



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,  
ARQUITETURA E URBANISMO.**

**Caracterização hidrodinâmica da Baía e Estuário  
Santista utilizando a modelagem numérica.**

Camila Maria Mateus Alves de Souza

**Campinas - SP**

**2012**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO.**

**Camila Maria Mateus Alves de Souza**

**Caracterização hidrodinâmica da Baía e Estuário Santista  
utilizando a modelagem numérica.**

Dissertação apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos Energéticos e Ambientais.

**Orientador: Prof. Dr. Tiago Zenker Gireli**

**Campinas - SP**

**2012**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

So89c Souza, Camila Maria Mateus Alves de  
Caracterização hidrodinâmica da Baía e Estuário Santista  
utilizando a modelagem numérica / Camila Maria Mateus  
Alves de Souza. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Tiago Zenker Gireli.  
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e  
Urbanismo.

1. Modelagem. 2. Calibração. 3. Validação. I. Zenker  
Gireli, Tiago . II. Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III.  
Título.

Título em Inglês: Hydrodynamic characterization of Santos Bay and Estuary using  
numerical modeling

Palavras-chave em Inglês: Modeling, Calibration, Validation

Área de concentração: Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Geraldo de Freitas Maciel, Paulo Vatauvuk

Data da defesa: 30-03-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

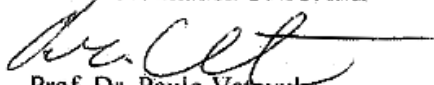
**CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DA BAÍA E ESTUÁRIO  
SANTISTA UTILIZANDO A MODELAGEM NUMÉRICA.**

**Camila Maria Mateus Alves de Souza**

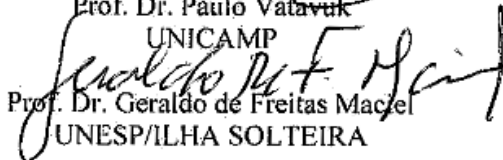
**Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**



Prof. Dr. Tiago Zenker Gireli  
Presidente e Orientador/UNICAMP



Prof. Dr. Paulo Vatauvak  
UNICAMP



Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel  
UNESP/ILHA SOLTEIRA

Campinas, 30 de março de 2012

## **Dedicatória**

A minha mãe Antonia, meu exemplo de vida, e a minha irmã Carol, quem tanto amo.

Ao meu pai Flavio Bueno Alves de Souza, in memoriam.

## **Agradecimento**

Meu agradecimento em especial para o Prof. Dr. Tiago Zenker Gireli pelo incansável apoio e orientação para a realização desse trabalho, e principalmente por todo o conhecimento que me transmitiu na área de Hidráulica Marítima.

Aos examinadores da banca de qualificação e defesa, Prof. Dr. Paulo Vatauvuk, Profa. Dra. Patricia Dalsoglio Garcia e Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel, pelas valiosas sugestões que me levaram a conclusão dessa dissertação.

À equipe do Danish Hydraulic Institute (DHI), pela concessão da licença do programa Mike 21, sem a qual seria impossível a realização desse trabalho.

À minha mãe Antonia Aparecida Mateus Alves de Souza e minha irmã Ana Carolina Mateus Alves de Souza, que sempre me apoiaram, principalmente nos momentos difíceis, para que eu pudesse concluir meu mestrado. A todos os meus familiares que acompanharam meus esforços e estiveram presentes em minha vida.

Aos meus amigos Maikon Bueno, Aldenir Antunes e Rayssa Ávila do Valle pelo incentivo e apoio, e principalmente pela nossa amizade.

A todos aqueles que direta e indiretamente contribuíram para a realização dessa dissertação.

Por fim, porém não menos importante, a Deus, sempre presente em minha vida.

## RESUMO

As obras costeiras são de grande porte e custos associados já que são inseridas em um meio complexo que sofre alterações de diversos fatores, sejam eles naturais ou antrópicos. Projetar estes tipos de estruturas baseando-se apenas em conhecimentos teóricos não garante sua máxima otimização e minimização de custos. Para isso, utilizam-se inúmeras ferramentas, como a modelagem numérica, que permite analisar os impactos gerados pela interação entre a obra e o meio ambiente.

Nesse estudo, foi realizada uma caracterização hidrodinâmica da Baía e Estuário Santista utilizando a modelagem numérica através do software MIKE 21, onde se criou um modelo que representasse o canal do porto de Santos.

Na etapa de calibração, a modificação dos coeficientes de Manning conduziu o modelo para a convergência do processo.

Na etapa da validação, os valores dos estudos foram coerentes com os extraídos do protótipo, levando-se em consideração as simplificações adotadas para este estudo e o emprego de um modelo bidimensional.

Por fim, pode-se concluir que a caracterização da região foi efetuada com sucesso e que o modelo desenvolvido já se configura em uma ferramenta apta a ser empregada para simular os impactos que as mudanças climáticas e a ação antrópica poderiam trazer para hidrodinâmica do Estuário Santista.

Palavras-chaves: Modelagem Numérica, calibração, validação.

## **ABSTRACT**

The coastal works are associated to large costs as they are inserted in a complex environment that changes on several factors, whether natural or anthropogenic. Designing these types of structures based only on theoretical knowledge does not guarantee its maximum optimization and cost minimization. For this, various tools are used, such as numerical modeling, that can be analyzed the impacts generated by the interaction between the work and environment.

In this study, a hydrodynamic characterization are performed of Santos Bay and Estuary using numerical modeling software MIKE 21, which created a model that represents the channel of the Port of Santos.

In the calibration step, modifying the Manning coefficients of the model led to the convergence of the process.

In the validation step, the values of the studies were consistent with those extracted from the prototype, taking into account the simplifications adopted for this study and the use of a two-dimensional model.

Finally, can be concluded that the characterization of the region was carried out successfully and the model developed has already been configured in a suitable tool to be used to simulate the impacts of climate change and human action could bring to Santos Estuary hydrodynamics.

**Keywords:** Numerical Modeling, calibration, validation.



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DOS MUNICÍPIOS DA BAIXADA SANTISTA NO ESTADO DE SÃO PAULO.<br>.....   | 18 |
| FIGURA 2 - LOCALIZAÇÃO DOS TERMINAIS DO PORTO DE SANTOS SITUADO ENTRE AS DUAS<br>MARGENS DO ESTUÁRIO SANTISTA. ....  | 23 |
| FIGURA 3 - ÁREAS DE INFLUÊNCIA DO PORTO DE SANTOS, SUAS VIAS DE CONEXÃO E PRINCIPAIS<br>PRODUTOS EXPORTADOS. ....  | 24 |
| FIGURA 4 - INTERMODALIDADE DO PORTO DE SANTOS .....  | 25 |
| FIGURA 5 - LOCALIZAÇÃO DOS PRODUTOS NOS TERMINAIS DO PORTO DE SANTOS.....  | 26 |
| FIGURA 6 - PROJETOS ESTRATÉGICOS DO PORTO DE SANTOS. ....  | 27 |
| FIGURA 7 – LOCALIZAÇÃO DOS TRECHOS DO CANAL DE NAVEGAÇÃO DO PORTO DE SANTOS. .   | 28 |
| FIGURA 8 - LOCALIZAÇÃO DAS ROCHAS TEFFÉ E ITAPEMA.....   | 30 |
| FIGURA 9 – SUPER PORTO BARNABÉ BAGRES. ....  | 31 |
| FIGURA 10 – COMBINAÇÃO DAS FORÇAS QUE ORIGINAM AS MARÉS. ....  | 35 |
| FIGURA 11 – MARÉS DE SIZÍGIA E QUADRATURA. ....  | 36 |
| FIGURA 12 - MAREGRAMA PREVISTO PARA O DIA 20/05/1947 NO MARÉGRAFO DE TORRE<br>GRANDE, PORTO DE SANTOS (SP). ....   | 37 |
| FIGURA 13 - PREVISÃO DE MARÉ PARA SANTOS SEGUNDO PROGRAMA DESENVOLVIDO POR<br>FRANCO (1988). ....  | 37 |
| FIGURA 14- LINHA DE TERRA E DELIMITAÇÕES DA REGIÃO A SER SIMULADA.....   | 53 |
| FIGURA 15 - FECHAMENTO DAS ILHAS E ÁREAS PARA SER GERADA A MALHA FLEXÍVEL DE<br>DIFERENTES DENSIDADES.....   | 54 |
| FIGURA 16 - DELIMITAÇÃO DAS MÁXIMAS ÁREAS DA TRIANGULAÇÃO DA MALHA FLEXÍVEL NAS<br>ÁREAS DA BAÍA E DO CANAL DO ESTUÁRIO SANTISTA. ....   | 55 |
| FIGURA 17 - MALHA FLEXÍVEL GERADA A PARTIR DOS PONTOS DE BATIMETRIA REDISTRIBUÍDOS E<br>DOS LIMITES DE ÁREA DE TRIANGULAÇÃO, NÚMERO DE NÓS E MÍNIMO ÂNGULO DO<br>TRIÂNGULO. .... | 56 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 18 - PONTOS IMPORTADOS DA BATIMETRIA DA REGIÃO E INTERPOLADOS COM A MALHA FLEXÍVEL GERADA. A PALHETA INFERIOR REPRESENTA AS PROFUNDIDADES DOS PONTOS E A SUPERIOR A PROFUNDIDADE DA INTERPOLAÇÃO DA MALHA COM OS PONTOS. .... | 57 |
| FIGURA 19 - ARQUIVO DE BATIMETRIA NO <i>FORMATO MESH</i> .....   | 57 |
| FIGURA 20 - ENCONTRO DAS MARÉS QUE SE PROPAGAM PELO ESTUÁRIO DE SANTOS E PELO CANAL DA BERTIOGA. ....  | 59 |
| FIGURA 21 – LOCALIZAÇÃO DAS LINHAS DE CONTORNO E VAZÕES DOS AFLUENTES.....   | 61 |
| FIGURA 22 - MARÉ SENOIDAL GERADA A PARTIR DOS DADOS DE AMPLITUDE DE MARÉ PARA O POSTO DE ILHA DAS PALMAS .....   | 63 |
| FIGURA 23 - DADOS DE ENTRADA NO ARQUIVO DE SIMULAÇÃO .....   | 64 |
| FIGURA 24 - CÓDIGOS DA LINHAS DE FECHAMENTO DO ARQUIVO DE BATIMETRIA.O CÓDIGO 2 REPRESENTA A ENTRADA DE MARÉ E OS DEMAIS OS RIOS DO ESTUÁRIO. ....   | 65 |
| FIGURA 25 - PONTOS DOS ARQUIVOS DE SAÍDA E DOS DADOS DE MARÉGRAFOS NOS ESTUDOS DE SONDOTÉCNICA (1977). ....  | 69 |
| FIGURA 26 - MALHA FLEXÍVEL GERADA E ÁREAS DE DELIMITAÇÃO PARA AS DIFERENTES TRIANGULAÇÕES. ....  | 72 |
| FIGURA 27 – ARQUIVO DE BATIMETRIA UTILIZADO NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO.....   | 72 |
| FIGURA 28 - SUPERPOSIÇÃO DAS MARÉS PARA SANTOS.....  | 73 |
| FIGURA 29 - OSCILAÇÃO DOS NÍVEIS MÉDIOS LOCAIS AO LONGO DO ESTUÁRIO NO MÊS DE AGOSTO DE 1976. ....   | 74 |
| FIGURA 30 - MARÉ GERADA PELAS CONSTANTES HARMÔNICAS DA ILHA DA MOELA. ....   | 77 |
| FIGURA 31 - COEFICIENTES DE MANNING ( $M^{1/3}/S$ ) UTILIZADOS NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO.78  |    |
| FIGURA 32 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO DO PROCESSO DE VALIDAÇÃO. ....   | 81 |
| FIGURA 33 - MARÉ GERADA PELAS CONSTANTES HARMÔNICAS PARA O PONTO SE-1. ELEVÇÕES (M) X TEMPO (H).....   | 82 |
| FIGURA 34 - MARÉ GERADA PELAS CONSTANTES HARMÔNICAS PARA O PONTO SE-2. ELEVÇÕES (M) X TEMPO (H).....   | 82 |
| FIGURA 35 - MARÉ GERADA PELAS CONSTANTES HARMÔNICAS PARA O PONTO SE-3. ELEVÇÕES (M) X TEMPO (H).....   | 83 |
| FIGURA 36 - MARÉ GERADA PELAS CONSTANTES HARMÔNICAS PARA O PONTO SE-4. ELEVÇÕES (M) X TEMPO (H).....   | 83 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 37 - MARÉ GERADA PELAS CONSTANTES HARMÔNICAS PARA O PONTO SE-5.<br>ELEVAÇÕES (M) X TEMPO (H).....   | 84 |
| FIGURA 38 - MARÉ GERADA PELAS CONSTANTES HARMÔNICAS PARA O PONTO SE-6.<br>ELEVAÇÕES (M) X TEMPO (H).....   | 84 |
| FIGURA 39 - FOTO DO PASSO DE TEMPO 69 DO TOTAL DE 288 DO ARQUIVO DE VÍDEO GERADO<br>DE TODA A ÁREA, REPRESENTANDO A ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE.....  | 86 |
| FIGURA 40 - GRÁFICOS DAS ELEVAÇÕES DE NÍVEL DURANTE TODO O PERÍODO DE MARÉ DE 4<br>DIAS. DESTAQUE PARA ONDA DE MARÉ DO DIA 25/08/1976.....   | 86 |
| FIGURA 41 - DIFERENÇAS DE FASE DE MARÉ ENTRE OS POSTOS E O MARÉGRAFO DA ILHA DAS<br>PALMAS MEDIDO ENTRE AS DIFERENÇAS DAS MÁXIMAS AMPLITUDES. ....   | 87 |
| FIGURA 42 - LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS E DO CAMINHAMENTO DAS MEDIÇÕES. LINHA VERDE<br>(ILHA DAS PALMAS ATÉ COSIPA), LINHA LARANJA (TORRE GRANDE ATÉ BASE AÉREA), E<br>LINHA ROXA (ILHA DAS PALMAS ATÉ CASQUEIRO). .... | 89 |
| FIGURA 43 - CRITÉRIO DE MEDIÇÃO DAS DIFERENÇAS DE FASE ENTRE OS NÍVEIS DE PREAMAR DE<br>POSTOS CONSECUTIVOS. ....  | 90 |
| FIGURA 44 - ELEVAÇÕES DO NÍVEL D'ÁGUA (M) NO PERÍODO DE TEMPO (H), PARA AS MARÉS NO<br>PONTO SE-1, NO DIA 17/03/76.....  | 95 |
| FIGURA 45 - VELOCIDADES (M/S) NO PERÍODO DE TEMPO (H), PARA O PONTO SE-1, NO DIA<br>17/03/76.....  | 95 |
| FIGURA 46 - ELEVAÇÕES DO NÍVEL D'ÁGUA (M) NO PERÍODO DE TEMPO (H), PARA AS MARÉS NO<br>PONTO SE-2, NO DIA 16/02/76.....  | 96 |
| FIGURA 47 - VELOCIDADES (M/S) NO PERÍODO DE TEMPO (H), PARA O PONTO SE-2, NO DIA<br>16/02/76.....  | 96 |
| FIGURA 48 - ELEVAÇÕES DO NÍVEL D'ÁGUA (M) NO PERÍODO DE TEMPO (H), PARA AS MARÉS NO<br>PONTO SE-3, NO DIA 30/03/76.....  | 97 |
| FIGURA 49 - VELOCIDADES (M/S) NO PERÍODO DE TEMPO (H), PARA O PONTO SE-3, NO DIA<br>30/03/76.....  | 97 |
| FIGURA 50 - ELEVAÇÕES DO NÍVEL D'ÁGUA (M) NO PERÍODO DE TEMPO (H), PARA AS MARÉS NO<br>PONTO SE-4, NO DIA 04/12/75.....  | 98 |
| FIGURA 51 - VELOCIDADES (M/S) NO PERÍODO DE TEMPO (H), PARA O PONTO SE-4, NO DIA<br>04/12/75.....  | 98 |

|  |     |
|--|-----|
| FIGURA 52 - ELEVAÇÕES DO NÍVEL D'ÁGUA (M) NO PERÍODO DE TEMPO (H), PARA AS MARÉS NO PONTO SE-5, NO DIA 28/02/76..... | 99  |
| FIGURA 53 - VELOCIDADES (M/S) NO PERÍODO DE TEMPO (H), PARA O PONTO SE-5, NO DIA 28/02/76.....                       | 99  |
| FIGURA 54 - ELEVAÇÕES DO NÍVEL D'ÁGUA (M) NO PERÍODO DE TEMPO (H), PARA AS MARÉS NO PONTO SE-6, NO DIA 15/03/76..... | 100 |
| FIGURA 55 - VELOCIDADES (M/S) NO PERÍODO DE TEMPO (H), PARA O PONTO SE-6, NO DIA 15/03/76.....                       | 100 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| TABELA 1 - CALADOS MÁXIMOS DE OPERAÇÃO NA PREAMAR COM ALTURA DE MARÉ .....  | 28 |
| TABELA 2 – PREVISÕES DE MARÉ PARA O PORTO DE SANTOS EM ABRIL DE 2012. ....  | 38 |
| TABELA 3 - DECLIVIDADES NATURAIS DAS ZONAS DE PRAIA. ....   | 52 |
| TABELA 4 - VALORES MÉDIOS MENS AIS DE DESCARGAS LÍQUIDAS – $QL$ ( $m^3/s$ ), DAS DESCARGAS<br>SÓLIDAS EM SUSPENSÃO – $QS$ (T/H) E DOS VOLUMES SÓLIDOS EM SUSPENSÃO – $Vs$ (T).<br>INCLUI AS DESCARGAS TURBINADAS (*)..... | 60 |
| TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS DOS DEFLÚVIOS MÉDIOS DOS CURSOS D'ÁGUA AFLUENTES AO<br>ESTUÁRIO DE SÃO VICENTE.....  | 61 |
| TABELA 6 - AMPLITUDES DE MARÉ PARA O POSTO DE ILHA DAS PALMAS.....  | 63 |
| TABELA 7 – AMPLITUDES – $H$ (M), E DIFERENÇAS DE FASE – $D$ (MIN) AO LONGO DO ESTUÁRIO. ....  | 69 |
| TABELA 8 - ÁREAS MÁXIMAS UTILIZADAS NOS TRECHOS DA ÁREA DE SIMULAÇÃO. ....  | 71 |
| TABELA 9 - CONSTANTES HARMÔNICAS PARA O POSTO DO TRAPICHO, NA ILHA DA MOELA.....  | 75 |
| TABELA 10 - COMPONENTES HARMÔNICAS UTILIZADAS PARA A GERAÇÃO DA MARÉ EM SANTOS.<br>.....  | 76 |
| TABELA 11 - DISTÂNCIAS E ÁREAS UTILIZADAS PARA A VERIFICAÇÃO DA SENSIBILIDADE DO MODELO<br>EM RELAÇÃO A MALHA FLEXÍVEL. ....  | 79 |
| TABELA 12 - PONTOS DE MEDIÇÃO NO PROCESSO DE VALIDAÇÃO. AS COORDENADAS X E Y<br>REPRESENTAM A LATITUDE E A LONGITUDE EM COORDENADAS UTM, E A COORDENADA Z<br>REPRESENTA A PROFUNDIDADE. ....                              | 81 |
| TABELA 13 – DIFERENÇA TEMPORAL ENTRE OS POSTOS DE MEDIÇÃO NO SENTIDO ILHA DAS<br>PALMAS ATÉ COSIPA EM MINUTOS.....  | 88 |
| TABELA 14 – DIFERENÇA TEMPORAL ENTRE OS POSTOS DE MEDIÇÃO NO SENTIDO TORRE<br>GRANDE ATÉ BASE AÉREA EM MINUTOS. ....  | 88 |
| TABELA 15 – DIFERENÇA TEMPORAL ENTRE OS POSTOS DE MEDIÇÃO NO SENTIDO ILHA DAS<br>PALMAS ATÉ CASQUEIRO EM MINUTOS. ....  | 88 |
| TABELA 16 – RESULTADOS DE DIFERENÇAS DE FASE ( $D$ ), NAS SIMULAÇÕES AJUSTADAS PELO<br>COEFICIENTE DE MANNING ( $M$ ). ....   | 91 |

|   |     |
|---|-----|
| TABELA 17 - RESULTADOS DE DIFERENÇAS DE FASE (D), NAS SIMULAÇÕES AJUSTADAS PELO COEFICIENTE DE MANNING (M) E PELAS MODIFICAÇÕES NA BATIMETRIA E NA MALHA FLEXÍVEL. O RESULTADO D(MIN)* REFERE-SE A MEDIÇÃO DE DIFERENÇA DE FASE EM RELAÇÃO AS MEIAS MARÉS DE ENCHENTE. .... | 92  |
| TABELA 18 - RESULTADOS DAS DIFERENÇAS DE FASE (D) ENTRE OS POSTOS ATRAVÉS DA MODIFICAÇÃO DA DENSIDADE DA MALHA FLEXÍVEL. ....   | 93  |
| TABELA 19 - AMPLITUDES DE MARÉ MEDIDAS EM CAMPO E GERADAS PELAS CONSTANTES HARMÔNICAS NO PROGRAMA MIKE 21. ....   | 103 |

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| RESUMO.....  | 6  |
| ABSTRACT .....                                     | 7  |
| LISTA DE FIGURAS .....                             | 8  |
| LISTA DE TABELAS .....                             | 12 |
| <br>   |    |
| 1 - INTRODUÇÃO .....                               | 17 |
| 2 - OBJETIVO .....                                 | 21 |
| 3 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....          | 23 |
| 4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....                     | 33 |
| 4.1 - VENTOS E ONDAS.....                          | 33 |
| 4.2 - MARÉS E CORRENTES .....                      | 34 |
| 4.3 - TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....               | 42 |
| 5 - PROGRAMA DE MODELAGEM NUMÉRICA MIKE 21 .....   | 43 |
| 5.1 – VARIAÇÕES DO FLUXO E DO NÍVEL D'ÁGUA .....   | 44 |
| 5.2 – CRITÉRIO DE ESTABILIDADE – CONDIÇÃO CFL..... | 45 |
| 5.3 – COEFICIENTE DE MANNING .....                 | 46 |
| 6 – ESTADO DA ARTE .....                           | 47 |
| 7 - METODOLOGIA .....                              | 49 |
| 8 - BASE DE DADOS.....                             | 51 |
| 8.1 – PRÉ-PROCESSAMENTO .....                      | 51 |
| 8.1.1 – Dados batimétricos .....                   | 52 |
| 8.1.2 – Condições de contorno .....                | 58 |
| 8.1.2.1 – Descargas líquidas dos rios.....         | 58 |

|   |     |
|---|-----|
| 8.1.2.2 – Maré .....  | 62  |
| 8.1.3 – Parâmetros de entrada no arquivo de simulação no programa Mike 21 .....     | 64  |
| 8.2 – CALIBRAÇÃO.....   | 70  |
| 8.2.1 – Dados batimétricos .....  | 70  |
| 8.2.2 – Maré.....   | 73  |
| 8.2.3 – Coeficiente de Manning .....  | 77  |
| 8.2.4 – Parâmetros de entrada no arquivo de simulação.....                          | 78  |
| 8.2.5 – Análise da sensibilidade do modelo pela modificação da malha flexível ..... | 79  |
| 8.3 – VALIDAÇÃO.....  | 80  |
| 9 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES .....   | 85  |
| 9.1 – PRÉ-PROCESSAMENTO .....   | 85  |
| 9.2 – CALIBRAÇÃO.....   | 89  |
| 9.3 – VALIDAÇÃO.....  | 93  |
| 10 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....   | 101 |
| 10.1 – BASE DE DADOS .....  | 101 |
| 10.2 – PRÉ-PROCESSAMENTO .....  | 102 |
| 10.3 – CALIBRAÇÃO.....  | 103 |
| 10.4 – VALIDAÇÃO.....   | 107 |
| 11 – CONCLUSÕES .....   | 113 |
| 12 – RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....                                     | 115 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 117 |





## 1 - INTRODUÇÃO

Segundo os registros dos marégrafos nos últimos anos, foi observado um importante incremento do nível do mar, apontando que a intensificação do efeito estufa tem alterado de forma significativa o clima do planeta; e contribuindo para uma provável inundação das regiões urbanas costeiras e os países insulares (FCTH, 2005).

Se confirmadas as projeções, os danos causados pela elevação do nível do mar nessas regiões podem ser irreversíveis, porém podem ser mitigados através de obras e investimentos necessários para conter todas as mudanças esperadas.

Assim, surge a necessidade de criar ferramentas para poder avaliar essas alterações em determinada região; assim como as alterações antrópicas através da construção e melhorias das obras costeiras. No caso deste estudo, visam-se os impactos causados no Estuário Santista; mas precisamente no Porto de Santos.

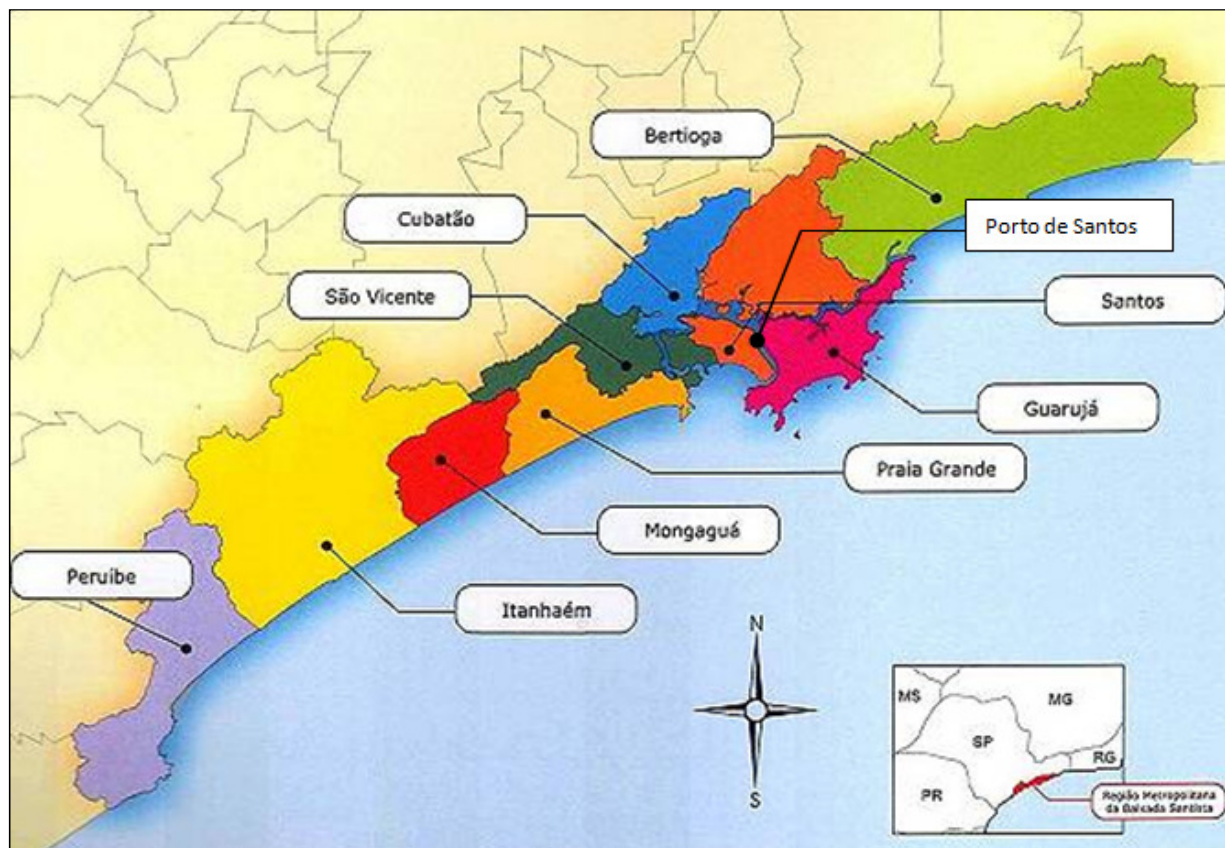
A Baixada Santista, que abrange os municípios de Bertioga, Cubatão, Guarujá, Santos, São Vicente, Praia Grande, Mongaguá, Itanhaém e Peruíbe; é integrante da Bacia Hidrográfica da Baixada Santista, cuja área corresponde à Ilha de São Vicente, ao Sistema estuarino Santista e à Baía de Santos; e está representada na Figura 1.

O Porto de Santos operou, em 2011, mais de 97 milhões de toneladas de carga, totalizando 118,2 bilhões de dólares correspondentes a 24,5% da Balança Comercial Brasileira (CODESP, 2012).

Com os investimentos e logística necessários, Santos pode garantir a posição de hub-port (porto concentrador) para a região sudeste do Brasil e todo o cone sul. Atualmente o porto conta com diversas obras de melhoria e expansão, que permitirão ao porto dobrar sua capacidade de funcionamento.

As obras costeiras e portuárias são importantes para o desenvolvimento econômico e turístico das cidades litorâneas; porém são de elevado custo associado, já que são inseridas em um sistema complexo, de constantes mudanças. Uma falha no projeto pode ocasionar desde a perda dos investimentos com a obra, altos custos de

manutenção, até o gasto de quantias muito superiores na minimização de impactos causados pela modificação do equilíbrio ambiental da região.



Cubatão, 2006 – Modificada.

Figura 1 - Localização dos municípios da Baixada Santista no Estado de São Paulo.

Projetar estes tipos de estruturas baseando-se apenas em conhecimentos teóricos ou projetos anteriores, não é suficiente para garantir o sucesso da obra; assim, algumas obras contemplam modelos físicos ou matemáticos; ou ambos.

Um modelo físico, em escala reduzida, reproduz a provável interação da obra com o ambiente, afim de que se possa maximizar o desempenho da obra e minimizar seu custo. O modelo físico é criado de forma a reproduzir, com a máxima precisão, as condições naturais do ambiente onde a obra é inserida; sendo em muitos casos, simulada também a sua fase de construção. Esse tipo de modelo em geral apresenta bons resultados, porém, para que possa ser representado de maneira satisfatória,

geralmente necessita grandes áreas para construção do mesmo, além da dificuldade de se reproduzir em escala reduzida, todos os efeitos significativos.

Outra alternativa para poder analisar o provável comportamento da obra é realizar uma modelagem matemática ou numérica. O modelo reproduzido por diferentes softwares é de grande complexidade; já que nem todos os fenômenos são bem reproduzidos por equações e métodos existentes. Porém, devido ao avanço na tecnologia, a modelagem matemática tornou-se uma alternativa atraente e oportuna para avaliação de impactos. Se comparado ao modelo físico, pode melhor representar as modificações no local; já que o modelo físico possui um custo associado à reprodução de novos cenários, embora apresente resultados mais satisfatórios. Os modelos matemáticos estão cada vez mais sendo aperfeiçoados; e os congressos internacionais apresentam inúmeros programas que tentam reduzir as simplificações e as incertezas.

A melhor condição de projeto seria, se possível, utilizar ambas as modelagens, física e numérica, de forma que cada uma complemente a outra, a fim de melhorar as previsões e minimizar os impactos.

Nesse estudo, será realizada uma caracterização hidrodinâmica da Baía e Estuário Santista, utilizando a modelagem numérica através do software MIKE 21 do Danish Hydraulic Institute; de forma a representar os processos hidrodinâmicos que afetam o estuário, e consequentemente o Porto de Santos.

Com o modelo calibrado e validado, poderá ser avaliada a influência das mudanças climáticas, como elevação do nível médio, redução da amplitude de maré, entre outras. Poderá também ser avaliada a influência das ações antrópicas, como alargamento e aprofundamento do canal; modificação da geometria das margens com a execução de dragagens e aterros no interior do estuário; aumento na circulação de correntes da região, que interferem sobre o transporte de sedimentos e a intrusão salina. Estes estudos poderão fornecer dados para um melhor funcionamento do Porto, e serão avaliados em estudos futuros, não estando contemplados nessa dissertação.



## **2 - OBJETIVO**

Essa pesquisa tem como objetivo principal realizar uma caracterização hidrodinâmica da Baía e Estuário Santista, calibrada e validada, de maneira a representar os efeitos decorrentes no Estuário, devido a ação da maré.

A caracterização será realizada utilizando o software Mike 21, do Danish Hydraulic Institute - DHI, que é um software de modelagem numérica e formulação determinada, permitindo, através da entrada de dados, e da adaptação de alguns parâmetros, caracterizar uma área de interesse. O modelo permite que sejam simulados diversos cenários obtendo diversos dados que podem ser comparados com dados de campo, ou ainda; cenários inexistentes e previsões de impactos.

O modelo será calibrado através de dados da propagação de maré, e validado com base nos dados compilados de medição de velocidades e correntes, quando do estudo da Sondotécnica (1977), na região do estuário santista.



### 3 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Porto de Santos está localizado entre as duas margens do estuário de Santos e possui 13km de cais, com 62 berços de atracação em uma área total de 7,8 milhões de m<sup>2</sup>, como mostrado na Figura 2 (CODESP, 2010).



Figura 2 - Localização dos terminais do Porto de Santos situado entre as duas margens do estuário Santista.

O porto foi inaugurado em 1892, e desde então, se encontra em contínuo processo de expansão. Em 1980, passou a ser administrado pela Companhia Docas do Estado de S. Paulo - CODESP, empresa de economia mista, de capital majoritário da União (CODESP, 2008).

Sua movimentação já superou mais de 1(um) bilhão de toneladas de cargas diversas, sendo em 2011; o açúcar de cana bruto, o café em grãos e a soja; as



mercadorias mais exportadas quanto ao valor. Nesse mesmo período, os destinos preferenciais dos produtos exportados embarcados por Santos, foram a China, os Países Baixos e Estados Unidos. (CODESP, 2012).

Santos tem grande influência nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás e o Distrito Federal, que somados representam 75 milhões de pessoas, e cerca de 67% do PIB nacional. Estes estados influenciam em 56% em valores da Balança Comercial Brasileira, e a proximidade e conectividade destes estados como o porto, é determinante para que Santos seja o porto concentrador do Brasil. Na Figura 3 se encontram os principais pólos industriais, e as áreas de produção dos principais produtos exportados pelo porto; além de suas vias de acesso.



Fonte: CODESP, 2008.

Figura 3 - Áreas de influência do Porto de Santos, suas vias de conexão e principais produtos exportados.

A hidrovía Tietê-Paraná está conectada com uma moderna malha ferroviária e rodoviária. O porto de Santos dista 65 km de São Paulo, a maior cidade brasileira; e além de ser servido por um grande complexo de transporte; inclui dois aeroportos internacionais num raio de 100 km, complementando sua intermodalidade; conforme Figura 4 (CODESP, 2008). O Porto de Santos conta também com a dutovia Transpetro.



Figura 4 - Intermodalidade do Porto de Santos

As principais rodovias que interligam o porto são:

- Sistema Anchieta-Imigrantes (ECOVIAS);
- Rodovia Cônego Domênico Rangoni (Piaçaguera-Guarujá);
- BR-101 - Rio / Santos;
- SP-55 - Rod. Padre Manoel da Nóbrega.

As ferrovias que estão conectadas diretamente com as instalações do Porto de Santos são:

- M.R.S. Logística S/A (MRS);
- Ferrovia Centro Atlântica (FCA);
- América Latina Logística (ALL).

Entre os aeroportos se destacam:

- Aeroporto Internacional de Guarulhos
- Congonhas (São Paulo)
- Viracopos (Campinas)
- Aeroporto local – base aérea de Santos – que deverá atender a demanda do segmento de serviços da cadeia de Gás e Petróleo, com determinante participação na Unidade de Operações da Bacia de Santos da Petrobrás (UOBS), segundo CODESP (2012).

Os berços de atracação do porto de Santos se encontram dispostos ao longo das duas margens do estuário e seus terminais especializados estão localizados na Figura 5.



Fonte: CODESP, 2008.

Figura 5 - Localização dos produtos nos terminais do Porto de Santos.

Em 2011, atracaram um total de 5.874 navios no Porto de Santos, sendo que 306 destas atracações foram realizadas por navios de cruzeiros, totalizando, entre

passageiros embarcados, desembarcados e em trânsito, 1.113.640 pessoas; 10,9% acima do contabilizado em 2010 (1.003.942 pessoas); o que representa um elevado crescimento também no setor de turismo para o porto.

Para atender todas as demandas, o Porto de Santos apresenta alguns projetos estratégicos de melhoria; que atende tanto o setor viário, ferroviário e aquaviário, quanto à melhoria e expansão portuária. Alguns desses projetos estão esquematizados na Figura 6.



Fonte: CODESP, 2008.

Figura 6 - Projetos Estratégicos do Porto de Santos.

Em 2010, foram concluídos alguns trechos da Margem Direita das obras da Avenida Perimetral. As obras da Margem Esquerda foram iniciadas em 2011. Estes dois acessos, que se caracterizam com duas vias expressas serão de fundamental importância para a integração e o desenvolvimento dos terminais.

Além destes projetos, em março de 2008, foi apresentada o EIA/RIMA ao IBAMA, para a dragagem de aprofundamento. O projeto consiste em aumentar a profundidade do canal para 15m e uma largura mínima de 220m, permitindo a

navegação em mão-dupla. Até julho de 2010, o canal possuía profundidades de manutenção variando entre 12 e 14m; e largura mínima de 150m, com navegação em mão-única; como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1- Calados Máximos de operação na preamar com altura de maré  $\geq 1,00$  metro em relação ao Zero DHN.

| Local de Navegação                   | Calado |        | Data da Batimetria |
|--------------------------------------|--------|--------|--------------------|
|                                      | Metros | Pés    |                    |
| Barra até Entrepasto de Pesca        | 13,30  | 43'08" | Julho de 2010      |
| Entrepasto de Pesca até Torre Grande | 13,30  | 43'08" | Fevereiro de 2009  |
| Torre Grande até Alamoia             | 12,20  | 40'00" | Fevereiro de 2009  |

Fonte: CODESP (2012)

A localização dos trechos do canal citados na Tabela 1 se encontra na Figura 7.



Fonte: BLENINGER, 2006 – Modificada.

Figura 7 – Localização dos trechos do canal de navegação do Porto de Santos.

Até o final de 2010, foram dragados, “in situ”, cerca de 7,4 milhões de m<sup>3</sup> de sedimentos mais sólidos, num total previsto de 13,6 milhões; aprofundando para 15m, o trecho situado entre o Canal da Barra até 4 km depois da Torre Grande. Segundo

relatório da CODESP (2010), a conclusão da dragagem para 15 m seria inicialmente prevista para agosto de 2011.

O projeto procurou aproveitar as maiores profundidades existentes, diminuindo os volumes a serem dragados e servindo para atualizar a carta náutica da região.

São utilizadas para a execução deste projeto, as dragas de sucção tipo “hopper”, sendo elas a Hang Jun 5001, de 5 mil m<sup>3</sup>, e a Xin Hai Hu, de 13mil m<sup>3</sup>. Essas dragas contemplam tanto o serviço de implantação do gabarito quanto o serviço de manutenção das profundidades.

Esse serviço foi iniciado após a obtenção de licenciamento que demandou o cumprimento de 24 programas ambientais, além de monitoramento arqueológico da área. O programa de monitoramento ambiental no estuário e na área de descarte, cumprido pela CODESP, garantiu a preservação do meio ambiente e a execução do serviço com o padrão de qualidade requerido. Segundo todos os relatórios que são encaminhados às secretarias do meio ambiente de Santos e Guarujá, até o momento, apontaram que a dragagem não trouxe qualquer impacto às praias da região (CODESP, 2010).

O projeto conta com o apoio da Federação e Colônias dos Pescadores da Baixada Santista, pois trará benefícios aos pescadores e familiares, através de novas oportunidades de trabalho.

A dragagem possibilitará aumentar em no mínimo 30% a movimentação e o desenvolvimento sustentável.

O projeto final deve aumentar a profundidade para 17m, o que permitiria ao porto receber os novos navios Panamax, e competir diretamente com os maiores portos do mundo.

O Porto de Santos também conta com projetos de construção e reforço de berços de atracação, que se encontram quase em 100% da cota de projeto, após um programa de dragagem de manutenção que dragou 850 mil metros cúbicos, entre cais e acessos.

Além da dragagem também será realizado o derrocamento parcial das rochas Teffé e Itapema, através da fragmentação e remoção, num volume total de 33.362 m<sup>3</sup>



de pedras; da cota 12 para 16m; conforme esquematizado na Figura 8 (SANTOS, 2011). A remoção das rochas ainda se encontra em processo de finalização.



Figura 8 - Localização das rochas Teffé e Itapema.

Outro projeto ainda em fase de pré-licenciamento é o Super Porto Barnabé Bagres, visando o aproveitamento do Largo de Santa Rita, Ilhas Barnabé, Bagres e áreas adjacentes; conforme Figura 9 (MKR, 2010).

Estão previstos investimentos do Governo Federal no setor de infraestrutura por conta do evento da Copa de 2014. Para ampliar a capacidade de atracação de navios de passageiros, está prevista a construção de 1.280 metros de cais, permitindo a atracação simultânea de 6 navios, somando mais de 18 mil leitos à rede hoteleira da região. A CODESP já encaminhou um pedido de licenciamento ambiental junto ao IBAMA, que dispensou o empreendimento de Licença Prévia. A obra tem estimativa de prazo de 30 meses (CODESP, 2010).

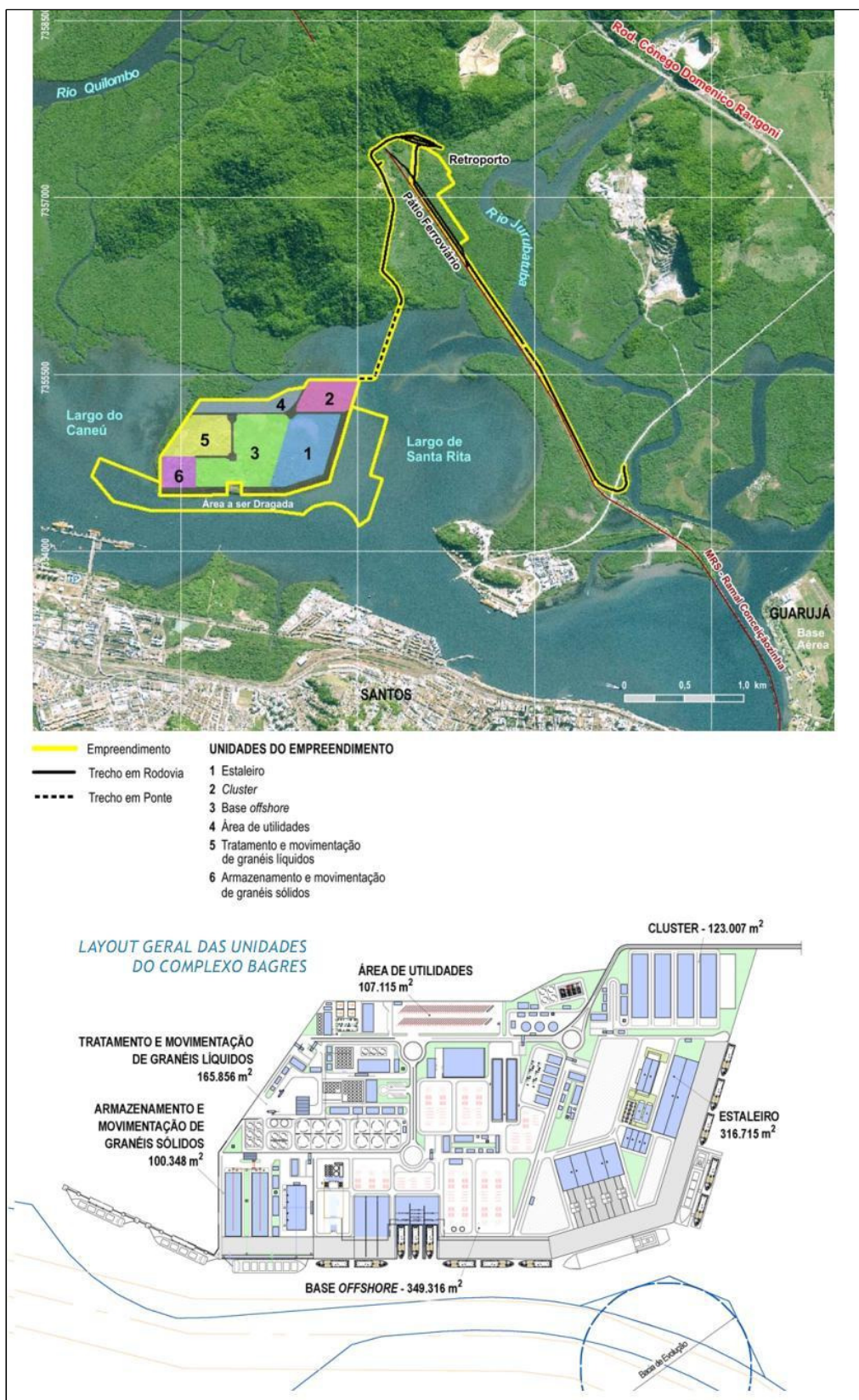


Figura 9 – Super Porto Barnabé Bagres.



Segundo CODESP (2010), outro grande empreendimento é a construção de uma via interna de circulação proposto para segregar e agilizar o trânsito de passageiros.

Todas as obras realizadas e previstas para o Porto de Santos visam seu empenho no contínuo crescimento, e aprimoramento para que o porto possa atender as demandas e os novos cenários que se apresentam. Mas, para que essas obras sejam realizadas com sucesso é imprescindível a utilização de ferramentas como a modelagem numérica, tanto na fase de planejamento como na fase de execução.

## **4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Os processos hidrodinâmicos são dominantes para a modificação de costas e obras costeiras, e serão analisados nesse capítulo. Para que se possa entender a complexidade desses fenômenos, e as consequências causadas pela interação desses processos com a região de estudo, a ação de agentes forçantes deve ser analisada, quais sejam: ondas, ventos, marés, correntes e transporte de sedimentos.

O Porto de Santos, que é a região de estudo de maior interesse, por ser a região que mais sofre alterações antrópicas; encontra-se naturalmente abrigado no Estuário Santista, e portanto; não sofre influência significativa de ondas, já que este é um requisito básico para o próprio funcionamento do porto. O porto também não é diretamente afetado pela ação do vento, já que pelas dimensões do canal do estuário, este não oferece uma pista de sopro necessária para que o vento possa gerar ondas que alterem a hidrodinâmica local. Além disso, segundo SONDOTÉCNICA (1977), as principais correntes que interferem no Estuário Santista são correntes geradas pela circulação de maré; assim, a modelação foi realizada levando-se em conta apenas o efeito da variação da maré, e desprezando o efeito de ventos e ondas.

### **4.1 - Ventos e ondas**

Segundo ALFREDINI (2005), as ondas de superfície geralmente derivam sua energia dos ventos que sopram sobre a superfície do mar e propagam-se principalmente no rumo em que eles sopram.

As vagas são ondas geradas por ventos locais e possuem formas irregulares e constantemente mutáveis, de difícil equacionamento, porém não interferem na modelagem do Porto de Santos, já que o estuário é estreito para gerar vagas com alturas apreciáveis.

Quando as ondas movem-se para fora da zona onde são diretamente afetadas pelo vento, assumem um aspecto mais ordenado, determinadas ondulações, que são aproximadamente paralelas e propagam-se de modo sensivelmente uniforme e sem grandes deformações em direção as costas e as margens. Dependendo do ângulo que as ondas incidem nas embocaduras do estuário, ou na entrada dos canais de navegação elas podem ser dissipadas, ou refletidas. Caso o canal de navegação não seja abrigado da ação das ondas, pode ser comprometido quanto ao seu funcionamento.

Portanto, o conhecimento da velocidade do vento e das alturas das ondas é de grande importância para o projeto de obras costeiras, porém não será contemplado no modelo, já que no caso do estuário de Santos, o porto se encontra abrigado e a interferência desses fenômenos pode ser desprezada.

## **4.2 - Marés e correntes**

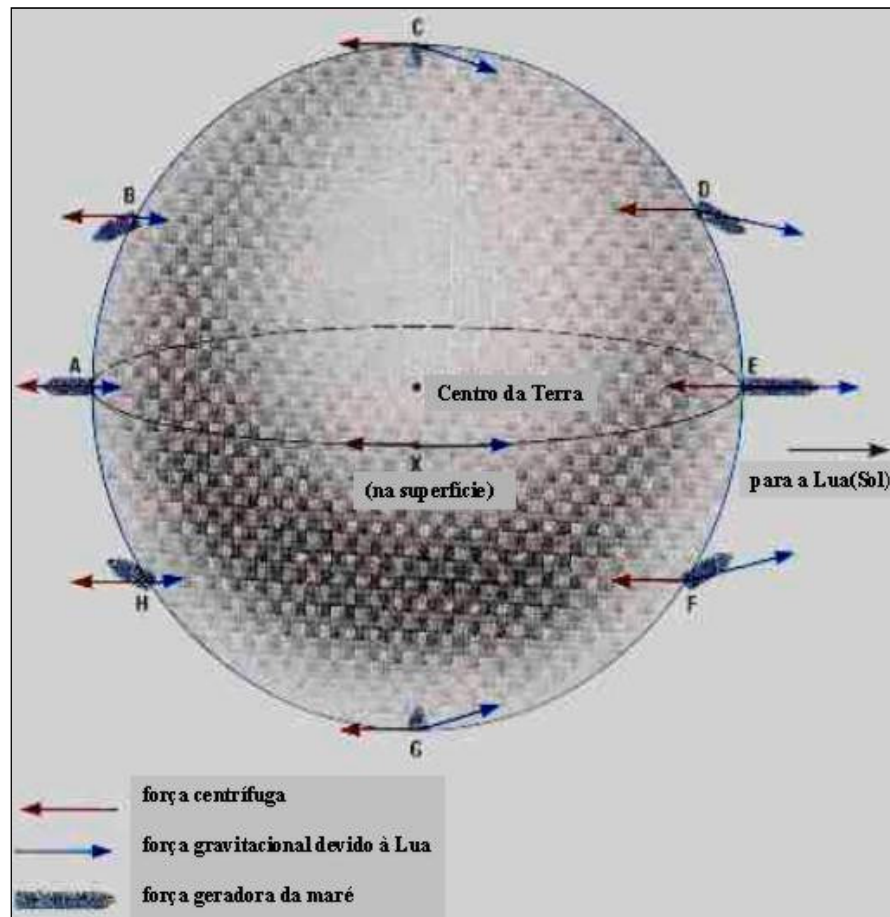
A maré astronômica é um efeito periódico, portanto previsível, e como o nome sugere é causada pela combinação dos efeitos das forças gravitacionais da Lua e do Sol, sobre as massas líquidas, e das forças centrífugas entre a Terra e a Lua, e da Terra com o Sol, como mostra a Figura 10.

A força centrífuga da Terra tem sempre mesmo sentido e magnitude, porém a força gravitacional entre a Terra e a Lua depende da posição da Lua em relação à Terra, e a resultante entre ambas as forças geram as marés. A resultante entre as forças gravitacionais entre o sistema Terra – Lua, e as forças centrífugas dos dois corpos equilibram o sistema como um todo.

As marés causam oscilações do nível do mar, e geralmente as marés astronômicas tem período de 12,42 horas entre a enchente e vazante, portanto são semi-diurnas; e podem ser medidas através dos marégrafos.

As marés também podem ser classificadas em sizígia quando a Terra, a Lua e o Sol estão em um mesmo alinhamento, produzindo as maiores amplitudes de maré, as

maiores preamares e menores baixa-mares; estando o Sol e a Lua em conjunção, situação de Lua Nova; ou em oposição, situação de Lua Cheia. Essas situações são denominadas de marés de águas vivas.

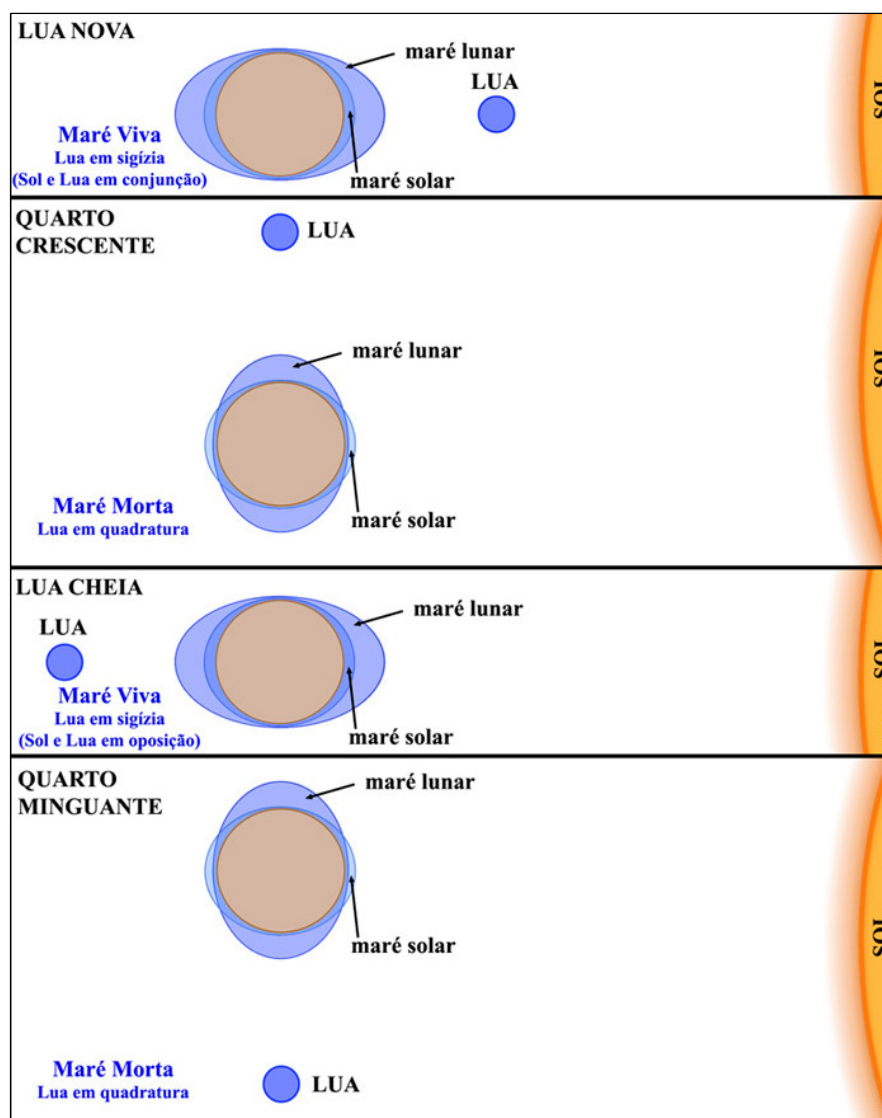


Fonte: Open University Course Team, 1997

Figura 10 – Combinação das forças que originam as marés.

As marés de quadratura ocorrem quando as forças geradoras das marés da Lua e do Sol estão defasadas em um ângulo de  $90^\circ$ , nas situações de Lua Crescente e Minguante, gerando as menores amplitudes de maré e sendo caracterizadas como marés de águas mortas. Estas marés podem ser observadas na Figura 11.

As marés também podem ser originadas por efeitos meteorológicos, como o vento e as pressões atmosféricas; que podem produzir variações do nível do mar consideráveis (marés meteorológicas), de difícil determinação.



Fonte: CARDOSO, 2007.

Figura 11 – Marés de Sizígia e Quadratura.

Para a previsão das alturas de maré, utiliza-se o método harmônico, que pressupõe que a maré observada é a somatória de um número de componentes ou marés parciais, cada uma com amplitudes de maré e fase diferentes para cada localidade, geradas pelas variações cíclicas das posições da Lua e do Sol em relação à Terra. Essa somatória das componentes pode ser visualizada na Figura 12, segundo Alfredini (2005), onde se encontram a composição das 7 principais componentes da maré.

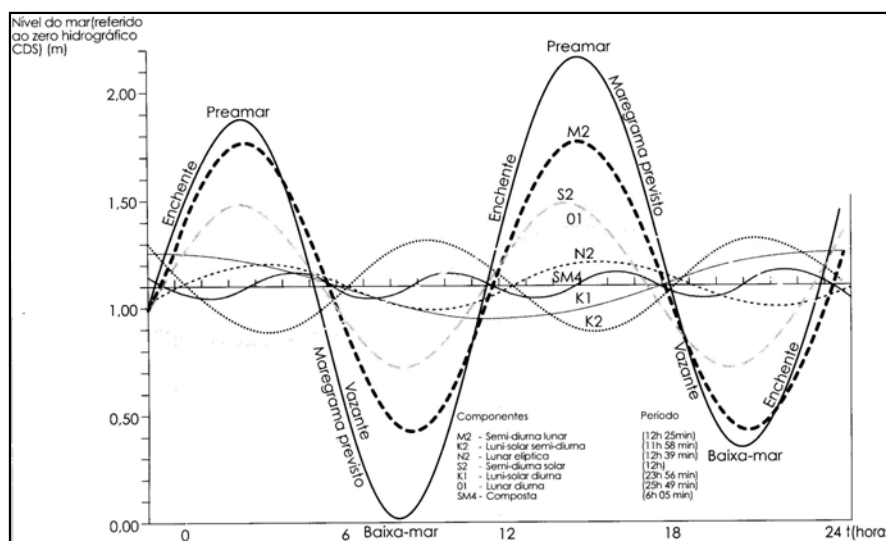


Figura 12 - Maregrama previsto para o dia 20/05/1947 no marégrafo de Torre Grande, Porto de Santos (SP).

Na Figura 13 pode ser encontrada a previsão da maré para o Porto de Santos com o programa desenvolvido por Franco (1988). Na Tabela 2 podem ser encontradas as previsões de maré para o mês de abril de 2012, segundo Marinha do Brasil (2012).

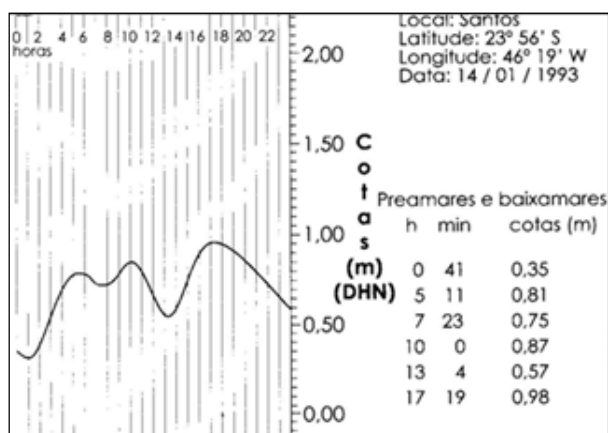


Figura 13 - Previsão de maré para Santos segundo programa desenvolvido por Franco (1988).

Tabela 2 – Previsões de maré para o Porto de Santos em abril de 2012.

| PORTO DE SANTOS - TORRE GRANDE (ESTADO DE SÃO PAULO)                         |                |                      |                    |
|--|----------------|----------------------|--------------------|
| Latitude: 23°57,1'S  |                | Longitude: 46°18,3'W | Fuso: +3,0         |
| Ano: 2012  |                |                      |                    |
| Instituição: DNPVN   |                | 45 Componentes       | Nível Médio: 79,38 |
|  |                |                      | Carta: 01701       |
| Existe para o mês Abril do ano 2012 selecionados um número de 122 previsões. |                |                      |                    |
| Lua  | Dia            | Hora                 | Alt. (m)           |
| Cheia  | DOM 01/04/2012 | 00:06                | 1,2                |
|  |                | 05:54                | 0,6                |
|  |                | 11:45                | 1,1                |
|  |                | 17:38                | 0,4                |
|  | SEG 02/04/2012 | 00:53                | 1,3                |
|  |                | 00:28                | 0,4                |
|  |                | 12:26                | 1,2                |
|  |                | 18:28                | 0,3                |
|  | TER 03/04/2012 | 01:30                | 1,4                |
|  |                | 07:02                | 0,3                |
|  |                | 13:04                | 1,3                |
|  |                | 19:13                | 0,2                |
|  | QUA 04/04/2012 | 02:06                | 1,5                |
|  |                | 07:38                | 0,2                |
|  |                | 13:41                | 1,5                |
|  |                | 19:54                | 0,1                |
|  | QUI 05/04/2012 | 02:41                | 1,5                |
|  |                | 08:15                | 0,1                |
|  |                | 14:13                | 1,5                |
|  |                | 20:36                | 0,1                |
|  | SEX 06/04/2012 | 03:08                | 1,4                |
|  |                | 08:56                | 0,1                |
|  |                | 14:47                | 1,5                |
|  |                | 21:15                | 0,1                |
|  | SÁB 07/04/2012 | 03:28                | 1,3                |
|  |                | 09:38                | 0,1                |
|  |                | 15:17                | 1,5                |
|  |                | 21:56                | 0,2                |
|  | DOM 08/04/2012 | 03:41                | 1,2                |
|  |                | 10:21                | 0,1                |
|  |                | 15:54                | 1,5                |
|  |                | 22:34                | 0,4                |
|  | SEG 09/04/2012 | 03:54                | 1,1                |
|  |                | 11:04                | 0,1                |
|  |                | 16:26                | 1,4                |
|  |                | 23:08                | 0,5                |

Continua...

| PORTO DE SANTOS - TORRE GRANDE (ESTADO DE SÃO PAULO)                         |                |                      |                    |
|--|----------------|----------------------|--------------------|
| Latitude: 23°57,1'S  |                | Longitude: 46°18,3'W | Fuso: +3,0         |
| Instituição: DNPVN   |                | 45 Componentes       | Nível Médio: 79,38 |
|  |                |                      | Carta: 01701       |
| Existe para o mês Abril do ano 2012 selecionados um número de 122 previsões. |                |                      |                    |
| Lua  | Dia            | Hora                 | Alt. (m)           |
| Minguante  | TER 10/04/2012 | 04:00                | 1,0                |
|  |                | 11:54                | 0,2                |
|  |                | 17:04                | 1,3                |
|  |                | 23:49                | 0,7                |
|  | QUA 11/04/2012 | 03:54                | 1,0                |
|  |                | 12:45                | 0,3                |
|  |                | 17:53                | 1,1                |
|  | QUI 12/04/2012 | 00:24                | 0,8                |
|  |                | 03:19                | 0,9                |
|  |                | 07:47                | 0,7                |
|  |                | 09:53                | 0,8                |
|  |                | 13:38                | 0,4                |
|  |                | 18:51                | 1,0                |
|  |                | 20:58                | 0,9                |
|  |                | 23:13                | 1,0                |
|  | SEX 13/04/2012 | 01:39                | 0,9                |
|  |                | 03:00                | 0,9                |
|  |                | 07:28                | 0,7                |
|  |                | 10:45                | 0,9                |
|  |                | 14:38                | 0,4                |
|  | SÁB 14/04/2012 | 00:09                | 1,0                |
|  |                | 07:17                | 0,7                |
|  |                | 11:21                | 1,0                |
|  |                | 15:43                | 0,4                |
|  | DOM 15/04/2012 | 00:43                | 1,1                |
|  |                | 07:17                | 0,6                |
|  |                | 11:56                | 1,1                |
|  |                | 16:47                | 0,4                |
|  | SEG 16/04/2012 | 00:51                | 1,1                |
|  |                | 07:13                | 0,6                |
|  |                | 12:24                | 1,2                |
|  |                | 17:43                | 0,3                |
|  | TER 17/04/2012 | 00:54                | 1,3                |
|  |                | 06:49                | 0,5                |
|  |                | 12:54                | 1,3                |
|  |                | 18:30                | 0,2                |



Continua...

| PORTO DE SANTOS - TORRE GRANDE (ESTADO DE SÃO PAULO)                         |                |                      |                    |
|--|----------------|----------------------|--------------------|
| Latitude: 23°57,1'S  |                | Longitude: 46°18,3'W | Fuso: +3,0         |
| Instituição: DNPVN   |                | 45 Componentes       | Nível Médio: 79,38 |
|  |                |                      | Carta: 01701       |
| Existe para o mês Abril do ano 2012 selecionados um número de 122 previsões. |                |                      |                    |
| Lua  | Dia            | Hora                 | Alt. (m)           |
| Nova   | QUA 18/04/2012 | 01:06                | 1,3                |
|  |                | 07:02                | 0,4                |
|  |                | 13:26                | 1,4                |
|  |                | 19:15                | 0,2                |
|  | QUI 19/04/2012 | 01:26                | 1,3                |
|  |                | 07:30                | 0,3                |
|  |                | 14:00                | 1,5                |
|  |                | 20:00                | 0,2                |
|  | SEX 20/04/2012 | 01:54                | 1,4                |
|  |                | 08:04                | 0,2                |
|  |                | 14:36                | 1,5                |
|  |                | 20:41                | 0,2                |
|  | SÁB 21/04/2012 | 02:17                | 1,4                |
|  |                | 08:41                | 0,2                |
|  |                | 15:08                | 1,5                |
|  |                | 21:17                | 0,2                |
|  | DOM 22/04/2012 | 02:43                | 1,4                |
|  |                | 09:17                | 0,2                |
|  |                | 15:41                | 1,4                |
|  |                | 21:54                | 0,3                |
|  | SEG 23/04/2012 | 03:06                | 1,3                |
|  |                | 09:51                | 0,3                |
|  |                | 16:11                | 1,4                |
|  |                | 22:24                | 0,4                |
|  | TER 24/04/2012 | 03:28                | 1,3                |
|  |                | 10:24                | 0,3                |
|  |                | 16:45                | 1,3                |
|  |                | 22:54                | 0,5                |
|  | QUA 25/04/2012 | 03:54                | 1,2                |
|  |                | 11:00                | 0,4                |
|  |                | 17:19                | 1,2                |
|  |                | 23:24                | 0,6                |
|  | QUI 26/04/2012 | 04:17                | 1,1                |
|  |                | 11:51                | 0,4                |
|  |                | 18:08                | 1,1                |

Continua...

| PORTO DE SANTOS - TORRE GRANDE (ESTADO DE SÃO PAULO)                         |                      |                    |              |
|--|----------------------|--------------------|--------------|
| Latitude: 23°57,1'S  | Longitude: 46°18,3'W | Fuso: +3,0         | Ano: 2012    |
| Instituição: DNPVN   | 45 Componentes       | Nível Médio: 79,38 | Carta: 01701 |
| Existe para o mês Abril do ano 2012 selecionados um número de 122 previsões. |                      |                    |              |
| Lua  | Dia                  | Hora               | Alt. (m)     |
| Crescente  | SEX 27/04/2012       | 00:06              | 0,7          |
|  |                      | 04:49              | 1,0          |
|  |                      | 12:53              | 0,5          |
|  |                      | 19:34              | 1,0          |
|  | SÁB 28/04/2012       | 01:15              | 0,7          |
|  |                      | 05:41              | 0,9          |
|  |                      | 14:00              | 0,5          |
|  |                      | 22:19              | 1,1          |
|  | DOM 29/04/2012       | 04:32              | 0,7          |
|  |                      | 10:08              | 1,0          |
|  |                      | 15:09              | 0,4          |
|  |                      | 23:36              | 1,2          |
|  | SEG 30/04/2012       | 05:32              | 0,6          |
|  |                      | 11:02              | 1,1          |
|  |                      | 16:23              | 0,4          |

As correntes de maré são causadas pelos gradientes gerados pelas variações do nível do mar devido à passagem das ondas de maré (ALFREDINI, 2005).

As correntes de deriva são geradas pelo efeito direto dos ventos sobre a superfície líquida, pelo efeito das ondas de superfície, e pela variação da densidade, consequência da variação da temperatura ou salinidade da água em determinada região.

Segundo SONDOTÉCNICA (1977), as correntes predominantes no porto de Santos são as correntes de maré, totalizando mais que 70%.

### 4.3 - Transporte de sedimentos

O efeito de correntes e ondas sobre o fundo das costas, formadas por material tipicamente arenoso, gera o transporte de sedimentos.

Esse transporte é contínuo, e geralmente tende a um equilíbrio, ou seja, o material que sai de uma determinada região é o mesmo que entra na mesma. Com a ação antrópica, através da construção de obras costeiras, esse equilíbrio é alterado, gerando problemas como assoreamento nos canais e erosão de praias.

O assoreamento dos canais ocorre devido ao novo equilíbrio da batimetria do terreno, ou seja, na acomodação dos taludes, e na entrada das correntes de marés.

Quando uma estrutura costeira bloqueia o transporte natural da costa, as praias adjacentes podem sofrer um processo de erosão, dependendo do gradiente de transporte de sedimentos na região, gerando problemas para o turismo ou para os moradores da região, necessitando novas obras e o processo de alimentação artificial de praias.

A quantificação do transporte de sedimentos é essencial para o funcionamento dos portos, já que a maioria deles necessita de dragagens periódicas, intensificadas quanto mais a cota exigida se distancia da natural.

Nesse trabalho não será modelado o transporte de sedimentos, por ser um processo complexo, cujas formulações ainda geram muitas incertezas, pois dependem de inúmeros fatores; mas deverá ser contemplado a partir da caracterização hidrodinâmica em estudos futuros.

## 5 - PROGRAMA DE MODELAGEM NUMÉRICA MIKE 21

O programa de modelagem numérica utilizado nesse estudo é o MIKE 21, autoria do DHI (Danish Hydraulic Institute), que é um programa bidimensional capaz de simular os efeitos decorrentes das iterações hidrodinâmicas, de ondas e de transporte de sedimentos em mares, rios ou canais.

A licença utilizada para esse estudo é a "Time-limited use of MIKE by DHI Software Licenses for Thesis Work" ("Licença de MIKE by DHI Software de tempo limitado para trabalho de teses"), concedida pelo representante da DHI no Brasil.

A licença inclui os módulos de pré-processamento (PP); para a entrada de dados no programa. Inclui também o módulo "flexible mesh" (MIKE 21 FM), que permite que o modelo seja representado através de uma malha flexível de diferentes densidades, que será melhor detalhado no capítulo de base de dados; assim como as versões "single grid" e "nested grid", de gradeamento retangular, através do qual se permitia realizar um aninhamento das malhas para densificar uma área de interesse. Esse último tipo de gradeamento não foi utilizado nesse estudo, já que a versão flexible mesh (FM) permite que o modelo seja melhor representado; mas não foi amplamente utilizada em estudos anteriores, já que o módulo FM é uma versão bem recente do programa.

A licença ainda inclui os módulos hidrodinâmico (HD), de ondas, e de transporte de sedimentos (ST).

Para a caracterização do modelo foram utilizados alguns manuais concedidos junto com a licença do programa (DHI, 2011).

O programa apresenta formulação determinada; para cada tipo de modelo utilizado. As principais formulações utilizadas nesse estudo do módulo hidrodinâmico, para o modelo bidimensional estão descritas a seguir (DHI, 2011; GARCIA, 2007; BAPTISTELLI, 2003).

## 5.1 – Variações do fluxo e do nível d'água

As equações que descrevem as variações do fluxo e do nível d'água, são a equação de conservação de massa e as equações de quantidade de movimento integradas na vertical:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ & + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p \\ & - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ & + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] + \Omega p \\ & - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Onde:

- $h(x, y, t)$  - profundidade da água (m)
- $\zeta(x, y, t)$  - elevação da superfície (m)

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| $p, q(x, y, t)$                   | - densidade de fluxo nas direções x e y respectivamente = (u <sub>h</sub> , v <sub>h</sub> ); (u, v) = média das velocidades nas direções x e y (m <sup>3</sup> /s/m) |
| $C(x, y)$                         | - resistência de Chezy (m <sup>1/2</sup> /s)  |
| $g$                               | - aceleração da gravidade (m/s <sup>2</sup> )   |
| $f(V)$                            | - fator de atrito do vento  |
| $V, V_x, V_y(x, y, t)$            | - velocidade do vento e componentes da direção em x e y (m/s)   |
| $\Omega(x, y)$                    | - parâmetro de Coriolis, depende da latitude (s <sup>-1</sup> )   |
| $P_a(x, y, t)$                    | - pressão atmosférica (kg/m/s <sup>2</sup> )  |
| $\rho_w$                          | - massa específica da água (kg/m <sup>3</sup> )   |
| $x, y$                            | - coordenadas (m)   |
| $t$                               | - tempo (s)   |
| $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ | - componentes do efeito de cisalhamento   |

## 5.2 – Critério de estabilidade – Condição CFL

A equação do número de Courant-Friedrichs-Lévy (CFL), para águas rasas é definido como:

$$CFL_{HD} = (\sqrt{gh} + |u|) \frac{\Delta t}{\Delta x} + (\sqrt{gh} + |v|) \frac{\Delta t}{\Delta y} \quad (4)$$

Onde:

|                      |  |
|----------------------|--|
| $h$                  | - profundidade da água (m)   |
| $u, v$               | - components da velocidade nas direções x,y (m/s)                        |
| $g$                  | - aceleração da gravidade (m/s <sup>2</sup> )                            |
| $\Delta x, \Delta y$ | - escalas de distância em x e y - medidas no centro de cada elemento (m) |
| $\Delta t$           | - intervalo de tempo (s)   |

### 5.3 – Coeficiente de Manning

A resistência do leito pode ser definida pelo Coeficiente de Manning ou Número de Chézy. A lei de atrito de fundo de Chézy representada pela formulação da tensão de atrito no leito em termos do número de Chézy é apresentada na Fórmula 5 (SILVA, 2003).

$$\tau_b = \frac{\rho g U |U|}{C^2} \quad (5)$$

O Número de Chézy é convertido em Coeficiente de Manning pela fórmula:

$$M = \frac{C}{h^{1/6}} \quad (6)$$

O coeficiente de Manning ( $m^{1/3}/s$ ), utilizado no modelo é o inverso do número de Manning ( $m^{-1/3}/s$ ), mais conhecido na literatura como coeficiente de Strikler.

Onde:

|          |   |
|----------|---|
| $\tau_b$ | - tensão de atrito no leito ( $N/m^2$ )     |
| $\rho$   | - densidade da água                         |
| $g$      | - aceleração devido a gravidade ( $m/s^2$ ) |
| $U$      | - velocidade ( $m/s$ )                      |
| $C$      | - número de Chézy ( $m^{1/2}/s$ )           |
| $M$      | - coeficiente de Manning ( $m^{1/3}/s$ )    |
| $h$      | - profundidade ( $m$ )                      |

## 6 – ESTADO DA ARTE

Neste capítulo são citados alguns trabalhos recentes que também utilizaram o programa de modelagem numérica Mike 21, para a caracterização de uma área específica. Alguns desses trabalhos também caracterizaram o Estuário Santista, entretanto estas caracterizações foram realizadas com propósitos diferentes das que motivaram este trabalho.

Baptistelli, S. C. (2003) utiliza a modelagem numérica para caracterizar o litoral da Praia Grande a fim de poder avaliar a circulação de correntes de maré induzidas pelo vento aplicadas a estudos de disposição oceânica de efluentes. O trabalho apresentou dados de medições de corrente, maré e vento analisando-os e utilizando-os para a implementação e calibração do modelo hidrodinâmico computacional MIKE 21 HD. Além da caracterização hidrodinâmica o trabalho contemplou a análise dos resultados das simulações e apresentou uma metodologia para o fornecimento das velocidades de corrente de projeto. Os resultados das simulações de calibração apresentam boa correlação com os dados observados em campo.

Garcia, P. D. (2007) realiza uma caracterização hidrossedimentológica das correntes de maré e do transporte de sedimentos associado à área portuária do Maranhão. Este trabalho utiliza os módulos hidrodinâmico e de transporte de sedimentos do programa. Os resultados verificaram a eficiência do modelo em representar as características recirculatórias na área do terminal Ponta da Madeira, e representaram com fidelidade a evolução dos fundos e as taxas de sedimentação da área de estudo. O trabalho ressalta a importância da ferramenta de modelagem numérica para a implantação e manutenção de um grande complexo portuário, como o caso do terminal Ponta da Madeira.

Baptistelli, S. C. (2008) realiza uma análise crítica da utilização da modelagem matemática na avaliação da dispersão de efluentes leves no litoral da Baixada Santista – SP. Para essa análise foram utilizados três modelos hidrodinâmicos - MIKE 21, POM e Delft3D. O trabalho mostra e discute as características e limitações teóricas e práticas existentes em cada modelo utilizado, sob a ótica da engenharia.



Amorim, J. C. C.; Vasconcellos, C. A. B.; Bundgaard, K.; Elfrink, B. (2011) realizam uma modelagem hidrodinâmica do Estuário de Santos para avaliação dos impactos da dragagem de aprofundamento do Porto de Santos - SP. Esse trabalho foi realizado utilizando a nova versão do programa, de malhas flexíveis (Flexible Mesh – FM), além de utilizar o módulo tridimensional. O trabalho avaliava os impactos do aprofundamento do canal de navegação do porto nos aspectos: hidrodinâmico, como elevações do nível d'água, correntes e distribuição do fluxo do canal; de salinidade, analisando a intrusão salina e a estratificação da coluna d'água; e de transporte de sedimentos, analisando o assoreamento da região. Os resultados apontaram que o aprofundamento do canal tende a causar pequenas mudanças nos fluxos para dentro e fora do canal, na salinidade, e na taxa de sedimentação dos manguezais. Porém o aprofundamento aumentaria as taxas de sedimentação nos canais.

## 7 - METODOLOGIA

Através da caracterização do modelo hidrodinâmico da Baía e Estuário Santista a ser desenvolvida, pretende-se analisar a fidedignidade na reprodução do comportamento do protótipo a partir da calibração e da validação realizadas.

Foram levantados a partir de estudos anteriores realizados na área, dados de batimetria, marés, ondas, ventos, campanhas correntométricas, trajetórias de flutuadores, medições de vazões sólidas, precipitações, vazões dos rios que afluem ao estuário, dentre outros; os quais permitam calibrar e validar a caracterização desenvolvida.

Após o levantamento desses dados, estes foram organizados na forma de base de dados para facilitar o processo de modelagem. Para a entrada de dados no programa, faz-se de necessário que estes estejam em formato específico. Nessa etapa, foi também importante a leitura e análise dos manuais do programa, assim como a simulação de exemplos concedidos pelos próprios manuais, a fim de entender seu funcionamento e suas exigências, para a correta preparação da base de dados.

Procedeu-se, então, à caracterização da região empregando o software Mike 21, que foi calibrado empregando um conjunto de dados de protótipo previamente selecionados, assegurando que a caracterização reproduza as condições originais de maneira satisfatória, se aproximando o máximo possível das condições reais. A caracterização foi calibrada através de dados da propagação de maré.

Na calibração, foi realizado o ajuste de alguns parâmetros do modelo, como por exemplo, a rugosidade de fundo; de forma que a resposta se aproximasse ao máximo dos resultados previamente selecionados de estudos anteriores de levantamentos realizados no protótipo. Também foram utilizados para a calibração, ajustes da batimetria da região, e ajustes no alinhamento da borda para a entrada de dados de maré; como será melhor discutido no capítulo de base de dados.

Foi realizada, com o modelo calibrado, uma verificação de sua sensibilidade através da modificação da malha flexível.

Após calibrada, a caracterização do Estuário Santista foi validada a partir de outros dados disponíveis, verificando assim sua eficiência.

Já na validação, sem nenhum novo ajuste, a caracterização deve reproduzir satisfatoriamente outras condições levantadas no protótipo. Se isso ocorrer, diz-se que a caracterização está validada e reproduz, com boa fidedignidade, os fenômenos que regem o protótipo.

A validação foi realizada com base na comparação de dados de medição de velocidades das correntes geradas pela caracterização calibrada, com as campanhas de medição de correntes realizadas no protótipo, extraídas de estudos anteriores (SONDOTÉCNICA, 1977).

Os dados de medição de correntes utilizados no processo de validação devem ser de dias diferentes dos dados utilizados no processo de calibração; para isso, na validação, sem nenhum novo ajuste de dados de batimetria e rugosidade do fundo; foram inseridos novos dados de entrada de marés para os novos períodos selecionados.

## 8 - BASE DE DADOS

A preparação da base de dados foi imprescindível para a realização da caracterização do modelo hidrodinâmico. Todos os dados foram preparados para que fossem reconhecidos pelo programa Mike 21, além da realização de uma primeira simulação; o que pode ser encontrado na fase de pré-processamento. Foram também preparados dados para o processo de calibração e validação.

Os dados utilizados nessa dissertação são de fontes mais antigas, a partir de 1970. Apesar dos estudos realizados nessa época não proverem de equipamentos modernos como os empregados nas medições realizadas na última década; são fontes que apresentam estudos mais completos e já foram utilizados em outros trabalhos e estudos dessa região.

A seguir, encontram-se discriminadas todas as etapas da preparação de dados para a realização da caracterização hidrodinâmica do Estuário Santista, desde sua fase de calibração até o processo de validação.

### 8.1 – Pré-processamento

Nessa etapa, foram gerados dados para as primeiras simulações do programa, a fim de se poder analisar os resultados obtidos comparados com os dados reais de campo para as mesmas condições.

Nessa primeira etapa, listaram-se todos os dados e parâmetros que pudessem ser modificados para que se fosse realizado, então, o processo de calibração.

Assim, foram preparados dados batimétricos, dados de marés e vazões líquidas dos rios, além dos parâmetros de entrada para a simulação.

### 8.1.1 – Dados batimétricos

Foram utilizadas algumas cartas batimétricas para gerar a topografia e batimetria da região. As cartas utilizadas para caracterizar a área de interesse foram extraídas da biblioteca do CTH, e são elas:

- Número 1701- Brasil – Costa Sul – Porto de Santos. Levantamento efetuado pela Marinha do Brasil até 1989;
- Número 1711 – Brasil – Costa Sul – Proximidades do Porto de Santos. Levantamentos efetuados pela Marinha do Brasil até 1982.

As cartas batimétricas citadas, a partir do programa AutoCad, geraram a batimetria da área de estudo; porém a partir do nível de referência de cota 0 (DHN), não foram encontradas informações suficientes a respeito da topografia da região.

Para gerar o que seria a “linha de terra”, foram utilizadas as informações de declividades encontradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Declividades naturais das zonas de praia.

| Zona da linha de costa  | Declividade natural | Espaçamento horizontal no modelo entre cota 0 e +4m (m) |
|-------------------------|---------------------|---|
| Praia Grande            | 2%                  | 200   |
| São Vicente             | 5%                  | 80  |
| Baía de Santos          | 2%                  | 200   |
| Guarujá                 | 5%                  | 80  |
| Costões                 | 1:1                 | 4   |
| Estuário                | 1:3                 | 12  |
| Cais do Porto de Santos | 1:3                 | 4   |

Fonte: FCTH (2005)

A linha de terra foi gerada para representar a linha topográfica de 4m; que seria o necessário para gerar uma planície de inundação para as simulações do programa. Essa área de inundação deve ser delimitada, quando da geração das elevações do nível do mar, através dos períodos de enchente e vazante da maré que se propagam ao longo da costa; de modo que todo o continente ou ilhas que pertençam a região

simulada não sejam alagadas; fato que provocaria um erro no programa. Portanto, é necessário que a área seja delimitada de pelo menos uma linha topográfica num valor superior ao limite esperado de preamar na região, por isso optou-se pela cota de 4m.

Através dos dados gerados pelo programa AutoCad, podem-se inserir os dados de linha de terra ou de delimitação da área a ser simulada os processo hidrodinâmicos, no programa Mike 21, gerando a linha de terra visualizada na Figura 14.

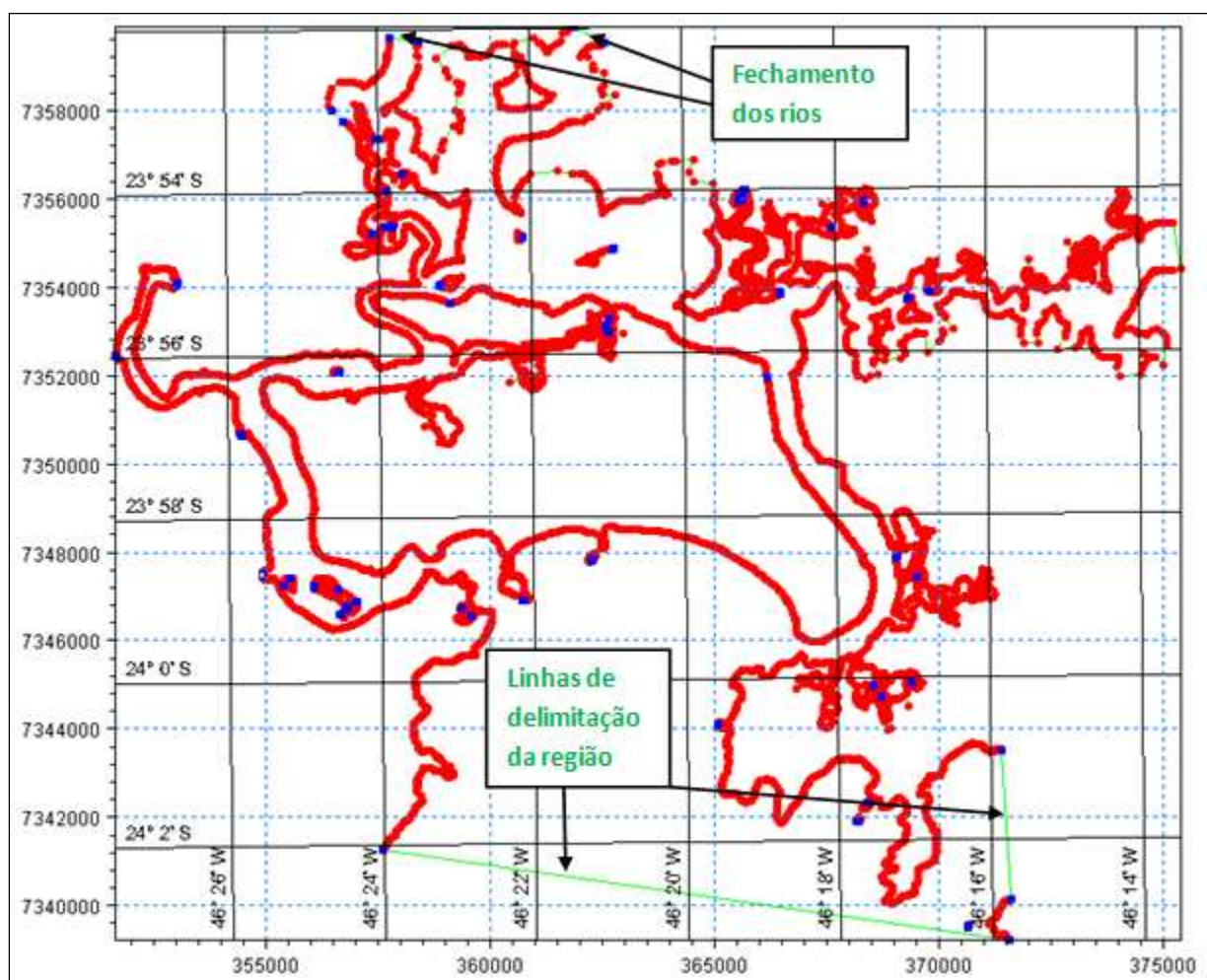


Figura 14- Linha de Terra e delimitações da região a ser simulada.

Essas linhas foram geradas a partir de pontos importados do programa AutoCad, e resultou em áreas muito densas de pontos, o que tornou o processo de simulação muito lento. Porém o programa conta com a opção de redistribuição dos pontos nas linhas, que foi utilizado já na primeira simulação, optando-se por uma distribuição na

área da Baía e do Canal respectivamente de 100 e 200 metros de distanciamento entre os pontos.

Como a área de interesse representava apenas uma parte da Baixada Santista, foi necessário delimitar a área, e portanto, foram feitos alguns “cortes” ao longo dos rios e criadas algumas linhas de fechamento, para se obter um limite de simulação. Esses fechamentos “criados” nos rios e as linhas de delimitação da região são discriminadas no programa como condições de contorno específicas, e algumas delas estão representadas na Figura 14.

Após delimitação da área de simulação, foi inserido o conceito “polígonos” que delimitam quais são as áreas fechadas dentro da área de simulação. Essas áreas servem para ser gerada a malha flexível, através da qual o programa pode realizar os cálculos dos efeitos hidrodinâmicos para cada triângulo incluído na malha.

Os polígonos representam tanto as ilhas, como áreas delimitadas para serem geradas malhas de diferentes densidades. Estas áreas são separadas por linhas que não representam condições de contorno como fechamento de rios, ou linhas de terras. As áreas delimitadas encontram-se na Figura 15 e são representadas por pontos verdes.

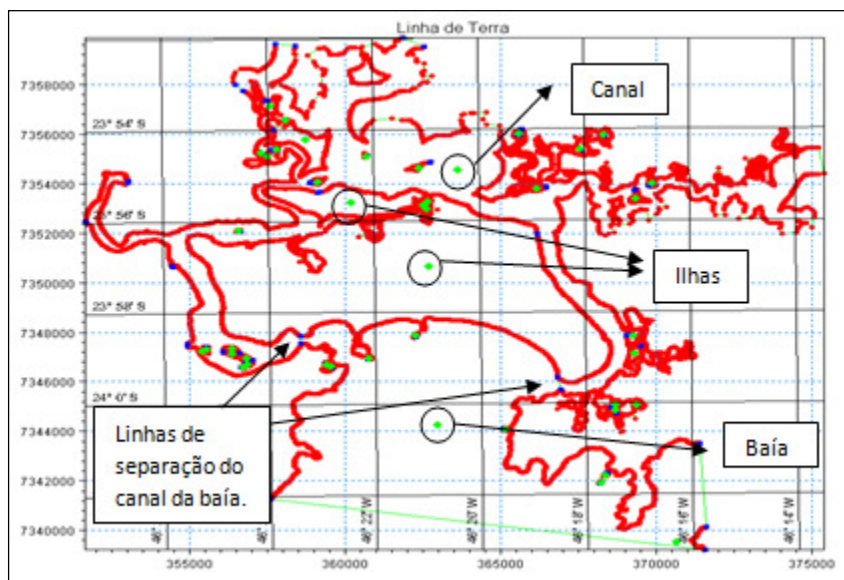


Figura 15 - Fechamento das ilhas e áreas para ser gerada a malha flexível de diferentes densidades.

As áreas fechadas podem gerar uma malha triangular ou retangular. Nesse estudo optou-se pela malha flexível triangular; e foi delimitada para as diferentes áreas, uma área máxima dos triângulos como podem ser representadas na Figura 16.

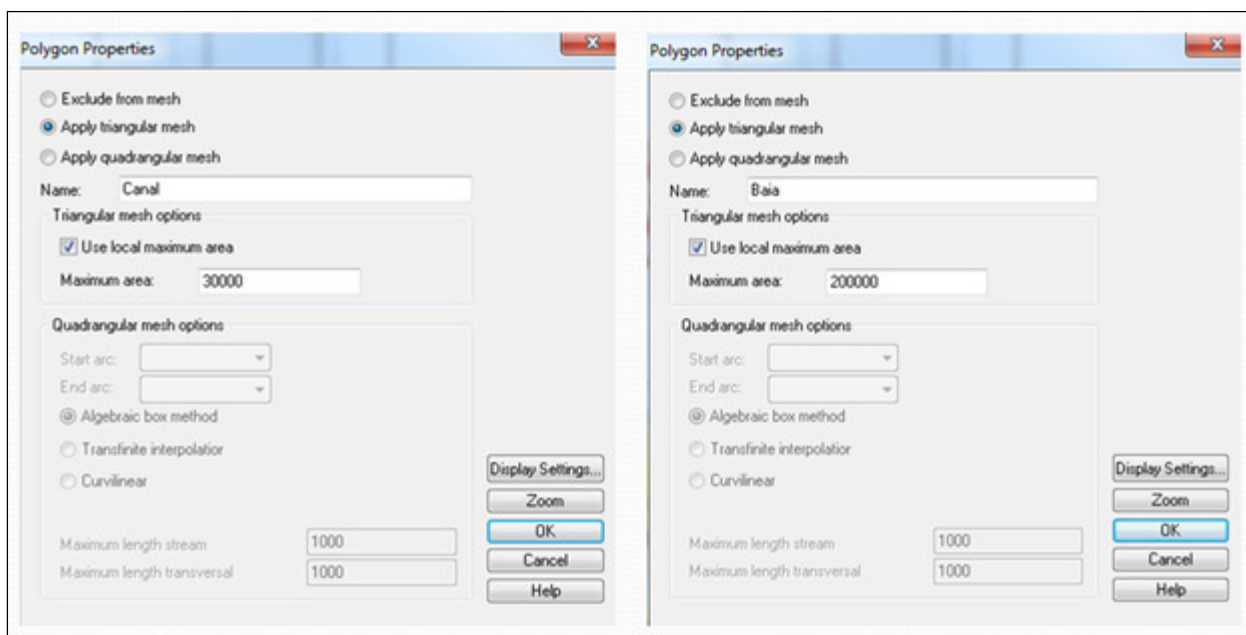


Figura 16 - Delimitação das máximas áreas da triangulação da malha flexível nas áreas da Baía e do canal do Estuário Santista.

Após inseridas as áreas máximas dos triângulos de cada trecho de interesse, pode-se gerar a malha flexível, onde deve ser especificado qual a área máxima da triangulação a ser gerada, que foi escolhida o mesmo valor da triangulação da área da Baía, de 200.000m<sup>2</sup>. Também é necessário que seja informado o mínimo ângulo do triângulo, sendo recomendado o ângulo de 30°, para que os triângulos se aproximem de triângulos equiláteros; porém dependendo da configuração da área, o programa direciona para ângulos menores, nesse caso o ângulo mínimo foi 26°. Além disso, também é pedido um número máximo de nós, que resulta no número de triângulos a serem gerados e interfere consideravelmente no tempo de processamento do programa. Nesse caso, foi determinado como 10.000 o número máximo de nós. A malha gerada resultou em 10.410 elementos e 6.925 nós e pode ser observada na Figura 17.



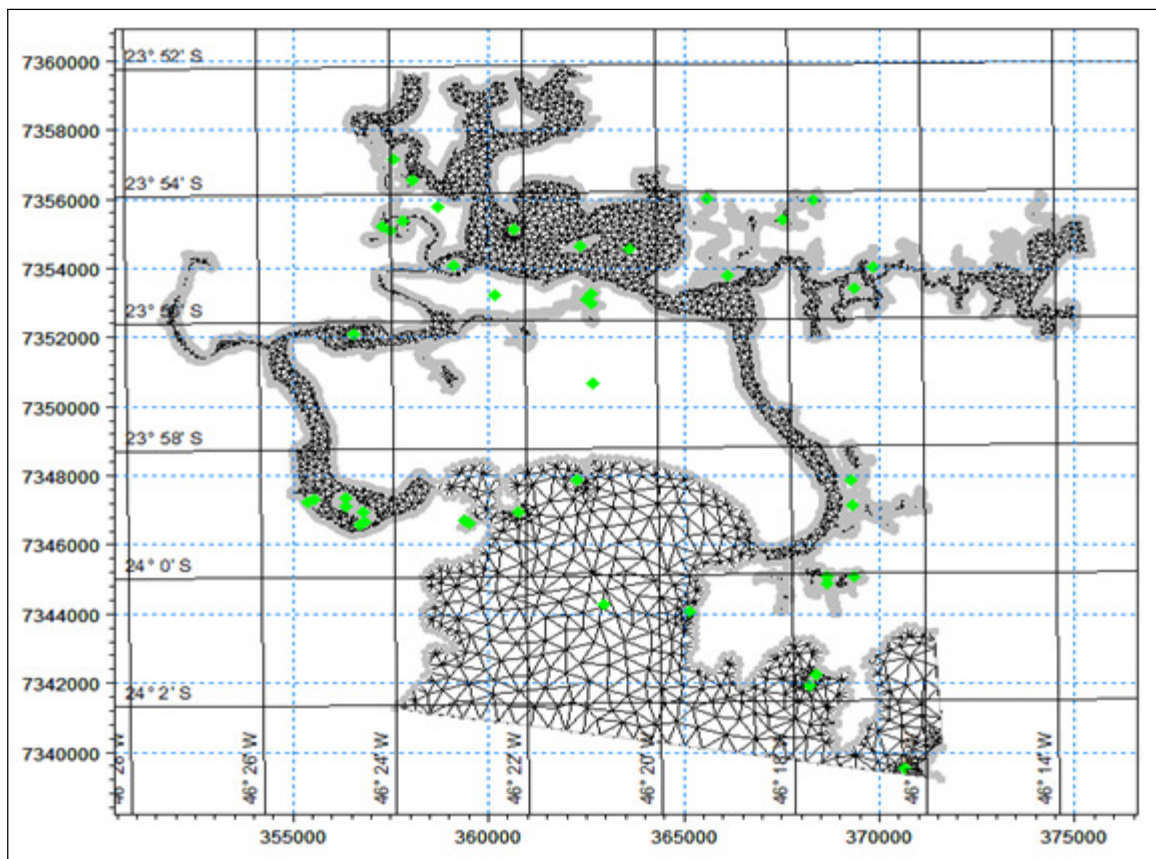


Figura 17 - Malha flexível gerada a partir dos pontos de batimetria redistribuídos e dos limites de área de triangulação, número de nós e mínimo ângulo do triângulo.

Com a malha gerada, foram importados os pontos da batimetria da região, e interpolados com a malha. A Figura 18 mostra duas palhetas que representam as profundidades, sendo a inferior dos pontos importados da batimetria e a superior da interpolação dos pontos com a malha flexível.

Após esta etapa, foi gerado um arquivo no *formato mesh*, que é então entendido pelo programa como a batimetria utilizada para discretizar a área de estudo; e está representado na figura Figura 19.

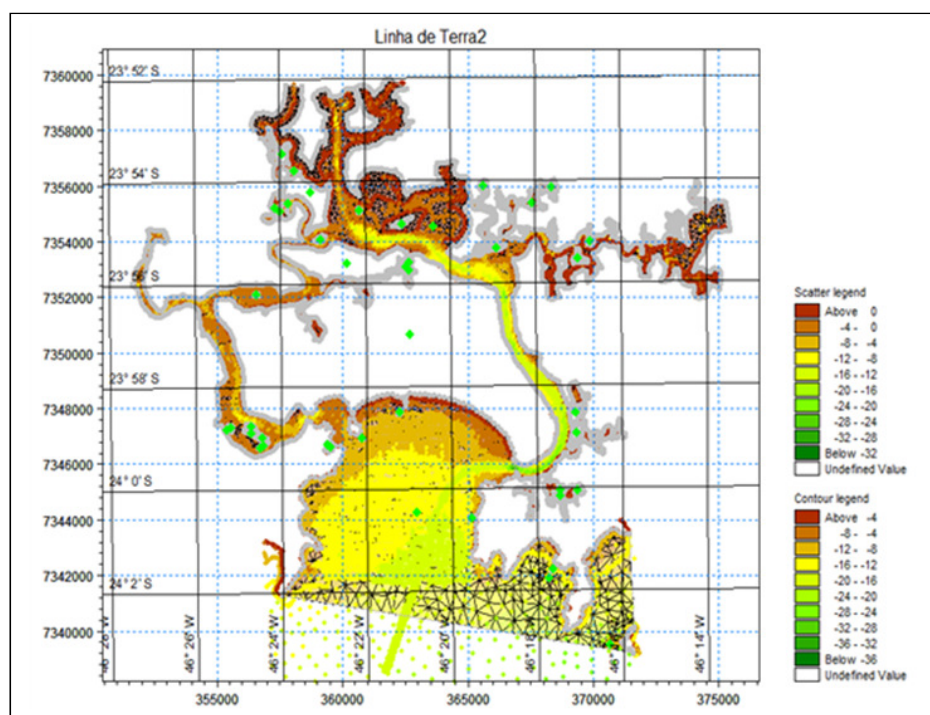


Figura 18 - Pontos importados da batimetria da região e interpolados com a malha flexível gerada. A palheta inferior representa as profundidades dos pontos e a superior a profundidade da interpolação da malha com os pontos.

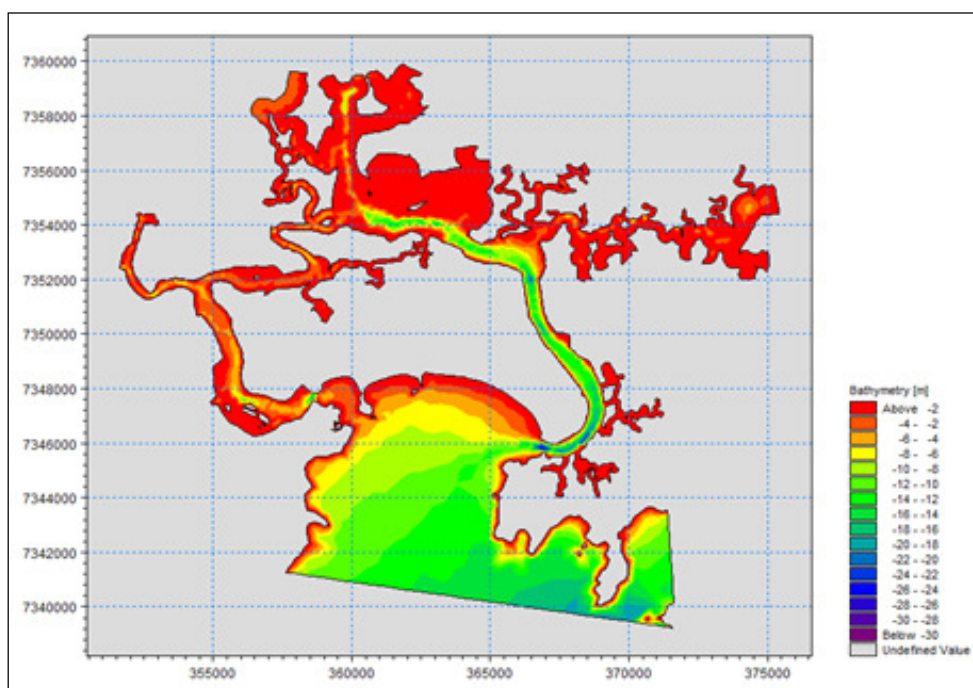


Figura 19 - Arquivo de batimetria no *formato mesh*.

### *8.1.2 – Condições de contorno*

As condições de contorno utilizadas para essa simulação foram a vazão dos rios que afluem no estuário, e a maré que foi introduzida na borda inferior inclinada da área caracterizada.

As linhas que fazem os fechamentos da região são entendidas pelo programa como linhas de terra fictícias, pois não são discretizados dados de entrada de vazões ou marés.

#### *8.1.2.1 – Descargas líquidas dos rios*

Os rios que afluem no estuário interferem diretamente na hidrodinâmica da região, por isso suas vazões devem ser contabilizadas como condições de contorno.

Estes rios foram “cortados” o mais próximo possível das seções onde existiam dados de vazões em função da existência de dados de batimetria. Acredita-se que o local onde foram realizados esses cortes, e introduzidos os dados de vazões dos rios, não interfere significamente na influência da maré que entra no estuário.

O corte da lateral direita da área, onde se encontra o Canal da Bertioga, está localizado no Largo do Candinho, onde segundo FCTH (2005) se dá o encontro das marés que se propagam pelo estuário a partir da embocadura de Santos e de Bertioga. Portanto, no Largo do Candinho, a propagação da maré pode ser afetada devido à reflexão das marés, entretanto essa simplificação foi necessária pela ausência de dados de batimetria detalhados e de maré na região do Canal da Bertioga. Estas regiões estão representadas na Figura 20.



Rangel, 2012 – Modificada.

Figura 20 - Encontro das marés que se propagam pelo Estuário de Santos e pelo Canal da Bertioga.

As descargas líquidas dos rios Quilombo, Jurubatuba, Perequê, Mogi e Cubatão foram extraídas de Sondotécnica (1977), e estão representadas na Tabela 4.

Como o período selecionado para essa simulação de pré-processamento; assim como as simulações de calibração, é agosto de 1976; foram utilizadas as vazões de julho de 1976. O período foi selecionado pelos dados de defasagem de maré obtidos.

As vazões líquidas dos afluentes Piaçabuçu, Mariana, Paranhos e Branco foram extraídas da Tabela 5, de deflúvios médios (SONDOTÉCNICA, 1977).

A localização do fechamento dos rios, e as descargas líquidas estão representadas na Figura 21.

Tabela 4 - Valores médios mensais de descargas líquidas – QL (m<sup>3</sup>/s), das descargas sólidas em suspensão – Qs (t/h) e dos volumes sólidos em suspensão – Vs (t). Inclui as descargas turbinadas (\*).

| Ano  | Mês       | Parâmetro | Quilombo  | Jurubatuba | Perequê  | Mogi      | Cubatão (*) | Total V(t) |
|------|-----------|-----------|-----------|------------|----------|-----------|-------------|------------|
| 1975 | Setembro  | QL        | 1,15      | 1,66       | 0,94     | 1,44      | 81,36       | 19.605,6   |
|      |           | Qs        | 0,04      | 0,5        | 0,99     | 0,70      | 25,00       |            |
|      |           | Vs        | 28,20     | 360,0      | 712,8    | 507,00    | 18.000,00   |            |
|      | Outubro   | QL        | 2,02      | 6,69       | 2,2      | 4,58      | 112,94      | 35.421,6   |
|      |           | Qs        | 0,15      | 1,21       | 1,36     | 2,89      | 42,00       |            |
|      |           | Vs        | 111,60    | 900,2      | 1.011,8  | 2.150,2   | 31.247,80   |            |
|      | Novembro  | QL        | 3,36      | 15,00      | 4,46     | 9,46      | 136,32      | 72.851,3   |
|      |           | Qs        | 0,41      | 3,37       | 3,16     | 4,13      | 90,00       |            |
|      |           | Vs        | 295,2     | 2.507,3    | 2.275,2  | 2.973,60  | 64.800,00   |            |
|      | Dezembro  | QL        | 19,68     | 19,66      | 10,53    | 21,47     | 140,29      | 149.234,6  |
|      |           | Qs        | 10,82     | 4,66       | 8,74     | 16,36     | 160,00      |            |
|      |           | Vs        | 8.053,10  | 3.467,0    | 6.502,6  | 12.172,00 | 119.040,0   |            |
| 1976 | Janeiro   | QL        | 31,53     | 47,58      | 20,36    | 41,79     | 118,37      | 132.930,4  |
|      |           | Qs        | 17,48     | 10,72      | 18,13    | 25,34     | 107,00      |            |
|      |           | Vs        | 14.005,10 | 7.975,7    | 13.488,7 | 18.852,90 | 79.608,00   |            |
|      | Fevereiro | QL        | 9,36      | 10,32      | 4,90     | 10,32     | 152,86      | 37.968,4   |
|      |           | Qs        | 1,94      | 1,93       | 3,53     | 7,68      | 39,50       |            |
|      |           | Vs        | 1.350,00  | 1.342,2    | 2.456,90 | 5.345,30  | 27.492,00   |            |
|      | Março     | QL        | 5,07      | 9,67       | 3,66     | 7,69      | 143,61      | 80.832,4   |
|      |           | Qs        | 0,71      | 4,81       | 4,25     | 8,27      | 90,00       |            |
|      |           | Vs        | 528,20    | 3.578,6    | 3.162,00 | 6.152,90  | 66.960,30   |            |
|      | Abril     | QL        | 21,17     | 15,8       | 9,71     | 19,71     | 149,68      | 133.531,1  |
|      |           | Qs        | 11,11     | 3,23       | 8,42     | 12,58     | 150,00      |            |
|      |           | Vs        | 7.999,20  | 2.411,9    | 6.062,40 | 9.057,60  | 108.000,00  |            |
|      | Maio      | QL        | 3,43      | 6,19       | 2,45     | 5,06      | 123,69      | 63.641,2   |
|      |           | Qs        | 0,34      | 0,69       | 1,82     | 2,69      | 80,00       |            |
|      |           | Vs        | 252,90    | 513,4      | 1.354,00 | 2.001,30  | 59.519,90   |            |
|      | Junho     | QL        | 2,57      | 4,63       | 1,82     | 3,72      | 124,74      | 27.410,3   |
|      |           | Qs        | 0,20      | 0,26       | 1,24     | 1,87      | 34,50       |            |
|      |           | Vs        | 144,00    | 187,2      | 892,80   | 1.346,40  | 24.802,90   |            |
|      | Julho     | QL        | 3,23      | 4,68       | 1,96     | 4,14      | 114,09      | 60.011,6   |
|      |           | Qs        | 0,35      | 0,44       | 1,27     | 2,09      | 79,00       |            |
|      |           | Vs        | 260,40    | 327,4      | 944,90   | 1.599,0   | 56.880,00   |            |



Tabela 5 - Características dos deflúvios médios dos cursos d'água afluentes ao estuário de São Vicente

| Tributário | Área de Drenagem (Km2) | Deflúvio Médio (m3/s) |
|------------|------------------------|-----------------------|
| Piaçabuçu  | 31                     | 1,2                   |
| Mariana    | 20                     | 0,8                   |
| Paranhos   | 25                     | 1,0                   |
| Branco     | 114                    | 4,6                   |
| Total      | 190                    | 7,6                   |

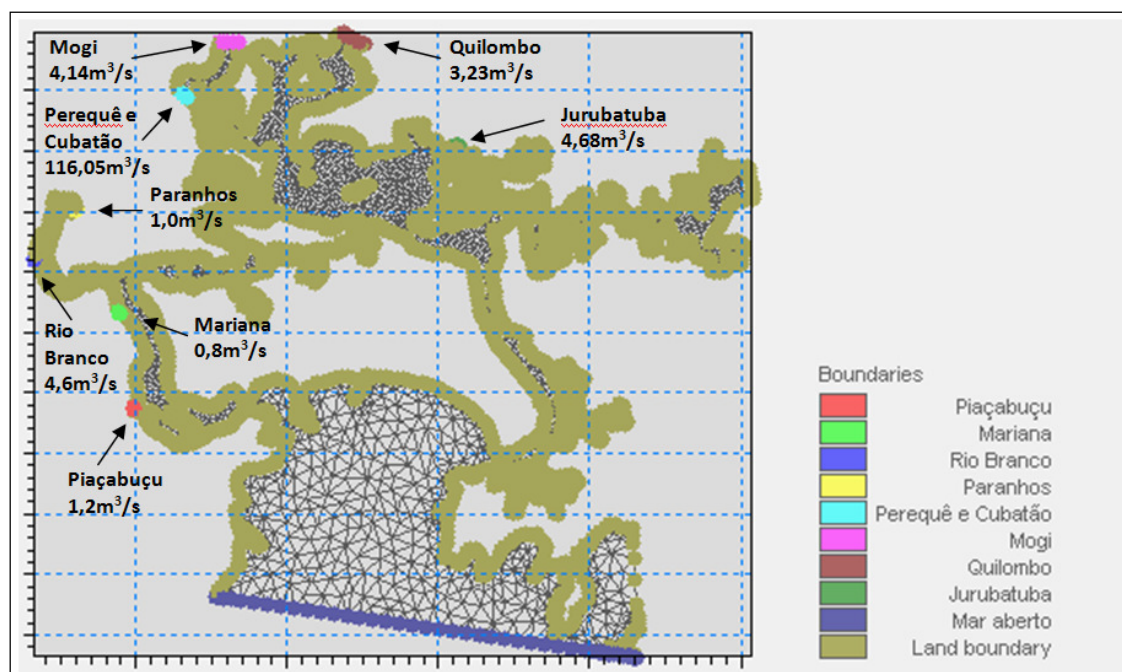


Figura 21 – Localização das linhas de contorno e vazões dos afluentes.

### 8.1.2.2 – Maré

Para essa simulação, foi gerada uma maré senoidal; que é uma maré semi-diurna pura e leva em consideração apenas o efeito da maré astronômica.

Essa maré foi gerada a partir da seguinte formulação:

$$\eta = \frac{H}{2} * \text{sen} \left( \frac{2*\pi}{T} * t + \phi \right) + NM \quad (7)$$

Onde:

$\eta$ : altura da onda (m);

$H$ : amplitudes de maré que variam a cada comprimento de onda (m);

$T$ : período da onda de maré,  $T = 12,42\text{h}$ ;

$t$ : tempo (h);

$\phi$ : defasagem,  $\phi = 0$ ;

$NM$ : nível médio,  $NM=0,77\text{m}$ .

A altura de 0,77 é referenciada pela diferença dos níveis entre o Zero do D.H.N. que representa a média das baixa-mares de sizígia e o nível médio do mar da região, que segundo as cartas batimétricas é de 0,77m.

As amplitudes de maré ( $H$ ) para esse marégrafo foram extraídas de Sondotécnica (1977), para o período de 23/08/76 a 26/08/76. Foram utilizados os dados de referência do marégrafo da Ilha das Palmas, por ser o marégrafo mais próximo da borda de entrada da maré. Esses dados podem ser visualizadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Amplitudes de maré para o posto de Ilha das Palmas.

| Marégrafo da Ilha das Palmas |       |
|------------------------------|-------|
| Data                         | H (m) |
| 23/08/1976                   | 1,36  |
| 24/08/1976                   | 1,57  |
| 25/08/1976                   | 1,58  |
| 26/08/1976                   | 1,47  |
| Média                        | 1,50  |

A cada comprimento de onda, foi utilizada uma amplitude da maré, sendo:

$$1^{\circ} = 1,36$$

$$2^{\circ} = (1,36+1,57)/2$$

$$3^{\circ} = 1,57...$$

Os dados geraram a maré representada na Figura 22.

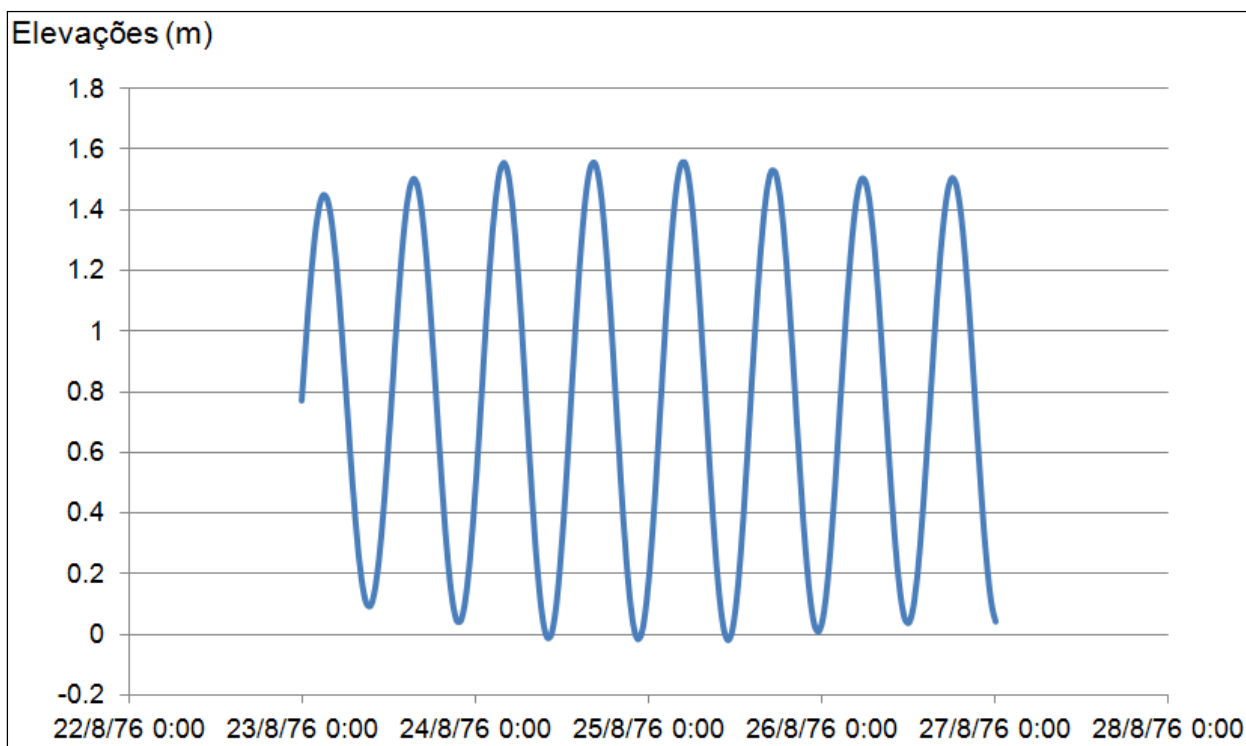


Figura 22 - Maré senoidal gerada a partir dos dados de amplitude de maré para o posto de Ilha das Palmas



### 8.1.3 – Parâmetros de entrada no arquivo de simulação no programa Mike 21

Nessa etapa são inseridos todos os arquivos gerados para a realização da simulação, assim como a definição de diversos parâmetros que podem ser modificados para a caracterização hidrodinâmica da região.

O arquivo gerado para a simulação - Mike 21 Flow Model FM (Modelo de Fluxo Mike 21 – Malha Flexível) - pede que sejam ajustados os seguintes dados, conforme palheta apresentada na Figura 23, extraída no programa Mike 21.



Figura 23 - Dados de entrada no arquivo de simulação

Os dados estão discretizados abaixo:

- Domain (Domínio) – Deve ser inserido o arquivo de batimetria gerado no formato (.mesh); além das especificações das condições de contorno. As linhas criadas no *arquivo mesh* podem representar linhas de terra ou linhas de fechamento onde pode ser inseridas entradas de marés ou

vazões, ou outras. A determinação de cada tipo de linha é especificada por um número. Quando as linhas são criadas elas possuem o código 0. Todas as linhas que permaneceram com o código 0, nessa etapa são transformadas para código 1, que representa linhas fechadas, ou seja, de interação entre terra e água. Às linhas abertas deve ser atribuído um valor maior que 1 (DHI – MZ GENERIC, 2011). Todas essas linhas, que no caso desse exemplo foram utilizadas para representar a entrada de maré e dos afluentes, foram representadas com números de 2 a 10, sendo necessário adotar um número diferente para cada tipo de entrada. Na Figura 24 são representados os códigos adotados para cada linha;

| Domain  |                   |
|---|-------------------|
| Mesh and Bathymetry Domain specification Boundary names |                   |
| Boundary  | Name              |
| Code 4  | Guilombo          |
| Code 6  | Perequê e Cubatão |
| Code 5  | Mogi              |
| Code 2  | Mar aberto        |
| Code 3  | Jurubatuba        |
| Code 7  | Paranhos          |
| Code 8  | Rio Branco        |
| Code 9  | Mariana           |
| Code 10   | Plaçabuçu         |

Figura 24 - Códigos da linhas de fechamento do arquivo de batimetria. O código 2 representa a entrada de maré e os demais os rios do Estuário.

- Time (Tempo) – Deve ser inserido a data de início da simulação (que é a mesma da série da maré), o tempo do time step (passo de tempo) e a quantidade de passos de tempo até o final da série temporal. O passo de tempo deve ser especificado como o tempo em que serão realizados os cálculos no processo iterativo de simulação; sendo, para esse caso, 240s. Como o período de simulação da maré é de 4 dias, o número de passos de tempo para essa simulação foi 1440;
- Modulo Selection (Módulo selecionado) – São incluídos os módulos do programa para serem realizados os cálculos. Nesse caso apenas o

módulo hidrodinâmico foi selecionado, porém podem ser incluídos os módulos de transporte de sedimentos, ondas, entre outros;

- Solution Technique (Técnica de solução), na aba do módulo hidrodinâmico - Deve ser especificado o tipo de tratamento dos dados da integração do tempo e a discretização espacial, sendo adotado o tipo de processo “Low order, fast algorithm” (baixa ordem, algoritmo rápido), para reduzir o tempo de processamento. Também deve ser introduzido o mínimo e o máximo passo de tempo sendo adotados 0,01 e 240s. Além disso deve ser especificado o CFL number crítico. O CFL (ou número de Courant) é um número que representa a estabilidade do modelo. Quanto maior esse número, mais instável pode ser tornar o processo de simulação. Segundo estudos anteriores que utilizaram o mesmo programa, veja Baptistelli (2008), e Garcia (2007), este número deve ser menor que 1 para canais com grande variação na batimetria, como o caso de Santos. Foi utilizado nas simulações um CFL máximo de 0,8;
- Flood and Dry (Alagamento e secamento) – Foi incluído no projeto esse módulo, que significa que a área da caracterização hidrodinâmica pode incluir áreas de inundação e de secagem. Como especificado no capítulo de batimetria, foi criada uma linha topográfica de 4m, para que fosse incluída uma área possível de inundação. O programa pede que sejam especificados valores mínimos de cota onde podem ser consideradas essas áreas. Foram estabelecidos os valores sugeridos pelo programa de secagem, inundação e umedecimento, respectivamente de 0,005; 0,05 e 0,1m (DHI – MIKE FM HD 2D, 2011);
- Density (Densidade) – Foi especificada a densidade barotrópica, através da qual a densidade do fluido só depende da pressão, já que a temperatura é constante. Esse é o caso de Santos, já que está localizado na zona tropical da Terra;
- Eddy Viscosity (“Coeficiente de Viscosidade Turbulenta”) – O coeficiente empregado foi determinado pela formulação de Smagorinsky, que deve ser escolhido entre 0,25 e 1,0 (DHI – MIKE FM HD 2D, 2011). Esse valor

pode ser constante em todo o domínio computacional ou pode ser gerado um arquivo onde é especificado o valor para cada triângulo da malha flexível. Nesse caso foi utilizado o valor constante de 0,28, que é o valor padrão sugerido pelo programa;

- Bed Resistance (Resistência do leito) – Foi escolhido para representar a resistência do leito o coeficiente de Manning. Os valores normalmente utilizados para calibração do modelo variam entre 20 e 40  $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ . Quando não se tem informação sobre a rugosidade do fundo, o valor recomendado pelo programa, e utilizado nessa primeira etapa é 32  $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ;
- Coriolis Forcing (Força de *Coriolis*) – Foi escolhida a força de Coriolis variando no domínio. Em aplicações reais, essa força deve ser incluída; apenas em testes de laboratório essa força pode ser desprezada, entretanto, o efeito dessa força não é significativo em regiões pouco extensas, que é o caso desse exemplo. (DHI – MIKE FM HD STEP BY STEP, 2011);
- Os itens: Wind Forcing (Força do Vento), Ice Coverage (Cobertura de gelo), Tidal Potencial (Potencial das marés), Precipitation-Evaporation (Precipitação-Evaporação), Wave Radiation (Ondas de radiação) e Sources (Fontes); não foram incluídos;
- Structures (Estruturas) – Não foram incluídas as estruturas do Porto de Santos no canal. A linha topográfica de 4m na área onde se encontram os cais está quase encostada na linha 0m; o que sugere ao modelo que há algum tipo de estrutura de contenção que difere do terreno original.
- Initial Conditions (Condições Iniciais) – Foi introduzida a condição de nível médio inicial de 0.77m constante em toda a área; conforme especificado no capítulo de maré;
- Boundary Conditions (Condições de Contorno) – Foi especificado os arquivos de condições de contorno gerados. Para todas as linhas de código 1- Land Boundary (Contornos de Terra), foi especificado “zero normal velocity” (velocidade normal nula). Para a linha de entrada de maré, nomeada de Mar aberto; foi escolhido o tipo nível especificado, no

formato variando no tempo, constante ao longo da borda, e foi inserido o arquivo de maré gerado no programa no formato (.df0). Para esse arquivo foi inserido um “período de acomodação” do nível d’água de 0,77m em 7200s, variando de forma senoidal. Para as condições de contorno de entrada dos rios, foi especificado uma descarga constante, com o valor de cada vazão, sem período de acomodação;

- Outputs (Saídas) – Foram gerados arquivos de saídas nos mesmos pontos de medição dos estudos compilados; para isso, foram inseridas as coordenadas de cada ponto. Os pontos de medição estão representados na Figura 25 e foram extraídos de Sondotécnica (1977). Foi gerado um arquivo denominado “Área” que inclui todo o domínio do modelo. Pode ser escolhida a opção da simulação em determinado arquivo de saída não contemplar todo o período de tempo de dados de entrada, como nesse caso, o período de dados de maré de 4 dias; porém nesse exemplo isso não foi utilizado. Nesses arquivos deve ser especificado uma frequência de saídas de dados, que representa a cada quantos passos de tempo serão gerados os dados de saída. No caso dessa simulação o número de passos de tempo era 240s, e foi especificado uma frequência de 5, então nos arquivos de saída, os dados eram impressos a cada 20 minutos. Para todos os arquivos de saída, os dados calculados foram: elevação da superfície, velocidade nas duas direções, corrente (direção e velocidade) e o número de Courant calculados em cada triângulo da malha flexível.

Inseridos todos os parâmetros, o arquivo está pronto para ser iniciada a simulação.

Os resultados dos arquivos de saída foram comparados com os dados extraídos do relatório de Sondotécnica (1977), das diferenças de fase entre os postos medidos e o marégrafo da Ilha das Palmas, apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Amplitudes – H (m), e diferenças de fase – d (min) ao longo do estuário.

| Local      | I. Palmas |   | C. Pesca |    | T. Grande |    | B. Aérea |    | I. Barnabé |    | Cosipa |    | Tumiaru |    | Casqueiro |    |
|------------|-----------|---|----------|----|-----------|----|----------|----|------------|----|--------|----|---------|----|-----------|----|
| Data       | H         | d | H        | d  | H         | d  | H        | d  | H          | d  | H      | d  | H       | d  | H         | d  |
| 23/08/1976 | 1,36      | — | 1,26     | 10 | 1,37      | 15 | 1,38     | 37 | 1,36       | 40 | 1,38   | 63 | 1,04    | 10 | 1,38      | 35 |
| 24/08/1976 | 1,57      | — | 1,30     | 8  | 1,72      | 18 | 1,74     | 18 | 1,62       | 33 | 1,74   | 33 | 1,51    | 8  | 1,60      | 18 |
| 25/08/1976 | 1,58      | — | 1,52     | 10 | 1,60      | 20 | 1,76     | 30 | 1,66       | 32 | 1,76   | 50 | 1,54    | 15 | 1,54      | 50 |
| 26/08/1976 | 1,47      | — | 1,48     | 10 | 1,54      | 25 | 1,62     | 30 | 1,55       | 40 | 1,62   | 55 | 1,47    | 25 | 1,51      | 50 |
| Médias     | 1,50      | — | 1,39     | 10 | 1,56      | 20 | 1,62     | 32 | 1,55       | 36 | 1,62   | 56 | 1,39    | 16 | 1,51      | 45 |

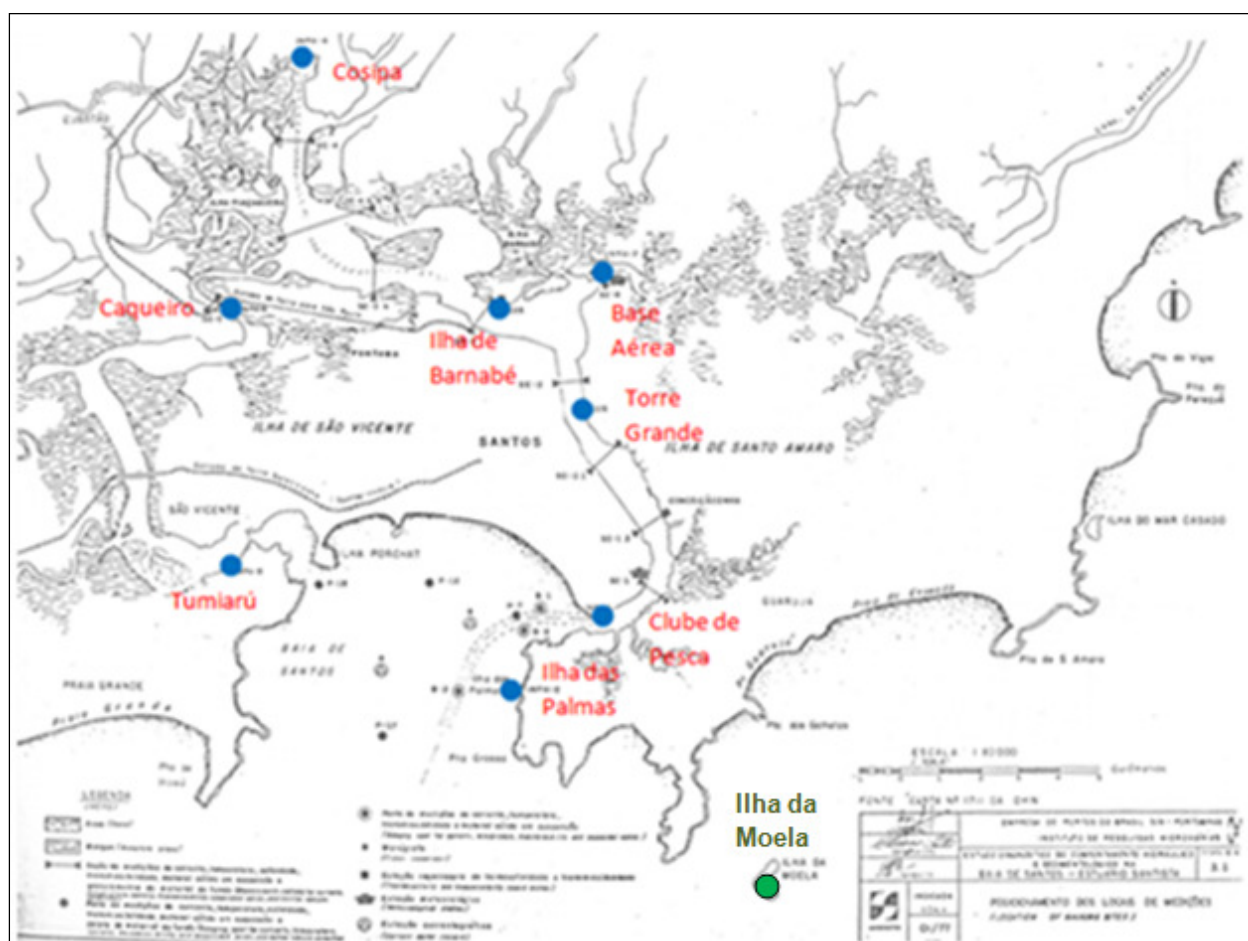


Figura 25 - Pontos dos arquivos de saída e dos dados de marégrafos nos estudos de Sondotécnica (1977).

## 8.2 – Calibração

Para a etapa de calibração, optou-se pela modificação de diversos parâmetros que seriam necessários para representar a região caracterizada. Esses parâmetros foram sendo modificados ao longo das simulações realizadas, conforme análise dos resultados.

Na simulação de número 30, pôde-se completar o processo de calibração. A seguir, encontram-se discriminados todos os dados que foram modificados desde a primeira simulação, até a fase final de calibração.

Foram modificados dados de batimetria, maré e outros parâmetros de entrada como o coeficiente de Manning.

### 8.2.1 – *Dados batimétricos*

Na batimetria da região foram feitas algumas modificações tanto em dados batimétricos como nas linhas de borda da região.

Optou-se pela modificação da linha onde era inserida a entrada da maré na região. Essa linha que começava na Ponta de Itaipú, no lado inferior esquerdo da Figura 25, e terminava da extremidade inferior da Ilha da Moela, gerou falhas nas simulações nos pontos próximos a Ponta de Itaipú, pois a maré de entrada gerava nessa região sobre-elevações maiores que as “permitidas” nesses pontos, ou seja; o programa calculava uma inundação da região e uma extrapolação para fora da área delimitada. Além disso, foi recomendado o afastamento da linha de entrada de maré para que houvesse uma acomodação dos dados ao longo da Baía até os Pontos de Medição de Ilha das Palmas, Clube de Pesca e Tumiarú.

Foi realizada a redistribuição dos pontos ao longo das linhas, optando-se por uma maior discretização da região. Na área da Baía, os pontos passaram de um distanciamento de 200 para 100 metros, e na região do canal, de 100 para 50m; já que

optou-se por uma maior densificação de triângulos da malha flexível nas duas regiões, por isso a necessidade de uma maior discretização de pontos.

Em relação à malha flexível, foram feitas novas separações na região. O trecho entre o posto do Clube de Pesca e o posto da Torre Grande, foi o trecho que mais apresentou incoerência quanto aos valores medidos em campo. Por isso optou por uma maior densificação de triângulos nessa região. Porém esse trecho apresenta inúmeros afluentes, que permaneceram com a mesma discretização dos outros trechos do Canal do Porto. A Tabela 8 apresenta a triangulação máxima utilizada em cada região e a Figura 26 com a localização dos trechos em questão, assim como o resultado final da malha flexível.

Para a criação da malha flexível, foi especificada uma área máxima de 50.000 m<sup>2</sup>, ângulo mínimo de 30º, e 150.000 o número máximo de elementos de nó. Nessa etapa, a malha flexível resultou em 37.345 elementos e 21.914 números de nós, o que gerou um aumento significativo se comparado aos 10.410 elementos e 6.925 nós da primeira simulação.

Tabela 8 - Áreas máximas utilizadas nos trechos da área de simulação.

| Trechos                     | Áreas máximas (m <sup>2</sup> ) |
|-----------------------------|---------------------------------|
| Baía                        | 50.000                          |
| Canal                       | 7.500                           |
| Canal do Porto              | 1.000                           |
| Afluentes do canal do porto | 7500                            |

Foi alterada também a batimetria do trecho entre os postos da Ilha de Barnabé até a Cosipa. Esse trecho estava com uma profundidade menor que a medida no local para o mesmo período. A carta batimétrica utilizada não contemplava que o trecho já havia sido dragado, conforme dados dos estudos utilizados para comparação de resultados (SONDOTÉCNICA, 1977).

A configuração final do arquivo de batimetria utilizado para a calibração da região é apresentada na Figura 27.



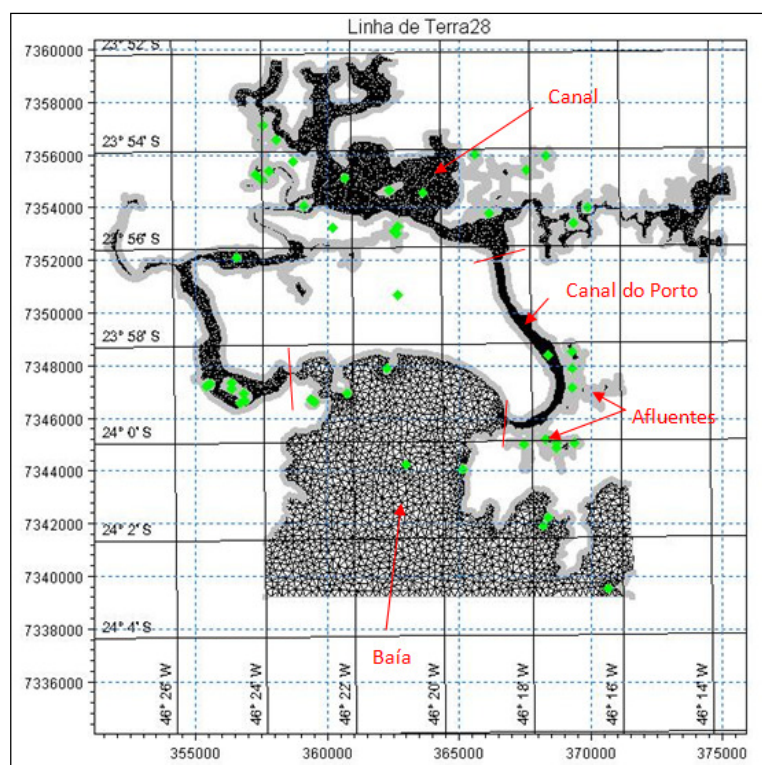


Figura 26 - Malha flexível gerada e áreas de delimitação para as diferentes triangulações.

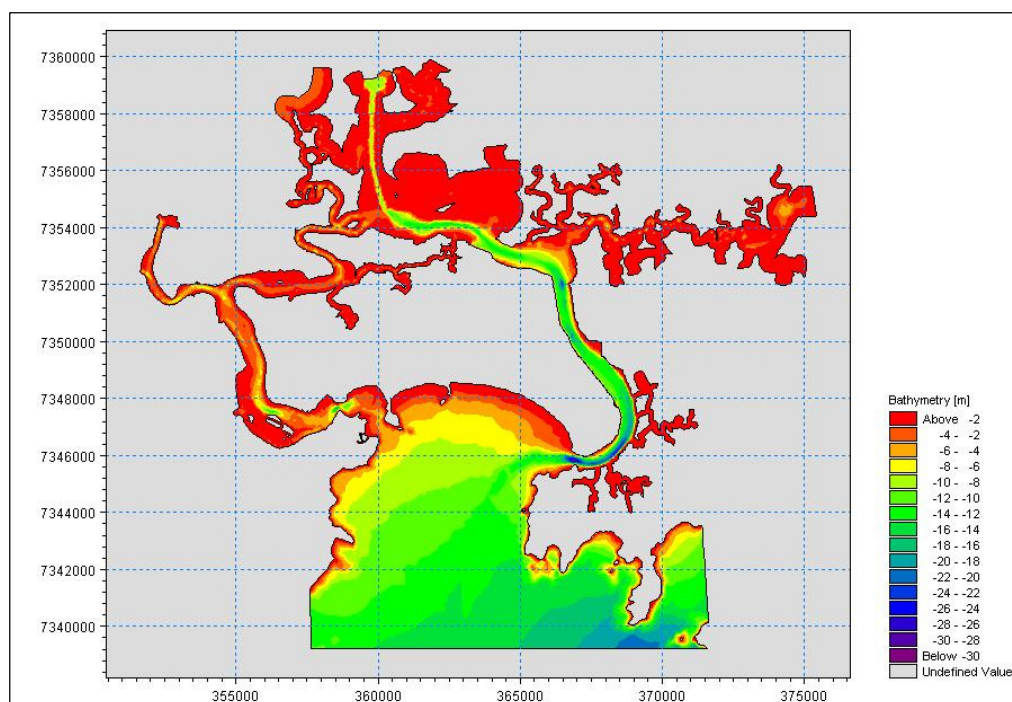


Figura 27 – Arquivo de batimetria utilizado no processo de calibração.

### 8.2.2 – Maré

A maré utilizada na primeira simulação foi gerada a partir de dados de amplitudes de maré e representava uma maré semi-diurna pura. Porém, a maré em Santos sofre influência de componentes harmônicas de período diurno, sendo considerada uma maré de desigualdades diurnas, além da influência de efeitos meteorológicos; conforme esquematizado na Figura 28 (SONDOTÉCNICA, 1977).

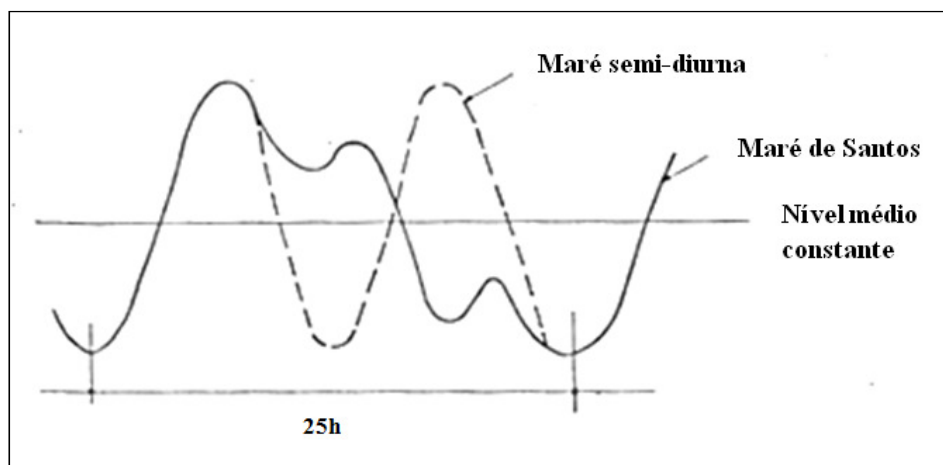


Figura 28 - Superposição das marés para Santos

Assim, para as demais simulações foram geradas marés de períodos de interesse a partir de componentes harmônicas do Posto da Ilha da Moela. Esse posto é praticamente coincidente com a extremidade direita da borda do modelo que foi introduzida a maré. Como não havia outro marégrafo na extremidade oposta, a variação de maré foi considerada constante ao longo de toda a borda.

As componentes foram extraídas de Sondotécnica (1977), e se encontram na Tabela 9. Dessa tabela, foram inseridas 28 componentes no programa Mike 21, que conta com um módulo para geração de marés através de dados harmônicos. Não foram inseridas todas as componentes, pois algumas delas não puderam ser representadas com as componentes disponíveis no programa. Porém as componentes que não foram utilizadas possuíam amplitudes da ordem de centímetros, podendo ser desprezadas,

não acarretando alterações significativas na maré gerada. As componentes que foram utilizadas para a geração da maré, com suas amplitudes e fases, estão esquematizadas na Tabela 10. O programa gerou a maré para o mesmo período de 23/08/76 a 27/08/76.

Para contemplar na simulação os efeitos relacionados à maré meteorológica, a elevação gerada pelas constantes harmônicas para o marégrafo da Ilha da Moela foi somada a oscilação do nível médio local na Ilha das Palmas para o mesmo período. Esta oscilação foi extraída de Sondotécnica (1977), onde foram levantadas as oscilações dos níveis médios locais ao longo do estuário, conforme apresentado na Figura 29. Como os dados são de postos de medição diferentes, deve-se esperar uma imprecisão no resultado da maré; porém pela ausência de dados mais precisos, considerou-se que as variações nos níveis médios locais não seriam muito diferentes uma vez que os pontos são bem próximos.

A maré resultante está representada na Figura 30, onde também são encontradas algumas elevações, porém a tabela de elevações não está apresentada de forma integral.

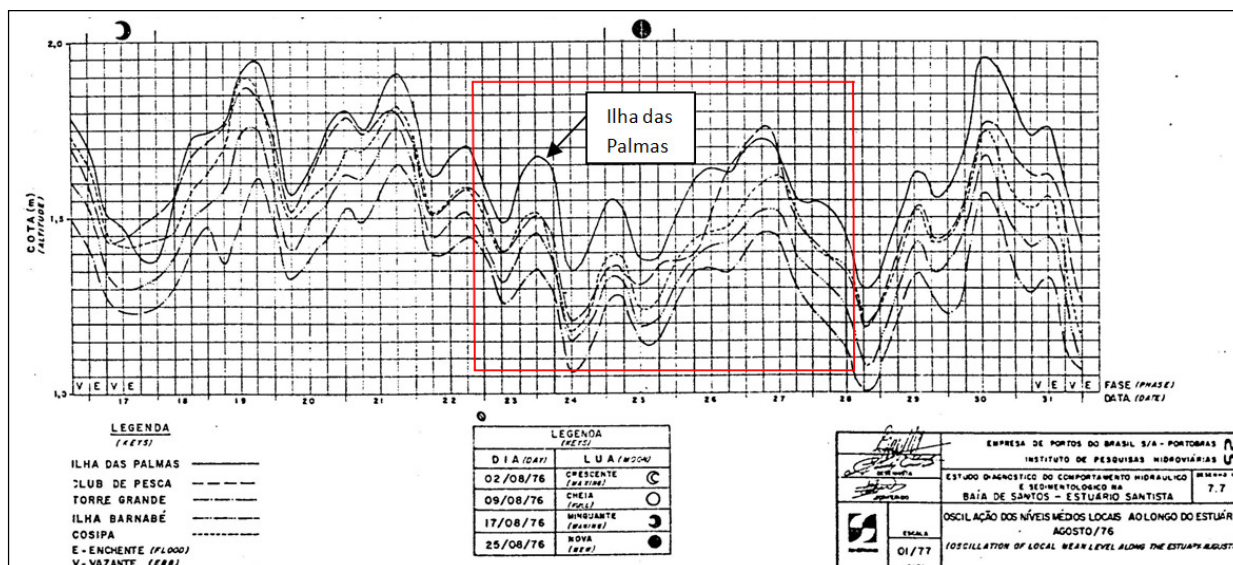


Figura 29 - Oscilação dos níveis médios locais ao longo do estuário no mês de agosto de 1976.

Tabela 9 - Constantes harmônicas para o posto do Trapicho, na Ilha da Moela.

| Informações   | Ondas Fundamentais   |        |       | Ondas Superiores e Compostas |        |       |
|---|----------------------|--------|-------|------------------------------|--------|-------|
| Posição<br>$\varphi=24^{\circ}03'1\text{ S}$<br>$\lambda=46^{\circ}16'1\text{ W}$<br>Fuso: $=+3$<br>Localização do marégrafo:<br>Trapicho   |                      | H (cm) | g (o) |                              | H (cm) | g (o) |
|   | Sa                   |        |       |                              |        |       |
|   | Ssa                  |        |       |                              |        |       |
|   | Mm                   | 16,3   | 340,5 | 2SM2                         | 0,2    | 252,4 |
|   | Mf                   |        |       | MK3                          | 1,8    | 95,3  |
|   | MSf                  | 0,2    | 276,4 | MO3=2MK3                     | 2,6    | 333,5 |
| Época e duração das observações<br><br>Anos: 1962<br><br>Época do ano (ou mês): 12/7 a 12/8<br><br>Observações de 32 dias.<br><br>Método de observação: Marégrafo<br><br>Autoridade: I.O.S.P<br>Método de análise: T. Liverpool Institute   | K1                   | 8,6    | 131,6 | SK3                          |        |       |
|   | O1                   | 11,5   | 72,2  | SO3                          |        |       |
|   | P1                   | 2,8    | 131,6 | S3                           |        |       |
|   | Q1                   | 4,7    | 57,7  |                              |        |       |
|   | J1                   | 0,6    | 10,3  | M4                           | 2,6    | 336,5 |
|   | M10                  | 0,2    | 283,8 | MS4                          | 1,6    | 69,2  |
|   | OO1                  | 1,5    | 166,3 | MN4                          | 2,2    | 228,9 |
|   | $vK1=\rho1$          |        |       | MK4                          |        |       |
|   | $vJ1=\sigma1$        | 0,4    | 43,2  | S4                           |        |       |
|   | $TK1=\pi1$           | 0,2    | 131,6 | SK4                          |        |       |
|   | $NJ1=2Q1$            | 0,3    | 43,2  | SN4                          | 1,7    | 291,0 |
|   | $KP1=\varphi1$       | 0,1    | 131,6 |                              |        |       |
|   | $LP1=\chi1$          |        |       | M6                           | 1,1    | 64,0  |
|   | $\lambda O1=\Theta1$ |        |       | 2MS6                         | 1,1    | 133,8 |
|   | SO1                  |        |       | 2MN6                         | 0,5    | 26,1  |
|   | MP1                  |        |       | 2SM6                         | 0,8    | 243,2 |
|   | S1                   |        |       | MSN6                         |        |       |
|   | $RP1=\psi1$          | 0,1    | 131,6 | S6                           |        |       |
|   | KQ1                  |        |       | 2MK6                         |        |       |
|   |                      |        |       | MSK6                         |        |       |
| Referência de Nível<br><br>Marca de referência de nível: RN-1<br>junto a casa de máquina do guindaste<br><br>Zero do marégrafo: 417,4 cm abaixo da<br>referência de nível<br><br>Nível médio: 345,4 cm acima do zero do<br>marégrafo<br><br>Cota do nível médio acima do nível de<br>redução da carta de maior escala:<br>78,7cm<br><br>Carta No. 1801                                      | M2                   | 32,6   | 73,4  | M8                           |        |       |
|   | S2                   | 23,1   | 77,6  | 3MS8                         |        |       |
|   | N2                   | 3,0    | 117,7 | 2(MS)8                       |        |       |
|   | K2                   | 6,3    | 77,6  | 2(MS)8                       |        |       |
|   | $v2$                 | 0,6    | 117,7 | 2MSN8                        |        |       |
|   | $2MS2=\mu2$          | 1,4    | 23,2  | S8                           |        |       |
|   | L2                   | 1,3    | 53,0  |                              |        |       |
|   | T2                   | 1,4    | 77,6  | Outras Ondas                 |        |       |
|   | 2N2                  | 0,4    | 162,0 | OQ2                          |        |       |
|   | MNS2                 |        |       | OP2                          |        |       |
|   | $\lambda2$           |        |       | MKS2                         |        |       |
|   | KJ2                  |        |       | MSN2                         |        |       |
|   | R2                   |        |       |                              |        |       |
|   | M3                   | 4,5    | 182,9 |                              |        |       |
| Notas particulares de caráter prático<br><br>Maior amplitude observada: 145 cm<br>Menor amplitude obsevada: 25 cm<br><br>Altura da maior preamar observada<br>acima do zero do marégrafo: 430 cm<br><br>Altura da menor preamar observada<br>acima do zero do marégrafo: 260 cm<br><br>Classificação da maré (Courtier):<br>Desigualdades diurnas<br><br>Estabelecimento do porto: 2h 26min |                      |        |       |                              |        |       |
|   |                      |        |       |                              |        |       |
|   |                      |        |       |                              |        |       |
|   |                      |        |       |                              |        |       |
|   |                      |        |       |                              |        |       |
|   |                      |        |       |                              |        |       |
|   |                      |        |       |                              |        |       |
|   |                      |        |       |                              |        |       |
|   |                      |        |       |                              |        |       |
|   |                      |        |       |                              |        |       |

Tabela 10 - Componentes harmônicas utilizadas para a geração da maré em Santos.

| Componente | H (m) | g (o) |
|------------|-------|-------|
| MM         | 0.163 | 340.5 |
| MSF        | 0.002 | 276.4 |
| K1         | 0.086 | 131.6 |
| O1         | 0.115 | 72.2  |
| P1         | 0.028 | 131.6 |
| Q1         | 0.047 | 57.7  |
| J1         | 0.006 | 10.3  |
| M10        | 0.002 | 283.8 |
| OO1        | 0.015 | 166.3 |
| M2         | 0.326 | 73.4  |
| S2         | 0.231 | 77.6  |
| N2         | 0.03  | 117.7 |
| K2         | 0.063 | 77.6  |
| L2         | 0.013 | 53    |
| T2         | 0.014 | 77.6  |
| 2N2        | 0.004 | 162   |
| 2SM2       | 0.002 | 252.4 |
| MK3        | 0.018 | 95.3  |
| MO3        | 0.026 | 333.5 |
| M4         | 0.026 | 336.5 |
| M3         | 0.045 | 182.9 |
| MS4        | 0.016 | 69.2  |
| MN4        | 0.022 | 228.9 |
| SN4        | 0.017 | 291   |
| M6         | 0.011 | 64    |
| 2MS6       | 0.011 | 133.8 |
| 2MN6       | 0.005 | 26.1  |
| 2SM6       | 0.008 | 243.2 |

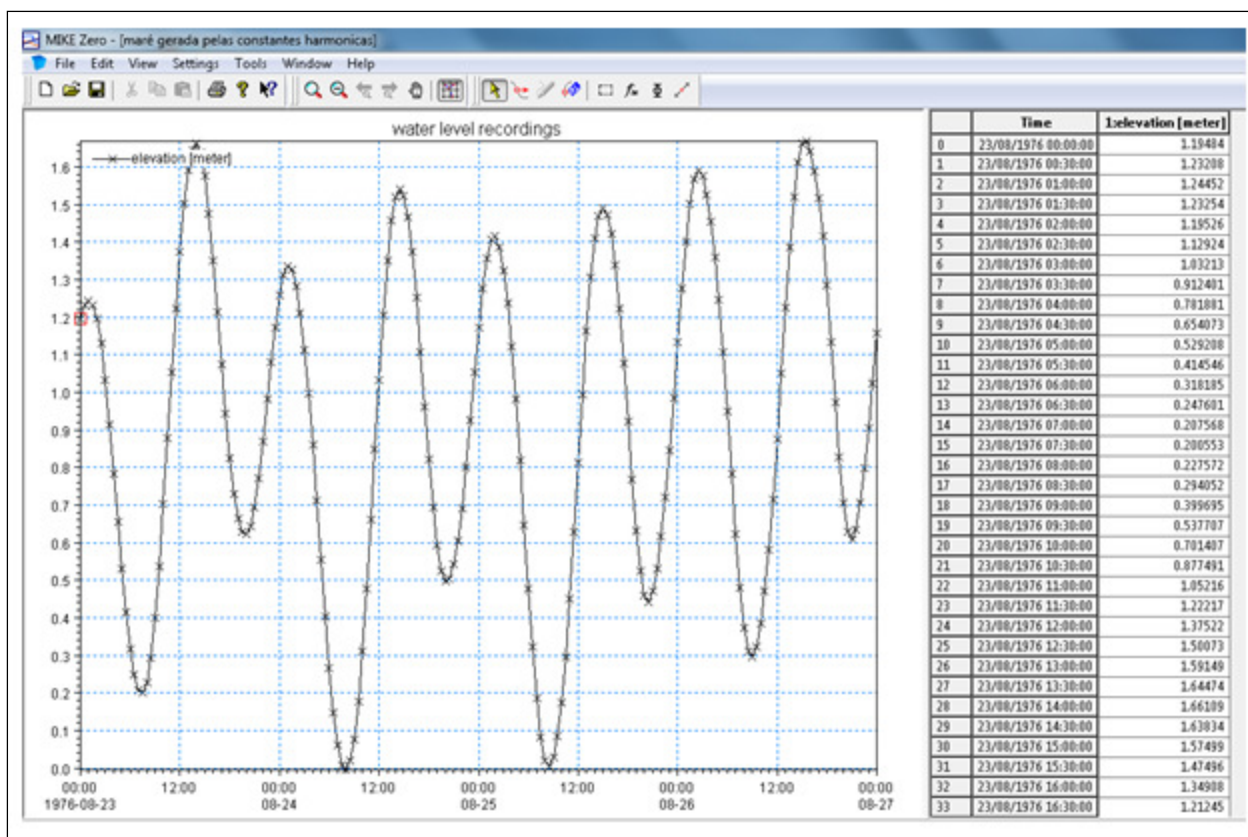


Figura 30 - Maré gerada pelas constantes harmônicas da Ilha da Moela.

### 8.2.3 – Coeficiente de Manning

O coeficiente de Manning representa a rugosidade do fundo. É um fator importante para a calibração do modelo já que geralmente não é constante em toda a região.

No Porto de Santos, onde os terminais são cais corrido de paramento fechado, ou seja, muros verticais de concreto; a rugosidade interfere consideravelmente na hidrodinâmica local, por apresentar um coeficiente de Manning superior aos locais com talude natural.

No processo calibratório, o coeficiente de Manning foi determinante para que se chegasse aos resultados esperados. A cada simulação foi alterado o coeficiente de Manning em cada trecho localizado entre postos consecutivos de medição. Foi gerado



um arquivo para cada simulação com o coeficiente de Manning em cada ponto (DHI – MIKE FM ST STEP BY STEP WC, 2011).

O arquivo final de calibração da caracterização da Baía e Estuário Santista está representado na Figura 31.

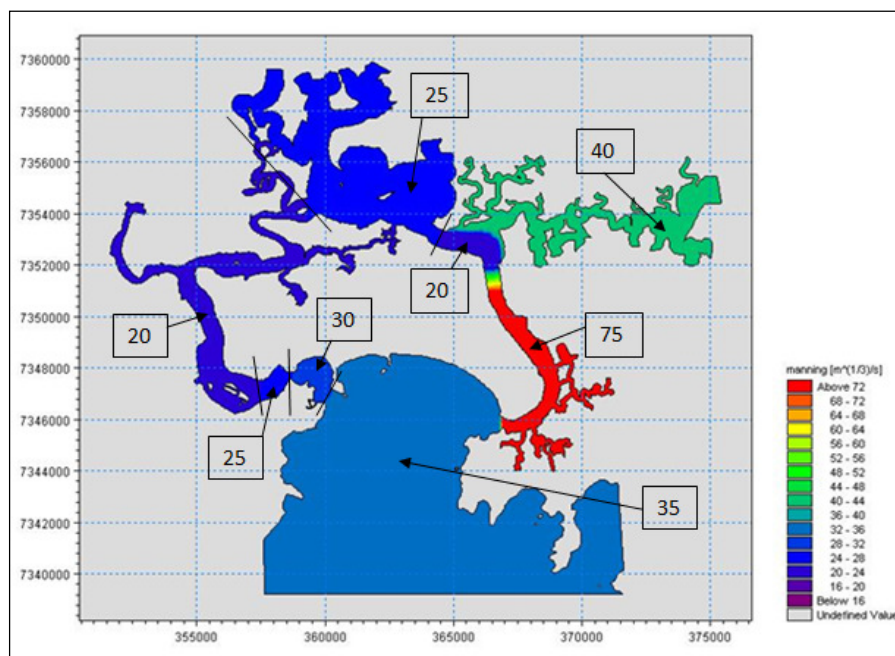


Figura 31 - Coeficientes de Manning ( $m^{1/3}/s$ ) utilizados no processo de calibração.

#### 8.2.4 – Parâmetros de entrada no arquivo de simulação

Além do arquivo da batimetria, foi modificado o time step para as simulações de calibração. Foi estipulado um time step de 2 segundos, bem abaixo do estipulado na primeira simulação, de 240s, para que houvesse uma maior precisão nos resultados.

Foi modificada a condição de “Bed Resistance”, para a opção variando no domínio, onde foi importado o arquivo de coeficientes de Manning criado. Foi modificada também a condição de maré, com o novo arquivo gerado pelas constantes harmônicas.

Nos arquivos de saída, além do número de passo de tempo, que passou a ser 172.800, foi modificada também a frequência para 60, para que fosse gerado um arquivo de saída discretizado a cada 2 minutos.

#### 8.2.5 – Análise da sensibilidade do modelo pela modificação da malha flexível

Como forma de analisar a resposta do programa em relação à modificação da malha flexível, foram realizadas simulações modificando a densidade da malha.

Essas simulações foram realizadas utilizando como referência a simulação de número 30, a qual calibrou o modelo em questão.

A malha empregada na simulação de número 30 foi modificada utilizando metade e o dobro do espaçamento entre os pontos, para a malha mais e menos densa respectivamente. Como consequência as áreas máximas utilizadas para gerar a malha flexível sofreram uma redução para  $\frac{1}{4}$  e um aumento de 4 vezes.

Na Tabela 11 se encontram esquematizadas as modificações no distanciamento entre os pontos e as áreas máximas empregadas em cada simulação, em cada trecho.

Tabela 11 - Distâncias e áreas utilizadas para a verificação da sensibilidade do modelo em relação a malha flexível.

|                               | Distancias (m) |       | Áreas (m2) |        |       |           |
|-------------------------------|----------------|-------|------------|--------|-------|-----------|
|                               | Baía           | Canal | Baía       | Canal  | Porto | Afluentes |
| Malha empregada na calibração | 100            | 50    | 50,000     | 7,500  | 1,000 | 7,500     |
| Malha mais densa              | 50             | 25    | 12,500     | 1875   | 250   | 1,875     |
| Malha menos densa             | 200            | 100   | 200,000    | 30,000 | 4,000 | 30,000    |



### 8.3 – Validação

Na etapa de validação, sem serem alterados os dados de batimetria, coeficientes de Manning e as considerações dos parâmetros que regem o modelo, deve ser verificada a eficiência do modelo para situações diferentes daquelas empregadas no processo de calibração.

As situações simuladas no processo de validação diferem do processo de calibração pelos períodos de simulação. Assim, para os novos dias de simulação, foi necessário gerar novos dados de entrada de maré. Esses dados de maré foram gerados para um período de 3 dias, sendo um antes e um depois do dia desejado. Esse novo período de 3 dias afetou o número de passos de tempo do modelo que passou para 128.700.

Os arquivos de maré foram gerados através dos mesmos dados de contantes harmônicas discriminados no processo de calibração, apenas alterando o período de geração da maré. Porém, diferente do processo de calibração, esses dados não foram corrigidos pela oscilação do nível médio, pois não foram encontrados dados para os novos períodos de simulação.

Na Tabela 12, são encontrados os nomes dos postos onde foram extraídos os novos dados para validação do modelo, suas coordenadas, e o dia em que foram obtidos os dados de medição de campo extraídos de Sondotécnica (1977).

Esses novos pontos de medição podem ser localizados na Figura 32, onde os nomes dados aos postos representam seções de medições encontradas no estuário. Nessas seções foram realizadas medições de velocidade de correntes em 3 pontos verticais. Para a comparação de dados, foi utilizada a vertical V2, medida no meio das seções especificadas. As marés geradas para os novos pontos de medição estão encontradas nas figuras: ponto SE-1 (Figura 33), ponto SE-2 (Figura 34), ponto SE-3 (Figura 35), ponto SE-4 (Figura 36), ponto SE-5 (Figura 37) e ponto SE-6 (Figura 38).

Tabela 12 - Pontos de medição no processo de validação. As coordenadas x e y representam a latitude e a longitude em coordenadas UTM, e a coordenada z representa a profundidade.

| Pontos | Coordenadas  | Data       |
|--------|--|------------|
| SE-1   | x= 368.442,427<br>y = 7.346.413,403<br>z = -17,396 | 17/03/1976 |
| SE-2   | x= 366.517,026<br>y = 7.351.492,512<br>z = -15,669 | 16/02/1976 |
| SE-3   | x= 364.334,283<br>y = 7.353.134,142<br>z = -14,110 | 30/03/1976 |
| SE-4   | x= 359.773,387<br>y = 7.357.260,660<br>z = -10,000 | 04/12/1975 |
| SE-5   | x= 357.638,378<br>y = 7.353.279,068<br>z = -4,323  | 28/02/1976 |
| SE-6   | x= 367.175,404<br>y = 7.353.884,190<br>z = -2,681  | 15/03/1976 |

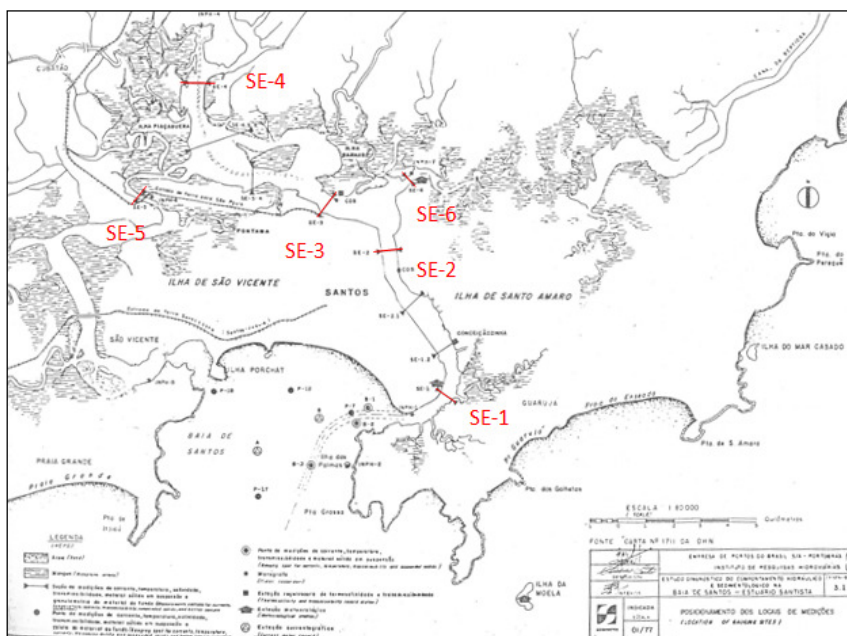


Figura 32 - Localização dos pontos de medição do processo de validação.

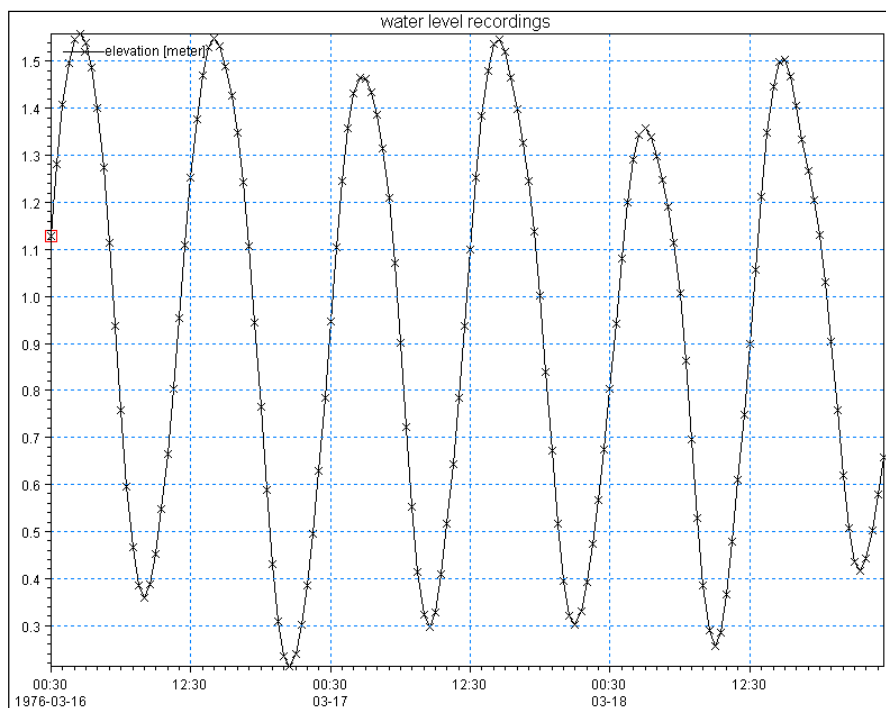


Figura 33 - Maré gerada pelas constantes harmônicas para o ponto SE-1. Elevações (m) x tempo (h).

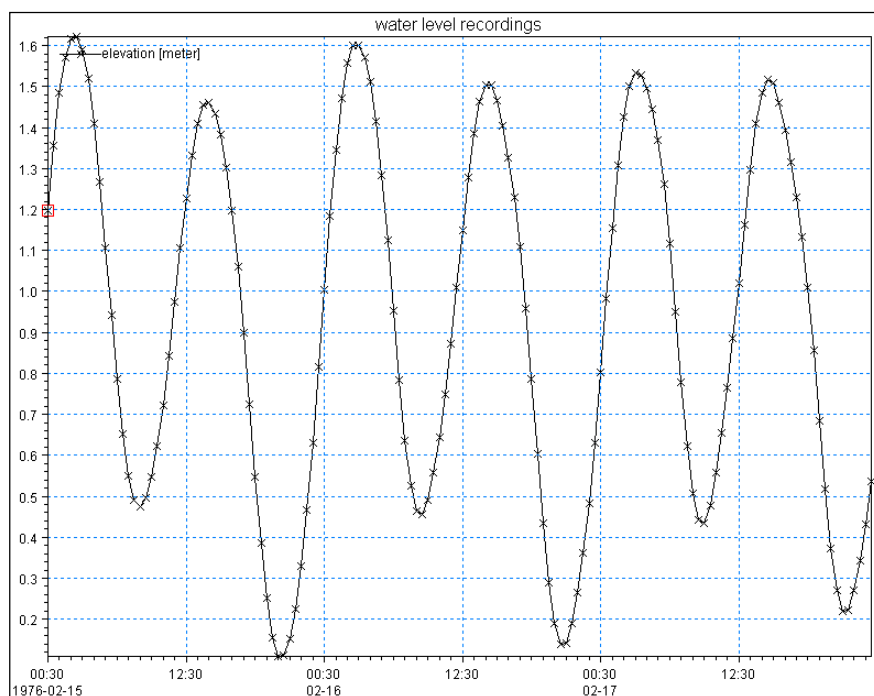


Figura 34 - Maré gerada pelas constantes harmônicas para o ponto SE-2. Elevações (m) x tempo (h).

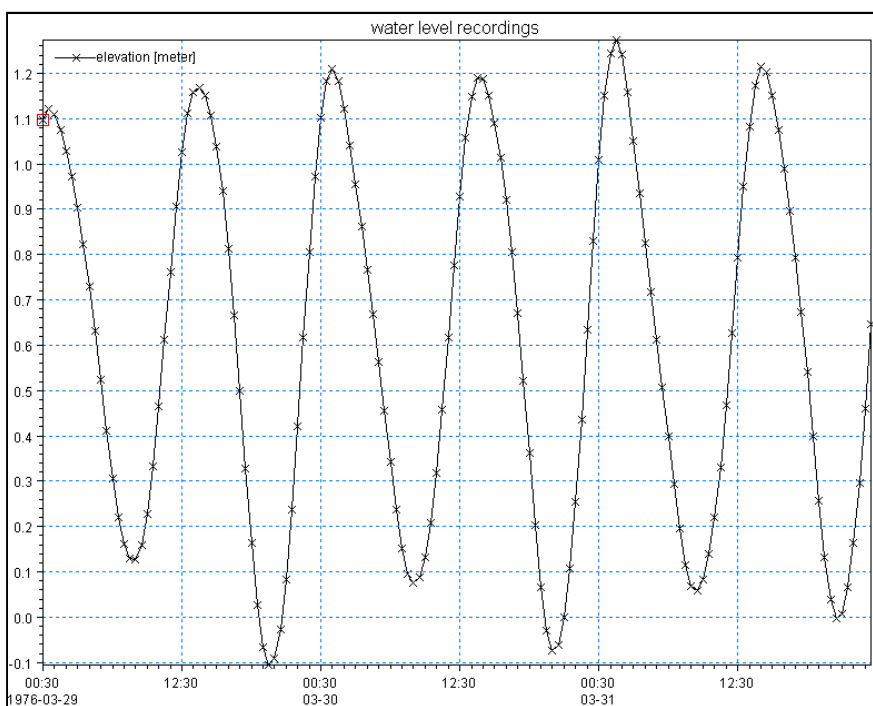


Figura 35 - Maré gerada pelas constantes harmônicas para o ponto SE-3. Elevações (m) x tempo (h).

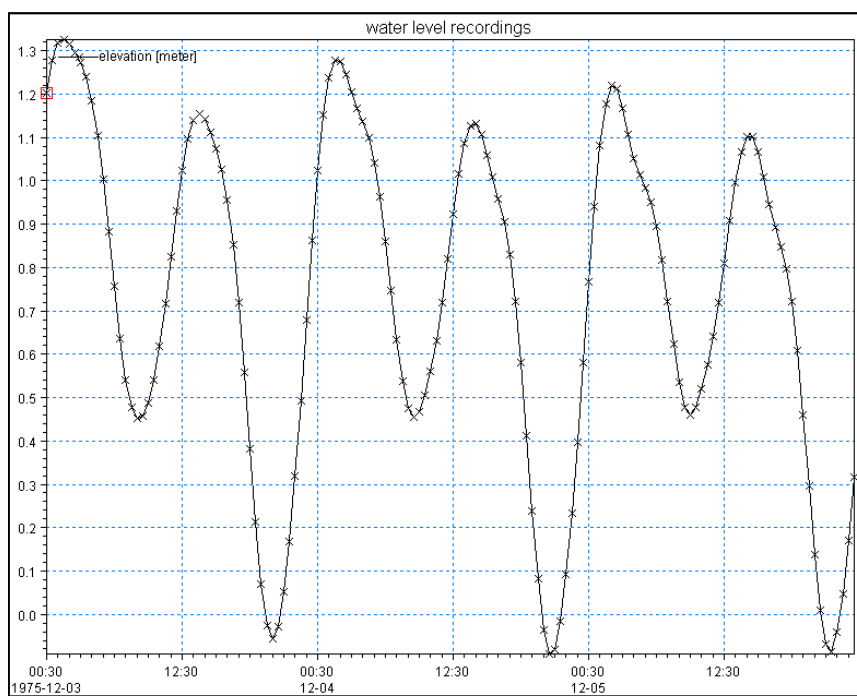


Figura 36 - Maré gerada pelas constantes harmônicas para o ponto SE-4. Elevações (m) x tempo (h).

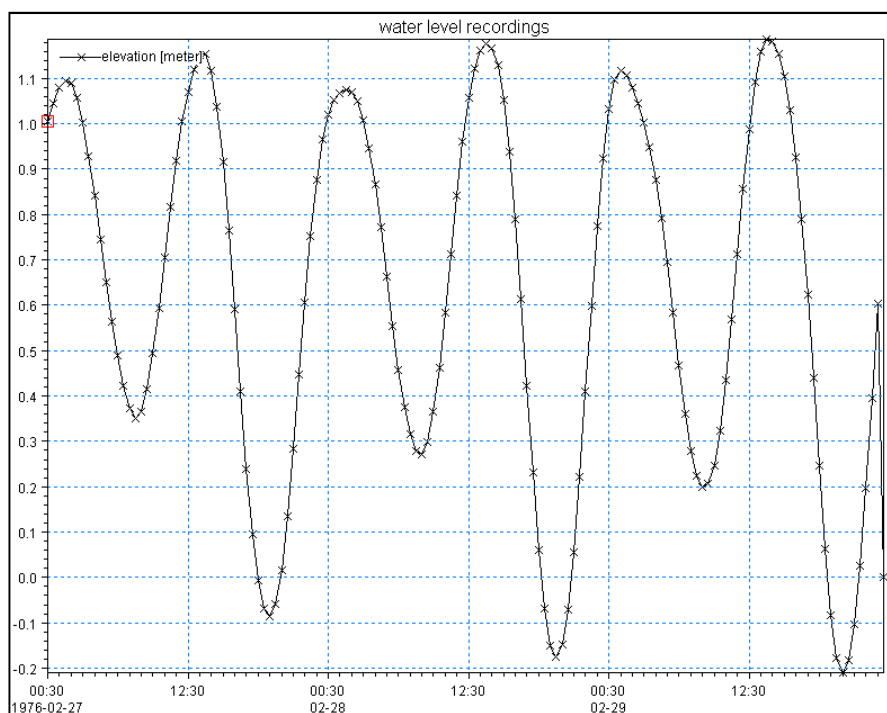


Figura 37 - Maré gerada pelas constantes harmônicas para o ponto SE-5. Elevações (m) x tempo (h).

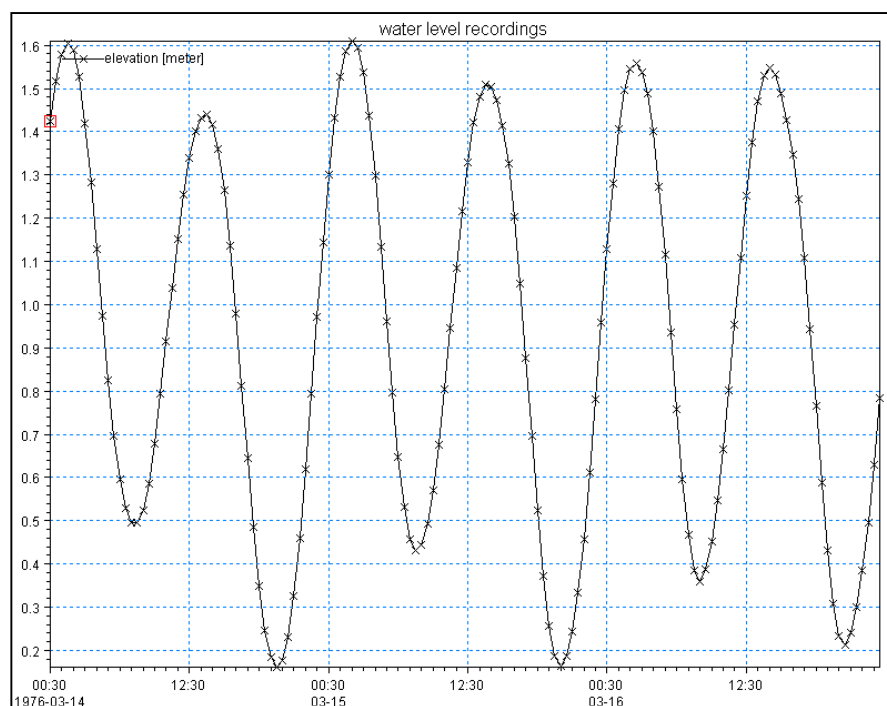


Figura 38 - Maré gerada pelas constantes harmônicas para o ponto SE-6. Elevações (m) x tempo (h).

## 9 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Os resultados de todas as simulações realizadas, desde a fase de pré-processamento, calibração e validação são apresentados nesse capítulo.

A justificativa das escolhas de modificação dos parâmetros, para que fosse possível a realização da calibração da caracterização hidrodinâmica da Baía e Estuário Santista é apresentada no capítulo de Discussão dos resultados.

### 9.1 – Pré-Processamento

Nessa etapa, foram processados os resultados obtidos da elevação da superfície.

Esses resultados permitiram que fosse gerado um arquivo de vídeo onde é apresentada a elevação do nível d'água durante todo o período de simulação.

Durante esse período, foram verificados momentos onde pode ser observado claramente as áreas de secagem, incluídas no módulo de “flood and dry”.

Essas áreas podem ser observadas na Figura 39, próximas às bordas das ilhas ou praias, onde pela palheta de profundidades mostrada; são especificados como “Undefined Value” (Valores Indefinidos). Isso significa que nesses casos o nível d'água se encontra abaixo da cota daquele local, ou seja, naquele instante a região está “seca”.

O momento que foi gerado essa “foto”, ocorreu no dia 23/08/1975, às 23 horas, que representa o passo de tempo de saída número 69. Nessa simulação foram especificados 1440 passos de tempo ao longo de 4 dias do período de maré, porém no arquivo de saída foi especificado uma frequência de 5, o que significa que ao todo foram “impressos”  $1440/5 = 288$  passos de tempo.

Foi gerado um gráfico onde são observadas as elevações de cada ponto de medição durante o período de propagação da maré, representadas na Figura 40.

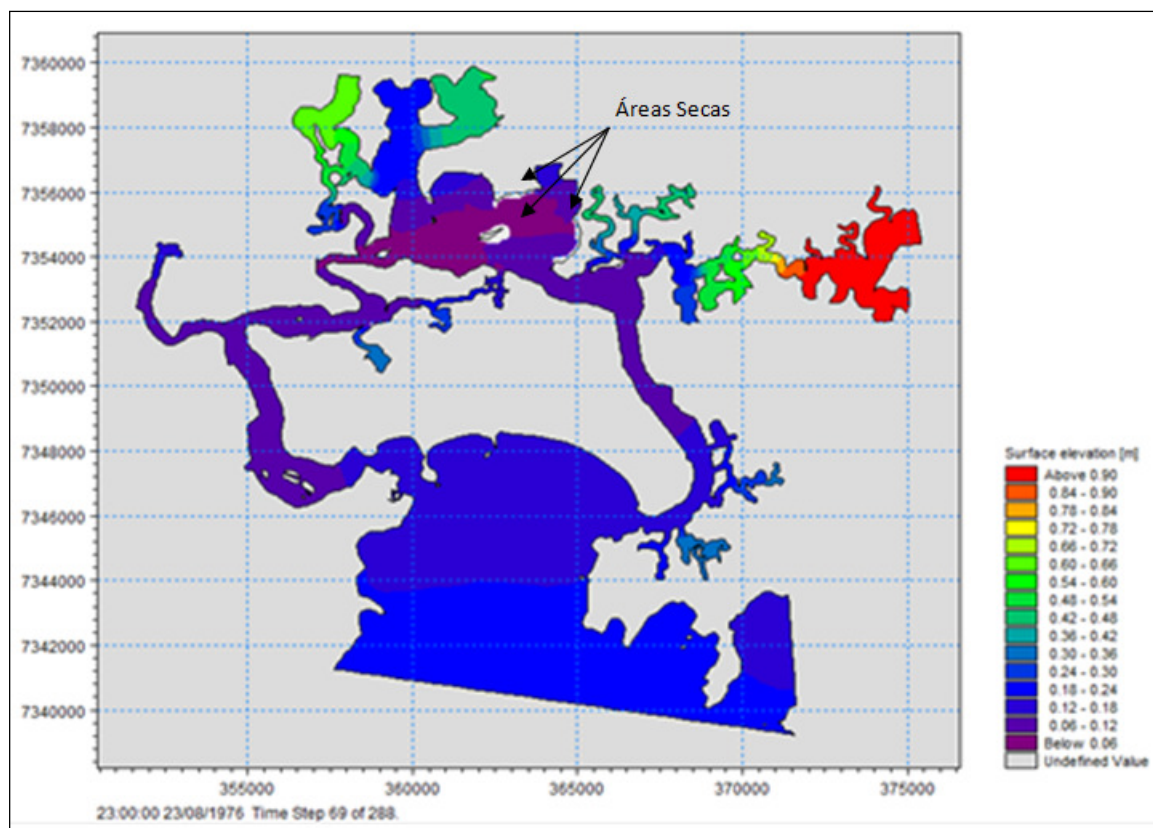


Figura 39 - Foto do passo de tempo 69 do total de 288 do arquivo de vídeo gerado de toda a área, representando a elevação da superfície.

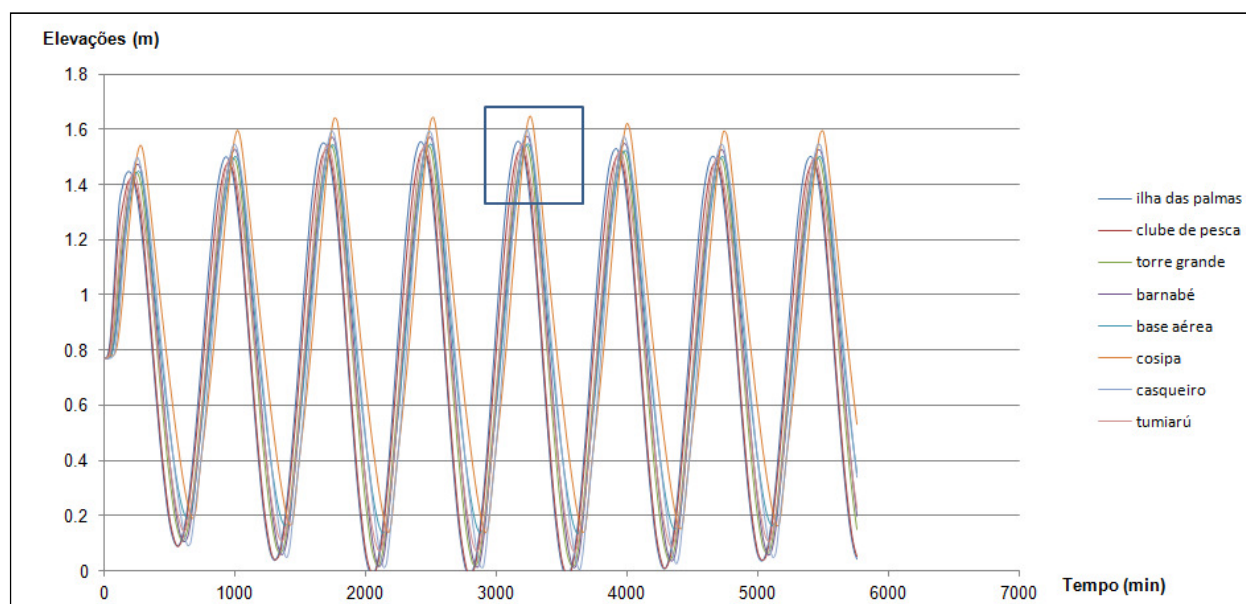


Figura 40 - Gráficos das elevações de nível durante todo o período de maré de 4 dias. Destaque para onda de maré do dia 25/08/1976.

Foi destacada a onda de maré do dia 25/08/1976, para ser comparada com as diferenças de fase entre o posto medido e o marégrafo da Ilha das Palmas; e com os resultados dos dados de Sondotécnica (1977), apresentados na Tabela 7.

Segundo esse relatório, “os dados do dia 25 foram os que apresentaram um comportamento mais lógico, enquanto que os atrasos de maré do dia 24 não tem explicação física”.

No período em destaque, foram medidas as diferenças de fase entre os postos e o marégrafo da Ilha das Palmas. Os valores medidos estão representados na Figura 41, onde os valores entre parênteses representam os valores extraídos da Tabela 7. Esses valores foram medidos pela diferença de tempo entre as amplitudes máximas de cada marégrafo.

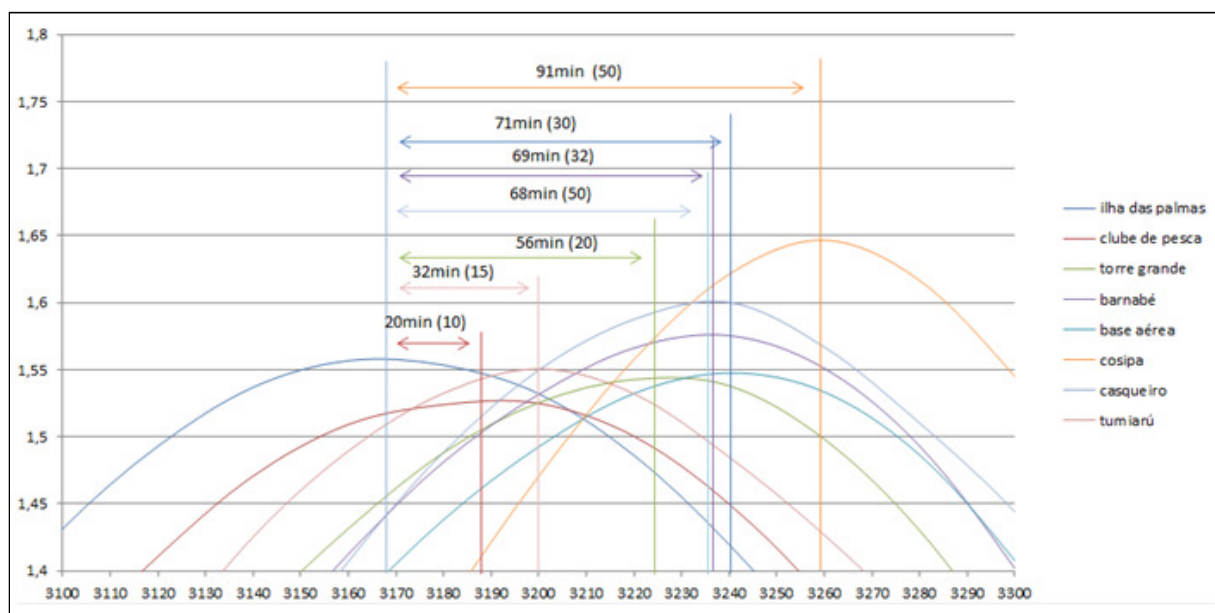


Figura 41 - Diferenças de fase de maré entre os postos e o marégrafo da Ilha das Palmas medido entre as diferenças das máximas amplitudes.

Essas diferenças “acumulam” os erros dos postos anteriores, quer dizer que “caminhando” a partir da baía pelo lado direito do canal do estuário, até que se chegue ao posto da Cosipa, a diferença de fase inclui os erros das diferenças dos outros postos.



Assim, foram analisadas também as diferenças entre os postos consecutivos, para que se pudessem reconhecer os trechos que apresentavam maiores diferenças dos valores extraídos do estudo. Essas diferenças estão representadas entre os trechos de Ilha das Palmas e Cosipa (Tabela 13), Torre Grande e Base Aérea (Tabela 14) e Ilha das Palmas e Casqueiro (Tabela 15). Veja localização dos postos e o “caminho das medições” na Figura 42.

Tabela 13 – Diferença temporal entre os postos de medição no sentido Ilha das Palmas até Cosipa em minutos.

| Valores   | Ilha das Palmas | Clube de Pesca | Torre Grande | Ilha de Barnabé | Cosipa |
|-----------|-----------------|----------------|--------------|-----------------|--------|
| Medidos   | 0               | 10             | 10           | 12              | 18     |
| Simulados | 0               | 20             | 36           | 13              | 22     |

Tabela 14 – Diferença temporal entre os postos de medição no sentido Torre Grande até Base Aérea em minutos.

| Valores   | Torre Grande | Base Aérea |
|-----------|--------------|------------|
| Medidos   | 0            | 10         |
| Simulados | 0            | 15         |

Tabela 15 – Diferença temporal entre os postos de medição no sentido Ilha das Palmas até Casqueiro em minutos.

| Valores   | Ilha das Palmas | Tumiarú | Casqueiro |
|-----------|-----------------|---------|-----------|
| Medidos   | 0               | 15      | 35        |
| Simulados | 0               | 32      | 36        |



Os arquivos dos marégrafos são geralmente “suavizados” para eliminar as ondulações que são visualizadas nos arquivos de saída do programa Mike 21. Essas ondulações aparecem na Figura 43. Para eliminar essas “incertezas”, decidiu-se medir como diferenças de fase; as diferenças entre o tempo da média dos tempos de cruzamento da linha 5% abaixo do pico, conforme esquematizado na Figura 43. O pico de cada posto de medição foi arredondado para valores até a casa do centímetro; por isso nesse exemplo, foi utilizado para os dois postos o valor de pico de 1,42m.

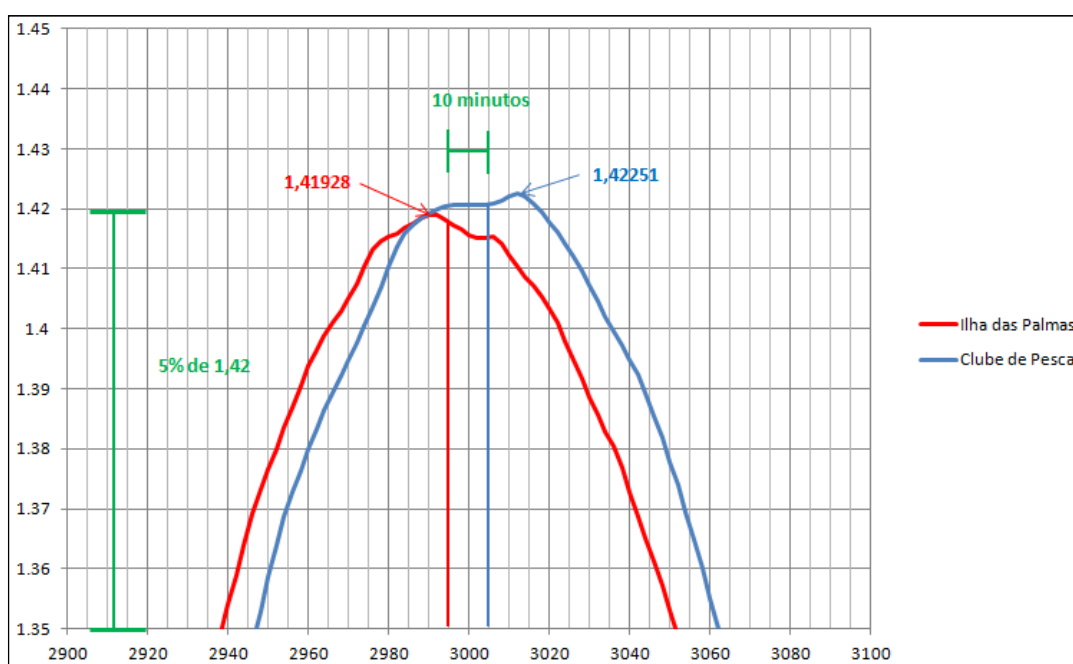


Figura 43 - Critério de medição das diferenças de fase entre os níveis de preamar de postos consecutivos.

O resultado das diferenças de fase dos postos, assim como os coeficientes de Manning utilizados em cada simulação é encontrado na Tabela 16. Na Tabela 17 são encontradas as simulações realizadas após a densificação da malha flexível no trecho entre o posto do Clube de Pesca e a Torre Grande, além da mudança na batimetria do trecho entre a Ilha de Barnabé e a Cosipa. Na simulação 30, o resultado  $d(\text{min})^*$  refere-se a medição de diferença de fase em relação as meias marés de enchente, ao invés da preamar. Foram discriminadas nas tabelas, as simulações que não apresentaram erros e as simulações cujos resultados permitiram concluir a calibração.

Tabela 16 – Resultados de diferenças de fase (d), nas simulações ajustadas pelo coeficiente de Manning (M).

| Trechos entre os postos               | Trechos de separação de coeficientes de Manning | Dados reais<br><br>d (min) | Simulações              |         |                         |         |                         |         |                         |         |                         |         |
|---------------------------------------|---|----------------------------|-------------------------|---------|-------------------------|---------|-------------------------|---------|-------------------------|---------|-------------------------|---------|
|                                       |   |                            | 23                      |         | 24                      |         | 25                      |         | 26                      |         | 27                      |         |
|                                       |   |                            | M (m <sup>1/3</sup> /s) | d (min) | M (m <sup>1/3</sup> /s) | d (min) | M (m <sup>1/3</sup> /s) | d (min) | M (m <sup>1/3</sup> /s) | d (min) | M (m <sup>1/3</sup> /s) | d (min) |
| Ilha das Palmas - Clube de Pesca      | Baía  | 10                         | 25                      | 14      | 35                      | 11      | 35                      | 11      | 35                      | 10      | 35                      | 10      |
| Clube de Pesca - Torre Grande         | Porto de Santos                                 | 10                         | 80                      | 18      | 80                      | 19      | 95                      | 20      | 40                      | 23      | 100                     | 20      |
| Torre Grande - Ilha de Barnabé        | Porto de Santos - Ilha de Barnabé               | 12                         | 25                      | 10      | 20                      | 12      | 20                      | 12      | 20                      | 11      | 20                      | 12      |
| Ilha de Barnabé – Cosipa              | Ilha de Barnabé – Cosipa                        | 18                         | 35                      | 15      | 30                      | 17      | 30                      | 15      | 25                      | 20      | 25                      | 20      |
| Torre Grande - Base Aérea             | Torre Grande - Largo do Candinho                | 10                         | 50                      | 14      | 50                      | 17      | 60                      | 16      | 32                      | 17      | 85                      | 15      |
| Ilha das Palmas - Tumiarú - Casqueiro | Baía até Ilha Porchat                           |                            | 40                      |         | 35                      |         | 30                      |         | 30                      |         | 30                      |         |
|                                       | Ilha Porchat até Tumiarú                        | 15                         | 50                      | 12      | 40                      | 11      | 25                      | 17      | 30                      | 13      | 28                      | 14      |
|                                       | Tumiarú - Casqueiro                             | 35                         | 20                      | 35      | 20                      | 36      | 20                      | 31      | 20                      | 37      | 20                      | 34      |

Tabela 17 - Resultados de diferenças de fase (d), nas simulações ajustadas pelo coeficiente de Manning (M) e pelas modificações na batimetria e na malha flexível. O resultado d(min)\* refere-se a medição de diferença de fase em relação as meias marés de enchente.

| Trechos entre os postos          | Trechos de separação de coeficientes de Manning | Dados reais | Simulações        |         |                   |         |                   |         |           |
|----------------------------------|---|-------------|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|-----------|
|                                  |   |             | 28                |         | 29                |         | 30                |         |           |
|                                  |   | d (min)     | M ( $m^{1/3}/s$ ) | d (min) | M ( $m^{1/3}/s$ ) | d (min) | M ( $m^{1/3}/s$ ) | d (min) | d (min) * |
| Ilha das Palmas - Clube de Pesca | Baía  | 10          | 35                | 10      | 35                | 10      | 35                | 10      | 7         |
| Clube de Pesca - Torre Grande    | Porto de Santos                                 | 10          | 40                | 17      | 75                | 15      | 75                | 15      | 10        |
| Torre Grande - Ilha de Barnabé   | Porto de Santos - Ilha de Barnabé               | 12          | 20                | 11      | 20                | 8       | 20                | 9       | 7         |
| Ilha de Barnabé - Cosipa         | Ilha de Barnabé - Cosipa                        | 18          | 25                | 20      | 25                | 22      | 25                | 21      | 21        |
| Torre Grande - Base Aérea        | Torre Grande - Largo do Candinho                | 10          | 32                | 15      | 40                | 13      | 40                | 12      | 8         |
|                                  | Baía até Ilha Porchat                           |             | 35                |         | 35                |         | 30                |         |           |
| Ilha das Palmas - Tumiarú        | Ilha Porchat até Tumiarú                        | 15          | 28                | 11      | 25                | 11      | 25                | 13      | 15        |
| Tumiarú - Casqueiro              | Tumiarú - Casqueiro                             | 35          | 20                | 34      | 20                | 32      | 20                | 31      | 31        |

Os resultados obtidos pela análise da sensibilidade do modelo em relação a modificação da malha flexível se encontram na Tabela 18. Os dados medidos em campo foram extraídos de Sondotécnica (1977).

Tabela 18 - Resultados das diferenças de fase (d) entre os postos através da modificação da densidade da malha flexível.

| Trechos entre os postos          | Dados de campo<br>d (min) | Simulações                  |                                |                              |
|----------------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|
|                                  |                           | Malha mais densa<br>d (min) | Malha da calibração<br>d (min) | Malha menos densa<br>d (min) |
| Ilha das Palmas - Clube de Pesca | 10                        | 8                           | 10                             | 10                           |
| Clube de Pesca - Torre Grande    | 10                        | 15                          | 15                             | 16                           |
| Torre Grande - Ilha de Barnabé   | 12                        | 8                           | 9                              | 10                           |
| Ilha de Barnabé - Cosipa         | 18                        | 19                          | 21                             | 31                           |
| Torre Grande - Base Aérea        | 10                        | 12                          | 12                             | 13                           |
| Ilha das Palmas - Tumiarú        | 15                        | 11                          | 13                             | 17                           |
| Tumiarú - Casqueiro              | 35                        | 29                          | 31                             | 30                           |

### 9.3 – Validação

No processo de validação foram feitas simulações nos pontos de medições referidos na Tabela 12.

Foram analisados, os dados de velocidades de correntes que foram calculados nesses pontos, comparados aos dados extraídos de Sondotécnica (1977).

Além dos dados de velocidades, foram feitas comparações entre a maré de sizígia gerada pelo programa e a maré de sizígia registrada no mesmo período da medição das velocidades (SONDOTÉCNICA, 1977). Para os valores de elevação da cota do nível d'água reais, foi necessário fazer um deslocamento vertical de -0,73m, para ajustá-lo ao nível de referência utilizado na maré gerada.

A Figura 44 a Figura 55, descreve as elevações do nível d'água das marés e as velocidades, dos dados simulados e medidos em campo, nos pontos SE-1 a SE-6.

Nas figuras de velocidades, os dados descritos como “Simulado” representa a resultante das velocidades registradas nas direções  $x$  e  $y$  (Velocidades  $U$  e  $V$ ), calculadas pelo programa. Essas resultantes, que são apresentadas em módulo, foram “rebatidas”, ou seja, assumiram valores negativos, para representar as velocidades nos períodos de vazante. Também são apresentadas as variações da velocidade medidas a 0,5m da superfície e a 1,0m do fundo, extraídas de Sondotécnica (1977).

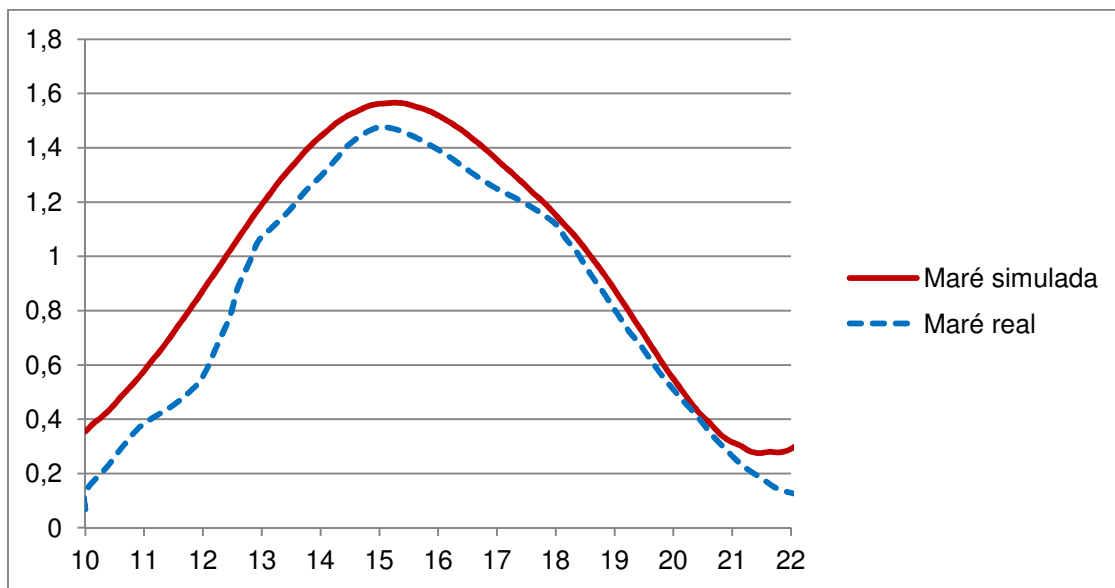


Figura 44 - Elevações do nível d'água (m) no período de tempo (h), para as marés no ponto SE-1, no dia 17/03/76.

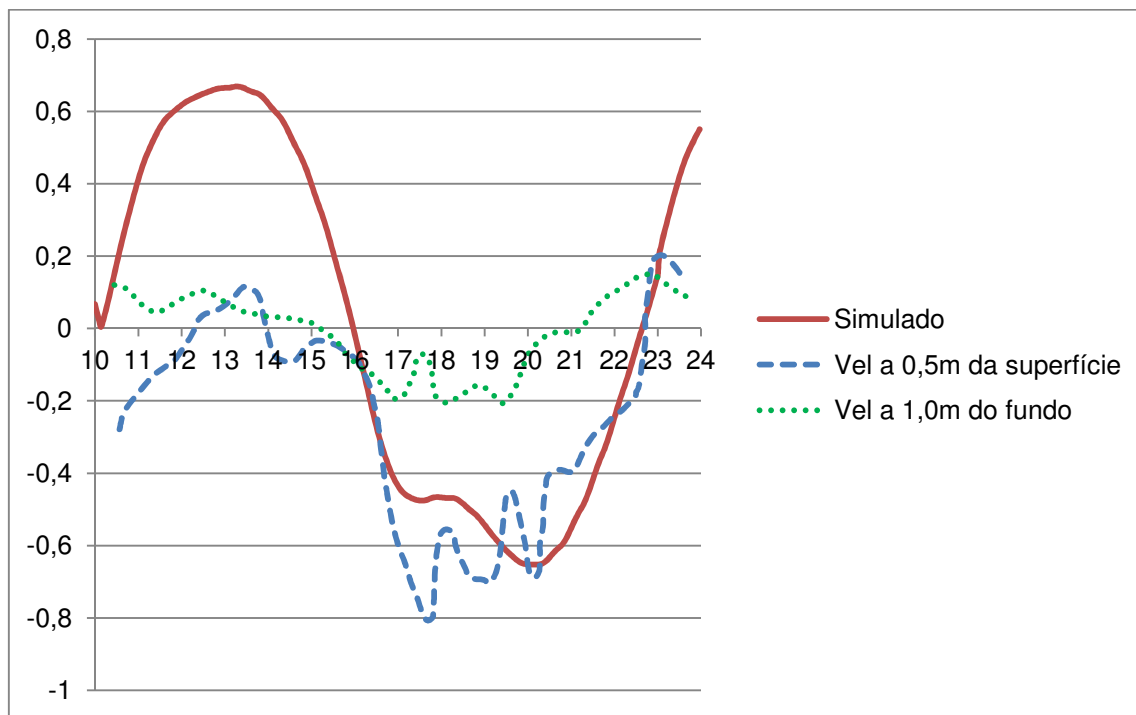


Figura 45 - Velocidades (m/s) no período de tempo (h), para o ponto SE-1, no dia 17/03/76.



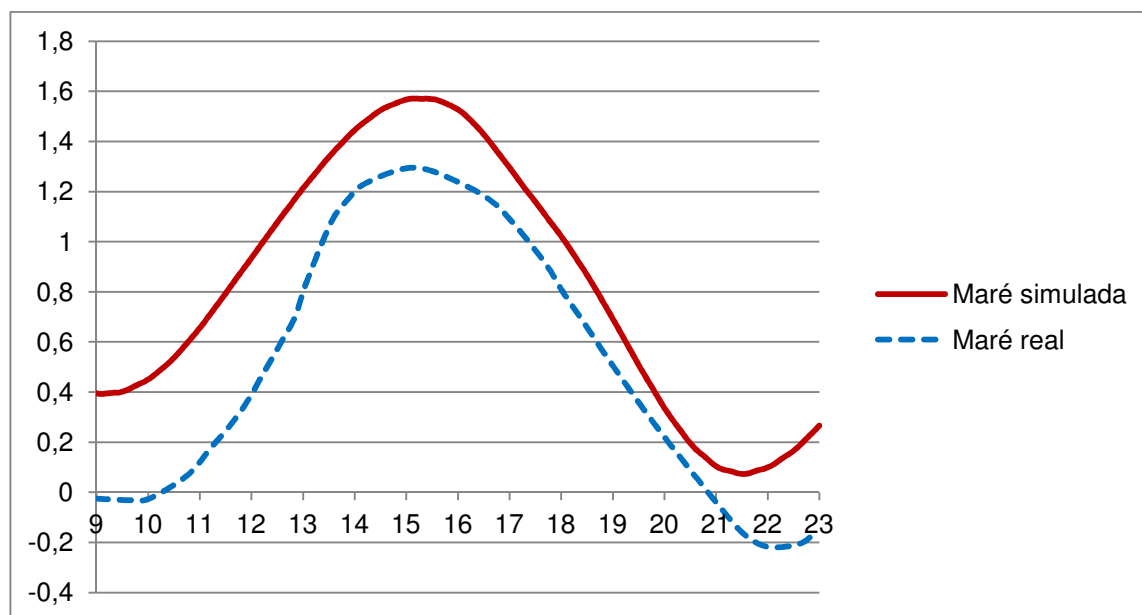


Figura 46 - Elevações do nível d'água (m) no período de tempo (h), para as marés no ponto SE-2, no dia 16/02/76.

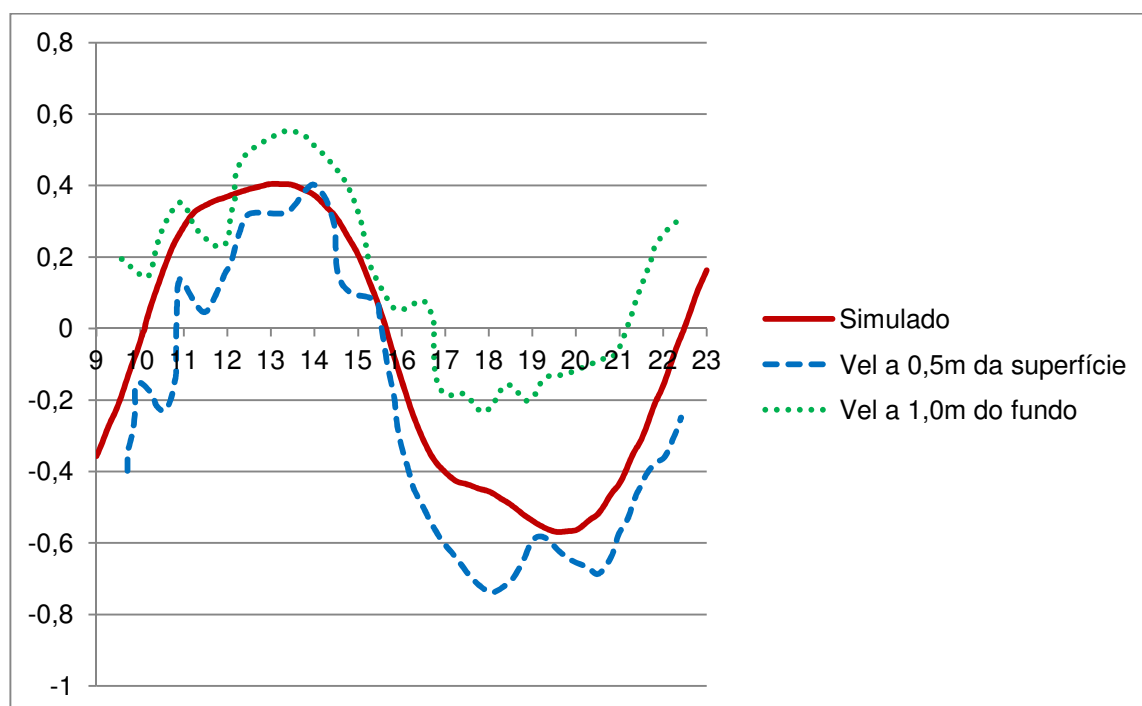


Figura 47 - Velocidades (m/s) no período de tempo (h), para o ponto SE-2, no dia 16/02/76.

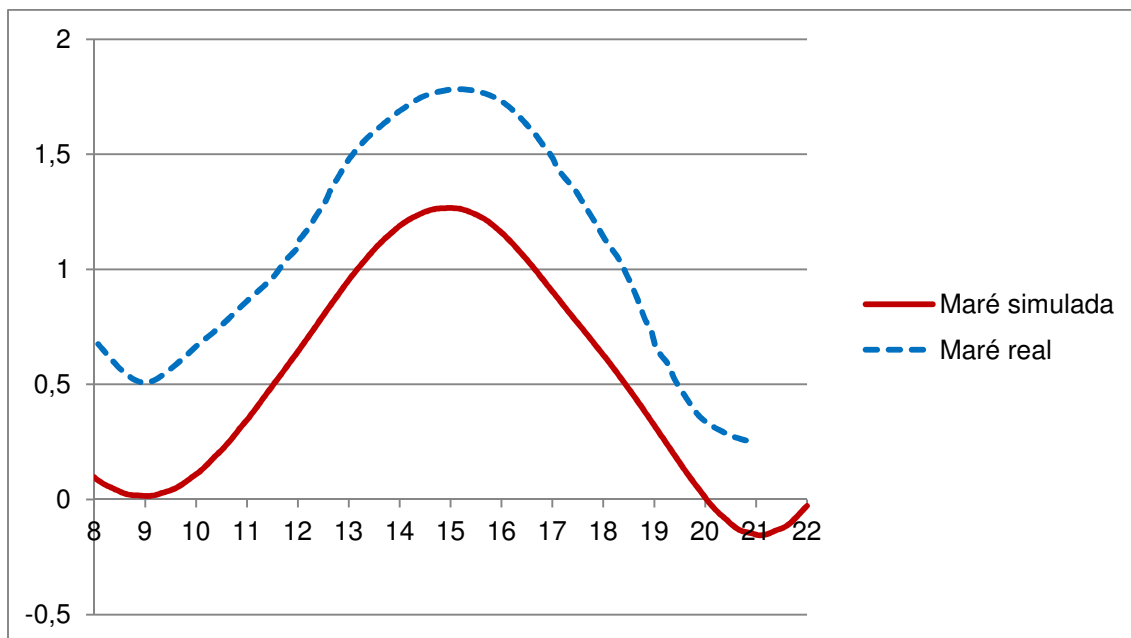


Figura 48 - Elevações do nível d'água (m) no período de tempo (h), para as marés no ponto SE-3, no dia 30/03/76.

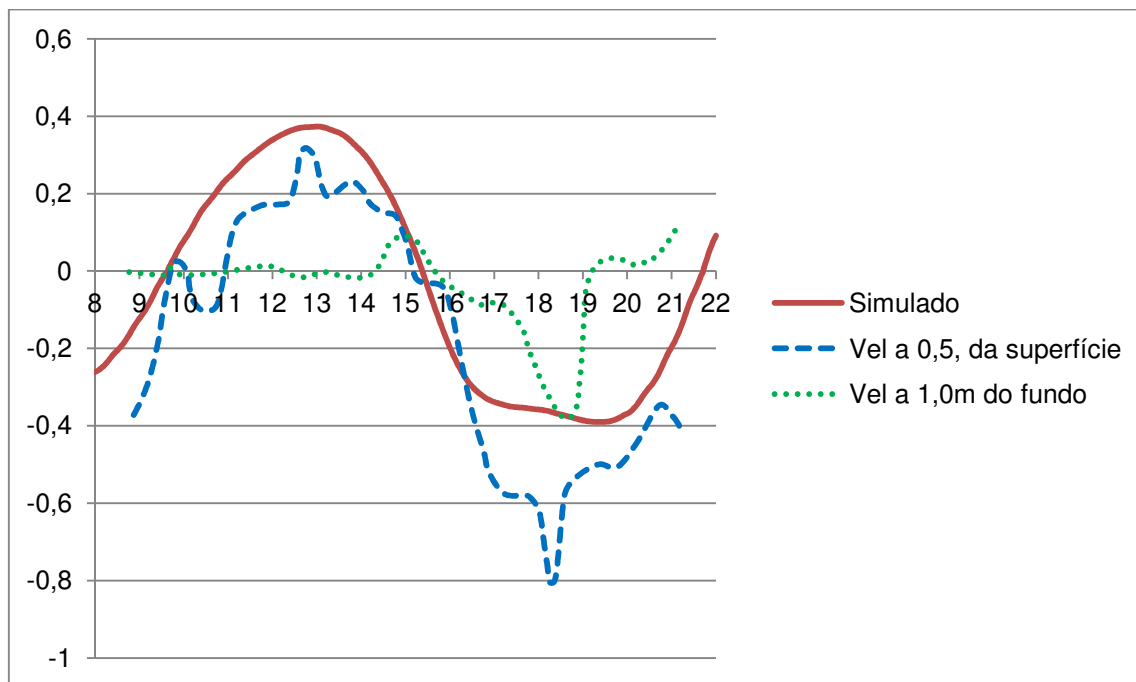


Figura 49 - Velocidades (m/s) no período de tempo (h), para o ponto SE-3, no dia 30/03/76.

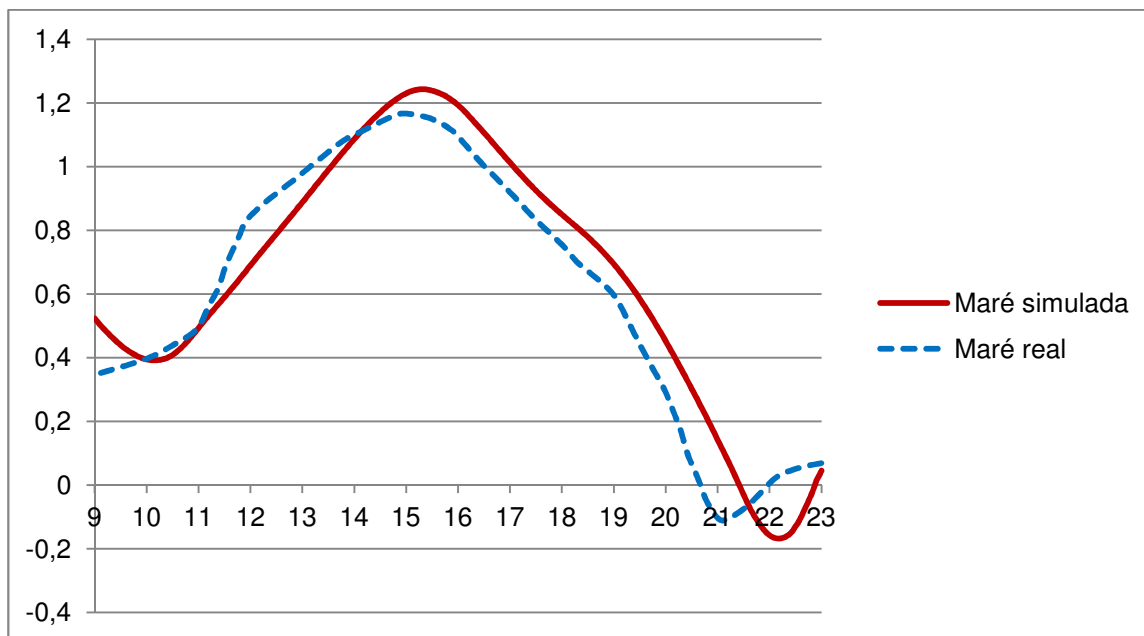


Figura 50 - Elevações do nível d'água (m) no período de tempo (h), para as marés no ponto SE-4, no dia 04/12/75.

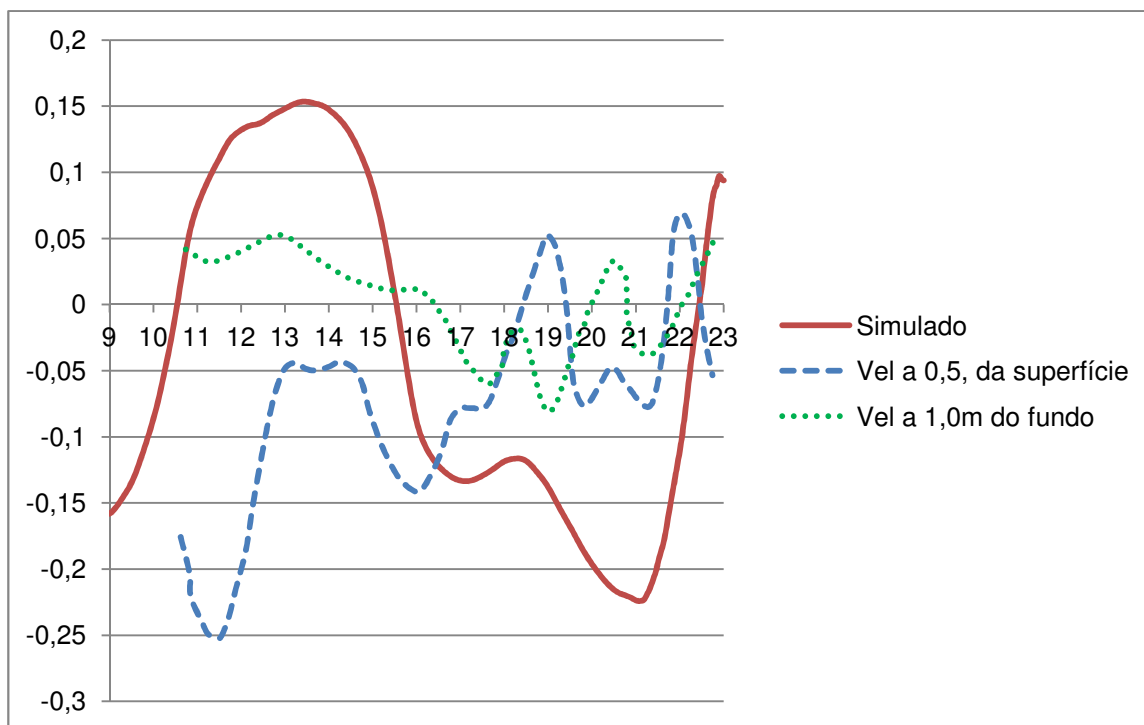


Figura 51 - Velocidades (m/s) no período de tempo (h), para o ponto SE-4, no dia 04/12/75.

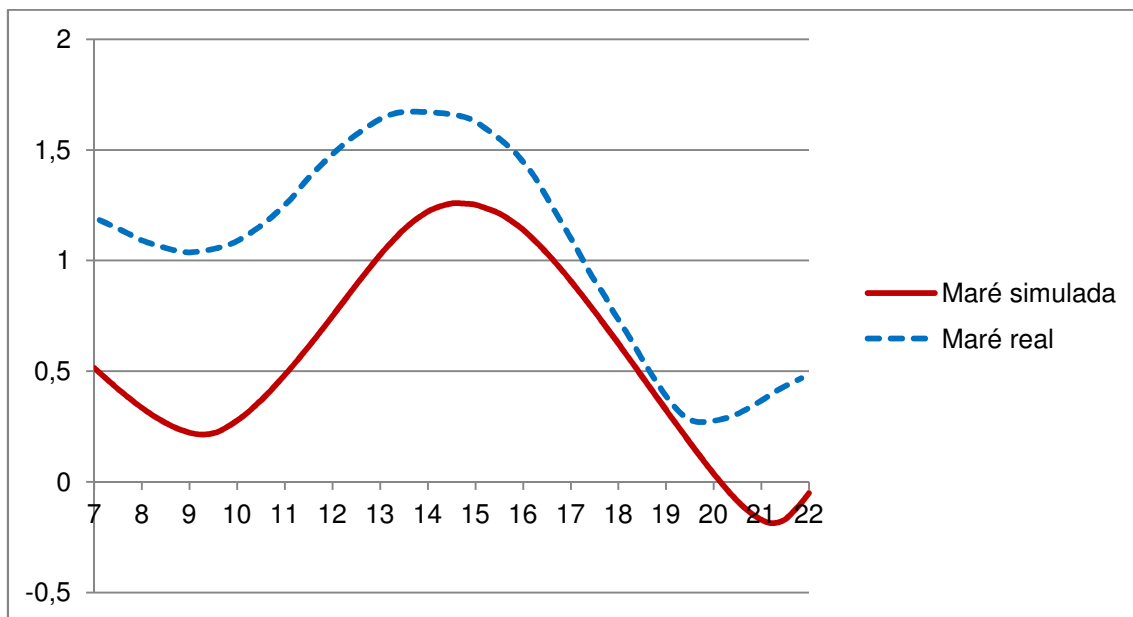


Figura 52 - Elevações do nível d'água (m) no período de tempo (h), para as marés no ponto SE-5, no dia 28/02/76.

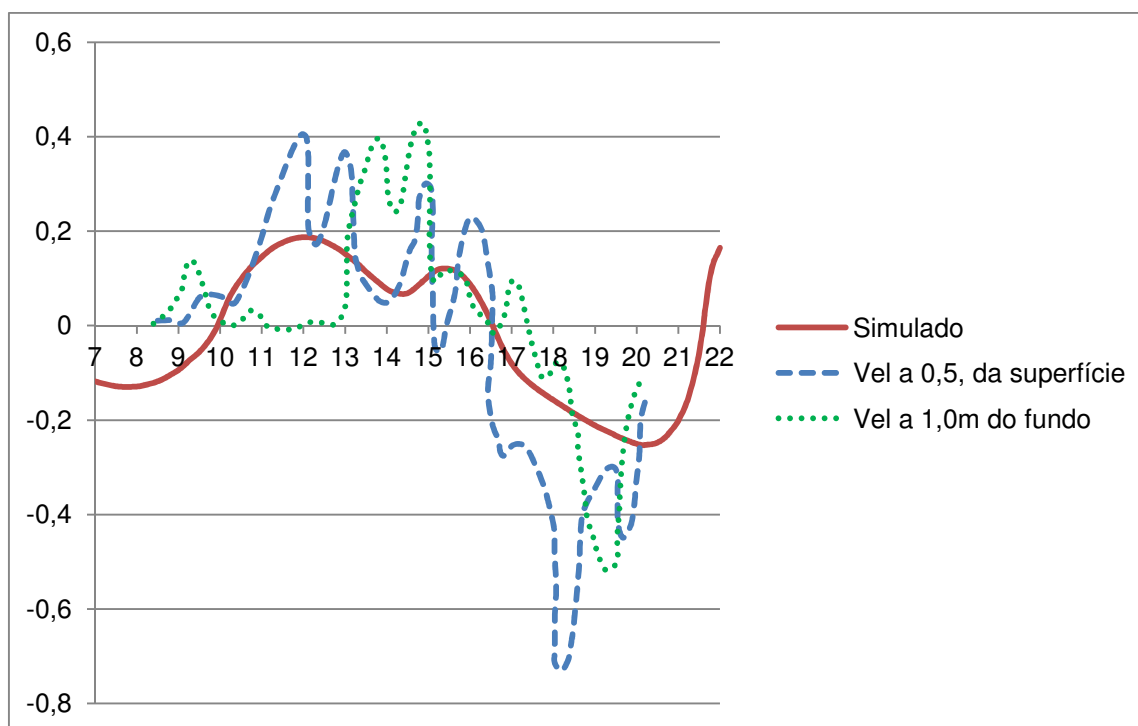


Figura 53 - Velocidades (m/s) no período de tempo (h), para o ponto SE-5, no dia 28/02/76.

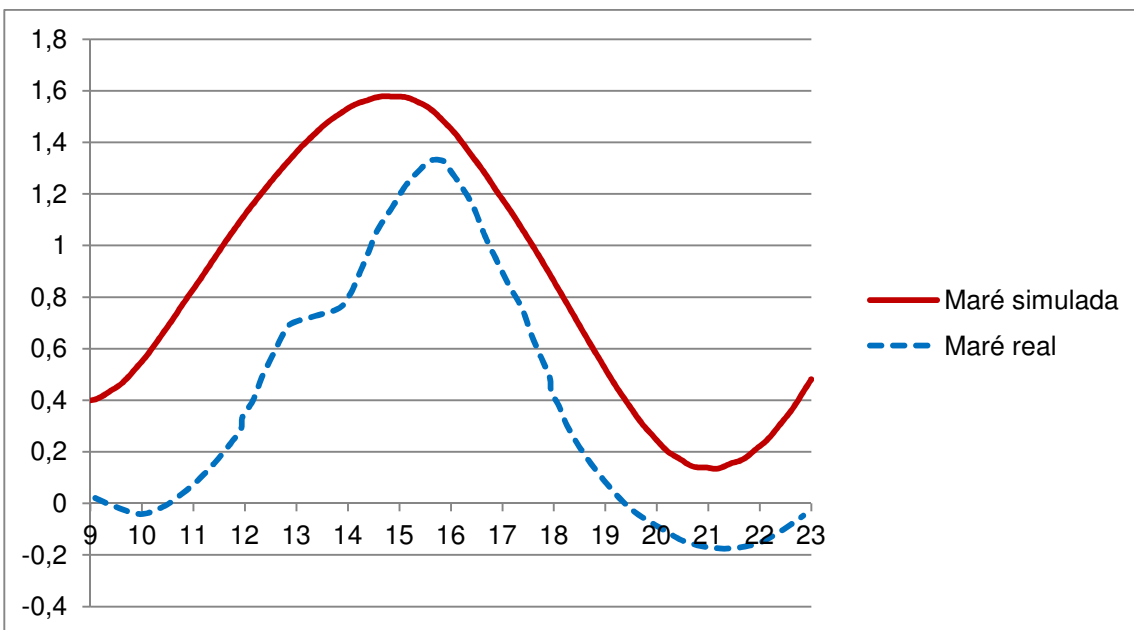


Figura 54 - Elevações do nível d'água (m) no período de tempo (h), para as marés no ponto SE-6, no dia 15/03/76.

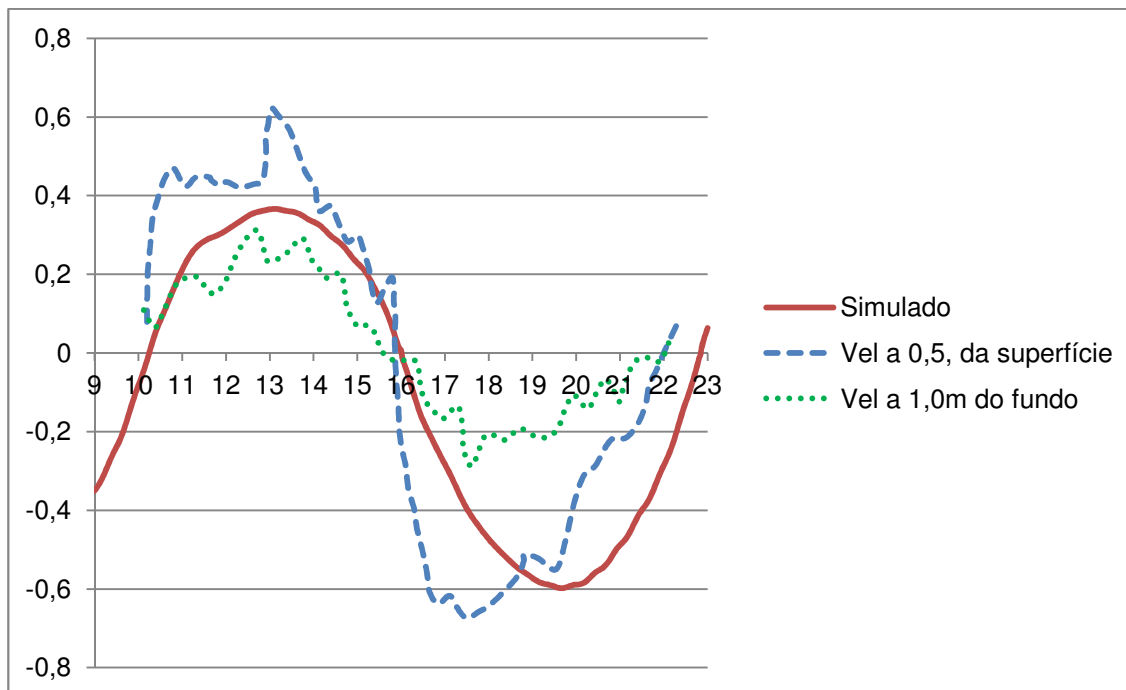


Figura 55 - Velocidades (m/s) no período de tempo (h), para o ponto SE-6, no dia 15/03/76.

## 10 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesse capítulo são discutidos os resultados obtidos tanto na fase inicial de pré-processamento; como nos resultados que permitiram concluir que a caracterização da região havia sido realizada satisfatoriamente.

Também serão analisados todos os resultados obtidos na fase de validação, além da discussão sobre a base de dados utilizada em todos os processos.

### 10.1 – Base de Dados

Os dados empregados nesse estudo foram retirados de fontes utilizadas anteriormente em outros estudos, e portanto, podem representar de forma satisfatória, a região analisada.

Na preparação da batimetria, foi necessária a modificação da delimitação da região, ou seja, a linha de contorno onde foram introduzidos os dados de entrada de maré não apresentou resultados favoráveis quando se encontrava encostada na linha de terra da região da Praia Grande. O programa apresentava um “over flow”, ou seja, havia uma inundação da região e uma transposição d’água para fora da área delimitada.

Os dados de propagação da maré foram gerados para uma maré semi-diurna pura e uma maré de desigualdades diurnas, que é o caso de Santos; onde também foi incluído o efeito meteorológico da maré.

Os dados de entrada de ventos e ondas que não foram incluídos nesse estudo, poderiam afetar mais significativamente os resultados no posto da Ilha das Palmas, que se encontra na Baía de Santos, e portanto sofre influência desses fatores; devendo ser portanto incluídos em outros estudos na região.

## 10.2 – Pré-Processamento

Nessa etapa foram analisadas as diferenças de fase entre os postos de medição em relação ao posto de Ilha das Palmas e as diferenças de fase entre os postos consecutivos.

Os resultados da diferença de fase entre os postos e o posto da Ilha das Palmas se mostrou incoerente com as diferenças apresentadas no estudo de Sondotécnica (1977).

Nos postos mais próximos ao posto da Ilha das Palmas, Clube de Pesca e Tumiarú; foram apresentados os dados mais incoerentes. Isso se deve ao fato da borda de entrada de maré estar inclinada, provavelmente num ângulo diferente da inclinação real da maré, além da maré ter sido gerada como uma maré semi-diurna pura; que não caracteriza a maré real da região.

Nos postos seguintes o erro foi sendo “acumulado”, e portanto, apresentaram também, grandes diferenças. No posto mais distante da borda de entrada de maré, a Cosipa, foi apresentada uma diferença significativa de 91 minutos se comparada com os 50 minutos apresentados no estudo.

Pela análise da diferença entre postos consecutivos, os “erros” apresentados foram minimizados, e puderam ser analisados os trechos mais críticos.

Além dos trechos que pertencem a Baía de Santos, foi apresentado um erro significativo entre os postos de Clube de Pesca e Torre Grande e Torre Grande e Base Aérea.

O trecho entre os postos de Clube de Pesca e Torre Grande é composto por inúmeros taludes verticais de concreto que formam os cais do Porto de Santos. Nessa região, o efeito de ondas e vento é desprezível, então além dos dados de entrada da maré, o que pode alterar significativamente o tempo de propagação de maré na região é sem dúvida a rugosidade do fundo expressa pelo coeficiente de Manning.

No trecho entre os postos de Torre Grande e Base Aérea, a rugosidade do fundo influi significativamente na região, já que é composta por áreas mais rasas e portanto

causa uma diferença considerável do efeito do fundo no tempo medido de propagação de maré.

### 10.3 – Calibração

Foram analisados os dados de diferenças de fase entre os mesmos postos analisados na primeira simulação.

Nessa etapa os valores encontrados pela maré gerada através das constantes harmônicas, e corrigidas com a oscilação do nível do mar; se mostraram mais coerentes com os dados medidos em campo; extraídos de Sondotécnica (1977). Entretanto, as amplitudes de maré geradas apresentaram pequenas diferenças em relação às amplitudes de maré medidas, conforme apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 - Amplitudes de maré medidas em campo e geradas pelas constantes harmônicas no programa Mike 21.

| Data       | Amplitudes (m) |  |                       |   |
|------------|----------------|--|-----------------------|---|
|            | Medida         | Maré gerada pelas componentes harmonicas | Maré gerada corrigida | Diferença entre a maré medida e a maré corrigida(%) |
| 23/08/1976 | 1.36           | 1.03                                     | 1.04                  | 23.53   |
| 24/08/1976 | 1.57           | 1.19                                     | 1.34                  | 14.65   |
| 25/08/1976 | 1.58           | 1.3                                      | 1.41                  | 10.76   |
| 26/08/1976 | 1.47           | 1.33                                     | 1.3                   | 11.56   |

Essas diferenças podem ser explicadas pelo fato da maré gerada não ter incluído todas as componentes harmônicas do marégrafo da Ilha da Moela; porém como as amplitudes dessas componentes são da ordem de centímetros, as diferenças encontradas entre os valores apresentados, devem sofrer também a influência de outros fatores. Outra influência se deve ao fato da maré ter sido gerada considerando o efeito astronômico, das constantes harmônicas, do marégrafo da Ilha da Moela; e



corrigida pelo efeito meteorológico da oscilação do nível médio registrado no marégrafo da Ilha das Palmas. Esse marégrafo está localizado próximo ao marégrafo da Ilha da Moela; porém, essa diferença pode ter influenciado para que o efeito meteorológico não fosse totalmente contemplado.

A maré gerada também pode ter criado algumas diferenças devido a sua consideração de entrada de dados na borda do modelo. O marégrafo da Ilha da Moela praticamente coincide com a extremidade direita da borda de entrada de maré. Porém não há registros de marégrafos na borda esquerda. Por isso, foi considerado que a maré era constante ao longo da borda, fato que não influenciaria na propagação da maré caso o alinhamento da borda coincidisse com a frente de propagação da onda de maré na região.

A inclinação utilizada inicialmente, não representava a inclinação real, fato que pode ser observado pelas diferenças dos tempos medidos entre os postos nas duas embocaduras marítimas. Como os postos da embocadura de Santos apresentaram maiores erros que os postos da embocadura de São Vicente, e não havia informações exatas sobre o alinhamento real da onda de maré medido em campo, optou-se por colocar a borda paralela a Baía; e afastá-la das linhas de terra reais, o que permitiu também minimizar os problemas de “over flow” gerados por essa proximidade.

Para estudos futuros, recomenda-se que sejam encontrados dados de registros de marégrafos nas duas extremidades da área modelada, ou que fosse encontrado o alinhamento real da borda de entrada de maré.

Na etapa de calibração, além da modificação dos dados de entrada de maré, foram alterados os coeficientes de Manning da região. Como a região de estudo apresenta trechos dragados, trechos de taludes verticais de concreto, e trechos com profundidades bem inferiores as encontradas na Baía e no Canal do Porto, inclusive com a presença de manguezais; é de se esperar que a rugosidade do fundo não seja constante em toda a região. Portanto, a alteração dos coeficientes de Manning por trechos, foi utilizada de forma a se obter a calibração da propagação da maré da região.

Os trechos naturais foram modificados dentro da faixa de valores recomendados de 20 a 40m<sup>1/3</sup>/s. Para o trecho que apresentava cais verticais de concreto, esse limite foi extrapolado, até o valor máximo de 80m<sup>1/3</sup>/s (PORTO, 1999).

Nas simulações apresentadas foram testados valores de Coeficiente de Manning que extrapolam os limites recomendados; para que fosse testada a sensibilidade do modelo a grandes diferenças do coeficiente de Manning em trechos consecutivos, além da resposta dos trechos a grandes variações de rugosidade.

Os trechos que apresentavam uma diferença de fase menor que o dado medido, foi diminuído o coeficiente de Manning, para que fosse promovida uma aceleração da propagação da maré devido a menor rugosidade. Os trechos que apresentaram diferenças de fase maiores que as medidas em campo, foi aumentado o coeficiente.

Na simulação de número 23 foram testados diferentes coeficientes para cada trecho analisado. Na simulação 24 chegou-se ao valor que melhor representaria a região da Baía de Santos. As simulações de 25 a 27, além de outros trechos, foram testadas principalmente a sensibilidade do trecho entre os postos do Clube de Pesca e a da Torre Grande, que apresentou maior discrepância em todas as simulações. Essa sensibilidade se demonstrou extremamente baixa já que foram extrapolados valores entre  $40$  e  $100\text{m}^{1/3}/\text{s}$ , e os valores não sofreram grandes alterações.

Na simulação 28 foram feitas alterações nos dados da batimetria da região entre os postos da Ilha de Barnabé e a Cosipa; além da densificação da malha flexível no trecho entre o Clube de Pesca até a Torre Grande. O trecho até a Cosipa não sofreu influência da modificação da batimetria, porém o trecho do Porto de Santos sofreu uma diminuição considerável pela densificação da malha, fato que se deve ao canal apresentar uma largura pequena e taludes muito íngremes, gerando distorções na batimetria interpolada pelo Mike em função do número de triângulos inicialmente empregados. Na simulação 29 obteve-se um valor razoável de diferença de fase para o Porto de Santos, porém o valor utilizado para “calibrar” o trecho gerou uma desaceleração também no trecho subsequente até a Ilha de Barnabé. Na simulação 30 foi feito um pequeno ajuste na região esquerda da baía, para ser ajustado o tempo até o posto de Tumiarú.

A calibração foi concluída na simulação de número 30. No trecho do Porto de Santos foi utilizado o valor de  $75\text{m}^{1/3}/\text{s}$  para o coeficiente de Manning. Como esse valor gerava uma diferença considerável no trecho posterior, foi gerado um pequeno trecho de “acomodação” ou interpolação dessa diferença, como representado na Figura 31.

Na simulação de número 30 também foram analisadas as diferenças de fase obtidas nos instantes de meia maré de enchente, ao invés das obtidas na preamar. Essa análise foi feita para avaliar a influência das oscilações de nível d'água de frequência mais alta obtidas nas simulações realizadas na obtenção da defasagem das ondas de maré. Os valores obtidos a partir dessa análise se mostraram idênticos aos obtidos no instante de preamar para os trechos entre a Ilha Barnabé e a Cosipa e entre os postos Tumiarú e Casqueiro. Para os trechos entre a Ilha das Palmas e o Clube de Pesca e entre a torre Grande e a Ilha Barnabé essa análise levou a defasagens menores do que as medidas, o que poderia ser entendido como uma pequena piora nos resultados. Já os trechos entre o Clube de Pesca e a Torre Grande e entre a Ilha das Palmas e Tumiarú, esta forma de análise conduziu a valores de defasagem idênticos aos medidos no protótipo.

Analisando as diferenças de fase nas simulações da análise da sensibilidade do modelo pela modificação da malha flexível, notou-se que a malha menos densa apresentou maior discrepância de valores se comparada com a malha utilizada na calibração. Os trechos mais críticos foram entre a Ilha de Barnabé e a Cosipa, e entre Ilha das Palmas e Tumiarú.

Quando realizada a densificação da malha, os valores obtidos foram iguais ou muito próximos da malha utilizada. Dessa maneira, conclui-se que a utilização de qualquer uma dessas duas malhas (malha da simulação de número 30 e malha mais densa) não acarreta erros para os resultados.

Porém se analisado o tempo de processamento entre essas malhas percebe-se que a utilização da malha mais densa implicaria em tempo muito superior. A malha da simulação de número 30 levou em média 16 horas para completar o processamento, enquanto a malha mais densa demorou 55 horas.

Assim, pode-se concluir que a utilização da malha empregada para a calibração do modelo resultou em menor tempo de processamento sem que fossem introduzidos erros pela falta de pontos e triangulação da malha flexível.

De maneira geral, independentemente da forma de análise empregada, pode-se perceber que com as alterações da batimetria; da densidade da malha flexível, e principalmente do Coeficiente de Manning, obtiveram-se valores de propagação muito

próximos dos medidos no protótipo, de forma que após a Simulação 30 o modelo foi considerado calibrado.

#### 10.4– Validação

No processo de validação foram feitas simulações em novos pontos de medição, com dados de elevação do nível médio e velocidades conhecidas; que permitiram fazer uma comparação dos dados produzidos pela caracterização hidrodinâmica, calibrada, com os valores reais medidos nesses pontos.

Como o modelo encontrava-se calibrado, não foi feita nenhuma alteração em relação a sua batimetria, condições de fundo e condições de contorno. Porém, como os pontos onde foram realizadas as novas medições apresentavam dados de outros períodos, foi necessário criar novas marés através do método das constantes harmônicas utilizado na calibração; porém sem as correções de nível médio, pois não havia dados para esses períodos.

Foram analisados os dados de elevações do nível d'água em cada ponto comparando os dados medidos em campo com os simulados. Foram plotados gráficos utilizando a mesma referência de nível vertical.

Foram comparados também os perfis de velocidades simulados com os medidos no protótipo a 0,5m da superfície e a 1,0m do fundo. Nesta análise, deve-se levar em conta o fato do programa Mike 21 apresentar os valores das velocidades integrados na vertical, por ter sido simulado na versão 2D, enquanto as medições no protótipo representam apenas dois pontos ao longo do perfil real de velocidades, sendo um deles próximo ao fundo e outro à superfície.

Assim, deve se levar em conta que o Estuário de Santos é classificado como parcialmente misturado, ou seja, a energia de maré, mesmo nas sizígias não é capaz de promover uma mistura completa da fração de água doce que adentra o estuário a partir dos rios com a água salgada.

Deste fato decorre que os perfis reais de velocidade devem sofrer uma certa variação ao longo da vertical, apresentando uma dominância da direção de enchente junto ao fundo em decorrência da entrada da cunha salina e de vazante junto a superfície em função do fluxo em direção ao mar da água doce proveniente dos rios.

No ponto SE-1, a comparação dos dados de elevação do nível d'água apresentaram resultados extremamente satisfatórios. As diferenças encontradas entre os dados impressos mostraram uma pequena defasagem dos dados da maré real, o que significa que houve um atraso da enchente no protótipo em relação à maré simulada pelo programa.

Na comparação das velocidades, os dados simulados para o período de enchente apresentaram módulos superiores às velocidades medidas nas duas profundidades. Acredita-se que essas velocidades medidas em campo não representam satisfatoriamente as condições reais. Isso ocorre pelo fato do ponto SE-1 estar localizado em um trecho curvo do Estuário Santista, tendo o ponto sido medido no meio da seção; onde para o período de enchente, deve se formar uma recirculação de correntes naquele local. Essa conclusão se deve ao fato da duração do período de enchente, para a velocidade a 0,5m da superfície, ser de aproximadamente 2 horas, enquanto o período de vazante é quase 9 horas, o que é incoerente com a realidade. Para o período de vazante, apesar de o período ser maior que o de uma maré semi-diurna clássica, as velocidades superficiais ficaram próximas das simuladas, já que nessa fase, a vertical onde foram medidas as velocidades na seção deve participar da área da seção transversal que contribui efetivamente para o escoamento da maré.

No ponto SE-2, a maré simulada apresentou cotas mais elevadas, fato que deve ser explicado por ter sido “desprezado” o efeito meteorológico, provavelmente negativo na região na data onde foram feitas as medições em campo; porém as amplitudes das duas marés eram iguais a 1,5m; além das preamares coincidirem em fase.

Em relação às velocidades, esse ponto apresentou resultados mais satisfatórios que o ponto SE-1; já que essa seção se encontra em um trecho retilíneo do estuário; onde os rumos das correntes são geralmente opostos nos períodos de enchente e vazante, além de serem perpendiculares à seção. Novamente o período de enchente do protótipo, de 4:30 horas, foi menor que o período simulado, de 5:30; enquanto o

período de vazante do protótipo foi maior, quando comparado o perfil simulado ao medido próximo a superfície. Entretanto, analisando as durações de enchente e vazante junto ao fundo, percebe-se nitidamente que há uma inversão desta tendência, ou seja, o perfil de correntes simulado mostra uma menor duração do ciclo de enchente e maior de vazante, o que pode ser plenamente justificado pelo fato do perfil de velocidades simulado ser integrado na vertical. De modo geral pode-se concluir que as velocidades nesse ponto foram bem coerentes e representaram as condições reais do protótipo.

No ponto SE-3, assim como em SE-2, as marés apresentaram cotas distintas, porém nesse ponto, a maré simulada apresentou valores ligeiramente menores que a maré real. As marés também coincidiram suas amplitudes e fase da preamar.

As velocidades medidas próximo à superfície apresentaram inúmeras oscilações, gerando valores na enchente ligeiramente menores que os simulados; e na vazante, picos que chegam e ter seu módulo equivalente ao dobro das velocidades simuladas. A velocidade de fundo apresentou em todo o período de enchente velocidades quase nulas. Isso ocorre porque o trecho está localizado a regiões de pequena profundidade, e grandes áreas de inundação, o que gera velocidades mais baixas nessa região. No período de vazante as velocidades próximas ao fundo apresentaram picos mais elevados. Os ciclos de enchente e vazante das velocidades simuladas e medidas apresentaram alguma discrepância; entretanto elas podem ser justificadas pelo fato do modelo ser integrado na vertical enquanto o estuário apresenta perfis de velocidades com grandes variações em função de sua condição de parcialmente misturado.

No ponto SE-4, as marés apresentaram amplitudes e cotas bem próximas, e coincidiram suas fases na preamar, porém a maré simulada apresentou um ligeiro atraso em relação à maré medida. Os valores foram considerados satisfatórios.

Esse ponto que está localizado no canal da Cosipa, apresentou velocidades de módulos não coincidentes entre os valores medidos e os calculados. Os valores medidos não apresentaram períodos de enchente bem definidos, devido a inúmeras oscilações, gerando inúmeros períodos de enchente e vazante. Considerando-se que as medições realizadas no protótipo não apresentam erros, este comportamento das correntes no protótipo é de difícil explicação, mas aparentemente pode se dever à

reflexões da onda de maré ao longo do estuário ou à proximidade entre esta seção e a entrada de alguns dos rios que afluem ao estuário.

O ponto SE-5 apresentou marés de mesmas amplitudes, porém com cotas da maré simulada inferiores das cotas do protótipo, provavelmente pelo efeito da maré meteorológica. Além disso, a fase da preamar, assim como o período da maré simulada; sofreu um ligeiro atraso em relação à maré real.

Os módulos da velocidade simulada nesse ponto apresentaram valores inferiores ao das velocidades medidas em protótipo. Isso deve ter ocorrido porque a região representada no modelo gerou uma área de inundação inferior das condições reais; o que subdimensionou o prisma de maré da região, que é a altura entre os níveis de baixa-mar e preamar. Recomenda-se que sejam melhor analisadas essas áreas em estudos futuros.

As velocidades medidas no protótipo apresentaram inúmeros picos e variações, assim como o ponto S-4. Acredita-se que as justificativas para tal comportamento estejam relacionadas aos mesmos motivos ressaltados para o ponto S-4; somados ao fato deste ponto estar na região de tombo das águas das ondas de maré que adentram o estuário pelas embocaduras de Santos e São Vicente; sendo essa uma região extremamente complexa do estuário; uma vez que o ponto exato de encontro das marés pode oscilar de posição neste trecho do estuário em função de inúmeros fatores como a própria amplitude de maré, as vazões fluviais, dentre outros.

O ponto SE-6 foi o que apresentou maiores diferenças em relação aos dados de maré. As amplitudes das marés coincidiram em 1,5m; porém as cotas da maré simuladas foram superiores as medidas no protótipo. A maré simulada encontra-se defasada em relação à maré real; sendo que a maré real apresenta um ligeiro atraso.

As velocidades nesse ponto, entretanto, apresentaram valores em módulo coerentes entre os valores medidos e simulados. O período de enchente foi quase coincidente nas três medições; e as velocidades simuladas foram maiores que as velocidades do fundo e menores que as da superfície; como é de se esperar que ocorra no protótipo, já que a velocidade simulada é uma média das velocidades do perfil da vertical do ponto medido. No ciclo de vazante, os períodos medidos em campo foram coincidentes e o período simulado foi ligeiramente maior. O ponto está localizado na

entrada da interconexão do estuário de Santos com o Canal da Bertioga. De forma que esse trecho deve sofrer influência da propagação da maré que adentra o estuário a partir desta última embocadura, dados que não foram inseridos no modelo. Assim, a partir dos resultados da validação pode-se concluir que essa simplificação não diminuiu significativamente a confiabilidade do modelo desenvolvido, porém, ainda sim, acredita-se que o Canal de Bertioga deve ser incluído em estudos futuros para melhorar ainda mais a resposta do modelo nesse trecho do estuário.

De modo geral, as marés nos pontos de medição apresentaram resultados satisfatórios. As amplitudes na maioria dos casos foi exatamente a mesma. As diferenças de cotas se devem ao fato das marés geradas não contemplarem o efeito meteorológico. Os níveis de preamar, assim como o período de maré foram ligeiramente defasados em alguns pontos, seja devido a um acúmulo de defasagem da vazante da maré do dia anterior gerada pelo programa, seja devido a não consideração de algumas constantes harmônicas na simulação.

As velocidades apresentaram alguma discrepância de valores. Porém conforme discutido, em alguns pontos as velocidades medidas no protótipo apenas próximo a superfície e ao fundo não representavam satisfatoriamente o comportamento do perfil completo de velocidades, tornando difícil uma comparação direta com os perfis simulados que são integrados na vertical.

Além disso, o fato das medições de campo provirem de estudos mais antigos, onde possivelmente as ferramentas de posicionamento e medição não apresentavam a mesma precisão dos dias de hoje pode ter gerado erros nos dados medidos em campo. Além disso, o estudo não apresenta os rumos das velocidades medidas, não permitindo que a análise seja feita contemplando esse parâmetro tão importante.

Ainda sim, alguns pontos simulados apresentavam valores bem próximos aos medidos no protótipo. De maneira geral, os valores simulados responderam satisfatoriamente aos valores esperados para as velocidades integradas na vertical, portanto, pelos resultados obtidos nos pontos medidos nessa etapa do estudo, pode-se concluir que a caracterização hidrodinâmica da Baía e Estuário Santista se encontra potencialmente validada.





## 11 – CONCLUSÕES

Nesse estudo foi realizada a caracterização hidrodinâmica da Baía e Estuário Santista empregando a modelagem numérica.

Para a realização da caracterização foram preparados diversos dados de entrada no programa de modelagem numérica Mike 21. Esses dados foram extraídos de estudos mais antigos realizados na região. Esses dados, apesar de não apresentarem grande precisão nas suas medições, devido às ferramentas utilizadas na época; representam, de maneira geral, satisfatoriamente as condições reais que regem a hidrodinâmica da região; portanto foram de extrema importância para que fosse realizada a caracterização.

Porém, no período escolhido para realização do modelo, não foram encontrados todos os dados necessários para que fossem representadas as condições reais de maneira precisa, o que foi necessário introduzir algumas simplificações, que produziram pequenas diferenças nas comparações entre os valores simulados e os valores reais medidos no protótipo.

A fase de pré-processamento, onde foi realizada uma simulação com dados de maré gerados para uma maré semi-diurna; apresentou resultados e erros que conduziram a uma modificação dos dados de entrada de maré; tanto nos valores da maré gerada, quanto no tipo de entrada, ou seja, promoveu uma modificação na borda de maré inicialmente adotada.

Foi necessário também, para que fosse concluído o processo de calibração, modificações na batimetria da região; assim como densificação da malha flexível criada, no trecho crítico do modelo; entre os postos do Clube de Pesca e Torre Grande, onde fica localizado o Porto de Santos. Essas modificações na malha flexível demonstraram uma sensibilidade do modelo; o que não pode ser percebido nesse trecho através da modificação na rugosidade do fundo, já que foram extrapolados valores entre 40 e  $100\text{m}^{1/3}/\text{s}$  do coeficiente de Manning, e os valores de defasagem medida entre o posto não sofreu grandes alterações.

Nos outros trechos; assim como no trecho do Porto de Santos, após a densificação da malha flexível; a modificação dos coeficientes de Manning conduziu o modelo para a convergência do processo de calibração.

No processo de validação, as diferenças entre os valores medidos em campo e os valores simulados, se devem ao fato de serem geradas marés considerando apenas o efeito astronômico das constantes harmônicas, além da inclinação da borda de entrada não estar alinhada com a resultante da maré real, já que foi utilizada uma maré constante em toda a borda. Em relação às velocidades, as diferenças entre as velocidades eram esperadas, por serem medidas em diferentes pontos do perfil de velocidade; sendo as velocidades do protótipo medidas apenas a 0,5m da superfície e a 1,0m do fundo, e a velocidade simulada integrada na vertical. Apesar disso, pode-se concluir que os valores dos estudos foram coerentes com os extraídos do protótipo, levando-se em consideração as simplificações adotadas para este estudo, dentre elas o emprego de um modelo bidimensional; a utilização de valores médios de vazões fluviais; a falta de informações precisas a respeito das planícies de inundação ao longo do estuário, e a supressão das forçantes de vento e ondas.

Além disso, o programa apresenta formulações específicas, que apesar de serem consideradas adequadas para caracterizar uma região em seus aspectos hidrodinâmicos, não conseguem reproduzir todos os fenômenos que regem um sistema tão complexo como o sistema estuarino de Santos.

Por fim, pode-se concluir que a caracterização da região foi efetuada com sucesso; mas apesar de serem recomendadas modificações para estudos futuros, no capítulo seguinte, o modelo desenvolvido já se configura em uma ferramenta apta a ser empregada para simular os impactos que as mudanças climáticas e a ação antrópica poderiam trazer para hidrodinâmica do Estuário Santista.

## 12 – RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendações para trabalhos futuros, propõe-se complementar a área do modelo com a embocadura do Canal da Bertioga. Além disso, sugere que seja modificada a representação das planícies de inundação no interior do estuário, afim de melhorar a representação dos prismas de maré, melhorando a resposta do modelo em relação às velocidades das correntes.

Em relação à maré introduzida, sugere-se afastar a borda do modelo para que haja um espaço de acomodação dos dados da maré até os primeiros pontos de medição, ainda na Baía de Santos. Deve-se também, obter as constantes harmônicas ao longo das bordas abertas, para que sejam introduzidas as diferentes ondas de maré que afetam o estuário.

Recomenda-se ainda introduzir o efeito de ondas, ventos e salinidade; além de acoplar ao modelo o módulo de transporte de sedimentos para analisar as modificações na morfodinâmica do estuário e o módulo que avalia as mudanças na linha de costa que podem decorrer das alterações climáticas e antrópicas previstas para a região.

Deve-se ainda, validar o trecho da Baía a partir de dados de trajetória de derivadores, e buscar dados de medições que contemplem o rumo além dos módulos das velocidades de correntes para os trechos do estuário.

Sugere-se fazer uma análise da sensibilidade de resposta do modelo com relação ao tempo do passo de tempo (time step).

Recomenda-se ainda que seja desenvolvido um modelo hidrodinâmico tridimensional para contemplar a estratificação parcial do estuário, já que no caso de Santos, é evidente a ocorrência desse fenômeno em diferentes trechos; mesmo na condição de sizígia, o qual foi simulado.

Por fim, com o modelo calibrado e validado; recomenda-se que sejam simulados cenários que levem em conta as mudanças que ocorrem na região. Deve-se avaliar a influência das mudanças climáticas; como elevação do nível médio, redução da amplitude de maré, entre outros. Deve-se também avaliar a influência das ações antrópicas; como alargamento e aprofundamento do canal e modificação da geometria

das margens com a execução de dragagens e aterros no interior do estuário; que consequentemente causariam modificações na circulação de correntes da região, inferindo sobre o transporte de sedimentos e a intrusão salina. Deve-se ainda avaliar o efeito da combinação dos dois cenários, além de gerar conclusões a respeito de possíveis impactos negativos identificados e buscar medidas mitigatórias.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFREDINI, P. "Obras e Gestão de Portos e Costas". Ed. Edgard Blücher. São Paulo, 2005.

AMORIM, J. C. C.; VASCONCELLOS, C. A. B.; BUNDGAARD, K. ; ELFRINK, B.. Modelagem hidrodinâmica do Estuário de Santos para avaliação dos impactos da dragagem de aprofundamento do Porto de Santos - SP. In: XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2011, Maceió - AL. Anais do XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2011.

BAPTISTELLI, S. C.; "Modelação numérica da circulação de correntes de maré e induzidas pelo vento aplicada a estudos de disposição oceânica de efluentes na Praia Grande – São Paulo" - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

\_\_\_\_\_. "Análise crítica da utilização da modelagem matemática na avaliação da dispersão de efluentes leves no litoral da Baixada Santista (Estado de São Paulo)" - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BLENINGER, T. Coupled 3D hydrodynamic models for submarine outfalls: Environmental hydraulic design and control of multiport diffusers. Doctoral thesis presented to Institute for Hydromechanics, University Karlsruhe, Alemanha. 2006.

CARDOSO, A. Gestão Costeira Integrada. Maré. 2007.  
Disponível em: < <http://www.aprh.pt/rgci/glossario/mare.html>>. Acesso em: 21 dez. 2011.

CODESP. Imprensa. 2011 foi ano de tonelagem recorde para operações do Porto de Santos.

Disponível em: <<http://www.portodesantos.com.br/pressRelease.php?idRelease=557>>. Acesso em: 19 fev. 2012.

\_\_\_\_\_. Relatório anual 2010. Santos, 2010.

\_\_\_\_\_. São Paulo, 2008. Disponível em: < <http://www.portodesantos.com.br>>. Acesso em: Nov. 2008.

CUBATÃO. Seção Agenda 21 - CUBATÃO 2020. A região metropolitana e o contexto de Cubatão. Cubatão, 31 ago. 2006. Disponível em: <<http://www.novomilenio.inf.br/cubatao/ag21d01.htm>>. Acesso em: 07 fev. 2012.

DHI – MIKE FM HD 2D. MIKE 21 Flow Model FM. Hydrodynamic Module. User Guide. Dinamarca. 2011.

DHI – MIKE FM HD STEP BY STEP. Mike 21 & Mike 3 Flow Model FM. Hydrodynamic Module. Step-by-step training guide. Dinamarca. 2011.

DHI – MIKE FM ST STEP BY STEP WC. Mike 21 Flow Model FM. Sand Transport Module. Step-by-step training guide: Coastal application. Dinamarca. 2011.

DHI – MIKE ZERO STEP BY STEP. Mike Zero. Project Oriented Water Modelling. Step-by-step training guide. Dinamarca. 2011.

DHI – MZ GENERIC. Mike Zero Preprocessing & Postprocessing. User Guide. Generic Editors and Viewers. Dinamarca. 2011.

FCTH. “Diagnóstico sobre os efeitos da elevação do nível do mar, decorrentes do aquecimento global da atmosfera, nos ecossistemas costeiros brasileiros”, 2005.

FRANCO, A. S.; “Tides – fundamentals, analysis and prediction”. 2<sup>nd</sup>. Ed., FCTH. São Paulo, 1988.

GARCIA, P. D.; “Caracterização hidrossedimentológica das correntes de maré e do transporte de sedimentos associado à área portuária do maranhão” - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MARINHA DO BRASIL. Informações aos navegantes. Previsões de Maré. Porto de Santos – Torre Grande (Estado de São Paulo). Abr. 2012.

Disponível em: <( <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/tabuas/50225Abr2012.htm>)>. Acesso em: 01 mar. 2012.

MKR Tecnologia, Serviços, Indústria e Comércio Ltda. RIMA – Relatório de Impacto Ambiental. Centro Portuário Industrial Naval Offshore de Santos. 2010.

OPEN UNIVERSITY COURSE TEAM – “Waves, tides and shallow water processes”. Butterworth Heinemann, London, 1997.

PORTO, R. M.; Hidráulica Básica. 2nd. Ed., EESC-USP. São Carlos, 1999.

SANTOS, L. Jornal A Tribuna. Caderno Porto & Mar. Página C-6. Santos, 9 nov. 2011.

SILVA, G. C.; “Análise comparativa de metodologias de modelagem numérica da propagação de ondas aplicada à Engenharia Costeira e Portuária” - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SONDOTÉCNICA. “Comportamento hidráulico e sedimentológico do Estuário Santista – Empresas de Portos do Brasil S.A. – Portobrás – Instituto de Pesquisas Hidroviárias – INPH – Relatório Final - Texto”. 1977.

\_\_\_\_\_. “Comportamento hidráulico e sedimentológico do Estuário Santista – Empresas de Portos do Brasil S.A. – Portobrás – Instituto de Pesquisas Hidroviárias – INPH – Relatório Final – Desenhos”. 1977.

RANGEL, G. Disponível em: <<http://www.travessia14bis.com/>>. Acesso em: 27 fev. 2012.