

**NAÇÃO: BRASIL**  
**ESTADO FEDERAL: CEARÁ**  
**Prefeitura de Caucaia**  
**Localidade "Iparana-Icarai-Parazinho"**



## **PARQUE EÓLICO OFFSHORE CAUCAIA** **N. 59 AEROGERADORES**

**Anexo 1.3 para o Estudo de Impacto Ambiental (EIA)**

**Modelo dinâmico para o estudo da circulação de água - tradução**

**Empresa Proprietária**



SEDE LEGAL BI ENERGIA LTDA AV. DESEMBARGADOR MOREIRA, 2120  
SALA 907, ALDEOTA - FORTALEZA - CE  
CEP 60170-002

**Consultoria Técnica**



SEDE LEGAL TENPROJECT BRASIL AV. DESEMBARGADOR MOREIRA,  
2120 SALA 907, ALDEOTA - FORTALEZA - CE  
CEP 60170-002

NOVEMBRO 2019

# MODELO DINÂMICO PARA O ESTUDO DA CIRCULAÇÃO DE ÁGUA NA ÁREA REFERENTE A REGIÃO COSTEIRA DA PROVÍNCIA DE CAUCAIA (BRASIL)

MARIO VULTAGGIO(\*)

(\*) Universidade de Nápoles "Parthenope" \_ departamento de ciências aplicadas

## Introdução

O modelo dinâmico desenvolvido pelos pesquisadores da Universidade de Nápoles Parthenope relacionados aos Departamentos de Ciências Ambientais (DiSam) e Ciências Aplicadas (DSA) da Faculdade de Ciências e Tecnologia é baseado no documento oficial intitulado:

***Projeto de proteção contra erosão e restauração da praia real do município de Caucaia*** apresentada por Domenico ACCETTA (Instituto Nacional de pesquisas Hidroviarias – INPH).

O objetivo do modelo dinâmico-numérico foi estudar os efeitos da introdução de quebra-mares ao longo da faixa costeira da região de Caucaia sobre a corrente costeira representada pela circulação geral da corrente equatorial ao longo das costas norte-setentrionais do Brasil (ramo representado pela *corrente atual da Guaiana*).

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

O levantamento foi feito através de modelagem numérica, introduzindo os efeitos de uma série de quebra-mares ao longo da faixa litorânea da província de Caucaia (Fortaleza - Brasil). A partir de uma pesquisa local, parece que nos últimos anos esta região foi atingida por uma forte erosão causada, provavelmente, pela recente construção da extensão do principal píer do porto de Mucuripe, ao sul de Caucaia.

## O modelo dinâmico

O *Princeton Ocean Model* (POM) foi usado para estudar a evolução da circulação na área afetada e a restauração do litoral, introduzindo 11 quebra-mares ao longo do litoral de Caucaia no modelo dinâmico. O modelo foi implementado em dois domínios aninhados e diferentes cenários foram simulados com e sem quebra-mares, como mostra o diagrama de blocos da figura 1.

Na primeira fase, a análise preliminar da propagação das ondas gravitacionais ao longo da costa foi realizada após a implementação hipotética do projeto. O modelo utilizado é o Princeton Ocean

Model (POM), um dos modelos mais difundidos para o estudo da circulação geral pela comunidade física oceanográfica. O modelo POM é um modelo tridimensional (3D) e foi adaptado para estudos de circulação costeira. Entre as características mais interessantes do POM está o "acompanhamento do terreno", que permite uma discretização vertical usando uma camada limite inferior realista (fundo do mar). Isto é muito importante nas águas costeiras e nos estuários sujeitos à ação gravitacional das forças de maré.

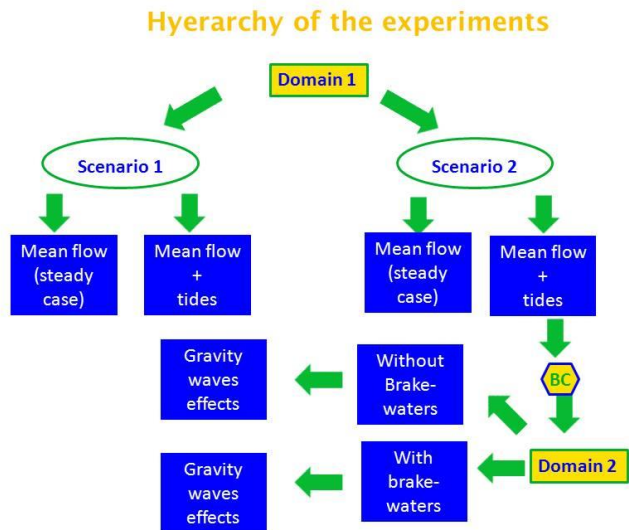


Figura 1 – diagrama de blocos de modelo dinâmico POM

**O modelo de equação**

Uma versão barotrópica do POM foi implementada para este estudo. As equações básicas usadas pelo modelo são:

$$\frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UV D}{\partial y} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ H^2 A_M \frac{\partial U}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ H A_M \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + (\tau_b - \tau_w)_x - \frac{gD}{\rho_0} \int_{-1}^0 \int_{\sigma} \left[ D \frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\partial D}{\partial x} \sigma' \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma} \right] d\sigma' d\sigma$$

$$\frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial UV D}{\partial x} - fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ H^2 A_M \frac{\partial V}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ H A_M \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + (\tau_b - \tau_w)_y - \frac{gD}{\rho_0} \int_{-1}^0 \int_{\sigma} \left[ D \frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\partial D}{\partial y} \sigma' \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma} \right] d\sigma' d\sigma$$

$$\frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0$$

Onde:

$$\sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta} \quad \text{que varia de } 0 \text{ em } z = e - 1 \text{ a } z = H$$

$$D = H + \eta \quad (\text{espessura total do mar})$$

$$U = \int_{-1}^0 u \, d\sigma \quad (\text{Velocidade integrada } u)$$

$$V = \int_{-1}^0 v \, d\sigma \quad (\text{velocidade integrada } v)$$

## Os domínios da topografia e da integração

A partir dos dados disponíveis sobre o perfil da costa e da batimetria, dois domínios diferentes foram reconstruídos:

- a) Domínio 1 (13 km x 6 km com resolução espacial horizontal de 50 m);
- b) Domínio 2 (9 km x 3 km com resolução de 12,5 m).

O domínio 1 foi usado para obter condições de contorno a serem impostas ao longo dos limites laterais do domínio 2.

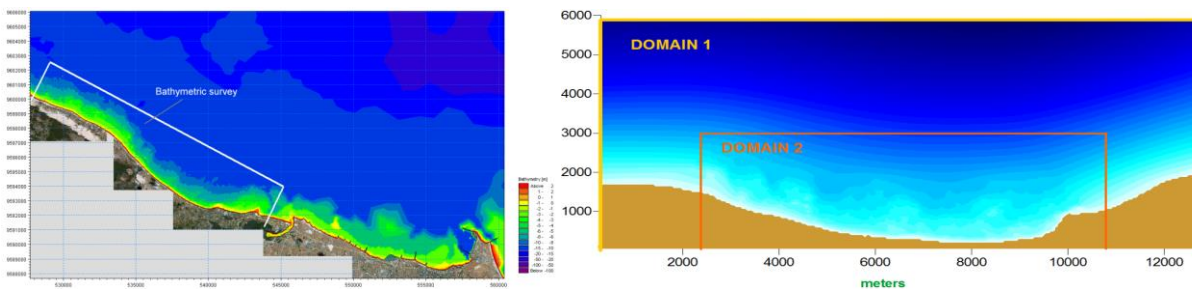


Figura 2 – Topografia e área de estudo batimetria

Desta forma, a área representada pelo domínio 2 é, exclusivamente, de um modo aninhados para o domínio 1; além disso, conforme exigido pelo projeto no domínio 2, os quebra-mares espaçados conforme necessário foram introduzidos (ver figura 3).

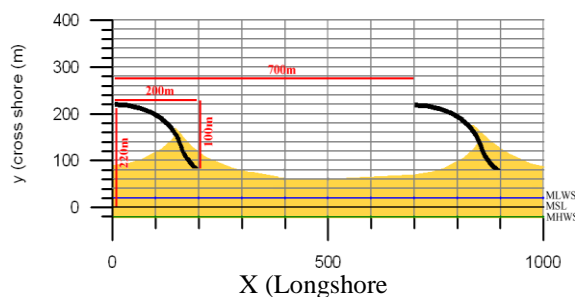


Figura 3 - Modelo de quebra-mares

## Simulação de circulação no domínio 1

As simulações no domínio 1 constituem o passo necessário para a implementação do modelo na área de interesse (domínio 2). Os resultados deste modelo são necessários para obter as seguintes informações:

1. Circulação média das correntes geradas pelos ventos predominantes na região de Caucaia;
2. Circulação das correntes de maré produzidas pela ação lunar (M2) da maré semidiurna;
3. Informações sobre as condições de limite a serem impostas ao domínio aninhado 2.

A figura 4 mostra a variação da circulação de água produzida pela construção do píer do Mucuripe no porto de Fortaleza.

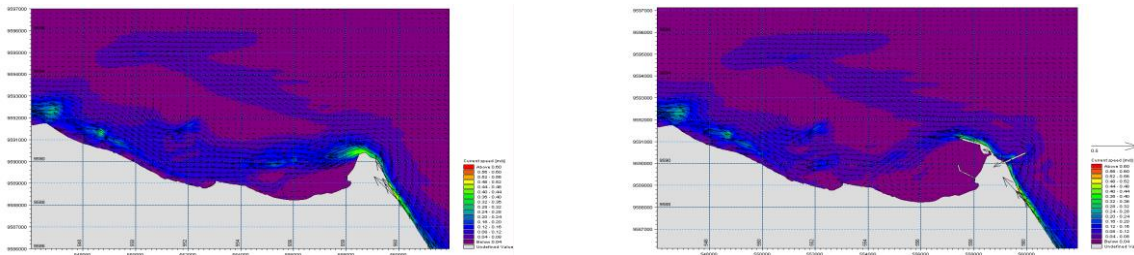


Figura 4 – modelo geral de circulação entre Fortaleza e a costa de Caucaia

Através da imposição de condições de contorno esses dois cenários foram reproduzidos como mostra a figura 4. É bem evidente como a circulação ao longo da costa de Caucaia mudou devido à construção do píer do Mucuripe.

Esses modelos foram obtidos simplesmente impondo um fluxo líquido de entrada no lado leste da mesma quantidade da vazão líquida no lado oeste. Além disso, essas duas simulações foram apenas uma abordagem preliminar para testar a implementação dos dados de entrada do modelo. Posteriormente, foi introduzida a harmônica semi-diurna lunar, principal componente característico da área em estudo.

De fato, a partir das gravações das marés no porto de Mucuripe, é evidente que a área de Caucaia é fortemente influenciada por uma maré semidiurna. Finalmente, a partir dos dados processados, em um ponto interno genérico do domínio, obteve-se a elevação da superfície do mar e da qual fica clara a ação do componente semi-diurno lunar M2.

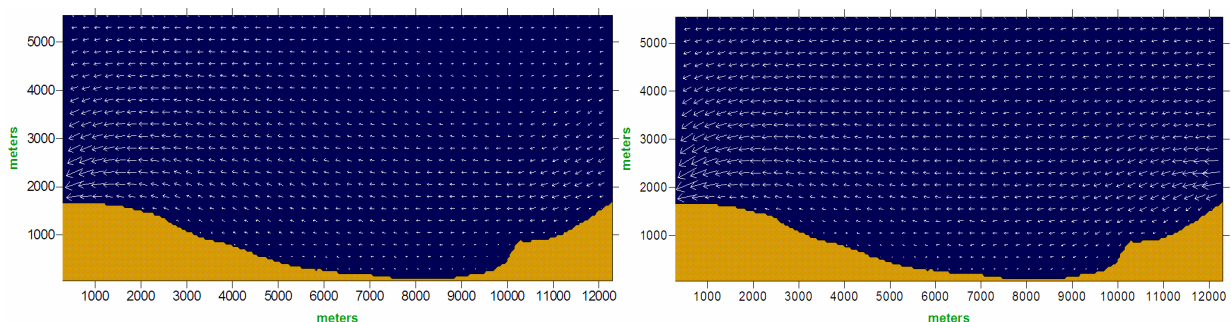


Figura 5 – evolução da circulação no domínio 1 instantaneamente T-0<sup>h</sup> e t-6<sup>h</sup>

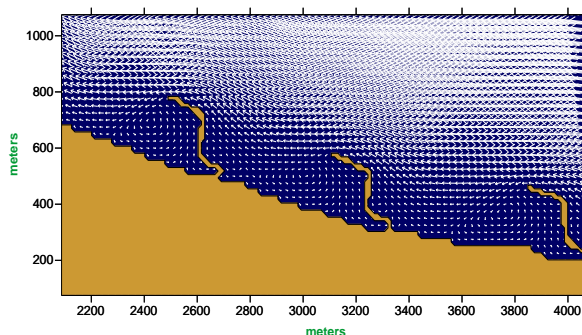
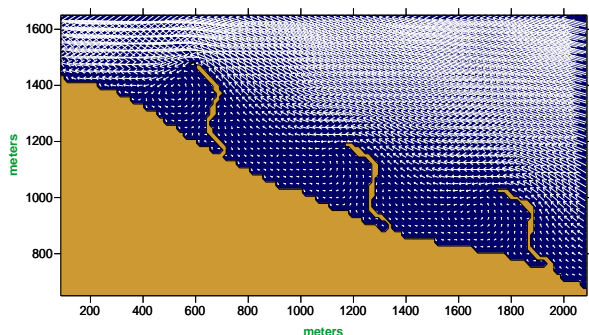
Devido à característica dos ventos constantes atuando na área (ventos alísios do ESE) e à presença da maré semidiurna, o modelo foi realizado por um período de 12 horas. As duas representações mostradas na Figura 5 estão relacionadas a dois instantes do período de integração (T = 12h).

## Simulação de circulação no domínio 2

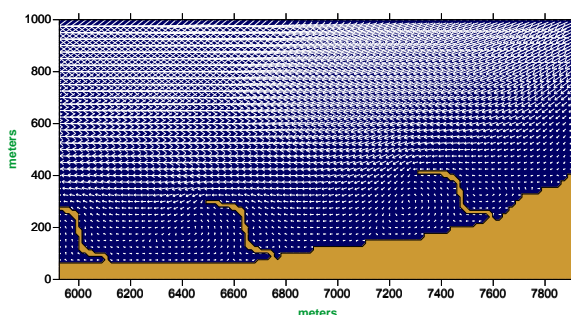
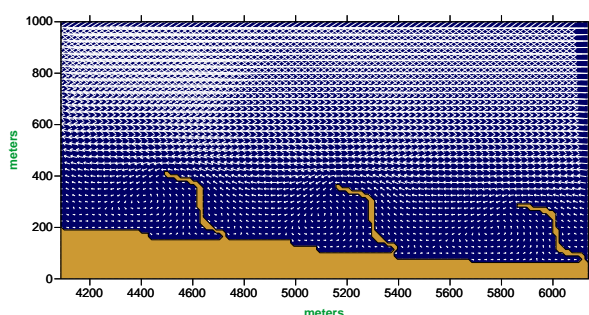
A simulação da circulação de água no domínio 2 representa o coração deste trabalho. As condições de contorno obtidas a partir dos resultados do domínio 1 foram usadas para impor condições de contorno no domínio 2. O estudo foi realizado de duas maneiras diferentes:

- circulação de água na ausência de quebra-mares
- circulação de água na presença de quebra-mares;
- circulação da água com quebra-mares e ação da harmônica maré principal m2.

O domínio 2, para melhor destacar as características da circulação dentro das áreas delimitadas pelos quebra-mares, foi dividido em 4 setores com numeração progressiva a partir do setor norte (Praia de Combuco)



Sector 1 sector 2



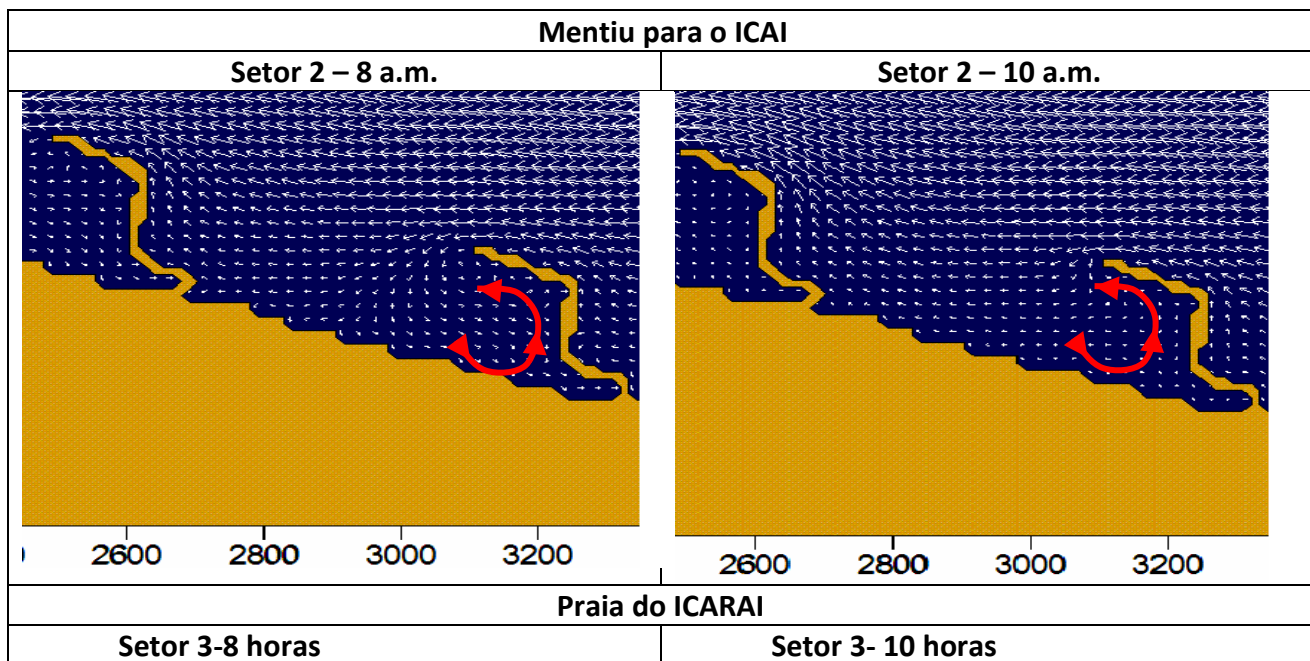
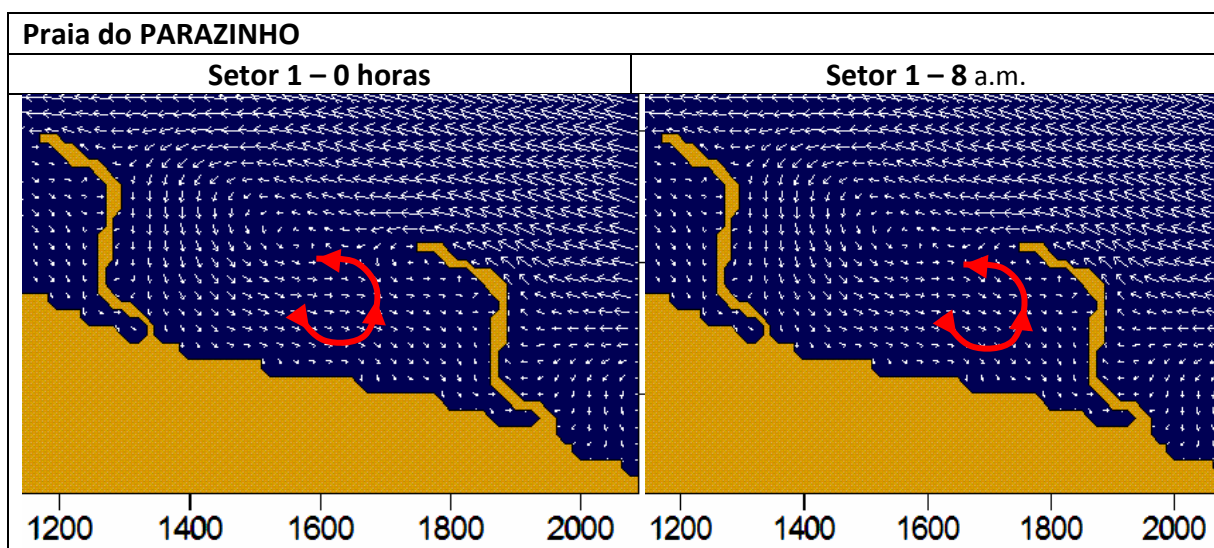
Sector 3 sector 4

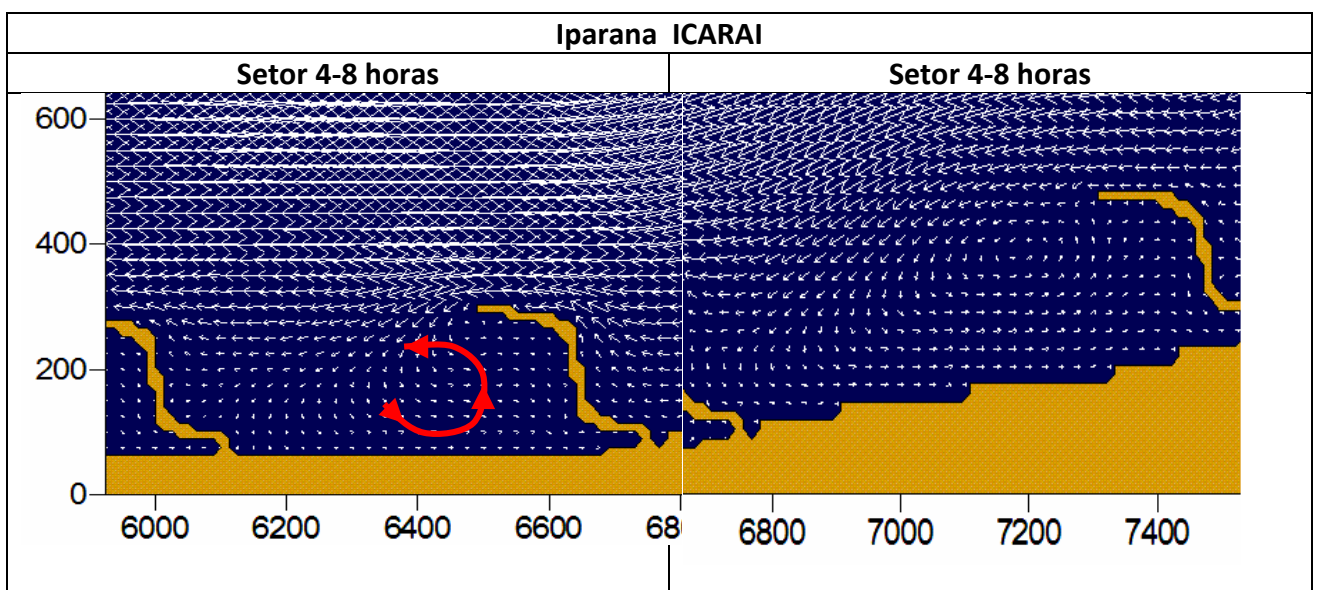
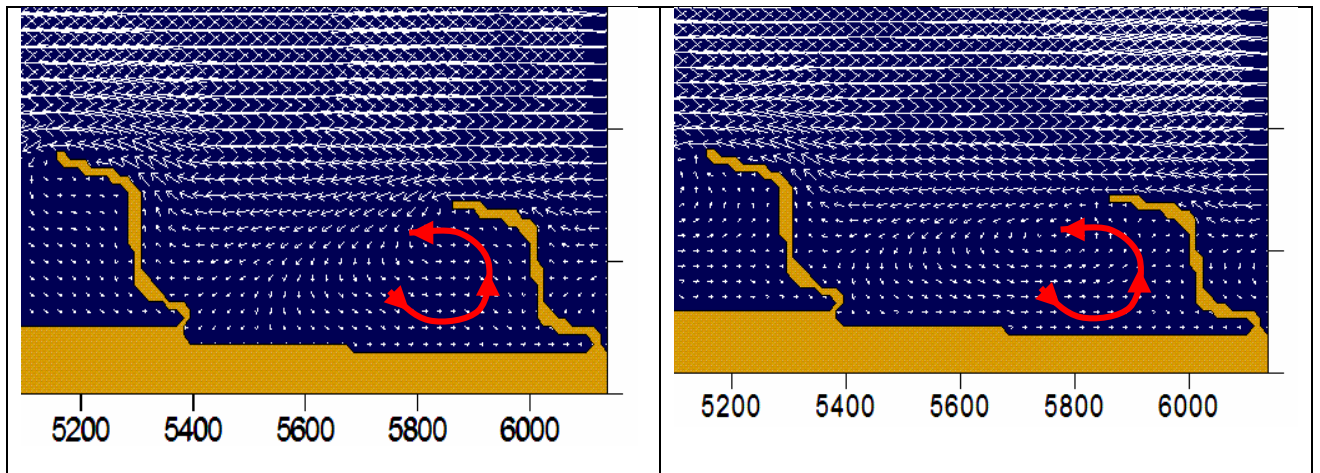
Figura 6 – exemplos de circulação nos 4 sectores de amostragem

Dos principais elaborados fica bem evidente a circulação rodopiante no interior das áreas costeiras delimitadas pelos quebra-mares.

As representações elaboradas a partir do norte (Praia de Combuco) mostram que os quebra-mares propostos influenciam substancialmente, também neste caso, a circulação geral de correntes próximas à costa de interesse; em particular, o padrão de circulação de água dentro das áreas

delimitadas por quebra-mar mostra que a configuração proposta é capaz de gerar velocidade e entre os quebra-mares de células vorticais a baixa velocidade, o que poderia muito provavelmente gerar um depósito sedimentar na área dentro dos próprios quebra-mares.





## Planos de ondas

Os planos de ondas são amplamente utilizados no projeto de estruturas portuárias, quebra-mares e estuários, pois fornecem a distribuição e / ou contração da energia gerada pelas ondas abaixo da costa e se dissipam ao longo das estruturas costeiras.

O grupo de estudo também estava interessado neste problema e simulou uma situação muito simplista, mas significativa, de como a batimetria pode distribuir ou concentrar frentes de onda próximas às praias.

Como primeira aplicação de um modelo de propagação de ondas, uma frente de onda foi considerada como entrada na direção NNE do domínio tomando dados estatísticos locais de ondas significativas, um fabricante de ondas  $T = 4$  s, de altura de poucos metros (2) e um período de integração de 3s.



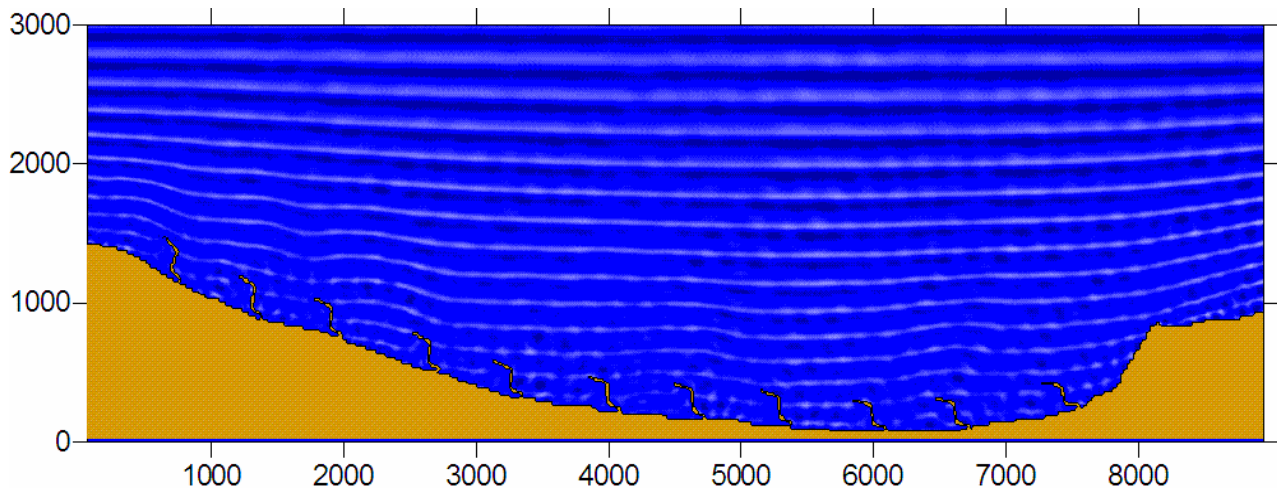


Figura 7 – exemplo de um plano de ondas na área de estudo com quebra-mares.

Das simulações elaboradas, não parece que ao longo da costa sejam gerados fogos de concentração de energia. Neste caso foi considerado um caso simplista com frente de onda entrando do norte; no entanto, é necessário que no futuro próximo uma frente de onda gerada pelo ESE predomine (entrada de frente de onda no ESE).

### **Conclusões e perspectivas futuras**

Os resultados mostram como a introdução de 11 quebra-mares pode influenciar a circulação geral ao longo da costa de Caucaia; em particular, deve ser enfatizado que tal configuração é potencialmente capaz de gerar células de recirculação (fracas) entre dois quebra-mares adjacentes, o que hipoteticamente deve impedir a perda de sedimentos da costa. Além disso, foi desenvolvido um modelo de refração de ondas de águas rasas que mostra a influência dos quebra-mares na propagação de ondas gravitacionais; no entanto, esses planos de ondas poderiam ser melhorados adotando métodos mais sofisticados, aplicando casos que correspondam a observações locais diretas.

### **Conclusões**

As seguintes considerações podem ser feitas sobre os resultados obtidos a partir deste primeiro levantamento sobre a evolução do modelo de circulação na presença de quebra-mares. Todos os dados obtidos, seja pelo processamento com dados de entrada, fornecidos pela literatura, ou pela introdução também do componente de maré, característico da área e representado nesta primeira fase pelo harmônico semidiurno lunar M2, fornecem um arcabouço que deve ser elaborado posteriormente com uma batimetria real e completa da área e com dados atuais de métricas registrados na área de interesse da investigação.

As barreiras de quebra-mar, introduzidas na área em estudo, permitem reduzir o transporte costeiro, delimitando o fluxo no interior das áreas delimitadas por duas barreiras adjacentes de

quebra-mar; o modelo elaborado de circulações de vórtices dentro de uma velocidade fraca que deveria cancelar o fenômeno da erosão e gerar uma nutrição das áreas estudadas pelo modelo..

Prof. Mario VULTAGGIO

St. George de Sannio

21 de junho de 2019