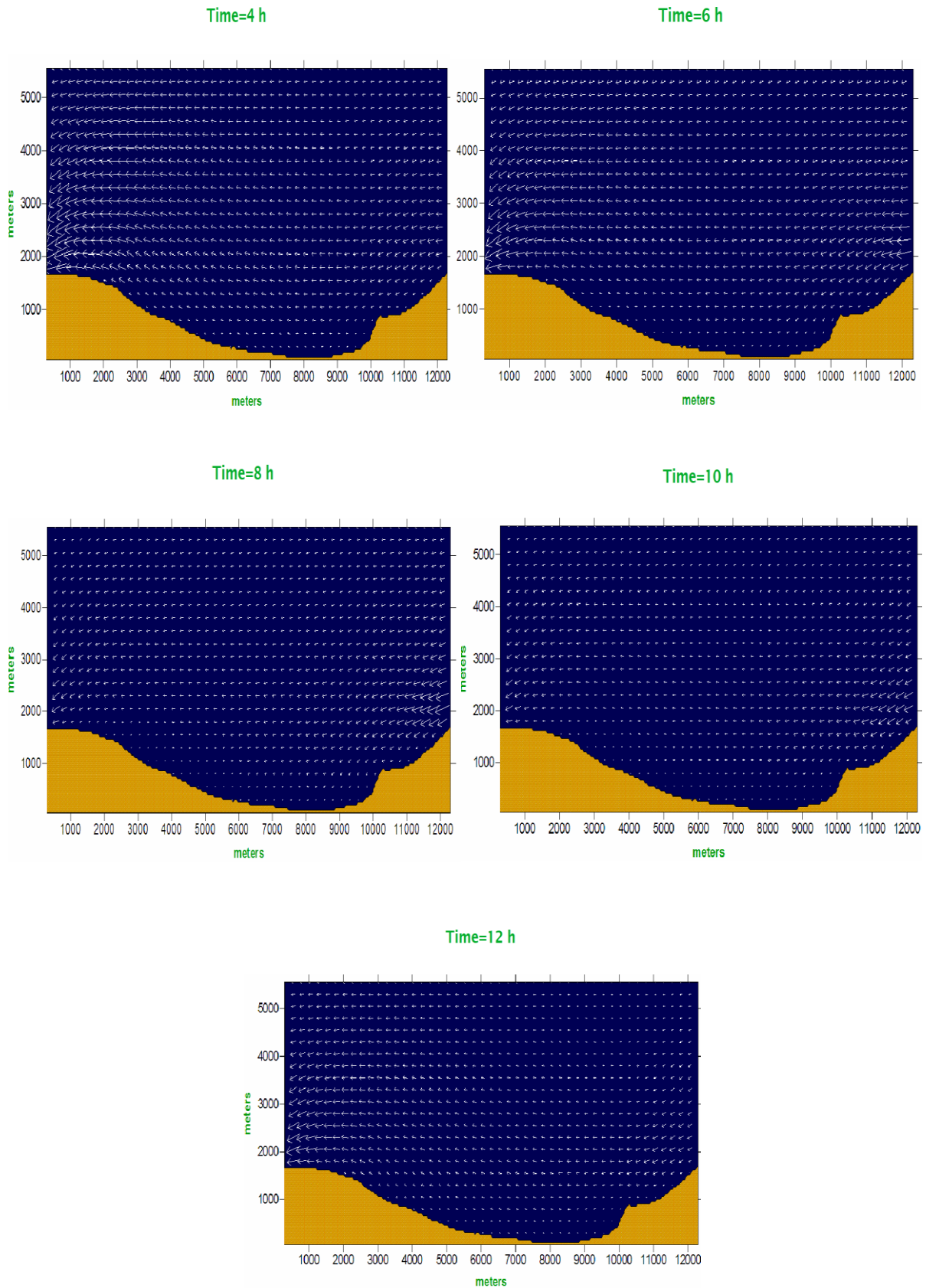
Fonte: Modelo Dinâmico Vultaggio, 2019.

Figura 4.1.12.6.2.2 – Modelo dinâmico por intervalos temporários de duas a 12 horas, na ausência dos molhes.



Raoni Ceci

Continuação da Figura 4.1.12.6.2.2



Fonte: Modelo Dinâmico Vultaggio (2019)

Raoni Ceci

Como observamos na ausência dos molhes, o fluxo é estacionário, com velocidades paralelas à costa, que são responsáveis pela erosão.

De acordo com a morfologia do litoral, 11 molhes foram inseridos em correspondência com o litoral de Caucaia, em frente à área do projeto.

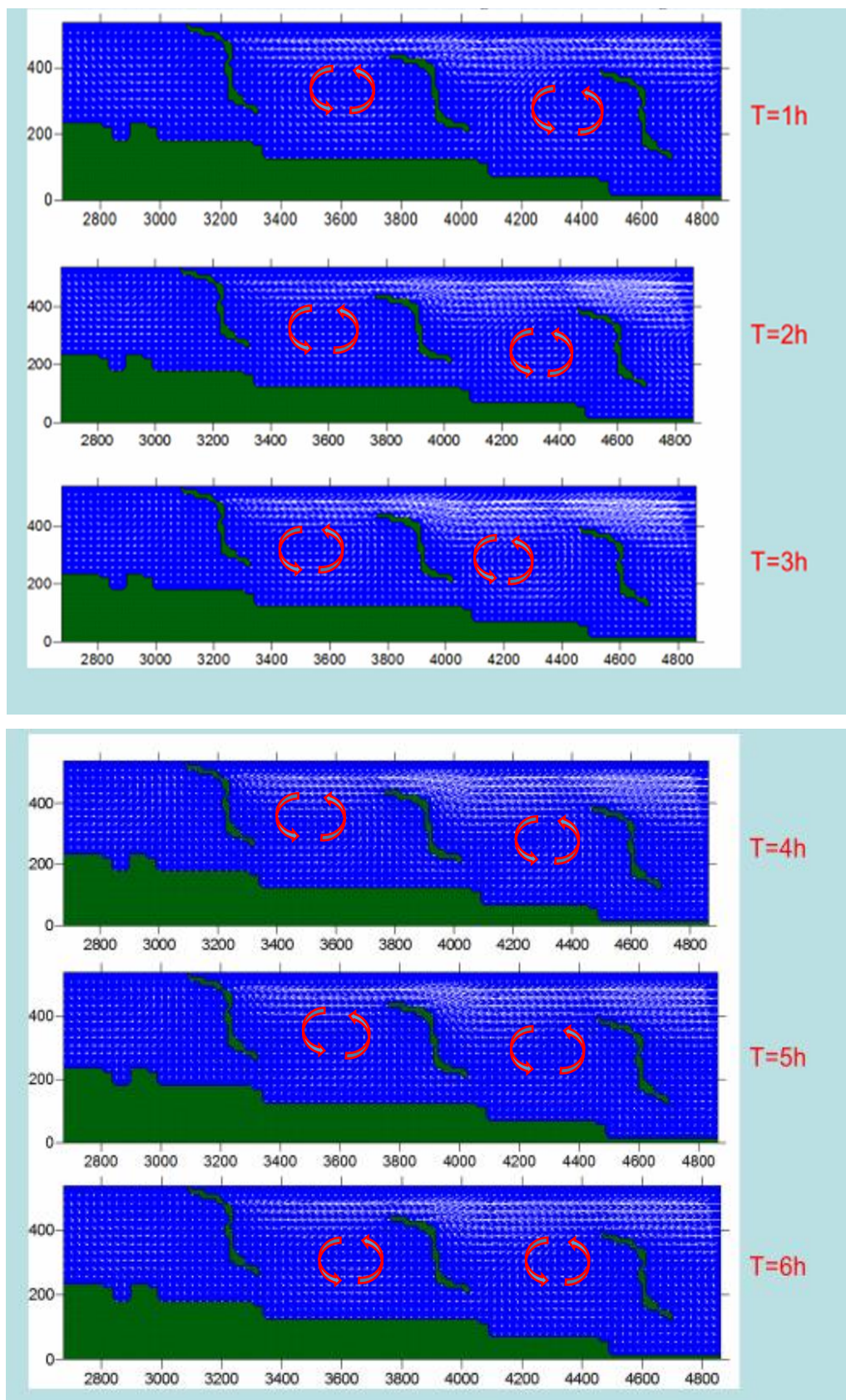
A inserção foi realizada com barreiras de quebra-mar, observando que, para melhorar o efeito de nutrição da área, as mesmas foram então conectadas à costa se tornando verdadeiros molhes.

Os molhes permitem que se encontre a nutrição em suas próprias áreas calmas geradas, pois os vórtices são criados com velocidades de transporte reduzidas que, portanto, permitem o depósito de material. De qualquer forma, o fenômeno vorticoso está localizado em correspondência às áreas calmas e imediatamente fora observa-se que as condições atuais permanecem nas condições iniciais. A influência dos molhes, devido a sua forma particular, faz com que as correntes externas a eles retornem às condições iniciais (não há efeito do molhe).

Na figura , é apresentado o domínio avaliado primeiro com as barreiras de quebra-mar e, a seguir, a configuração das mesmas assim como planejado, considerando as mesmas formas evoluídas em molhes.

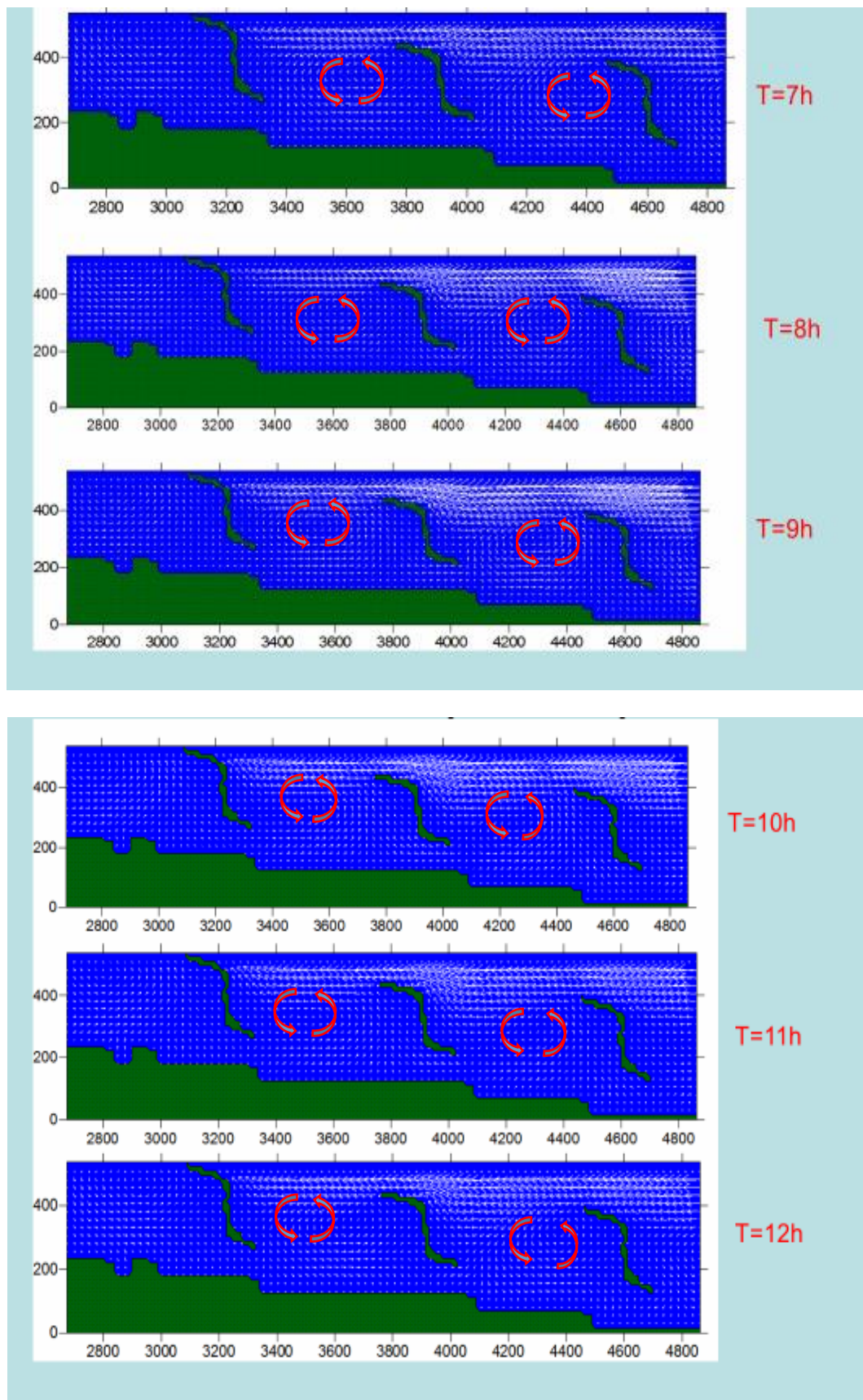


Figura 4.1.12.6.2.3 - Modelo dinâmico de circulação das águas em frente a Caucaia_ Fluxo estacionário, com barreiras (até 12 h)



Raoni Ceci

Continuação da Figura 4.1.12.6.2.3



Fonte: Vultaggio, 2019.

Raoni Ceci

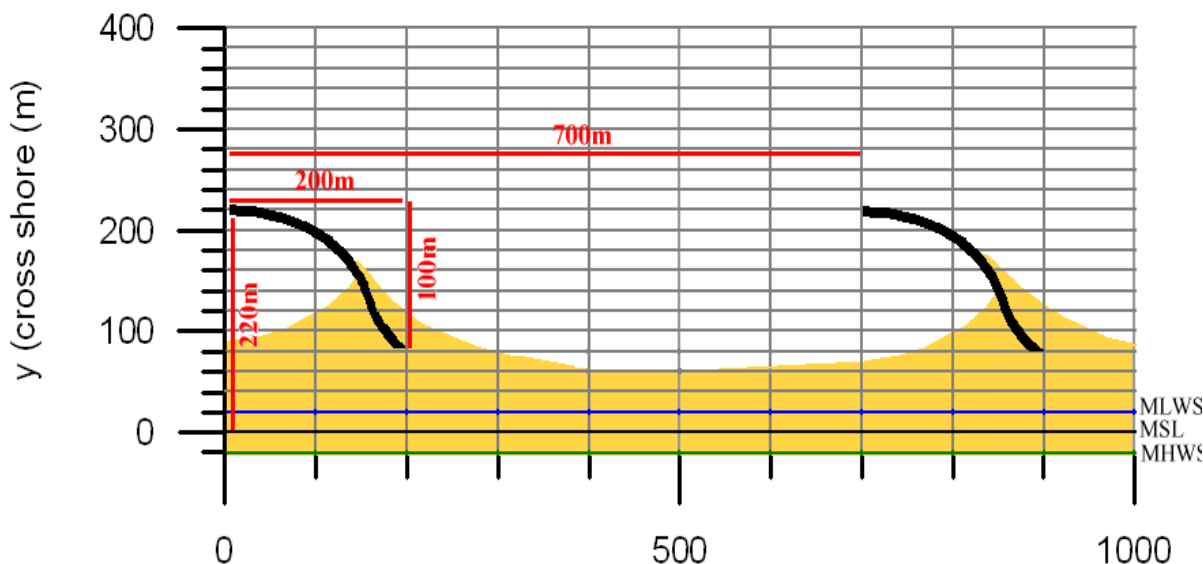
Observa-se como a circulação varia dentro das barreiras abaixo. Para acentuar o efeito, as barreiras se conectam à costa, criando os molhes, com áreas de calma bem definidas. Esse arranjo significa que não há efeitos de contorno significativos fora das áreas dos quebra-mares.

A evolução das barreiras levou à definição dos molhes mais funcionais conectados à terra firme, como representado abaixo.

O movimento das ondas que se desenvolve paralelamente à costa favorece o fenômeno erosivo da própria costa. Portanto, elementos como a corrente podem ser desviados, perdendo energia cinética e favorecendo fenômenos de alimentação costeira.

A solução adotada foi aquela de inserir barreiras de quebra-mar próximo à costa. Eles foram então incluídos no modelo dos molhes de quebra-mar de acordo com o seguinte esquema.

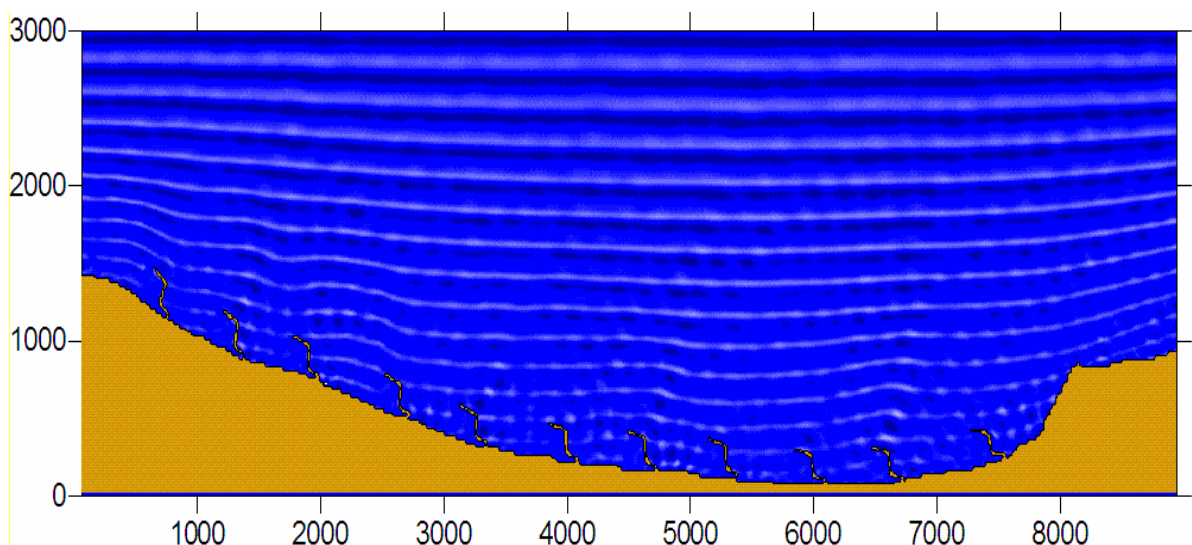
Figura 4.1.12.6.2.4 - Molhes inseridos sobre a linha de costa.



Fonte: Vultaggio, 2019.

Raoni Ceci

Figura 4.1.12.6.2.5- Plano de onda e molhe.



Fonte: Vultaggio (2019)

Além da modalidade ilustrada, as ondas serão monitoradas através de sistemas de satélite, com o auxílio de drones e / ou sistemas de bóias, a fim de obter dados detalhados para a confirmação daqueles estimados.

O estudo mostra que em mar aberto, e em particular nas áreas em exame, há ondas muito longas e altas: cerca de 2,5 - 3 m.

Esses dados também são confirmados por estudos em fetch. No hemisfério sul, observamos que a partir de áreas equatoriais há ondas longas e altas com média de 2,5 - 3 m, que chegam em até 10 m no Pólo Sul de maneira gradual. No hemisfério norte, por outro lado, ondas médias de 10 m são atingidas apenas no Atlântico Norte e no Pacífico Norte, enquanto no Mediterrâneo, que é um mar fechado, a média é muito mais baixa e é de 1-2 m.

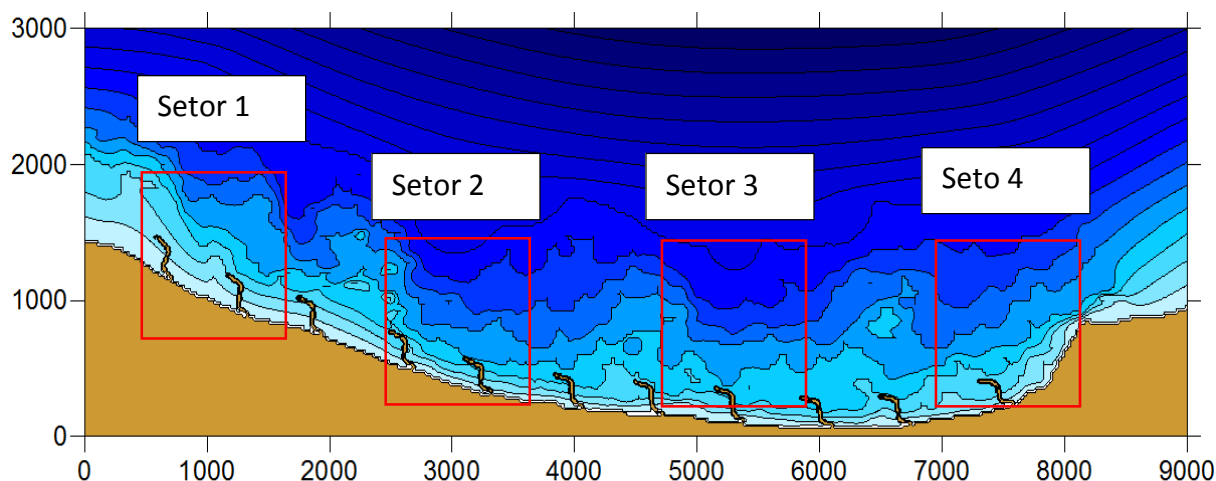
Os resultados mostram que os quebra-mares propostos (conforme INPH) influenciam substancialmente a circulação geral das correntes próximas à costa de interesse; em particular, o modelo dinâmico mostra que a configuração proposta é capaz de gerar células de vórtice de baixa velocidade sob a costa e entre quebra-mares que causam deposição de sedimentos na área dentro dos próprios quebra-mares.

A literatura oceanográfica sobre a ação de depósito de sedimentos dos primeiros quebra-mares instalados perto da costa é bem conhecida por reduzir a ação erosiva do transporte de correntes nas proximidades.

Para uma análise detalhada da circulação de correntes nos quebra-mares, todo o litoral do estudo foi dividido, neste segundo estudo, em quatro setores.

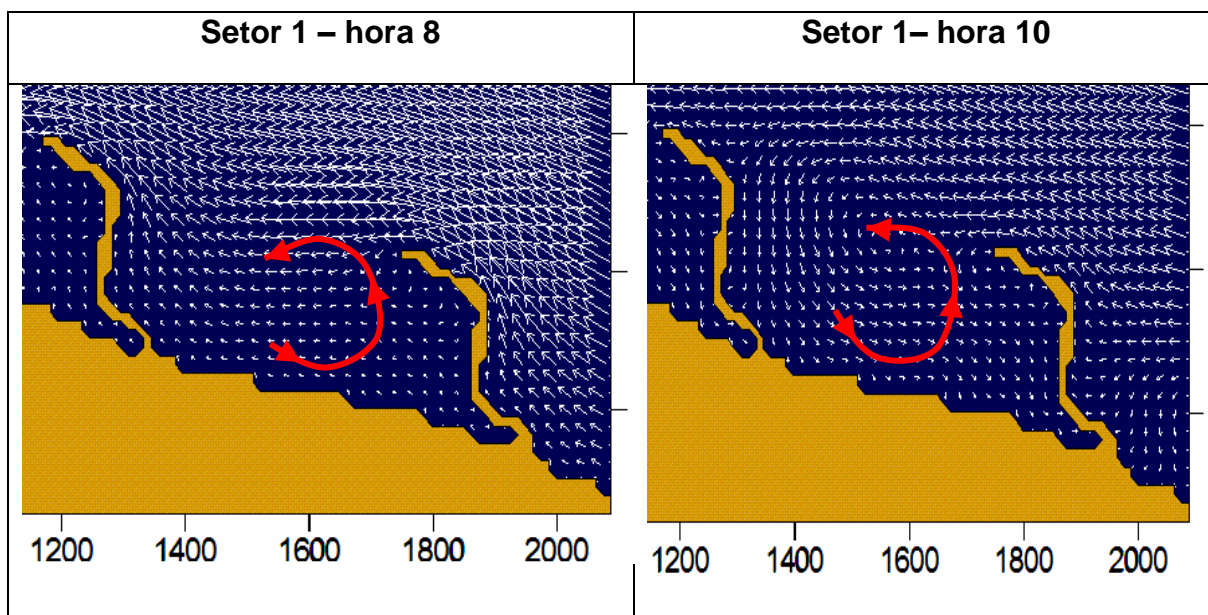
A partir das representações obtidas do modelo, alguns possíveis modelos de circulação da água, internamente aos quebra-mares, relativos ao intervalo de processamento ($T = 12h$), para os diferentes 4 setores, de oeste para leste, foram extraídos e representados abaixo.

Figura 4.1.12.6.2.6 - Identificação dos setores de detalhe dos molhes.



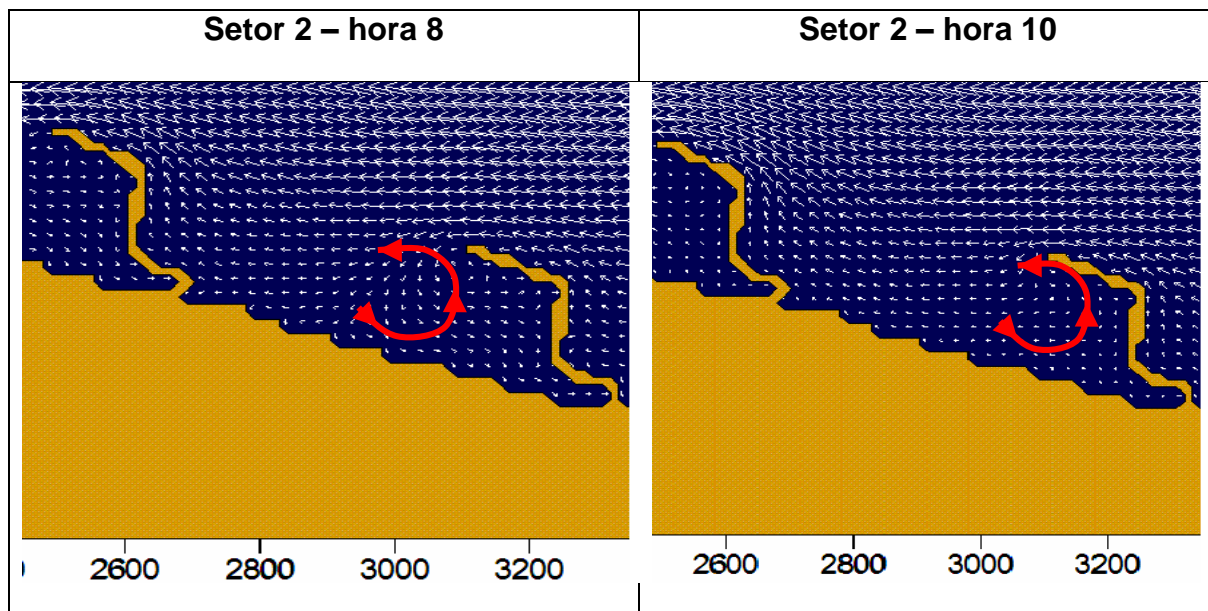
Fonte: Vultaggio, 2019.

Figura 4.1.12.6.2.7 - Setores com Modelo de circulação das águas internamente aos quebra-mares, setor 1



Fonte: Vultaggio, 2019.

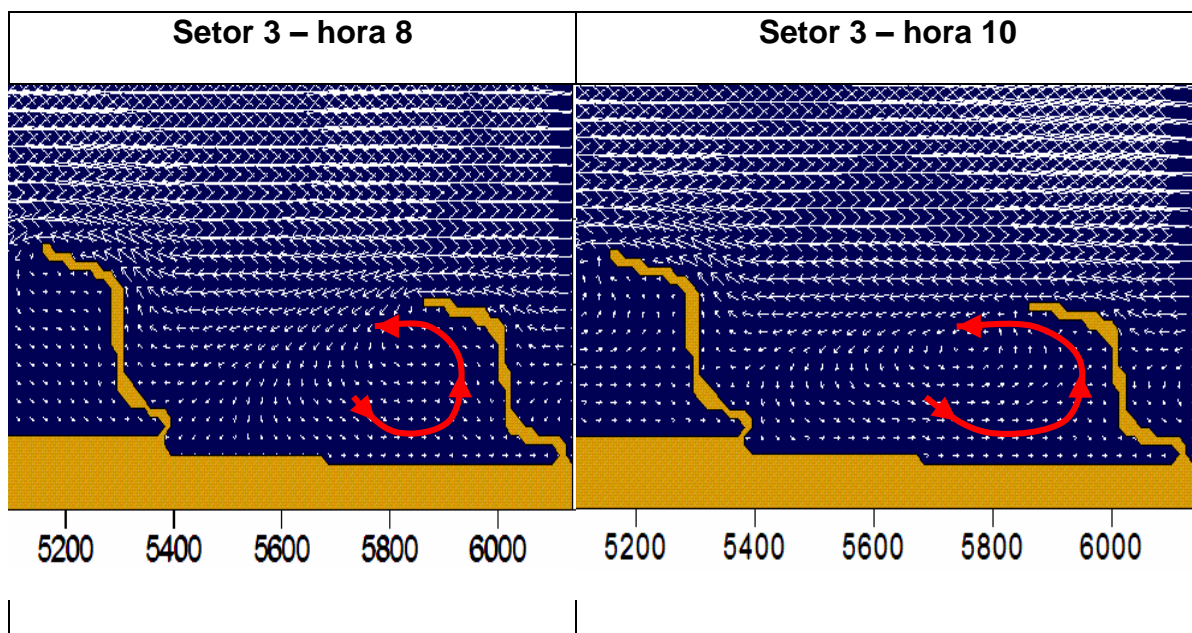
Figura 4.1.12.6.2.8 - Setores com Modelo de circulação das águas internamente aos quebra-mares, setor 2



Fonte: Vultaggio, 2019.

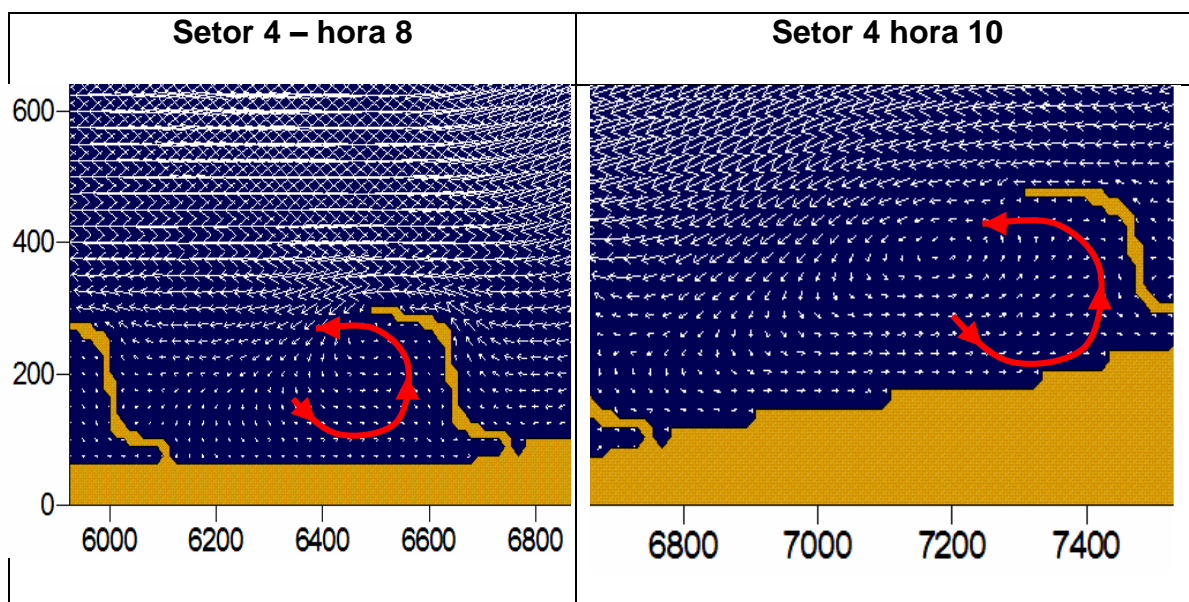
Raoni Ceci

Figura 4.1.12.6.2.9 - Setores com Modelo de circulação das águas internamente aos quebra-mares, setor 3



Fonte: Vultaggio, 2019.

Figura 4.1.12.6.2.9 - Setores com Modelo de circulação das águas internamente aos quebra-mares, setor 4



Fonte: Vultaggio, 2019.

Raoni Ceci

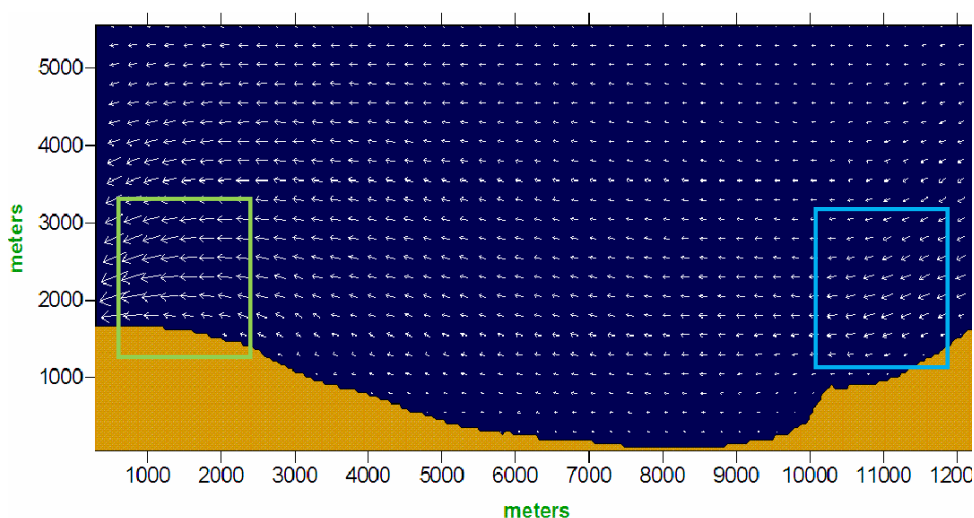
Observa-se que nos diferentes setores dentro das áreas calmas são criados vórtices, essas mudanças de direção envolvem uma redução da energia cinética do transporte, o que favorece o depósito, exatamente no vórtice, portanto, nas áreas dentro dos molhes.

Como visto, os componentes que representam as correntes retornam imediatamente para fora molhes aos valores iniciais, não afetados pelo efeito do molhe.

A forma particular, que não se estende ortogonalmente às ondas, significa que a corrente fora do molhe não é alterada. A forma favorece, além do processo de nutrição, também que o fluxo de corrente nas áreas adjacentes aos molhes não seja alterado, portanto os molhes serão funcionais em correspondência com a área em que estão localizados.

A figura 4.1.12.6.2.10 contém as áreas externas aos molhes (comparação das direções da corrente fora da área em que os molhes estão localizados). A figura 4.1.12.6.2.11 expoe áreas externas aos molhes, com condição pós obra com os molhes (setor extremo oeste), enquanto que a figura 4.1.12.6.2.12, contempla a condição pós obra com os molhes (setor extremo leste).

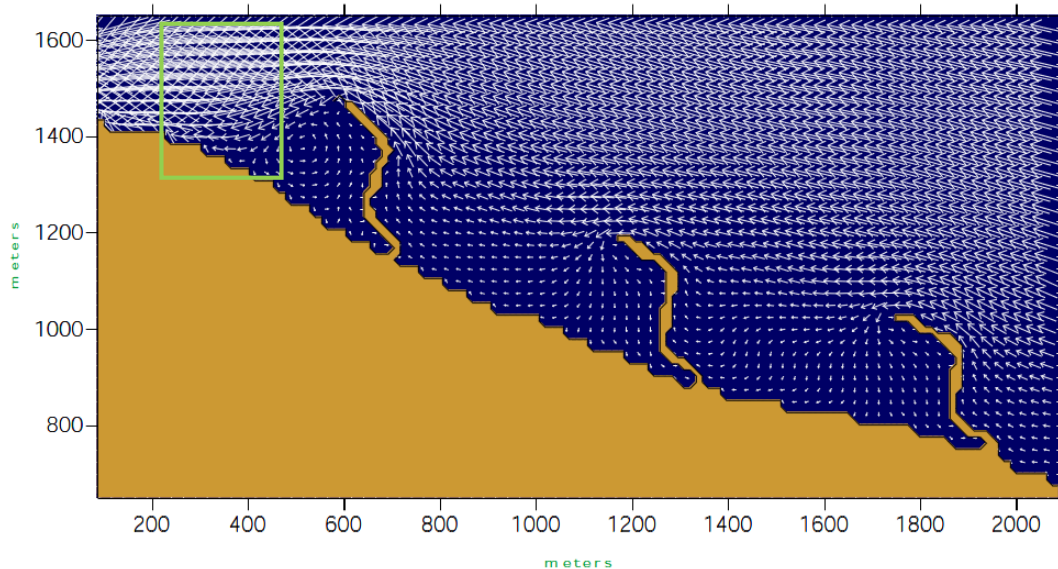
Figura 4.1.12.6.2.10 - Comparação das direções da corrente fora da área em que os molhes estão localizados.



Fonte: Vultaggio, 2019.

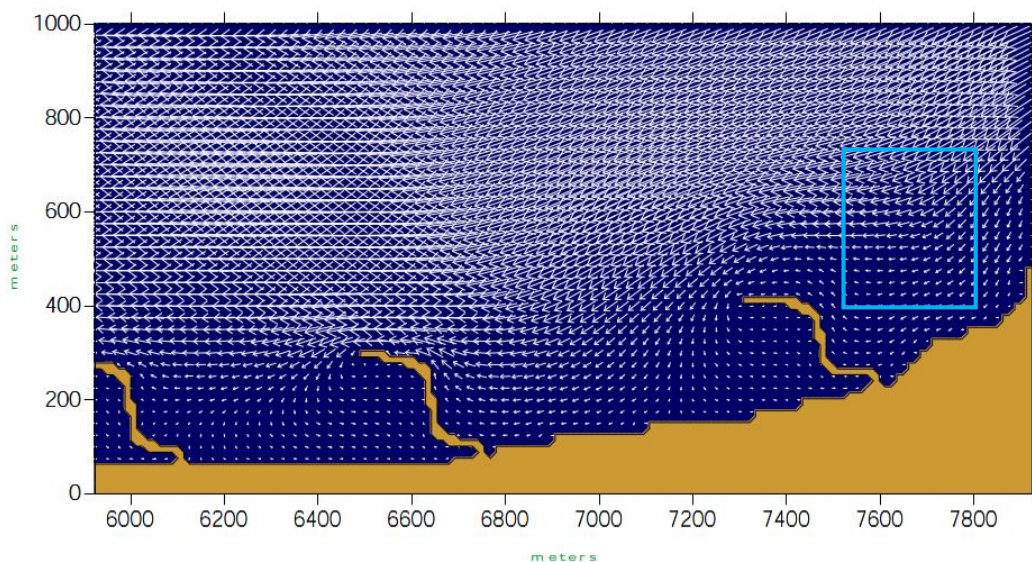
Raoni Ceci

Figura 4.1.12.6.2.11 - Condição pós obra com os molhes, setor extremo oeste.



Fonte: Vultaggio, 2019.

Figura 4.1.12.6.2.12 - Condição pós obra com os molhes, setor extremo leste.



Fonte: Vultaggio, 2019.

Raoni Ceci

Especifica-se que as escalas de representação aplicadas ao modelo são diferentes, entre a representação dos molhes e a costa sem os molhes. As imagens mostradas acima servem para indicar as direções das linhas de fluxo que permanecem praticamente inalteradas nas áreas externas aos molhes.

4.1.12.7 Observações Finais

Internamente aos quebra-mares, tendo em vista que a principal característica é representada pela periodicidade das marés produzida pelo principal harmônico semidiurno lunar (M2), algumas conclusões podem ser deduzidas sobre o movimento das águas na área envolvida pelo estudo dinâmico:

- O modelo desenvolvido mostra a geração de uma circulação de vórtice na área delimitada por quebra-mares com periodicidade ligada à corrente de maré; também existem áreas de convergência de circulação perto da linha costeira e do quebra-mar;
- Fora da área interessada (área costeira delimitada por quebra-mares), a circulação das águas tem as mesmas características da corrente geral (Corrente das Guianas) cuja velocidade é afetada pelo componente de maré semidurna; no período simulado, no entanto, não houve reversões de direção, mas apenas redução de velocidade;
- Em todos os setores (de 4 representativos), nos quais a costa foi subdividida, existem circulações vorticais, no sentido anti-horário, a baixa velocidade (ordem de magnitude 5 cm / s);

Nota-se que durante a fase de planejamento avançado, antes do canteiro de obras, o modelo:

- Ele será calibrado com medições atualizadas e reais, introduzindo a corrente de maré real.
- Estudos detalhados serão conduzidos sobre distribuições de traços dentro das áreas delimitadas pelos quebra-mares que levam em consideração o tipo e a natureza dos materiais de interesse. Esse tipo de distribuição exigirá modelagem específica para poder definir sua distribuição nas áreas delimitadas pelos quebra-mares.

Demais considerações nos Anexos 1.1, 1.2 e 1.3.

4.339

