ROGÉRIO RIKER DE SOUZA

**Modelagem numérica da circulação de correntes de maré
na Baía de Marajó e Rio Pará (PA).**

São Paulo

2006

ROGÉRIO RIKER DE SOUZA

**Modelagem numérica da circulação de correntes de maré
na Baía de Marajó e Rio Pará (PA).**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Civil.

São Paulo

2006

ROGÉRIO RIKER DE SOUZA

**Modelagem numérica da circulação de correntes de maré
na Baía de Marajó e Rio Pará (PA).**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia Civil

Orientador: Prof. Livre-Docente Paolo Alfredini

São Paulo

2006

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL, OU PARCIAL, DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL, OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, ____ de _____ de 2006

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Souza, Rogério Riker de

Modelagem numérica da circulação de correntes de maré na Baía de Marajó e Rio Pará (PA) / R.R. de Souza. -- São Paulo, 2006.

159 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.

1.Hidráulica marítima 2.Processos estuarinos 3.Modelagem matemática I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária II.t.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Rogério Riker de Souza

Modelagem numérica da circulação de
correntes de maré na Baía de Marajó e
Rio Pará (PA).

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Civil.
Área de Concentração: Engenharia Civil

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

DEDICATÓRIA

À minha amada Rachel Pereira Segadilha, por todo carinho, compreensão, amor e incentivo sem o qual não seria possível a realização desse trabalho.

Aos meus pais Arnaldo Amaral de Souza e Rosenia Riker de Souza por serem a razão da minha existência.

Ao meu irmão Arnaldo Adriano Riker de Souza, pelo ombro amigo nas horas difíceis e pelas cobranças sadias.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Livre-Docente Paolo Alfredini pela proposição e orientação de um tema tão importante ao desenvolvimento da minha região. Obrigado pela coragem de ousar, pelo incentivo e apoio, principalmente nos momentos difíceis e pela oportunidade de aprendizado na área da Hidráulica Marítima.

Aos examinadores do Exame de Qualificação desta dissertação: Comte Joffre Villote e Dr. Winston Hisasi Kanashiro.

Ao amigo, Engenheiro Civil Rogério Fernando do Amaral pela constante e incansável ajuda e pelo enorme apoio nos momentos de dificuldade.

Ao Engenheiro e Doutor em Engenharia Rodrigo Nogueira de Araújo pelo incentivo e troca de experiências.

Ao Centro Tecnológico de Hidráulica - CTH, por todo apoio logístico e acadêmico imprescindíveis na elaboração do trabalho.

À CAPES por todo incentivo, na forma de bolsa de estudo, demonstrando mais uma vez o seu comprometimento com o desenvolvimento técnico/científico do nosso país.

Aos professores e funcionários do Departamento de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, por todo auxílio, conhecimento e companheirismo.

À minha família paulistana, tio Poda, tia Vera, Ivor e Nídia, pela acolhida e desprendimento, não tenho palavras para agradecer a oportunidade e o carinho dispensado à minha pessoa. Obrigado pelo porto seguro, compreensão e, acima de tudo, pelo amor, tão necessário nessa longa jornada.

Aos meus Pais e meu Irmão, por todo incentivo, pela confiança, pelo amor que motivam a minha caminhada.

À Rachel Segadilha, pela compreensão, pelo carinho, pelo amor e pelo incentivo, principalmente nos momentos difíceis e de dúvida.

Ao meu amigo Paulo Roberto Kyriakakis e a toda equipe da ACTHON Planejamento Ambiental Ltda, pelo apoio e compreensão e principalmente pela oportunidade.

Os meus sinceros agradecimentos à todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

SOUZA, R. R de . **Modelagem Numérica da Circulação de Correntes de Maré na Baía de Marajó e Rio Pará (PA)**. 2006. 159 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

A região amazônica possui uma vocação natural para a navegação, uma vez que os rios desempenham um papel preponderante, sendo em muitos casos as únicas alternativas de transporte e comunicação. O trabalho se insere nesse cenário, tendo como objetivo maior a sistematização do conhecimento a respeito da circulação de correntes de maré na Baía de Marajó e Rio Pará (PA), com foco na Área Portuária de Vila do Conde. O melhor entendimento sobre as correntes de maré será um elemento importante para o planejamento portuário e hidroviário interior, além de propiciar um incremento na segurança e otimização nas operações portuárias. A sistematização da circulação das correntes de maré na área de estudo foi implementada através de modelagem numérica com a utilização do software MIKE21 HD de autoria do DHI, consistindo basicamente em um modelo bidimensional verticalmente integrado. Como subsídio à programação numérica, foi realizada uma revisão bibliográfica a respeito dos principais temas relacionados: correntes, maré e vento, bem como foram levantadas as principais bases de dados da região, utilizados na calibração e validação do modelo numérico. Em razão da escassez de dados disponíveis a calibração foi executada com dados do Porto de Vila do Conde, por meio de medições de intensidade e direção das velocidades das correntes nos anos de 1991 e 2001. A validação foi realizada através da Carta de Correntes de Maré, com ponto específico na Baía de Marajó. O programa mostrou-se consistente e aplicável à realidade, permitindo desta forma a obtenção de Cartas de Correntes de Maré para toda a área de estudo, bem como para a área foco.

Palavras-chave: Hidráulica Marítima, Processos Estuarinos, Modelagem Matemática.

ABSTRACT

SOUZA, R. R de. **Numerical modelling of the tidal currents pattern in Marajó Bay and Pará River (PA)**. 2006, 159 p. MSc Thesis (MSc) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

In the amazonic region, navigation is the natural and leading, in some cases the only one possibility, role in the transportation network. In this scenario, the thesis has the main purpose of consolidating the knowledge about tidal currents pattern in Marajó Bay and Pará River (PA), considering Vila do Conde Harbour as the most important study area. A best knowledge about the tidal currents will be an important factor for port and waterway planning, contributing to increase the port operation safety and development. The tidal currents pattern was consolidated through numerical modelling using DHI MIKE 21 HD software, which is a bidimensional vertically integrated model. A bibliographical review was carried out about correlated themes: currents, tides and winds, and also was made a data base research, which was used in the numerical model calibration and validation. Due to the few data obtained, calibration was performed with Vila do Conde Harbour data, using current intensity and directions obtained in 1991 and 2001 surveys. The validation was performed using the Tidal Currents Chart, for a point in the Marajó Bay. The software results showed a consistent fit to the real condition, which made possible to get a Tidal Currents Chart of the whole area and for the focus area.

Keywords: Maritime Hydraulics, Estuarine Processes, Mathematic Modelling

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 -	Localização da Área de Estudo.....	07
Figura 2.1 -	Tipos de maré ao redor da Terra.....	13
Figura 2.2 -	Amplitude de maré ocasionada pela componente M_2	15
Figura 2.3 -	Fase da componente M_2	15
Figura 2.4 -	Esquema de circulação dos ventos no planeta.....	19
Figura 2.5 -	Influência do vento sobre a massa líquida.....	20
Figura 2.6 -	Correntes no litoral brasileiro.....	23
Figura 2.7 -	Gráfico de Shields, segundo YALIN (1971).....	26
Figura 2.8 -	Determinação do coeficiente de Chézy.....	28
Figura 2.9 -	Arranjo Geral do Porto de Vila do Conde.....	32
Figura 2.10 -	Localização dos terminais portuários.....	34
Figura 3.1 -	Esquema de aninhamento de grades batimétricas.....	40
Figura 3.2 -	Esquema da matriz formadora da grade batimétrica.....	41
Figura 4.1 -	Grade batimétrica gerada a partir das Cartas Náuticas.....	48
Figura 4.2 -	Grades batimétricas do Modelo.....	51
Figura 4.3 -	Formato de entrada da grade batimétrica com espaçamento de 270 m, referente à Área 1.....	52
Figura 4.4 -	Formato de entrada da grade batimétrica com espaçamento de 90 m, referente à Área 2.....	52
Figura 4.5 -	Formato de entrada da grade batimétrica com espaçamento de 30 m, referente à Área 3.....	53
Figura 4.6 -	Estações maregráficas na área de estudo.....	54
Figura 4.7 -	Tela de aquisição de dados da maré, destacando a definição do período de simulação.....	57
Figura 4.8 -	Tela de aquisição de dados da maré, destacando a definição das constantes harmônicas.....	58
Figura 4.9 -	Previsão de Maré no Cabo Maguari.....	59
Figura 4.10 -	Previsão de Maré na Ilha dos Guarás.....	59
Figura 4.11 -	Distribuição linear da maré.....	60

Figura 4.12 -	Maré medida no Porto de Vila do Conde. Data: 05/04/2001.....	61
Figura 4.13 -	Maré medida no Porto de Vila do Conde. Data: 06/04/2001.....	61
Figura 4.14 -	Maré medida no Porto de Vila do Conde. Data: 07/04/2001.....	62
Figura 4.15 -	Maré medida no Porto de Vila do Conde. Data: 08/04/2001.....	62
Figura 4.16 -	Maré medida no Porto de Vila do Conde. Data: 09/04/2001.....	63
Figura 4.17 -	Maré medida no Porto de Vila do Conde. Data: 10/04/2001.....	63
Figura 4.18 -	Distribuição de frequência de ocorrência (%) dos ventos em função do rumo (Abril/1991).....	65
Figura 4.19 -	Distribuição de frequência dos ventos no Porto de Belém (1931-1961)....	68
Figura 4.20 -	Carta de Corrente de Maré. - 03 horas antes da Preamar.....	71
Figura 4.21 -	Distribuição de frequência da direção da corrente - OCEANOTÉCNICA (1991).....	73
Figura 4.22 -	Trajetórias dos derivadores lançados em maré de enchente - Porto de Vila do Conde.....	75
Figura 4.23 -	Trajetórias dos derivadores lançados em maré de vazante - Porto de Vila do Conde.....	76
Figura 5.1 -	Velocidades para Areia Fina.....	85
Figura 5.2 -	Velocidades para Areia Grossa.....	85
Figura 5.3 -	Comparação do nível d'água em Vila do conde. Data: 05/04/2001.....	88
Figura 5.4 -	Comparação do nível d'água em Vila do conde. Data: 06/04/2001.....	88
Figura 5.5 -	Comparação do nível d'água em Vila do conde. Data: 07/04/2001.....	89
Figura 5.6 -	Comparação do nível d'água em Vila do conde. Data: 08/04/2001.....	89
Figura 5.7 -	Comparação do nível d'água em Vila do conde. Data: 09/04/2001.....	90
Figura 5.8 -	Comparação do nível d'água em Vila do conde. Data: 10/04/2001.....	90
Figura 5.9 -	Comparação da trajetória dos derivadores reais e simulados - 1º lançamento.....	92
Figura 5.10 -	Comparação da trajetória dos derivadores reais e simulados - 2º lançamento.....	93
Figura 5.11 -	Comparação da trajetória dos derivadores reais e simulados - 3º lançamento.....	94
Figura 5.12 -	Comparação da trajetória dos derivadores reais e simulados - 4º lançamento.....	95

Figura 5.13 -	Comparação da trajetória dos derivadores reais e simulados - 5° lançamento.....	96
Figura 5.14 -	Comparação da trajetória dos derivadores reais e simulados - 6° lançamento.....	97
Figura 5.15 -	Comparação da trajetória dos derivadores reais e simulados - 7° lançamento.....	98
Figura 5.16 -	Comparação da trajetória dos derivadores reais e simulados - 8° lançamento.....	99
Figura 5.17 -	Comparação da trajetória dos derivadores reais e simulados - 9° lançamento.....	100
Figura 5.18 -	Correlação entre amplitudes de maré, direção e velocidades de corrente. Dados OCEANOTÉCNICA (1991).....	103
Figura 5.19 -	Rosa de direções e correntes para o Porto de Vila do Conde, extraída do modelo a uma profundidade de 3 metros.....	104
Figura 5.20 -	Distribuição de frequência da direção da corrente - OCEANOTÉCNICA (1991).....	105
Figura 5.21 -	Dados relativos a Carta de Corrente - 06 horas antes da Preamar.....	108
Figura 5.22 -	Dados relativos a Carta de Corrente - 05 horas antes da Preamar.....	108
Figura 5.23 -	Dados relativos a Carta de Corrente - 04 horas antes da Preamar.....	109
Figura 5.24 -	Dados relativos a Carta de Corrente - 03 horas antes da Preamar.....	109
Figura 5.25 -	Dados relativos a Carta de Corrente - 02 horas antes da Preamar.....	110
Figura 5.26 -	Dados relativos a Carta de Corrente - 01 hora antes da Preamar.....	110
Figura 5.27 -	Dados relativos a Carta de Corrente - Preamar.....	111
Figura 5.28 -	Dados relativos a Carta de Corrente - 01 hora depois da Preamar.....	111
Figura 5.29 -	Dados relativos a Carta de Corrente - 02 horas depois da Preamar.....	112
Figura 5.30 -	Dados relativos a Carta de Corrente - 03 horas depois da Preamar.....	112
Figura 5.31 -	Dados relativos a Carta de Corrente - 04 horas depois da Preamar.....	113
Figura 5.32 -	Dados relativos a Carta de Corrente - 05 horas depois da Preamar.....	113
Figura 5.33 -	Dados relativos a Carta de Corrente - 06 horas depois da Preamar.....	114
Figura 5.34 -	Localização dos pontos escolhidos para a Validação do Modelo.....	115
Figura 5.35 -	Rosa com a comparação das direções e velocidades (Validação do Modelo).....	119
Figura 5.36 -	Correlação entre amplitudes de maré, direção e velocidades de corrente	

	(Validação do Modelo).....	120
Figura 5.37 -	Ajuste das direções dos pontos obtidos na carta de corrente e no modelo (Validação do Modelo).....	121
Figura 5.38 -	Ajuste das velocidades dos pontos obtidos na carta de corrente e no modelo (Validação do Modelo).....	122
Figura 6.1 -	Saída de direções e velocidades - 06 horas antes da Preamar em Belém.....	127
Figura 6.2 -	Saída de direções e velocidades - 05 horas antes da Preamar em Belém.....	128
Figura 6.3 -	Saída de direções e velocidades - 04 horas antes da Preamar em Belém.....	129
Figura 6.4 -	Saída de direções e velocidades - 03 horas antes da Preamar em Belém.....	130
Figura 6.5 -	Saída de direções e velocidades - 02 horas antes da Preamar em Belém.....	131
Figura 6.6 -	Saída de direções e velocidades - 01 hora antes da Preamar em Belém.....	132
Figura 6.7 -	Saída de direções e velocidades - Preamar em Belém.....	133
Figura 6.8 -	Saída de direções e velocidades - 01 hora depois da Preamar em Belém....	134
Figura 6.9 -	Saída de direções e velocidades - 02 horas depois da Preamar em Belém...	135
Figura 6.10 -	Saída de direções e velocidades - 03 horas depois da Preamar em Belém...	136
Figura 6.11 -	Saída de direções e velocidades - 04 horas depois da Preamar em Belém...	137
Figura 6.12 -	Saída de direções e velocidades - 05 horas depois da Preamar em Belém...	138
Figura 6.13 -	Saída de direções e velocidades - 06 horas depois da Preamar em Belém...	139
Figura 6.14 -	Saída de direções e velocidades na Área 3 - 06 horas antes da Preamar em Vila do Conde.....	140
Figura 6.15 -	Saída de direções e velocidades na Área 3 - 05 horas antes da Preamar em Vila do Conde.....	141
Figura 6.16 -	Saída de direções e velocidades na Área 3 - 04 horas antes da Preamar em Vila do Conde.....	142
Figura 6.17 -	Saída de direções e velocidades na Área 3 - 03 horas antes da Preamar em Vila do Conde.....	143
Figura 6.18 -	Saída de direções e velocidades na Área 3 - 02 horas antes da Preamar em Vila do Conde.....	144
Figura 6.19 -	Saída de direções e velocidades na Área 3 - 01 hora antes da Preamar em Vila do Conde.....	145
Figura 6.20 -	Saída de direções e velocidades na Área 3 - Preamar em Vila do Conde.....	146

Figura 6.21 -	Saída de direções e velocidades na Área 3 - 01 hora depois da Preamar em Vila do Conde.....	147
Figura 6.22 -	Saída de direções e velocidades na Área 3 - 02 horas depois da Preamar em Vila do Conde.....	148
Figura 6.23 -	Saída de direções e velocidades na Área 3 - 03 horas depois da Preamar em Vila do Conde.....	149
Figura 6.24 -	Saída de direções e velocidades na Área 3 - 04 horas depois da Preamar em Vila do Conde.....	150
Figura 6.25 -	Saída de direções e velocidades na Área 3 - 05 horas depois da Preamar em Vila do Conde.....	151
Figura 6.26 -	Saída de direções e velocidades na Área 3 - 06 horas depois da Preamar em Vila do Conde.....	152

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Oito maiores componentes da maré astronômica.....	12
Tabela 2.2 -	Ficha da Estação Maregráfica do Porto de Belém.....	16
Tabela 2.3 -	Ficha da Estação Maregráfica do Porto de Vila do Conde.....	17
Tabela 4.1 -	Ficha da Estação Maregráfica Cabo Maguari.....	55
Tabela 4.2 -	Ficha da Estação Maregráfica Ilha dos Guarás.....	56
Tabela 4.3 -	Distribuição de frequência (%) do vento no PVC (Abril/1991).....	65
Tabela 4.4 -	Distribuição das velocidades de vento no PVC (Abril/1991).....	66
Tabela 4.5 -	Distribuição das frequências de ocorrência e intensidade dos ventos no Porto de Belém (1931-1961).....	67
Tabela 4.6 -	Vazões veiculadas pela UHE Tucuruí.....	78
Tabela 5.1 -	Comparação intensidade da corrente em relação à rugosidade de fundo	82
Tabela 5.2 -	Comparação das Velocidades no Perfil.....	84
Tabela 5.3 -	Comparação dos dados de direções e intensidades de correntes em relação à Preamar em Belém.....	117
Tabela 6.1 -	Ficha Maregráfica de Colares.....	126

LISTA DE ABREVIATURAS

ANTAQ: Agência Nacional de Transportes Aquaviários

ALBRÁS: Alumínio Brasileiro S/A

ALUNORTE: Alumina Norte do Brasil S/A

BE: Berço

CIAGA: Centro de Instrução Almirante Graça Aranha

CDP: Companhia Docas do Pará

CG: Cais de Carga Geral

CGS: Cais de Granéis Sólidos

DHI- Danish Hydraulic Institute

DHN: Diretoria de Hidrografia e Navegação

FEMAR: Fundação Estudos do Mar

HiBRAM: Hidrologia da Bacia Amazônica

INPH: Instituto de Pesquisas Hidroviárias

PA: Estado do Pará

PVC: Porto Vila do Conde

SETRAN/PA: Secretaria dos Transportes do Estado do Pará

UHE: Usina Hidrelétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

- C: Número de Chézy
C': Número de Chézy relativo ao grão
Cr: Número de Courant
D₅₀: dimensão mediana do grão
D₉₀: dimensão que 90% em peso dos sedimentos possuem dimensão menor
D*: parâmetro da partícula
d: Diâmetro mediano dos grãos do material do leito
Fr: Número de Froude
f(V): Fator de atrito do vento
g: Aceleração da gravidade
H: Altura da onda
h: Profundidade da água
K: coeficiente de Strickler
k: constante de Von Karman
k_{forma}: rugosidade devido à conformação do fundo
k_{grão}: rugosidade devido ao grão
k_N: Rugosidade equivalente de Nikuradse
k_s: rugosidade equivalente (m)
L: Comprimento da onda
M: Coeficiente de Manning
N: Número de Manning
p,q (x,y,t): Densidade de fluxo nas direções x e y ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) = (u_h,v_h); (u,v) = velocidades médias na vertical nas direções x e y
P_a(x,y,t): Pressão atmosférica ($\text{kg}/\text{m}/\text{s}^2$)
R: raio hidráulico
T: parâmetro de estágio de transporte
t: Tempo (s)
tf: Tonelada-força
U_{corrente}: Velocidade da corrente (m/s)

U_{vento} : Velocidade do vento (m/s)
 u_* : velocidade de atrito (m/s)
 u_*' : velocidade de atrito do fundo relativa ao grão de sedimento
 u_{*cr}' : velocidade de atrito crítica de acordo com Shields
 V : velocidade média (m/s)
 V_y : velocidade local do escoamento à distância y do fundo
 x, y : Coordenadas
 y : distância do fundo (m)
 Δ : altura da conformação de fundo de canal
 δ : Índice de esbeltez de onda
 λ : comprimento da conformação de fundo de canal
 $\Omega(x, y)$: Parâmetro de Coriolis, dependente da latitude (s^{-1})
 θ : Parâmetro de Shields
 θ_c : Valor crítico do parâmetro de Shields
 θ' : Parâmetro de Shields relativo ao atrito superficial
 ρ_w : Massa específica (kg/m^3)
 ν : Viscosidade cinemática da água
 $\zeta(x, y, t)$: Elevação da superfície (m)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.2 OBJETIVO DO ESTUDO	2
1.3 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO.....	3
1.4. ÁREA DO ESTUDO.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	8
2.2 PROCESSOS HIDRODINÂMICOS	8
2.2.1. Marés	9
2.2.2. Ventos.....	18
2.2.3. Correntes.....	21
2.2.4. Ondas de Gravidade	29
2.3. Principais Terminais na Área de Estudo	29
3. DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	35
3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	35
3.1. MÓDULO PP (Pre Processing Module)	35
3.2. MÓDULO NHD (Nested Hydrodynamic Module)	35
3.2.1 - Equações principais.....	35
3.2.2 - Resistência do leito	42
4. METODOLOGIA E BASE DE DADOS.....	44
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	44
4.2. PREPARAÇÃO DOS DADOS.....	44
4.2.1. Batimetria	44
4.2.2. Dados de Maré.....	53
4.2.3. Dados de Vento	64
4.2.4. Dados de Corrente	70
4.2.5. Dados de Vazão Fluvial.....	77

5. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	80
5.1 - Simulação Prévia.....	80
5.2 - Calibração do Modelo Numérico	83
5.2.1 - Correção das velocidades do modelo no perfil vertical	83
5.2.2 - Calibração do Modelo Numérico utilizando os dados do INPH (2001)	86
5.2.3 - Calibração do Modelo Numérico utilizando os dados da OCEANOTÉCNICA (1991)	101
5.3 - Validação do Modelo Numérico	105
 6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	 123
 7 - CONCLUSÕES.....	 153
 8. BIBLIOGRAFIA	 155

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A região Amazônica possui uma vocação natural para a navegação. Os rios desempenharam papel preponderante na colonização da região, foram as primeiras vias de acesso ao interior. Expedições partiam de Belém com destino às entranhas da floresta Amazônica, através do rio mar, o rio Amazonas. Apesar do passar dos séculos e da evolução tecnológica experimentada pela humanidade, as vias fluviais continuam hoje a ter uma enorme importância para a economia local. Em muitos casos são as únicas alternativas de transporte e comunicação, são as “estradas” dos ribeirinhos, que as utilizam como meio de transporte e fonte de subsistência.

É nesse cenário que o presente trabalho se insere, uma vez que a região possui escassez de dados confiáveis, aliado com a crescente importância do transporte fluvial na matriz de transporte nacional e regional, tornando-se importante a existência de iniciativas que tentem aumentar o conhecimento sobre a região, especificamente na Área Portuária de Vila do Conde, notável exemplo de intermodalidade logística no Brasil, podendo vir a constituir-se no Porto Concentrador de Carga da Bacia Amazônica, uma vez que convergem para ele (conforme pode ser visualizado na Figura 1.1) as Hidrovias Araguaia-Tocantins e dos Rios Guamá-Capim; bem como a navegação de cabotagem de granel líquido e de bauxita, esta última proveniente do Rio Trombetas, realizada através da Barra Norte do Rio Amazonas. A navegação pelos Estreitos ao Sul da Ilha de Marajó, bem como a futura Hidrovia que atravessará a Ilha do Marajó também devem ser consideradas.

No presente trabalho, no Capítulo 1, foram apresentados os objetivos específicos e as justificativas, sendo mostrada a área de estudo. No Capítulo 2, foi realizada uma breve revisão

bibliográfica dos conceitos básicos acerca dos fatores que influenciam a modelagem hidrodinâmica.

O modelo numérico, ferramenta essencial para a realização do trabalho, é descrito no Capítulo 3. Os dados da área foram apresentados e discutidos no Capítulo 4. No Capítulo 5 foram apresentadas a Calibração e Validação do modelo numérico.

Nos Capítulos 6 e 7 são formuladas, respectivamente, a apresentação e análise dos resultados e as conclusões acerca da modelagem numérica.

1.2 OBJETIVO DO ESTUDO

O objetivo do presente trabalho é o de sistematizar o conhecimento da circulação de correntes de maré na Baía de Marajó e Rio Pará (PA) com foco na área portuária de Vila do Conde, através de modelagem numérica com a utilização do software MIKE 21 (DHI), tendo como dados de entrada basicamente a batimetria da região e as previsões de marés.

Uma vez determinada a circulação das correntes de maré na área de estudo, pode-se usá-la como subsídio na elaboração de inúmeros estudos e trabalhos, como os listados a seguir:

- Estudo do incremento de segurança e otimização nas manobras de atracação e desatracação dos navios nos píeres;
- Estudo da otimização das condições de amarração dos navios que operam nos píeres;
- Subsidiar a elaboração de planos de contingência para possíveis vazamentos de granéis líquidos na área portuária;
- Elemento para o planejamento portuário e hidroviário interior, com repercussões locais, regionais e nacionais, como a seleção de novas áreas portuárias ou melhoria das atuais, bem como na operação das hidrovias;

- Estudo do efeito das vazões descarregadas na UHE Tucuruí, no rio Tocantins e das vazões pelos Estreitos ao Sul da Ilha de Marajó.

Segundo AGERSCHOW (1983), um porto deve se localizar em áreas que possuam vocações naturais, tais como boas condições climáticas (vento, temperatura, precipitação e umidade), condições marítimas (proteção de ondas, marés, correntes e transporte de sedimentos), condições hidrográficas, topográficas e relativas ao relevo e ao solo. O presente trabalho se insere como ferramenta de modelação das condições marítimas e hidrográficas, uma vez que propõe o estudo da circulação da maré no estuário.

Outro aspecto a ser levado em conta no trabalho, e explicado por ERNST (1987), é relativo à análise dos impactos da instalação dos portos, dentre os quais pode-se citar os econômicos inter-relacionados com o desenvolvimento regional e nacional, bem como os impactos ambientais no meio físico, biótico e antrópico. Os impactos abordados no presente trabalho se concentram no meio físico, representado pelos possíveis impactos nos corpos d'água por ocorrência de vazamentos de granéis líquidos, junto aos portos.

1.3 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

A motivação inicial para a elaboração do presente trabalho partiu da constatação da carência de informações sobre os processos hidrodinâmicos na região amazônica, principalmente na foz do Rio Amazonas e, especificamente, na Área Portuária de Vila do Conde.

Existem dados pontuais, representados por campanhas de medições de velocidades e direção de correntes e direção e intensidade dos ventos junto ao Porto de Vila do Conde,

sendo que esses dados, além de serem pontuais, limitam-se à poucos dias, dificultando, assim, a validação e extrapolação dos mesmos.

Por fim, a Marinha do Brasil disponibiliza cartas náuticas e cartas de correntes de maré da área, lembrando que os dados contidos nelas, além de não serem atualizados, estão em uma escala muito reduzida, não possibilitando uma boa resolução da área portuária, servindo, assim, apenas como um ponto de partida para estudos mais específicos, como é o caso do presente trabalho.

A partir dessas premissas, visualizou-se a possibilidade da elaboração de um estudo com objetivo de identificar-se a dinâmica da circulação das correntes na Baía de Marajó e Rio Pará, a partir dos dados existentes e, com isso, servir de base para elaboração de inúmeros outros trabalhos e estudos, bem como passível de ser aprimorada, à medida que dados hidrográficos em maior quantidade e resolução forem sendo disponibilizados.

1.4. ÁREA DO ESTUDO

A abrangência da área de estudo (ver Figura 1.1) é a Baía de Marajó e o Rio Pará, localizados no Estado do Pará, junto à foz do Rio Amazonas, no seu canal Sul. O rio Pará é formado a partir de contribuições do Rio Amazonas, através das vazões veiculadas nos Estreitos de Breves e Boioçu, que se somando às contribuições do Rio Tocantins e Guamá formam a Baía de Marajó.

Segundo CARRETEIRO (1987), o Rio Amazonas, dentro dos limites do território brasileiro, possui cerca de 3.100 km de extensão, com uma declividade média de 2 cm/km. Possui duas embocaduras, a “norte” em forma de delta e a “sul” em forma de estuário.

Segundo MIRANDA (2002), os estuários podem se classificados, a partir das suas características morfogeológicas, de 04 formas: planície costeira, fiorde, formado por barras e

por outros processos. O Rio Amazonas possui uma característica peculiar, a existência de dois tipos de embocaduras, que circundam a Ilha de Marajó.

A primeira, denominada de canal Norte, classificada como formada por outros processos, no caso delta, caracterizada por morfologia muito alterada por processos de sedimentação recente. Apresenta inúmeras ilhas, dentre as quais sobressaem a Ilha de Marajó, que segundo DHN (2000) possui aproximadamente 49.600 km² de área, e as de Jurupari, Caviana de Dentro, Caviana de Fora, Mexiana, Bailique e outras menores.

A segunda, denominada como canal Sul, classificada como planície costeira. Com característica de ser relativamente rasa, onde a área da seção transversal em geral aumenta estuário abaixo, e a configuração da seção transversal tem a forma de “V”. A razão largura/profundidade, é grande devido ao processo recente de sedimentação. O fundo é preenchido com lama e sedimentos finos na sua parte superior, apresentando grande transporte de sedimentos em suspensão, principalmente oriundos do rio Amazonas. O canal Sul é limitado a oeste pelo Cabo Maguari na Ilha de Marajó e a leste pela Ponta da Tijoca, na Ilha dos Guarás. O canal ou barra nessa área é conhecido como Barra do Quiriri, que é a principal limitante de profundidade para os navios que demandam aos portos da região.

O Rio Amazonas se liga ao canal Sul por uma série intrincada de canais e furos, sendo que as principais vias são representadas pelo Estreito de Breves e Boioçu. A navegação na região se faz pelos dois canais, principalmente pelo Estreito de Breves, em razão de sua maior profundidade. A partir desse ponto, recebe a denominação de Rio Pará, que se juntando com o Rio Tocantins, formam a Baía de Marajó. O Rio Pará separa as costas leste, sudeste e sul da Ilha de Marajó do continente, tem largura considerável havendo trechos em que o navegante situado no meio do rio não avista suas margens.

Foi considerada como área de abrangência maior de estudo o Rio Pará e a Baía de Marajó e, em virtude da escala muito reduzida, foram aninhadas áreas menores, com o intuito

de realizar a calibração e validação do modelo numérico. Como área foco, considerou-se a região em torno da Área Portuária de Vila do Conde. Essa área foi escolhida em virtude da existência de dados de medição de correntes, que possibilitaram a calibração do modelo numérico. A Figura 1.1 apresenta as áreas do presente estudo, representadas pelo Rio Pará e Baía de Marajó.

Figura 1.1 - Localização da Área do Estudo

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O presente capítulo apresenta uma síntese dos principais conceitos teóricos necessários para um bom desenvolvimento do trabalho. Foi feita uma revisão bibliográfica dos principais agentes dos processos hidrodinâmicos, sendo que, foi dado maior destaque aos mais dominantes e influentes na área de estudo. Também foram apresentadas as principais características dos portos na área de estudo.

2.2 PROCESSOS HIDRODINÂMICOS

Para a caracterização dos processos hidrodinâmicos, em especial o estudo da circulação de correntes de maré, objetivo primordial do trabalho, é necessário ter o conhecimento das variantes que regem os processos, que são: marés, ventos, correntes oceânicas, ondas, vazões fluviais além de propriedades físico-químicas dos mares e rios.

Foi dada maior importância ao estudo das marés, dados de entrada para o modelo numérico. As correntes oceânicas, bem como as ondas, foram descritas conceitualmente no presente capítulo, mas foram desconsideradas para a modelagem computacional, por não influenciarem na área interna.

As vazões de contribuição fluvial dos principais cursos d'água da região, em virtude de seu caráter estritamente empírico e determinadas por medições de campo, foram apresentadas e discutidas no Capítulo 04, denominado de Metodologia e Base de Dados.

2.2.1. Marés

Para a utilização de programas de simulação hidrodinâmica é imprescindível ter o conhecimento do processo de geração e propagação de marés oceânicas. O item a seguir aborda a questão das marés astronômicas e meteorológicas.

Primeiramente, deve ser feita uma descrição conceitual a respeito da maré. Maré pode ser entendida como a variação do nível d'água no oceano, na forma de ondas de longos períodos, causadas basicamente por influência de forças astronômicas e eventos meteorológicos.

As marés astronômicas são resultado da interação das forças de atração gravitacional da Lua e do Sol sobre as massas líquidas e da força centrífuga dos sistemas Terra-Sol e Terra-Lua, devido à contínua variação da posição relativa dos astros. Sua característica principal é o fato de ser periódica e, conseqüentemente, previsível. Os principais movimentos orbitais que influenciam as oscilações das marés são: o movimento de revolução da Lua, em órbita elíptica em torno da Terra, com um período de 29,5 dias, a revolução da Terra, em órbita elíptica em torno do Sol, com um período de 365,25 dias e a rotação da Terra, em torno do seu próprio eixo, com um período de 24 horas ou um dia solar.

As oscilações de subida e descida do nível do mar, denominadas respectivamente de enchente e vazante, estão associadas com correntes de maré, com estofas de defasagem variável com a preamar e baixa-mar.

Considerando o sistema Terra-Lua, a força centrífuga do sistema equilibra exatamente as forças de atração gravitacional entre os dois corpos, de modo que o sistema como um todo se mantém em equilíbrio. Deve ser lembrado que as forças centrífugas possuem direção paralela à linha de união entre os dois centros de massa. Já a magnitude da força gravitacional exercida pela Lua sobre a Terra não é a mesma em todos os pontos da superfície da Terra,

porque nem todos os pontos estão à mesma distância do centro da Lua. Sendo assim, os pontos mais próximos da Lua terão maior atração gravitacional do que os pontos mais distantes. A composição das forças centrífugas com as forças de atração gravitacional da Lua, direcionadas para o centro da Lua, darão resultantes de forças conhecidas como forças geradoras da maré.

Os planos de rotação da Lua e do Sol em relação à Terra não são fixos e sofrem mudanças com o passar do tempo. As órbitas do Sol e da Lua são elípticas em vez de circulares. A adição desse fator torna a predição e compreensão das marés algo bem complexo.

As forças que devem ser consideradas para efeito da propagação da maré são as forças horizontais, denominadas forças trativas, pois são elas que produzem o movimento das águas.

Fazendo-se uma analogia com o exposto anteriormente, as forças gravitacionais geradas pelo Sol também têm influência sobre as marés, com correspondentes forças trativas. Entretanto, sua magnitude corresponde a 46% das lunares, isso se explica devido ao fato do Sol estar 360 vezes mais distante da Terra do que a Lua. A maré solar tem período semi-diurno de 12 horas.

A compreensão e análise do fenômeno das marés têm por objetivo reproduzir parâmetros significativos, estáveis temporalmente, que descrevem o regime dinâmico das marés em um local específico de observação. A teoria mais aceita para a modelação do comportamento das marés, segundo FRANCO (1988), é o Método Harmônico, baseado principalmente nas investigações de Laplace, que considera a maré como a soma de um número finito de constituintes harmônicas, cujas velocidades angulares e fases são determinadas a partir de argumentos astronômicos.

Segundo SORENSEN (1997), a principal componente harmônica lunar é a M_2 , com período igual a 12,42 horas. A principal componente harmônica solar é a S_2 , com período de

12 horas. Com isso as forças lunares, que são superiores às solares, produzem, subidas e descidas sucessivas de maré com um atraso de 0,84 horas (cerca de 50 minutos) de um dia para outro.

A posição relativa da Terra, da Lua e do Sol é responsável por variações quinzenais observadas nas séries de marés, que alcançam o máximo relativo, maiores preamares e baixamares (marés de sigízia) quando os três corpos celestes estão em um mesmo plano (representado pela Lua Nova e Lua Cheia) e um mínimo relativo (marés de quadratura), quando as forças de atração da Lua e do Sol estão em quadratura de fase, tendendo a se anularem (representado pela Lua Crescente e Minguante). Os ciclos de maré de sigízia e quadratura não são produzidos por uma força específica de geração de maré, mas pela combinação de efeitos das componentes harmônicas principais M2 e S2.

Como já exposto, as principais componentes solares e lunares são apenas duas, em um total de 390 componentes, que possuem períodos variando de 8 horas a 18,60 anos. Cada componente possui um período que pode ser determinado por análises astronômicas, sendo que sua amplitude e ângulo de fase são dependentes das condições locais, a serem determinados por meios de registro. Desse conjunto, segundo SORENSEN (1997), a maioria pode ser negligenciada no momento da predição da maré.

As oito maiores componentes com seus símbolos, períodos, intensidade relativa (depende da localização) e descrição estão apresentadas na Tabela 2.1. As componentes se combinam de diferentes maneiras em cada parte da costa e são afetadas por fatores meteorológicos locais, resistência do leito e ressonância, produzindo a maré local.

Tabela 2.1 - Oito maiores componentes da maré astronômica

Tipo de Maré	Símbolo	Período (horas)	Intensidade Relativa (%)	Descrição
Semi-Diurna	M_2	12,42	100,00	Principal componente lunar semidiurna
	S_2	12,00	46,00	Principal componente solar semidiurna
	N_2	12,66	19,10	Componente lunar devido à variação mensal da distância da Lua a Terra
	K_2	11,97	12,70	Componente solar-lunar devido à mudança constante da declinação da órbita do Sol e da Lua
Diurnas	K_1	23,93	58,40	Componente devido à desigualdade de O_1 e P_1
	O_1	25,82	41,50	Principal componente lunar diurno
	P_1	24,07	19,30	Principal componente solar diurno
Maré de longo Período	M_f	327,86	17,20	Componente lunar bi-semanal

Fonte: SORENSEN (1997).

As marés registradas em qualquer local da Terra podem, genericamente, ser classificadas em três tipos: semidiurna, diurna e mista. A seguir é definida cada uma delas:

- Semidiurna: provoca duas subidas e duas descidas no nível d'água por dia. Apresentam duas preamares e duas baixamars por dia. A principal constituinte de maré é a componente lunar semidiurna M_2 e a componente solar semidiurna S_2 . Os desvios dos movimentos reais com relação às órbitas regulares são calculados através da introdução de constituintes semidiurnas adicionais (N_2 , K_2 , etc). Esse é o tipo predominante de maré em todo o mundo;
- Diurna: provoca apenas uma subida e uma descida no nível d'água por dia, correspondendo à periodicidade de um dia lunar. São explicadas pela declinação da

Lua e do Sol, sendo responsáveis por importantes diferenças entre as sucessivas subidas e descidas. Por conseguinte, apresentam apenas uma preamar e uma baixamar por dia;

- Mistas: existe uma grande desigualdade na variação vertical entre dois ciclos diários.

As marés semidiurnas ocorrem nos locais onde as componentes semidiurnas $M_2 + S_2$ são mais intensas que as componentes diurnas $K_1 + O_1$. O inverso é representado por marés diurnas. A Figura 2.1 apresenta a distribuição dos vários tipos de marés astronômicas ao redor da Terra.

Figura 2.1 - Tipos de maré ao redor da Terra.

As variações das marés astronômicas podem sofrer influência das condições meteorológicas, originando uma variação de nível d'água conhecida como maré meteorológica. Sua influência é mais sentida em zonas costeiras mais rasas e em estuários. Esse fenômeno pode ser causado pelas variações da pressão atmosférica e a ação do vento

sobre a água, ocasionando níveis mais altos ou mais baixos do que os previstos para a maré astronômica. Sua previsão é mais complexa do que a da maré astronômica, uma vez que não é cíclica ou periódica.

Segundo ALFREDINI (2005), as condições meteorológicas podem modificar consideravelmente a altura e horário de uma determinada maré. O vento pode represar a maré ou reduzi-la. O nível d'água também tem influência das pressões atmosféricas. O efeito combinado de ventos com sentido mar-terra com baixas pressões corresponde a marés meteorológicas positivas, que constituem ameaça de inundação para as áreas costeiras mais baixas. Já o efeito oposto é conhecido como maré meteorológica negativa, sendo problemático para a navegação em águas rasas.

Segundo BEARDSLEY (1995) e PEREIRA (1999) as amplitudes das principais componentes harmônicas semidiurnas da maré, M_2 (lunar principal de período de 12,42 horas), S_2 (solar principal de período de 12 horas) e N_2 (lunar elíptica maior de período de 12,66 horas), respondem por 85% ou mais da variação total da elevação na área de estudo, sendo as mais energéticas da região e com amplitudes respectivamente de 70 a 85 cm, 20 a 28 cm e 15 a 17 cm. As principais componentes diurnas são a K_1 (lunisolar declinacional de período de 23,93 horas) e O_1 (lunar principal de período de 25,82 horas), com amplitudes respectivamente de 6 e 8 cm. Assim, a principal forçante da maré é a semidiurna, com a predominância da componente M_2 .

Ainda, segundo os referidos autores das cartas cotidais da componente M_2 apresentadas nas Figuras 2.2 e 2.3, baseiam-se em 37 registros de variação do nível d'água nos canais estuarinos. O comportamento regular observado na Plataforma Continental Amazônica interior em frente às embocaduras muda assim que a onda de maré entra nos braços principais do Rio Amazonas (Canal Norte e Canal Sul) e no Rio Pará. Embora a onda se propague com o mesmo gradiente, mostrando a mesma fase (300°) a cerca de 350 Km da

embocadura, a elevação da amplitude mostra um decaimento geral à medida que progride para montante. Há fortes gradientes de amplitude nos estreitos canais que separam os Canais Norte e Sul do Rio Amazonas, comparativamente aos observados do lado da Ilha de Marajó. As alturas dos níveis médios do mar com relação aos níveis de redução correspondentes à média das menores baixa-mares de sizígia apresentam uma tendência geral de redução do largo para o interior dos rios Amazonas e Pará. Assim, existe uma redução semelhante entre a Barra Norte do Amazonas (em Ponta do Céu) e o Porto de Santana na costa do Amapá, comparativamente com a Ilha dos Guarás e Vila Malato (costa oriental da ilha de Marajó) na costa do Pará. A mesma tendência é observada quanto à redução da amplitude de maré.

Figura 2.2 - Amplitude de maré ocasionada pela componente M_2

Figura 2.3 - Fase da componente M_2

Os dados relativos às estações maregráficas da região, bem como as previsões das marés foram apresentados e discutidos no Capítulo 04, denominada de Metodologia e Base de Dados. Como ilustração, nas Tabelas 2.2 e 2.3 estão apresentadas as fichas das Estações Maregráfica do Porto de Belém e Vila do Conde.

Tabela 2.2 - Ficha da Estação Maregráfica do Porto de Belém.

FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR <i>Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras</i>					
Nome da Estação : BELÉM (PORTO) – PA					
Localização : Na quina norte do cais do porto					
Organ. Responsável : IAGS / INPH / DNH					
Latitude : 01° 26,6' S		Longitude : 48° 29,1' W			
Período Analisado : 01/03/55 a 21/02/56		Nº de Componentes : 36			
Análise Harmônica : Método Tidal Liverpool Institute					
Classificação : Maré Semidiurna..					
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		XI H 29 min		Nível Médio (Zo):	181 cm acima do NR.
Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :		331 cm acima do NR.		Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :	264 cm acima do NR.
Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :		31 cm acima do NR.		Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :	98 cm acima do NR.
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	3,6	321	MU ₂	5,9	051
Ssa	6,7	006	N ₂	22,3	319
Mm	4,2	015	NU ₂	4,8	296
Mf	2,6	068	M ₂	116,3	334
MTM	-	-	L ₂	6,5	330
Msf	8,3	039	T ₂	2,6	347
Q ₁	1,4	295	S ₂	33,3	012
O ₁	9,0	293	K ₂	9,1	011
M ₁	0,9	146	MO ₃	4,4	175
P ₁	2,4	325	M ₃	1,3	181
K ₁	9,5	317	MK ₃	3,8	205
J ₁	0,1	198	MN ₄	5,1	237
OO ₁	0,3	040	M ₄	12,2	253
MNS ₂	0,6	089	SN ₄	0,8	268
2N ₂	4,3	285	MS ₄	7,6	279
Referências de Nível: RN - 1 IAGS localizada no extremo Norte do cais do porto, em frente ao abrigo do mareógrafo. RN - 2 IAGS localizada no capeamento do cais do porto ao lado do cabeço no. 11.					
Obs: Outros períodos: 01/04/55 a 02/05/55; 01/01/36 a 04/01/37; 04/01/77 a 08/03/77; 01/01/48 a 31/12/50; 01/01/61 a 30/12/62; 01/01/63 a 31/12/87; 14/08/78 a 14/09/73 e 01/01/62 a 11/07/62. Há observações do INPH de 1926 a 1991. Consta das Tábuas das Marés					

Código BNDO: 10520

- 54 -

Fonte: FEMAR (2003).

Tabela 2.3 - Ficha da Estação Maregráfica do Porto de Vila do Conde.

FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR <i>Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras</i>					
Nome da Estação :		VILA DO CONDE (PORTO) – PA			
Localização :		Baía de Marajó			
Organ. Responsável :		DHN			
Latitude :		01° 33,9' S	Longitude :		48° 46,0' W
Período Analisado :		01/04/91 a 01/05/91	Nº de Componentes :		42
Análise Harmônica :		Método Almirante Santos Franco			
Classificação :		Maré Semidiurna.			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		XII H 33 min	Nível Médio (Zo):		168 cm acima do NR.
Médias das Preamares de Sizigia (MHWS) :		306 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		246 cm acima do NR.
Média das Baixa-mares de Sizigia (MLWS) :		30 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		91 cm acima do NR.
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU ₂	3,8	154
Ssa	-	-	N ₂	22,3	343
Mm	6,6	344	NU ₂	4,2	345
Mf	-	-	M ₂	107,7	356
MTM	-	-	L ₂	4,6	316
Msf	12,1	028	T ₂	1,8	043
Q ₁	1,9	308	S ₂	30,2	030
O ₁	9,4	287	K ₂	8,2	003
M ₁	1,8	168	MO ₃	4,1	201
P ₁	3,2	323	M ₃	1,3	187
K ₁	9,6	326	MK ₃	5,0	217
J ₁	-	-	MN ₄	6,4	273
OO ₁	-	-	M ₄	17,9	285
MNS ₂	4,5	253	SN ₄	2,8	273
2N ₂	2,9	330	MS ₄	9,3	312
Referências de Nível: RN DHN localizada na parte de trás da Igreja de São João Batista. RN da Oceanotécnica localizada no capeamento do cais, quina norte, ao lado do primeiro cabeço de amarração.					
Obs: Outros Períodos: 10/06/63 a 16/06/63; 27/10/72 a 27/11/72. Consta das Tábuas das Marés					

Código BNDO: 10566

- 57 -

Fonte: FEMAR (2003).

2.2.2. Ventos

Os ventos desempenham papel importante no sistema marinho, sobretudo na geração das ondas e correntes de deriva. Os ventos são formados pelo aquecimento irregular da atmosfera, uma vez que os raios solares não incidem uniformemente na superfície terrestre e em virtude da não uniformidade da orientação dos raios solares e dos movimentos da Terra.

Segundo CAMPOS (1995), diferenças de temperatura causam diferenças de pressão atmosférica. A taxa de variação da pressão atmosférica entre duas áreas é denominada de gradiente de pressão atmosférica e causa o movimento horizontal do ar, ou seja, o vento. A direção dos ventos sempre se processa de regiões de alta pressão (também chamados de anticiclones) para as de baixa pressão (ciclones) e sua velocidade está relacionada com a magnitude do gradiente de pressão.

Centros de baixa pressão ocorrem quando o ar se aquece, torna-se mais leve e sobe, enquanto os de alta pressão, ao contrário, ocorrem quando o ar se resfria, torna-se mais denso e desce.

Seguindo os princípios das áreas de alta e baixa pressão, as massas de ar se deslocam das regiões de alta pressão, polares, para áreas de baixa pressão, equatoriais. Esse movimento constante dá origem aos ventos chamados de planetários, que podem ser classificados em:

- Ventos Alísios: ventos que sopram dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes;
- Contra-Alísios: ventos que sopram do Equador para os pólos, em altas altitudes;
- Ventos do Oeste: ventos que sopram dos trópicos para os pólos;
- Ventos Polares: ventos frios que sopram dos pólos para as zonas temperadas.

A Figura 2.4 apresenta o esquema de circulação dos ventos no planeta.

Figura 2.4 - Esquema de circulação dos ventos no planeta Fonte: GARRISON (1999).

O padrão de circulação dos ventos é bem complexo, principalmente da célula do meio, ou seja a compreendida entre as latitudes 30° e 60°. Ressaltando que nas regiões de encontro das células, geralmente não há ventos ou, se ocorrem, são muito fracos e irregulares. Próximo do Equador, a região chamada de doldrum, ou calma equatorial, além da ausência de ventos apresenta grande ocorrência de chuvas causadas pela grande evaporação. Esse fenômeno é muito comum na região de estudo, uma vez que está localizada nas proximidades da linha do Equador.

Em função das diferentes capacidades de refletir, absorver e emitir o calor recebido do Sol inerentes a cada tipo de superfície (tais como mares e continentes) surgem as brisas que caracterizam-se por serem ventos periódicos que sopram do mar para o continente e vice-versa. Sendo que, no período diurno, devido à maior capacidade da Terra de refletir os raios solares, a temperatura do ar aumenta e, como consequência, forma-se uma corrente de ar que sopra de mar para a Terra (brisa marítima). À noite, a temperatura da terra cai mais

rapidamente do que a temperatura da água, desta forma a brisa sopra da Terra para o mar (terral).

Os parâmetros importantes para os ventos são a sua velocidade e direção predominante. Os movimentos de ar na atmosfera (vento) processam-se em regime turbulento. Sendo assim, a velocidade instantânea do vento é descrita de forma simplificada como um valor médio acrescido de um desvio a partir da média, denominado flutuação.

Segundo HERBISCH (1992) o vento exerce força sobre a massa líquida. Segundo o autor, a velocidade do vento acrescenta cerca de 3,5% de sua velocidade à massa líquida na superfície. Esse índice é confirmado por HOULT (1972), apud COSTA & CARMO(1999), através da expressão:

$$U = U_{\text{corrente}} + 0,0351 U_{\text{vento}}$$

O efeito do vento pode ser melhor entendido a partir da Figura 2.5 (adaptada de HERBISCH,1992).

Figura 2.5 - Influência do vento sobre a massa líquida

Onde:

A: Correntes gerais, originadas pela rotação da terra, correntes marítimas e ventos de longa duração (remotos) que alteram o nível médio do mar;

B: Influência da velocidade do vento atuando diretamente sobre a massa líquida. Destaca-se que é um termo de curta duração que varia com a velocidade, direção e duração do vento;

C: Influência do vento sobre um filme líquido sobre a superfície da água.

Na prática, para algumas aplicações, inclusive as contidas no presente trabalho, levam-se em consideração apenas a intensidade da velocidade média. Vale ressaltar que a maioria dos instrumentos de medição devido às suas configurações e características fornecem somente o valor da velocidade média. O outro parâmetro importante a ser analisado é a direção predominante do vento de onde ele sopra.

No capítulo 04, foram apresentados os dados de medições de vento, através de medições pontuais e séries históricas na região de estudo.

2.2.3. Correntes

O movimento da massa líquida é conhecido como correntes, sendo classificadas segundo IPPEN (1966) em:

- Correntes de densidade;
- Correntes de maré;

- Correntes de deriva;
- Correntes induzidas por onda de superfície.

As correntes de densidade são correntes oceânicas, devido às diferenças de densidade da água do mar, são também conhecidas como termoalinas e referem-se aos movimentos de água produzidos devidos variações de temperatura ou salinidade em alguma região oceânica superficial, devido às insolações irregulares e variáveis na superfície da Terra.

As correntes de maré, são produzidas pela oscilação das marés. Apresentam como característica básica a periodicidade. Dentre todos os tipos de correntes, as correntes produzidas pela variação da maré são as de maior importância para o trabalho em questão, merecendo explicações adicionais.

De acordo com IPPEN (1966), as correntes de maré podem ser giratórias, alternativas ou hidráulicas. As correntes giratórias têm como característica a possibilidade de tomarem qualquer direção, sendo verificadas normalmente em zonas profundas do mar, onde a massa líquida não está confinada ou delimitada pelo continente.

Segundo ALFREDINI (2005), a velocidade máxima da corrente de maré junto à superfície apresenta um comportamento do tipo:

$$V_{\text{máx}} = K \cdot a^{\alpha}, \text{ onde}$$

$V_{\text{máx}}$: Velocidade máxima;

K: Coeficiente de proporcionalidade que depende do ponto e do estado da maré (enchente ou vazante);

a: Amplitude da maré

α : coeficiente a ser ajustado, variando de 0,5 a 1

As correntes alternativas, como o próprio nome indica, possuem caráter praticamente bidirecional, apresentando uma rosa de corrente muito achatada em decorrência dos fluxos de enchente, iniciados após a baixamar e de vazante, iniciados após a preamar. Tais correntes são encontradas em zonas próximas ao continente, que apresentam pequenas profundidades, principalmente baías, restingas, lagunas e estuários, como é o caso da região em estudo no presente trabalho.

As correntes induzidas por ondas de superfície presentes na zona de arrebentação podem gerar movimentos que induzirão erosão e conseqüentemente transporte de sedimentos ao longo da praia.

O atrito do vento com a superfície dos oceanos provoca o aparecimento das correntes de deriva.

A Figura 2.6 (CAMPOS, 1995) mostra as principais correntes oceânicas atuantes no litoral brasileiro.

Figura 2.6- Correntes no litoral brasileiro

A corrente Sul-Equatorial do Oceano Atlântico, que se movimenta no sentido leste-oeste na altura do Equador, bifurca-se ao alcançar a costa nordestina brasileira. A corrente que se desvia para o norte é denominada corrente das Guianas, também conhecida como corrente Norte do Brasil, e a que se dirige para o sul é a corrente do Brasil.

É importante ressaltar que as velocidades das correntes de maré apresentam um perfil logarítmico, tomando como base a teoria de camada limite de Prandtl e os estudos de escoamentos em condutos forçados (fórmula universal de perda de carga). Assim, foi desenvolvida a lei de resistência logarítmica:

$$\frac{V_y}{u_*} = \frac{2,3}{k} \log \frac{y}{k_s} + \overline{B}$$

$$\frac{V}{u_*} = \frac{2,3}{k} \log \frac{12R}{k_s}, \text{ sendo}$$

V_y : velocidade local do escoamento à distância y do fundo;

u_* : velocidade de atrito;

k : constante de Von Karman, usualmente adotada igual a 0,4;

k_s : rugosidade equivalente;

y : distância ao fundo;

$\overline{B}$: 8,5 para escoamento turbulento rugoso;

V : velocidade média

R : raio hidráulico, para larguras muito grandes, é igual à profundidade.

A lei logarítmica de velocidades tem sido verificada por diversos autores em observações de campo, destacando que os maiores desvios desse padrão ocorrem mais próximos da superfície livre, devido ao atrito do escoamento com o ar.

O método utilizado para o cálculo da velocidade está intimamente ligado à determinação do k_s . Para tanto, foi utilizada a metodologia e proposições de VAN RIJN (1984). Originalmente, o autor desenvolveu o método para o cálculo tanto do transporte de fundo, quanto para o transporte em suspensão, bem como a previsão da configuração da forma de fundo. Na presente dissertação, levou-se em consideração a parte inicial das formulações, isto é, aquelas referentes à determinação do perfil do fundo e por conseqüente do perfil de velocidade. De forma a elencar os passos utilizados na determinação do perfil de velocidades são apresentadas as seguintes explicações, retiradas de VAN RIJN (1984).

Tomando como base os parâmetros básicos do fluido e do sedimento, o autor propõe dois adimensionais como suficientes para retratar o fenômeno. O primeiro adimensional é o parâmetro da partícula (D_*) e o segundo o parâmetro de estágio de transporte (T). Os parâmetros são definidos como:

$$D_* = D_{50} \left[\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{onde,}$$

D_{50} : dimensão mediana da partícula;

s : densidade (ρ_s/ρ);

g : aceleração da gravidade;

ρ_s : massa específica do sedimento;

ρ : massa específica da água;

ν : viscosidade cinemática.

$$T = \frac{(u'^*)^2 - (u'^*_{cr})^2}{(u'^*_{cr})^2} \quad \text{onde,}$$

$u'^* = (g^{0.5}/C')u_m$ = velocidade de atrito do fundo relativa ao grão de sedimento. Onde:

u_m : é a velocidade média do escoamento.

C' : coeficiente de Chézy relativo ao grão e é expresso pela seguinte equação;

$$C' = 18 \log\left(\frac{12Rb}{3D_{90}}\right)$$

Rb = Raio hidráulico relativo ao fundo. Em canais muito largos é igual à profundidade;

D_{90} = Dimensão que 90% em peso dos sedimentos têm dimensão menor;

u'^*_{cr} = velocidade crítica de atrito de acordo com Shields. É estimada de acordo com o gráfico de Shields (Ver Figura 2.7).

Figura 2.7 - Gráfico de Shields, segundo YALIN (1971)

VAN RJIN (1984) considera a velocidade média com as paramétricas como um dado de entrada no cálculo do parâmetro de estágio de transporte (T).

Desta forma a sequência de cálculo é a seguinte:

- 1º) Cálculo do parâmetro da partícula(D^*), como mostrado acima;
- 2º) Cálculo da velocidade de atrito crítica (u'^*_{cr}), com entrada no gráfico de Shields, em função do D^* ;
- 3º) Cálculo do coeficiente de Chézy relativo ao grão;
- 4º) Cálculo da velocidade efetiva de atrito do fundo (u^*)
- 5º) Determinação da rugosidade relativa (k_s):

$$k_s = k_{s_{grão}} + k_{s_{forma}}, \text{ onde:}$$

$$k_{s_{grão}} = 3 D_{90}$$

$$k_{s_{forma}} = 1.1 \Delta (1 - e^{-25\psi}), \text{ onde}$$

$$\psi = \Delta / \lambda, \text{ onde}$$

Δ : altura da conformação de fundo do canal;

λ : comprimento da conformação de fundo do canal

As expressões de cálculos desses dois parâmetros são as seguintes:

$$\frac{\Delta}{h} = 0,11 \left(\frac{D_{50}}{h} \right)^{0,3} (1 - e^{-0,5T})(25 - T)$$

onde h: profundidade do escoamento

$$\frac{\Delta}{\lambda} = 0,015 \left(\frac{D_{50}}{h} \right)^{0,3} (1 - e^{-0,5T})(25 - T)$$

6º) Cálculo do K de Strickler, que é o inverso do número de Manning:

$$k = \frac{C'}{k_s^{1/6}}$$

7º) Cálculo da velocidade à distância y do fundo.

Os dados relativos às correntes foram apresentados no Capítulo 04, onde são apresentadas medições quantitativas de correntes induzidas por maré no estuário e medições pontuais no Porto de Vila do Conde.

O K de Strickler pode ser determinado a partir da Figura 2.8 (GIESE, apud ALFREDINI, 1983).

Figura 2.8 - Determinação do coeficiente de Chézy

2.2.4. Ondas de Gravidade

As ondas de gravidade são geralmente formadas pela ação do vento, representando a transferência direta de energia cinética da atmosfera para a superfície oceânica. Ao se mover sobre um corpo d'água, o vento exerce uma força tangencial sobre a superfície, provocando pequenas ondulações. Essas ondulações, por sua vez, alteram as condições de pressão do ar junto à superfície da água, fazendo que essa se ondule ainda mais.

As ondas podem ser geradas por efeito de vento soprando sobre o mar numa certa pista de sopro (“fetch”) num determinado tempo, como explicado acima, sendo denominadas vagas; ou serem produzidas por tempestades distantes, quando essas ondulações (ou marulhos) possuem período maior que 10 s, e conseqüentemente comprimento maior que 156 m, com menor dispersão de períodos, rumos e alturas e conseqüentemente menor esbeltez ($\delta=H/L$).

O clima ondulatório não será considerado neste trabalho, pois a ênfase está focada na circulação translatória de correntes de maré.

2.3. Principais Terminais na Área de Estudo

De acordo com SETRAN/PA (2004), o Porto de Vila do Conde está localizado a trinta e cinco quilômetros de Belém, às margens do rio Pará. O Porto de Vila do Conde é considerado o maior da Região Amazônica e um dos dez maiores do Brasil. Administrado pela CDP (Companhia Docas do Pará), o porto atende às necessidades do complexo alumínico integrado pelas unidades industriais da ALUNORTE (Alumina do Norte do Brasil S.A.) e ALBRÁS (Alumínio Brasileiro S.A.). A ALUNORTE produz alumina, matéria-prima do alumínio produzido pela ALBRÁS. A exportação desses produtos é de grande importância para a economia brasileira.

Em 1995 foi inaugurado um novo pier do porto, através de contrato entre CDP, ALUNORTE e ALBRÁS, destinado a receber granéis líquidos essenciais para a produção de alumina, de modo a fechar o chamado “ciclo do alumínio”, pela integração das três etapas: bauxita, alumina e alumínio. O investimento permitiu o aumento da capacidade de cargas para seis milhões de toneladas anuais. O Porto de Vila do Conde também movimenta óleo combustível, madeira, piche e coque.

De acordo com o Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Complexo Portuário do Rio Pará, as cargas movimentadas no Porto de Belém, basicamente carga geral solta, unitizada e contêineres, passarão a utilizar o Porto de Vila do Conde, por ser a alternativa mais viável, uma vez que dispõe de maior profundidade e de espaço para as instalações de estocagem, manejo de contêineres e outros serviços necessários para a movimentação da carga unitizada.

Segundo CDP (2004), as instalações de acostagem do Porto de Vila do Conde estão construídas em píer obedecendo ao formato de um "T" maiúsculo, em que, no travessão, estão localizados os Berços de atracação alinhados com a direção da correnteza do Rio Pará, dispensando a utilização de rebocadores nas manobras de atracação ou desatracação dos navios que utilizam o Porto. A ligação com a terra é feita através de uma Ponte de Acesso, com 378 m de comprimento. O cais de granéis sólidos e carga geral possui 292m e o cais de granéis líquidos possui 127m. Possuem, em conjunto, quatro berços de atracação com as seguintes finalidades: O CGS e CG possui dois berços de atracação, Berço Externo (101) e Berço interno (102).

O BE-101 está comprometido e aparelhado com equipamentos de grande porte e utilização exclusivamente direcionada para a movimentação dos insumos básicos constituídos por granéis sólidos - bauxita e coque, na importação, e alumina para exportação - utilizados nas plantas das indústrias do pólo alumínífero, ALUNORTE S/A e ALBRÁS S/A.

O BI-102, de uso público, dispõe de um guindaste elétrico sobre trilhos com capacidade de içamento para 12,5 t, que atende às operações de descarregamento de piche eletrolítico a granel através de uma moega com volume para 35m³, que eventualmente também é usado para descarregar coque, no fluxo de importação. Neste berço também se processam as operações de Carga Geral em fluxos de exportação, tais como madeira em amarrados e lingotes de alumínio em volumes de cargas unitizados. Em ambos os berços existem conjuntos de defensas elásticas apropriadas para receber navios de até 55.000 tpb, além de pontos de fornecimento de energia elétrica (440v) e água potável para o abastecimento de navios. O Cais de Granéis Líquidos possui dois Berços, BE-201 e BI-202, dotados de defensas elásticas, onde são realizadas as operações portuárias de descarregamento de soda cáustica e óleo combustível, através de equipamento próprio e, ainda, de carga geral.

O Porto de Vila do Conde apresenta o perfil operacional de Porto Graneleiro. No Porto de Vila do Conde o calado máximo recomendado é limitado pelas profundidades dos canais de acesso, quais sejam:

- Canal do Espardate (Baixo do Taipu): 12,20m na preamar;
- Canal do Quiriri: 12,98m. Quando demandando o porto por este canal, considerando-se a velocidade da embarcação em 8 nós, navios com calado superior a 10,70 m (35,1 pés), deverão levar em consideração a maré da hora, antes de demandar o citado canal, de forma a manter um pé do piloto de, no mínimo, 2,28 m .
- Sendo que no porto os calados máximos são: Berços externos (101 e 201): 20,0m; Berços internos (102 e 202) 16,0m .

É importante salientar que as manobras ficam restritas à própria embarcação, ou seja unicamente ao leme e propulsão, uso de espias com âncoras e auxílio de lanchas com equipamento de radiotelefonia em VHF. Na Figura 2.9, pode-se visualizar o arranjo geral do Porto Vila do Conde.

Figura 2.9- Arranjo Geral do Porto de Vila do Conde

Existem mais dois terminais nas proximidades do Porto de Vila do Conde. O Terminal da Pará Pigmentos e da Empresa Rio Capim Caulim (Ver Figura 2.10).

Segundo a ANTAQ (2004), o Terminal da Pará Pigmentos, denominado de Ponta da Montanha, está localizado entre as embocaduras dos rios Maratauíra e Abaeté, na margem direita da Baía do Marajó. Possui um píer de atracação sobre estaca com 84 m de comprimento por 11 m de largura, com dois berços de atracação.

Possui 02 dólfins com 7 x 7 m, duas torres de concreto de 50 m de comprimento com uma sala de controle cada uma, cinco defensas, uma galeria metálica de 40 m de comprimento (entre uma torre e outra), uma galeria metálica de 750 m de comprimento (acesso da área do retroporto ao terminal), uma área de peneiramento (início da galeria de 750 m) e quatro silos verticais com capacidade de 6300 ton cada um.

A embarcação tipo para operar no porto é um navio graneleiro de até 42.000 tpb com 198 a 200 m LOA. O porto possui capacidade instalada de 1.200.000 t/caulim por ano, sendo que, atualmente transporta 318.000 t/ano. A sua bacia de evolução tem 2,5 milhas náuticas no sentido NNW, com calado autorizado de 12 a 16 m.

O Terminal da Rio Capim Caulim, localizado na margem direita do Rio Pará, no local denominado Murucupi, a cerca de 0,5 km a jusante do centro urbano de Vila do Conde. Possui píer em forma de “T” com 300 metros de extensão e profundidade mínima de 16 m.

Possui 6 dólfins de amarração e atracação protegidos com defensas elásticas com uma distância de 60 metros de um para o outro com o carregador fixo no centro. Os dólfins possuem cabeços de amarração com capacidade para 80 tf. A área portuária é composta por 8 silos para armazenagem de 40.000 toneladas (totais) de granel sólido, 5 (cinco) tanques para armazenagem de 25.000 t (totais) de produto na forma líquida (polpa). Possui um transportador de correia de 48 polegadas e 929 m de extensão e um ship-loader com capacidade para 600 t/h. Duas bombas com capacidade de 500 t/ (úmidas) e tubulação de 10”.

Sua bacia de evolução possui área com cerca de 4 km de largura e profundidade de 15 a 25 m ainda não demarcada por bóias. O canal de acesso ao porto é o mesmo do Porto de Vila do Conde. Sua capacidade de transporte é de 1.000.000 t/ano e sua embarcação tipo é de 45.000 tpb.

O Terminal da Rio Capim Caulim recebe comboios provenientes da Hidrovia Guamá-Caulim, sendo que os comboios de empurra com capacidade de 2.100 t, são compostos de 04 chatas, com a formação 2 x 2.

Figura 2.10 - Localização dos terminais portuários

3. DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O software utilizado é de autoria do DHI (Danish Hydraulic Institute), o internacionalmente renomado instituto de Hidráulica dinamarquês que executa projetos e estudos nas áreas de Hidráulica Marítima, Fluvial e de Qualidade da Água em várias partes do mundo. Os módulos utilizados nesta etapa foram PP (Pre and Post Processing Module) e HD (Hydrodynamic Module) que é um modelo bidimensional verticalmente integrado.

3.1. MÓDULO PP (Pre Processing Module)

O módulo PP é utilizado para preparar as bases de dados para o processamento no programa e para a visualização das saídas gráficas e animações dos resultados. Neste caso serão feitas a previsão e análise de marés, a criação e edição da grade batimétrica e a criação das condições de contorno das marés.

3.2. MÓDULO HD (Hydrodynamic Module)

3.2.1 - Equações principais

O módulo HD é um sistema de modelagem numérica para a simulação das variações do nível e fluxo d'água em estuários, baías e áreas costeiras em geral. Ele simula fluxos variáveis em duas dimensões em um nível vertical homogêneo. Portanto, é este módulo que efetivamente faz os cálculos hidrodinâmicos.

As equações utilizadas para descrever as variações do fluxo e do nível d'água são a equação da conservação de massa e as equações do momento integradas na vertical.

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

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

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

Os seguintes símbolos são usados nas equações:

$h(x, y, t)$: 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 ($m^3/s/m$) = (u_h, v_h) ; (u, v) = média das velocidades nas direções x e y ;

$C(x, y)$: resistência de Chézy ($m^{1/2}/s$);

g : aceleração da gravidade (m/s^2);

$f(V)$: 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^{-1});

$P_a(x, y, t)$: pressão atmosférica ($kg/m/s^2$);

ρ_w : massa específica da água (kg/m^3);

x, y : coordenadas (m);

t : tempo (s);

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$: componentes do efeito de cisalhamento.

O MIKE 21 faz uso da “Alternating Direction Implicit (ADI)”, técnica para integrar as equações de conservação de massa e do momento no tempo e no espaço. As equações matrizes que resultam, para cada direção e cada linha da grade, são resolvidas por um algoritmo de varredura dupla “Double Sweep”.

O Mike 21 tem as seguintes propriedades:

- Centraliza todos os termos diferentes e os coeficientes dominantes, sem recorrer à iteração;
- Discretização do erro numa expansão da série de Taylor;
- Um algoritmo de solução bem-condicionada, confiável e de fácil operação.

As equações são resolvidas em uma extensão uni-direcional, alternando entre as direções x e y . Na varredura em x as equações da continuidade e do momento em x são resolvidas adotando ζ de n para $n + \frac{1}{2}$ e p de n para $n + 1$. Para os termos que envolvem q , são utilizados dois valores conhecidos, ou seja $n - \frac{1}{2}$ e $n + \frac{1}{2}$.

Na varredura em y as equações da continuidade e do momento em y são resolvidas tomando-se ζ de $n + \frac{1}{2}$ para $n + 1$ e q de $n + \frac{1}{2}$ para $n + \frac{3}{2}$, enquanto que os termos em p usam valores já calculados na varredura em x para n e $n + 1$.

Somando-se as duas varreduras tem-se “perfeito” tempo centralizado para $n + \frac{1}{2}$, isto é, tempo centralizado é dado pela seqüência balanceada de operações. O tempo perfeito está colocado entre aspas porque não é possível atingir o tempo centrado perfeito das derivadas cruzadas nas equações de momento. A melhor aproximação, sem recorrer à interação (que tem seus próprios problemas), é usar uma técnica de progressão lateral (side-feeding).

Para um espaço de tempo (time step) da extensão x , as equações são executadas de acordo com a descida na direção y , daqui para frente chamada de varredura para baixo (down sweep), e o próximo espaço de tempo de acordo com a subida da direção y , chamado de varredura para cima (up sweep).

Durante o “down sweep”, a derivada $\partial p / \partial y$ pode ser expressa em termos de $p_{j,k+1}^{n+1}$, sobre o lado que sobe e $p_{j,k-1}^n$ sobre o lado que desce, e vice-versa durante o “up sweep”. Neste caso pode ser obtida uma aproximação do tempo central de $\partial p / \partial y$ para $n + \frac{1}{2}$, embora com a possibilidade de ocorrerem algumas oscilações (zigzag).

Para uma seqüência de pontos da grade, as equações de massa e momento, conduzem à uma matriz tri-diagonal (varredura uni-direcional):

$$MV^{n+1} = W^n \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} A_j \cdot p_{j-1}^{n+1} + B_j \cdot \zeta_j^{n+1/2} + C_j \cdot p_j^{n+1} &= D_j l_k \\ A_j^* \cdot \zeta_j^{n+1/2} + B_j^* \cdot p_j^{n+1} + C_j^* \cdot \zeta_{j+1}^{n+1} &= D_j^* l_k \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Onde os coeficientes A, B, C, D e A*, B*, C*, D* são todos expressos em quantidades conhecidas. Note que p aqui pode ser q e j pode ser k.

O sistema da equação (4) é resolvido pelo processo de varredura dupla (Double sweep). No desenvolvimento do algoritmo há um postulado que se relaciona:

$$\left. \begin{aligned} p_j^{n+1} &= E_j^* \cdot \zeta_j^{n+1/2} + F_j^* \\ \zeta_j^{n+1/2} &= E_j \cdot p_j^{n+1} + F_{j+1} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Substituindo-se estas relações (6) nas equações (5) tem-se as relações para E, F, E* e F*.

$$\left. \begin{aligned} E_j^* &= \frac{-A_j^*}{B_j^* + C_j^* \cdot E_j} \\ F_j^* &= \frac{D_j^* - C_j^* \cdot F_j}{B_j^* + C_j^* \cdot E_j} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} E_{j-1}^* &= \frac{-A_j^*}{B_j + C_j \cdot E_j^*} \\ E_{j-1}^* &= \frac{D_j^* - C_j^* \cdot F_j^*}{B_j^* + C_j^* \cdot E_j^*} \end{aligned} \right\} (7)$$

Fica claro que assim que é conhecido um par de valores E_j, F_j (ou E_{j+1}^*, F_{j+1}^*), todos os coeficientes de E, F, E^*, F^* podem ser computados diminuindo j . Introduzindo a condição de contorno do lado direito nas equações (5), inicia-se a recorrência computacional para E, F, E^*, F^* , a varredura E, F . Introduzindo a condição de contorno do lado esquerdo em (6) a varredura complementar em que ζ e q são computadas. As varreduras podem ser feitas com o decréscimo ou o aumento da coordenada complementar.

Este módulo possibilita a simulação de grades batimétricas de diferentes resoluções, aninhadas, de forma que nas regiões onde se deseja maior refinamento os resultados sejam mais precisos, sem que haja necessidade de modelar com alta resolução toda área, o que é inviável computacionalmente. Na Figura 3.1 pode ser observado um esquema de aninhamento de grades.

Figura 3.1 - Esquema de aninhamento de grades batimétricas

O arquivo de grade batimétrica é formado a partir de uma matriz cujos valores dos elementos são as cotas dos pontos da superfície de fundo. Estes pontos têm um espaçamento definido de acordo com o tamanho da área a ser modelada e da precisão que se deseja. Em resumo, esta matriz representa a superfície de nível. Na Figura 3.2 está apresentado um esquema da matriz formadora da grade batimétrica.

Figura 3.2 - Esquema da matriz formadora da grade batimétrica

No modelo hidrodinâmico o espaçamento na direção x (Δx) deve ser igual ao espaçamento na direção y (Δy). Além disso, quando o recurso de aninhamento das grades é utilizado o valor de Δx na área menor deve ser 3 vezes menor que o da área maior. Por exemplo, na Figura 3.2 se a área 1 tem um espaçamento de 90m, o da área 2, 3 e 4 deve ter 30m, e assim sucessivamente.

Por fim, com os dados de entrada prontos as simulações podem ser feitas. Elas fornecem como resultados vários parâmetros hidrodinâmicos importantes, tais como, os níveis de maré e a velocidades e direção das correntes em toda a área de simulação.

Ressalta-se, ainda, que, além da batimetria e das condições de contorno, podem ser colocados como dados de entrada no modelo a ação de ondas e ventos para determinar as correntes resultantes. Neste trabalho, os dados de onda e vento não foram colocados por terem uma reduzida importância frente à maré, que é o principal agente hidrodinâmico local.

3.2.2 - Resistência do leito

Os dados de entrada são: profundidade da água, h , velocidade da corrente medida na profundidade, V , resistência de fundo expressa em termos do número de Manning, (M) ou do número de Chézy (C).

Destaca-se que para descrever a resistência do leito pode-se escolher o Número de Chézy ou Coeficiente de Manning. Em ambos os casos a resistência do leito utilizada é:

$$\frac{g u |u|}{C^2}$$

onde g é a aceleração da gravidade, u é a velocidade e C é o Número de Chézy. A conversão do número de Manning (K de Strickler) para o número de Chézy faz-se pela fórmula:

$$C = Mh^{1/6}$$

Onde M é o número de Manning e h é a profundidade local. As unidades, no Sistema Internacional (S.I.), do número de Chézy e do Coeficiente de Manning são $m^{1/2}/s$ e $m^{1/3}/s$, respectivamente.

O número da resistência do leito é atribuído para cada ponto da grade da área do modelo. Destacando-se que pode-se especificar um valor para todos os pontos da grade ou um valor de resistência para cada ponto da grade. No caso do estudo, devido o desconhecimento do material do fundo e dada a grande extensão do modelo, foi adotado uma única resistência para todo o modelo.

Usando um número de resistência pequeno aumenta-se a resistência do leito e usando um número de resistência grande diminuiu-se a resistência do leito, aumentando desta forma a velocidade. Recomenda-se, caso seja aplicado o número de Chézy na calibração do modelo utilizar valores entre 30 e 50 $\text{m}^{1/2}/\text{s}$.

4. METODOLOGIA E BASE DE DADOS

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nesse capítulo é descrita a metodologia utilizada para a operação do modelo hidrodinâmico a partir da preparação dos dados.

4.2. PREPARAÇÃO DOS DADOS

4.2.1. Batimetria

A descrição da batimetria da área é sem dúvida a mais importante tarefa no processo de modelagem hidrodinâmica. Para a escolha da área foram levados em conta os seguintes fatores :

- O MIKE 21 HD é um modelo de diferenças finitas com espaçamento da grade constante nas direções x e y, portanto a área do modelo deve ser retangular ou quadrada;
- Localização do marégrafo;
- A área de interesse ou pontos de interesse devem estar bem inseridos na área do modelo, no mínimo com 10 pontos de grade da borda aberta;
- Deve-se especificar os contornos abertos em áreas onde o fluxo de água é “bem conduzido” e a direção do fluxo, se possível, perpendicular ao contorno aberto;

- Apesar do MIKE 21 HD ter condições de simular regiões com alagamentos e secamento (flood and dry), não se deve colocar o nível ou fluxo nos contornos abertos tão próximo às áreas rasas que possam secar. Pontos de contornos abertos não devem nunca secar;
- Se possível, rotacionar o modelo para que a direção do fluxo principal seja paralelo a um dos eixos de coordenadas.

A seleção do espaçamento da grade e da área do modelo está intimamente ligada a uma série de considerações especiais, listadas abaixo:

- Toda grade deverá resolver todas as variações da batimetria que são importantes para o fluxo que se deseje simular;
- Provavelmente, o MIKE 21 HD não se tornará instável se houver uma elevação ou um buraco isolado na batimetria (não próximo à borda). Todavia, uma série de elevações ou buracos ao longo da grade poderá levar a uma instabilidade se a direção do fluxo for paralela a esta linha da grade e o número de Courant for maior que 1;
- O número de Courant e, conseqüentemente, a velocidade de percurso da informação no modelo estão intimamente relacionados à especificação do espaçamento da grade.

O número de Courant é definido como:

$$Cr = c \frac{\Delta t}{\Delta x}, \text{ onde } c \text{ é a celeridade, } \Delta t \text{ é a variação do tempo e } \Delta x \text{ é o espaçamento}$$

da grade. Para uma onda de maré a celeridade é:

$$c = \sqrt{g \times h} \text{ , onde } g \text{ é a aceleração da gravidade e } h \text{ é a profundidade.}$$

Destaca-se que a região objeto do estudo não possui grande quantidade de informações, sendo assim, a batimetria foi montada a partir de uma série de cartas náuticas da Marinha do Brasil, única fonte confiável de informação, contudo, não dispondo de grandes detalhes, tanto em função da escala das mesmas, entorno de 1:50.000, quanto pela época em que foram realizadas as sondagens.

Optou-se em um primeiro momento em levantar uma área que englobasse a Baía do Marajó e Rio Pará, além do Canal do Quiriri. Outro balizador foi à localização dos marégrafos escolhidos para borda molhada do modelo. O Cabo do Maguari e Ilha dos Guarás, obrigaram a expansão do modelo para áreas fora da Baía propriamente dita. Na parte interna do modelo, o limite Oeste foi a áreas dos Estreitos, nas proximidades do município de Breves, e o limite Sul, o Rio Tocantins.

Com a área delineada, foram pesquisadas as bases batimétricas existentes. Destacando-se que a base de dados foi obtida através da digitalização de inúmeras cartas náuticas da Marinha do Brasil, que abrangem toda a área de estudo. As cartas náuticas utilizadas na montagem da base de dados de batimetria foram as seguintes:

- Carta Náutica nº 303 - Brasil - Rio Pará - Do Baixo do Espardate a Mosqueiro. 2ª ed. 1983. Escala 1:100.002. Sondagens batimétricas realizadas até 1983;
- Carta Náutica nº 304 - Brasil - Rio Pará - Do Mosqueiro a Abaetetuba. 2ª ed. 1983. Escala 1:99.980. Sondagens batimétricas realizadas até 1980;
- Carta Náutica nº 305 - Brasil - Rio Pará - Da Ilha do Capim à Ilha da Conceição. 1ª ed. 1974. Escala 1:99.960. Sondagens batimétricas realizadas até 1973;

- Carta Náutica nº 306 - Brasil - Rio Pará - Da Ilha da Conceição aos Estreitos. 2ª ed. 1993. Escala 1:99.960. Sondagens batimétricas realizadas até 1989;
- Carta Náutica nº 315 - Brasil - Rio Pará - Da Boca da Vigia à Ilha do Mosqueiro. 1ª ed. 1961. Escala 1:49.996. Sondagens batimétricas realizadas de 1959 a 1960;
- Carta Náutica nº 316 - Brasil - Rio Pará - Do Mosqueiro a Belém. 2ª ed. 1980. Escala 1:49.990. Sondagens batimétricas realizadas até 1978;
- Carta Náutica nº 320 - Brasil - Rio Pará - Porto de Belém. 1ª ed. 1961. Escala 1:50.000. Sondagens batimétricas realizadas em 1958, 1958 e 1960;

É importante ressaltar que, devido à diferença de escalas e a data de realização das sondagens batimétricas, o modelo incorporou uma série de simplificações. O mais importante diz respeito ao grande dinamismo do transporte de sedimentos, tanto através do Rio Pará, braço Sul do Rio Amazonas, tanto pelo Rio Tocantins, fator preponderante na configuração das margens e fundos, interferindo diretamente nas direções e velocidades de correntes. Seria mais interessante, e incorreria-se em menores erros, possuir uma base de dados batimétricos nos mesmos períodos, contudo isso não foi possível.

Visando enriquecer o estudo foram também usados os Estudos de Correntometria realizados pelo INPH (2001) e Medições Maregráficas, Correntométricas e Anemográficas realizadas pela OCEANOTÉCNICA (1991) ambos contratados pela ALBRAS/ALUNORTE. O resultado final pode ser visualizado na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Grade batimétrica gerada a partir das Cartas Náuticas.

É importante destacar que as bases de dados utilizados, tanto na calibração, quanto na validação do modelo numérico se referem, basicamente, à Área Portuária de Vila do Conde e à Carta de Correntes de Maré (DHN, 1962).

É importante salientar, também, que foram incorporadas inúmeras simplificações na batimetria. As mais importantes referem-se aos casos dos Estreitos de Breves e Boioçu, Rio Tocantins e Guamá que tiveram os seus contornos fechados, não representando desta forma a realidade. Optou-se por esta simplificação por duas razões principais. A primeira, e mais importante, não existiria contribuição fluvial significativa nos pontos supracitados, comparativamente com a maré, não incorrendo desta forma em desajuste na representação do real. E segundo, as seções fechadas, por se localizarem muito distantes dos pontos de comparação, não ocasionariam erros ou distorções significativas nas direções e intensidades das correntes de maré.

Desta forma, foi imprescindível trabalhar com duas situações distintas, a saber. A primeira situação refere-se a uma simulação com espaçamento de grade batimétrica maior, devido à restrição computacional, incorrendo contudo em menor precisão dos dados. Na segunda, procurou-se adotar o menor espaçamento possível, conferindo assim maior precisão na simulação, contudo, ficando restrita apenas à área do entorno do Porto de Vila do Conde.

Assim, adotou-se para a primeira simulação o espaçamento de 270 m, abrangendo toda a área de estudo. A área simulada com esse espaçamento é intitulada ÁREA 1 e possui $270.000 \times 170.910 \text{ m}^2$.

Porém, como explicado anteriormente, a área possui grandes dimensões, e por conseguinte um grande espaçamento de grade, não sendo adequada para simulação em áreas portuárias. Com intuito de solucionar esse problema, foram montadas outras duas grades batimétricas de espaçamento menor, inseridas na ÁREA 1, e obedecendo ao critério de aninhamento, na razão de espaçamento de 3.

Desta forma, foi gerada a ÁREA 2, com grades batimétricas com espaçamento de 90 m, possuindo as dimensões de 57.780 x 38.340 m². Destaca-se que essa área servirá de base de dados para a seguinte, intitulada ÁREA 3.

A ÁREA 3, com grade batimétrica de espaçamento de 30 m, será utilizada no processo de calibração do modelo, abrange áreas do Porto de Vila do Conde e seus entornos, possui as dimensões de 18.630 x 9.720 m². É importante destacar que tanto a grade de 90 m quanto a de 30 m estão alinhadas à principal.

A localização das áreas bem como a articulação entre as mesmas é apresentada na Figura 4.2, destacando que o modelo foi rotacionado, visando facilitar a aquisição de dados, em 58,22809° no sentido anti-horário em relação ao Norte Verdadeiro.

Na sequência, o arquivo das grades batimétricas foi gerado no módulo PP do MIKE 21. Nesse processo foram utilizados os programas AutoCad, SoftDesk e Microsoft Excel. Todas as cartas náuticas tiveram seus dados verticais e horizontais, bem como seus posicionamentos unificados com o auxílio de um programa de conversão de unidades. A partir disto, foi iniciada a preparação das grades e dados de entrada para a simulação no MIKE 21. Nesse processo foi utilizado o SoftDesk a partir da metodologia proposta por ARAÚJO (2002).

Os dados de profundidade foram gerados no SoftDesk, extraídos na forma de arquivo de texto em uma sequência linear de cima para baixo e da esquerda para a direita. Através de uma macro elaborada no Microsoft Excel, foi elaborada uma matriz, com linhas e colunas, de maneira que se possa dar entrada no programa. Esse procedimento facilita sobremaneira a transferência de dados, bastando apenas copiar os dados do Microsoft Excel para o formato do MIKE21. As figuras 4.3 a 4.5 apresentam o formato de entrada da matriz batimétrica para as áreas 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 4.2 - Grades Batimétricas do Modelo

Figura 4.3 - Formato de entrada da grade batimétricas com espaçamento de 270m, referente à ÁREA 1.

Figura 4.4 - Formato de entrada da grade batimétricas com espaçamento de 90m, referente à ÁREA 2.

Figura 4.5 - Formato de entrada da grade batimétricas com espaçamento de 30m, referente à ÁREA 3.

4.2.2. Dados de Maré

Para a realização da modelagem hidrodinâmica é necessária a escolha de estações maregráficas conhecidas na área de estudo, para o fornecimento das constantes harmônicas, já que se faz necessário fornecer o nível de maré no contorno do modelo. Sendo assim, é fundamental a escolha das estações maregráficas.

Na Figura 4.6 encontram-se todas as estações maregráficas existentes na área de estudo, bem como as escolhidas. Nota-se que as estações escolhidas, Cabo Maguari e Ilha dos Guarás, foram selecionadas em virtude do seu alinhamento ser quase perpendicular com o fluxo de enchente e vazante. Esse fato simplifica a modelagem, motivo que levou a escolha das duas para a borda molhada do modelo.

Tabela 4.1 - Ficha da estação maregráfica Cabo Maguari

FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR		Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras			
Nome da Estação :	CABO MAGUARI – PA				
Localização :	Na ponta Leste da Ilha de Marajó, em frente ao farol Simão Grande.				
Organ. Responsável :	DHN				
Latitude :	00° 13,4' S	Longitude :	48 ° 27,9' W		
Período Analisado :	16/07/71 a 16/08/71	Nº de Componentes :	36		
Análise Harmônica :	Método Tidal Liverpool Institute.				
Classificação :	Maré Semidiurna.				
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)	VIII H 43 min	Nível Médio (Zo):	201 cm acima do NR.		
Médias das Preamares de Sizigia (MHWS) :	366 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :	280 cm acima do NR		
Média das Baixa-mares de Sizigia (MLWS) :	35 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :	121 cm acima do NR.		
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU ₂	3,9	288
Ssa	-	-	N ₂	24	235
Mm	9,3	334	NU ₂	4,7	235
Mf	-	-	M ₂	122,4	254
MTM	-	-	L ₂	2,9	317
Msf	2,6	051	T ₂	2,5	284
Q ₁	1,1	111	S ₂	43,0	284
O ₁	10,3	247	K ₂	11,7	284
M ₁	1,1	156	MO ₃	2,0	048
P ₁	4,7	251	M ₃	1,5	117
K ₁	14,1	251	MK ₃	3,7	096
J ₁	2,6	047	MN ₄	4,2	076
OO ₁	3,5	079	M ₄	14,1	095
MNS ₂	-	-	SN ₄	3,6	041
2N ₂	3,2	217	MS ₄	6,9	120
Referências de Nível: RN-1 colocada no quintal da residência do Sr. João Tôres.					
Obs: Outros Períodos: 19/06/66 a 20/07/66 .					

Código BNDO: 20527

- 43 -

Fonte: FEMAR (2003)

Tabela 4.2 - Ficha da estação maregráfica Ilha dos Guarás

FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR		Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras			
Nome da Estação :	ILHA DOS GUARÁS (Ponta da Romana) – PA				
Localização :	Barra do Rio Pará				
Organ. Responsável :	DHN				
Latitude :	00° 34,5' S	Longitude :	47° 54,0' W		
Período Analisado :	28/04/80 a 29/05/80	Nº de Componentes :	46		
Análise Harmônica :	Método Almirante Santos Franco.				
Classificação :	Maré Semidiurna.				
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)	VIII H 32 min	Nível Médio (Zo):	209 cm acima do NR.		
Médias das Preamares de Sizigia (MHWS) :	365 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :	314 cm acima do NR.		
Média das Baixa-mares de Sizigia (MLWS) :	52 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :	103 cm acima do NR.		
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU ₂	27,2	311
Ssa	-	-	N ₂	45,3	251
Mm	9,3	259	NU ₂	8,6	250
Mf	-	-	M ₂	131,2	249
MTM	1,1	087	L ₂	30,6	265
Msf	5,8	078	T ₂	1,5	306
Q ₁	9,9	183	S ₂	25,2	308
O ₁	4,6	165	K ₂	6,9	313
M ₁	2,3	309	MO ₃	7,2	071
P ₁	3,6	253	M ₃	4,1	229
K ₁	10,8	260	MK ₃	3,0	147
J ₁	5,6	028	MN ₄	9,0	123
OO ₁	3,6	171	M ₄	6,1	140
MNS ₂	16,9	353	SN ₄	4,2	185
2N ₂	6,0	254	MS ₄	4,1	166
Referências de Nível: RN 1 instalada em pilar de concreto próximo à casa existente na Ponta da Romana					
Obs: Outros Períodos: 26/10/72 a 26/11/72; 28/04/82 a 15/05/82; 14/06/59 a 28/06/59. Consta das Tábuas das Marés					

Código BNDO: 20533

- 44 -

Fonte: FEMAR (2003).

Para a construção dos arquivos de maré no formato exigido pelo programa, as etapas foram as seguintes:

- Preparação do arquivo com os dados das componentes harmônicas para os marégrafos escolhidos, no caso do estudo, Cabo Maguari e Ilha dos Guarás;
- Definição das datas em que as marés seriam geradas, em função dos pontos dos dados de corrente disponíveis;
- Criação dos arquivos de maré para as bordas.

As previsões de maré para o Cabo Maguari e Ilha dos Guarás foram realizadas com o auxílio do módulo PP do MIKE21. As constantes harmônicas utilizadas na previsão, totalizando 26, foram obtidas através da FEMAR - Fundação de Estudos do Mar (2003). Os dados e parâmetros dos marégrafos são apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Com objetivo de esclarecer o procedimento de geração de maré no módulo PP, foram apresentadas, a seguir, as janelas de entrada de dados do programa.

Figura 4.7 - Tela de aquisição de dados da maré, destacando a definição do período de simulação.

Figura 4.8 - Tela de aquisição de dados da maré, destacando a definição das constantes harmônicas.

A definição dos períodos de simulação foi função dos dados de medição de correntes e direções disponíveis, que foram utilizados para a calibração e validação do modelo. Destaca-se mais uma vez a carência de dados, se resumindo a dois períodos distintos. Um no ano de 1991 e outro em 2001. Contudo, é importante ressaltar que as medições de correntes ocorreram no final de abril dos respectivos anos, período de maior influência das marés devido ao período equinocial. Essa situação é a mais interessante no quesito velocidades, pois nesse período se registram-se os maiores valores.

O período de cada simulação sempre foi iniciado 12 horas antes do primeiro registro de correntes da série, período recomendado como ideal para a estabilização do programa. O final da simulação correspondia ao final do registro da série.

Os dados relativos às previsões de maré de Cabo Maguari e Ilha dos Guarás, extraídos do módulo PP, são apresentados nas Figuras 4.9 e 4.10.

Figura 4.9 - Previsão de Maré no Cabo Maguari.

Figura 4.10 - Previsão de Maré na Ilha dos Guarás.

De forma análoga à batimetria, os arquivos de maré também foram gerados em forma de matriz. Conforme mostrado nas figuras 4.9 e 4.10, que apresentam a variação do nível d'água ao longo das bordas (Cabo Maguari e Ilha dos Guarás) em um determinado tempo. A variação adotada como satisfatória foi de 15 minutos.

Visando simular a variação de maré na borda molhada, foi criada uma planilha em Excel, onde os dados dos dois marégrafos preenchem apenas a primeira e a última coluna da matriz. A variação do nível d'água na borda aberta foi conseguida através da suposição da distribuição linear, em cada linha da matriz. O resultado obtido a partir dessa distribuição é apresentado na Figura 4.11. Desta forma, os dados de maré estão finalmente prontos para a realização da simulação.

Figura 4.11 - Distribuição linear da maré.

Outro dado importante que servirá de comparação para a realização da calibração do modelo numérico se refere às medições da maré no Porto de Vila do Conde, realizadas pelo INPH em 2001 (Ver Figuras 4.12 a 4.17).

Figura 4.12 - Maré medida no Porto de Vila do Conde. Data: 05/04/2001

Figura 4.13 - Maré medida no Porto de Vila do Conde. Data: 06/04/2001

Figura 4.14 - Maré medida no Porto de Vila do Conde. Data: 07/04/2001

Figura 4.15 - Maré medida no Porto de Vila do Conde. Data: 08/04/2001

Figura 4.16 - Maré medida no Porto de Vila do Conde. Data: 09/04/2001

Figura 4.17 - Maré medida no Porto de Vila do Conde. Data: 10/04/2001

4.2.3. Dados de Vento

É importante lembrar que os dados de ventos existentes na região são muito escassos e não abrangem um período de tempo grande, incorrendo no risco de erros nas definições das direções e intensidade características. Por este fato, aliado ao efeito reduzido do vento sobre as correntes de maré, a ação do vento foi analisada fora da modelagem.

Procurou-se listar todas as fontes de dados encontrados. Basicamente foram apresentadas duas bases quantitativas, uma com medições de curta duração no Porto de Vila do Conde e uma de medição de longa duração, no Porto de Belém. Em virtude da falta crônica de dados disponíveis, foram apresentados também dados qualitativos dos ventos na região. A seguir foi apresentada cada uma das bases.

- Medição no Porto de Vila do Conde - Oceanotécnica (1991)

Para a obtenção dos registros de vento, escolheu-se o melhor local do porto, onde não houvesse obstáculos que interferissem ou mascarassem as medidas de direção e intensidade. Assim, instalou-se o equipamento na parte mais alta da cobertura da esteira de carregamento, na junção entre o píer e a passarela.

O anemômetro usado foi o WILH. LAMBRECHT KG, situado a uma altura de 10 m em relação ao píer, com registros contínuos de intensidade (metros/segundo) e direção (graus magnéticos) para cada 30 dias.

As medições apresentadas no relatório englobam apenas o mês de abril de 1991, onde os ventos predominantes na região foram de Leste (E), com 43% do período observado e Sudeste (SE), com 27%.

A velocidade dos ventos se revelou fraca na maior parte do período observado, com velocidade entre 0,5 e 4,5 m/s em 72% do mês. Os ventos mais fortes, entre 8,5 e 12 m/s (acima de 16 nós) foram poucos (02%) e por curto tempo.

As Tabelas 4.3 e 4.4 e a Figura 4.18 apresentam o resumo das medições de vento, em relação às frequências e intensidades.

Tabela 4.3 - Distribuição de frequência (%) do vento no PVC (Abril/1991)

Rumos	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Frequências (%)	06,52	16,94	42,80	26,54	06,52	0,27	0	0,41

Fonte: OCEANOTÉCNICA (1991)

Figura 4.18 - Distribuição de Frequência de ocorrência (%) dos ventos em função do rumo (Abril/1991).

Tabela 4.4 - Distribuição das velocidades de vento no PVC (Abril/1991)

Faixa de velocidade (m/s)	% de ocorrências
0,0	00,00
0,5 - 4,5	72,22
4,5 - 8,5	25,98
8,5 - 12,5	01,80
> 12,5	00,00

Fonte : OCEANOTÉCNICA (1991).

- Medições no Porto de Belém - DHN

Os dados referentes às medições de vento no Porto de Belém são representativas, pois englobam um período de 30 anos de medições, abrangendo os anos de 1931 a 1961. Os dados são apresentados na Tabela 4.5 e Figura 4.19.

Tabela 4.5 - Distribuição das frequências de ocorrência e intensidade dos ventos no Porto de Belém (1931-1961).

Meses	Ventos (%)										Intensidade média dos ventos pré-dominantes (nós)
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Variável ou não obs.	Calm.	
Jan.	11	22	4	2	0	1	1	3	7	49	4,8
Fev.	10	18	3	1	0	0	0	2	15	41	4,5
Mar.	12	20	3	1	0	0	0	3	7	54	4,7
Abr.	10	20	4	1	0	0	0	3	10	52	4,7
Mai.	7	23	11	4	1	0	0	2	7	45	4,7
Jun.	5	24	19	4	1	0	0	1	10	36	4,8
Jul.	5	31	16	4	0	0	0	1	7	36	4,8
Ago.	7	33	13	3	1	0	0	2	7	34	5,2
Set.	9	32	9	1	0	0	0	4	10	35	5,4
Out.	12	36	6	1	0	0	1	5	7	32	5,0
Nov	13	33	7	1	0	0	0	6	10	30	5,2
Dez.	13	26	7	1	0	0	1	5	7	40	5,4
Média	9,5	26,5	8,5	2,0	0,2	0,1	0,2	3,1	8,7	41,1	5,0

Fonte: DHN (2000).

Figura 4.19 - Distribuição de freqüência dos ventos no Porto de Belém (1931-1961)
Fonte: DHN (2000).

Continua

Figura 4.19 - Distribuição da frequência dos ventos no Porto de Belém (1931-1961).
Continuação

Fonte: DHN (2000).

- Dados qualitativos dos ventos na região

Segundo a DHN (2000), na foz do Rio Pará e Baía de Marajó, de janeiro a junho, período chuvoso e de cheias dos rios, predominam as calmarias seguidas de vento NE com rajadas violentas, que costumam rondar para SW passando pelo N, provocando fortes chuvas. De junho a dezembro, período mais seco, predominam os ventos de ENE e ESE, conhecidos

como ventos gerais. Em julho e agosto estes ventos são moderados; nos meses restantes são muitos frescos, com rajadas violentas, sendo conhecidos como marajó. No trecho compreendido entre o Porto de Belém e os Estreitos os ventos predominantes o ano todo são os de NE, conhecidos como marajó.

4.2.4. Dados de Corrente

- Dados da Carta de Correntes de Maré - DHN (1962)

A Carta de Correntes de Maré referente ao Rio Pará, publicada pela DHN em 1962 será usada para validar o modelo hidrodinâmico, através da comparação dos dados gráficos mostrados na carta e os esperados pelo modelo. As correntes são apresentadas em relação às cidades de Belém e Salinópolis, com dados gráficos de intensidade e direção, a intervalos regulares antes e depois da preamar em cada cidade.

As setas indicam as direções e os números os valores das velocidades das correntes, expressos em nós e décimos de nós, e referem-se à situação de sigízia média. Em Belém a amplitude da sigízia média é de 3,08 m e a máxima é de 3,78 m. A corrente representada exprime a média em uma camada de aproximadamente 5 m de espessura a partir da superfície, não considerando marés, fluxo do rio e ventos extremos. O estudo da maré e das correntes mostra que no mês de abril ocorrem as maiores correntes de vazante e as menores correntes de enchente. Uma vez que a área do modelo não contempla a área do Município de Salinópolis, a análise restringiu-se aos dados de Belém. Na Figura 4.20 é apresentada a digitalização da carta de corrente, no caso a situação 3 horas antes da preamar, observando-se o incremento da intensidade das correntes na Baía de Marajó, com relação ao largo, devido ao afunilamento da costa.

Figura 4.20 - Carta de Corrente de Maré - 03 horas antes da preamar.

- Dados da Oceanotécnica (1991)

Os dados são referentes às medições efetuadas pela Oceanotécnica no Porto de Vila do Conde no ano de 1991. Os dados foram obtidos através de dois correntógrafos marca Hidrologia, instalados numa posição distante cerca de 50 metros para montante do píer e alinhado a este, de modo a não sofrer interferências com manobras de navios.

Os correntógrafos foram colocados nos níveis de três e seis metros abaixo da superfície d'água, de modo a se medir a intensidade e direção da correnteza sem interferência de ondas e marolas ou do fluxo de pequenas embarcações que porventura passassem nas proximidades.

As medidas são registradas em metros por segundo (m/s) para as velocidades e em graus em relação ao norte verdadeiro para a direção, e registradas a cada 12 minutos de observações. O período de medições foi o período compreendido entre os dias 26/04 a 02/05/1991, abarcando um período de sigízia com Lua Cheia.

De modo geral os resultados encontrados foram:

- De maneira geral, a correnteza se inverte cerca de uma hora após a baixamar ou preamar, havendo um lapso entre 20 e 30 minutos sem correnteza ou com velocidades quase nula antes da inversão, período conhecido como estofa de maré;
- A direção da correnteza é predominantemente no sentido SW/WSW durante as enchentes e de ENE/NE durante as vazantes no nível de 3 m. No nível de 6 m as direções predominantes são de WSW durante as enchentes e de NE durante as vazantes. A Figura 4.21 sumariza as observações do nível de 3 m de profundidade;
- A velocidade da correnteza detectada pelo instrumento no nível de 3 m indicou uma subida gradual em sua intensidade a partir da inversão da correnteza, indo até 0,25

m/s (0,5 nó) na primeira hora. Nas três horas seguintes a velocidade varia entre 0,25 até 0,60 m/s (0,5 a 1,2 nós), decrescendo em seguida até a próxima inversão da correnteza. O mesmo ocorre no nível de 6 metros, porém com intensidades menores.

Figura 4.21 - Distribuição de frequência da direção da corrente - OCEANOTÉCNICA (1991)

- Dados do INPH (2001)

Os principais dados relativos à circulação de correntes são os obtidos pelo INPH, junto ao Porto de Vila de Conde. Esses dados foram usados na calibração do modelo hidrodinâmico, pois são espacialmente mais abrangentes das correntes junto ao porto.

Os dados de corrente foram obtidos através do lançamento e acompanhamento, através de GPS, de derivadores. Os derivadores estavam regulados de forma a seus lemes de deriva situarem-se a 7 metros abaixo da superfície d'água.

A seguir são apresentadas as Figuras 4.22 e 4.23, indicando a localização e os números dos derivadores, pontos de lançamento e as datas de lançamento. As medições com

derivadores foram realizadas no período de 05/04/01 a 10/04/01, possuindo também marés registradas.

As correntes de enchente, devido à maré, ocorrem sempre no sentido Norte-Sul, ou seja, de jusante para montante do Rio Pará. As correntes de vazante, devido à maré ocorrem sempre no sentido Sul-Norte, ou seja de montante para a jusante do Rio Pará.

Figura 4.22 - Trajetórias dos derivadores lançados em maré de enchente - Porto Vila do Conde

Figura 4.23 - Trajetórias dos derivadores lançados em maré de vazante - Porto Vila do Conde

- Informações do CIAGA e DHN

Em virtude da carência de dados mais exatos, foram levadas em consideração as informações do Roteiro da Costa Norte (DHN, 2000) e do Relatório de Manobras nos Terminais da ALUNORTE, Pará Pigmentos e Rio Capim Caulim realizado no Simulador do Centro de Instrução Almirante Graça Aranha (CIAGA, 1999).

O Roteiro da Costa Norte não apresenta valor das intensidades ou direção das correntes de maré, mas por outro lado ressalta que os valores das correntes podem ser alterados sensivelmente pelas grandes enchentes e vazantes dos rios, assim como por situações anormais de vento.

O Relatório de Manobras apresenta simulações de atracação e desatracação de navios tipo no porto de Vila do Conde, no Porto da Pará Pigmentos e Rio Capim Caulim, considerando correntes máximas de maré de sigízia de 1,6 nós e 10 nós de velocidades do vento.

4.2.5. Dados de Vazão Fluvial

Somente as vazões fluviais extremas têm papel importante na dinâmica das correntes na área de estudo, pois a sua variação influencia a circulação localmente, ou seja as intensidades e direções das correntes de maré, contribuindo também na formação da morfologia dos canais. Os cursos d'água considerados como mais importantes são os seguintes:

- Rio Tocantins;
- Rio Amazonas, através da vazão fluvial dos canais e estreitos, principalmente o do Boioçu e Breves. Segundo BEARDSLEY (1995), o Rio Amazonas tem sua vazão

máxima em Maio, podendo atingir 250.000 m³/s. Considerando que a vazão veiculada pelo Canal Sul seja 5% da total, estima-se que a vazão a ser considerada no modelo seria cerca de 13.000 m³/s, apresentando a mesma ordem de grandeza à veiculada pelo Rio Tocantins;

- Complexo Guamá, composto pelo Rio Guamá, Moju e Acará, que forma a Baía do Guajará, que se une com a Baía de Marajó.

A Tabela 4.6 apresenta as vazões veiculadas pela UHE Tucuruí obtidas junto a ELETRONORTE referentes aos meses de março e abril de 2001, que serão usadas para a etapa de Calibração do modelo hidrodinâmico.

Tabela 4.6 - Vazões veiculadas pela UHE Tucuruí

Data	Vazão turbinada (m ³ /s)	Vazão vertida (m ³ /s)	Vazão Total (m ³ /s)
01/04/01	5437	14850	20287
02/04/01	6296	14850	21146
03/04/01	6286	14850	21136
04/04/01	6326	15617	21943
05/04/01	6266	17277	23543
06/04/01	6246	17933	24179
07/04/01	6266	17927	24193
08/04/01	6346	17253	23599
09/04/01	6236	16667	22903
10/04/01	6306	15927	22233
11/04/01	6376	15097	21473
12/04/01	6316	14133	20449
13/04/01	6246	13167	19413
14/04/01	6686	11990	18676
15/04/01	6466	11570	18036
16/04/01	6776	11003	17779
17/04/01	6735	10710	17445
18/04/01	6756	10710	17466
19/04/01	6666	10710	17376
20/04/01	6806	12017	18823
21/04/01	6656	13923	20579
22/04/01	6326	15320	21646
23/04/01	6606	15680	22286
24/04/01	6566	15413	21979
25/04/01	6606	14740	21346

continua

Tabela 4.6 - Vazões veiculadas pela UHE Tucuruí (continuação)

Data	Vazão turbinada (m ³ /s)	Vazão vertida (m ³ /s)	Vazão Total (m ³ /s)
26/04/01	6706	13873	20579
27/04/01	6616	13053	19669
28/04/01	6146	12247	18393
29/04/01	6166	12000	18166
30/04/01	6206	11647	17853
01/05/01	6236	11117	17353
02/05/01	6786	10647	17433
03/05/01	6806	9637	16443
04/05/01	6747	7523	14270
05/05/01	6536	5730	12266
06/05/01	6376	5180	11556
07/05/01	6666	5180	11846
08/05/01	6706	5513	12219
09/05/01	6476	5347	11823
10/05/01	6406	5180	11586
11/05/01	6696	5180	11876
12/05/01	6516	4600	11116
13/05/01	6316	3920	10236
14/05/01	6246	3603	9849
15/05/01	6481	2875	9356
16/05/01	6491	2590	9081
17/05/01	6491	2590	9081
18/05/01	6486	2590	9076
19/05/01	6186	2590	8776
20/05/01	6256	2590	8846
21/05/01	6418	2590	9008
22/05/01	6486	2590	9076
23/05/01	6426	2590	9016
24/05/01	6476	2590	9066
25/05/01	6446	2517	8963
26/05/01	6386	2480	8866
27/05/01	6086	2480	8566
28/05/01	6546	2480	9026
29/05/01	6546	2480	9026
30/05/01	6556	2180	8736
31/05/01	6536	1553	8089
01/04/01	5437	14850	20287

Fonte: ELETRONORTE (2003).

O valor utilizado como entrada no modelo computacional foi à média aritmética das vazões totais no período, desta forma o valor adotado para as vazões de contribuição foi de 15.510 m³/s para o Rio Tocantins e 13.000 m³/s pelos Estreitos.

5. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

No presente capítulo foram elencados os passos e apresentados os procedimentos adotados na calibração e validação do modelo numérico. Destacando que o primeiro passo foi a realização de uma simulação prévia. Após a realização dessa simulação, iniciou-se o processo de calibração propriamente dito, utilizando-se os dados de maré e derivadores da Área Portuária. O último passo se refere à validação do modelo, onde foi usada a Carta de Correntes de Maré (DHN, 1962).

5.1 - Simulação Prévia

De posse dos dados de entrada e visando a correção de erros no processo de digitalização e na modelagem das marés procedeu-se à realização de uma simulação prévia, onde foram adotadas algumas premissas:

- A batimetria adotada foi a referente à Área 1;
- Utilizou-se dois marégrafos (Cabo Maguari e Ilha dos Guarás) na borda molhada do modelo, ressaltando que a data escolhida para a simulação dos mesmos foram os dias 14, 15 e 16/04/91;
- Adotou-se um ajuste linear entre os dados obtidos da previsão das marés, essa decisão foi embasada nas conclusões obtidas por BEARDSLEY (1995);
- Em relação à vazão fluvial foram adotadas duas situações distintas: na primeira a vazão fluvial adotada foi de 15.510 m³/s (Rio Tocantins) e 13.000 m³/s para os Estreitos. Na segunda não foram consideradas vazões fluviais;
- A intensidade dos ventos não foi considerada;

- Rugosidade adotada: K de Strickler igual a 32, equivalente a um n de Manning de 0,0312, que é o valor padrão (“default”) do modelo;
- Procedeu-se à extração de dados em dois pontos: um localizado nas proximidades da Área Portuária de Vila do Conde e outro na Baía de Marajó, objetivando-se criar uma base de comparação.

É importante ressaltar que o número de Courant, relacionado à estabilidade do modelo, não deve exceder 8. Uma vez que os valores referentes à celeridade e espaçamento de grade já foram previamente estabelecidos pela batimetria, este valor somente pode ser modificado pelo time step interno. Devido à grande extensão do modelo e, por conseguinte, o elevado número de pontos, o espaçamento de grade de 270 m condicionou a utilização de um número de Courant da ordem de 6.

A partir dos referidos dados de entrada procedeu-se à simulação prévia de onde foram extraídos dados de velocidade, direção e vazão, com os quais pode-se concluir que:

- Existiam uma série de locais na batimetria que deveriam ser “abertos”. O espaçamento da Área 1 (270 x 270 m) não conseguiu, em alguns casos, retratar a realidade. Nesses locais a batimetria foi devidamente corrigida;
- A rugosidade, por ser um parâmetro de calibração, não foi alterada, sendo prevista apenas a sua alteração durante o processo de calibração do modelo numérico.
- As velocidades e as direções das correntes não foram influenciadas pela vazão fluvial. A diferença encontrada ficou em cerca de 1,5% para mais, quando da utilização das vazões. Desta forma, visando diminuir o tempo de processamento, não foram adotadas posteriormente vazões fluviais. Os dados relativos à comparação da intensidade das correntes são apresentados na Tabela 5.1 e se referem ao Ponto (536,768) relativo à

Área 1 com horário em relação à Preamar no Porto de Belém, na Baía de Marajó. Vale ressaltar que áreas definidas previamente, possuem uma malha de pontos, tendo origem no canto inferior esquerdo da figura;

Tabela 5.1 - Comparação da intensidade da corrente em relação à rugosidade de fundo

Horário	Rugosidade (K de Strickler)		
	32	40	50
	Velocidades (m/s)		
6 horas antes	0,62	0,63	0,64
5 horas antes	0,64	0,65	0,66
4 horas antes	0,52	0,52	0,53
3 horas antes	1,00	1,02	1,03
2 horas antes	1,15	1,17	1,19
1 hora antes	1,05	1,07	1,09
Preamar	0,71	0,72	0,73
1 hora depois	0,20	0,20	0,21
2 horas depois	0,47	0,47	0,48
3 horas depois	0,81	0,82	0,83
4 horas depois	0,95	0,96	0,97
5 horas depois	0,99	1,00	1,02
6 horas depois	0,62	0,63	0,64

- A opção de não se utilizar as vazões fluviais foi embasada também nas vazões da maré obtidas quando da simulação sem a adoção de vazões fluviais. Os valores das vazões calculados pelo modelo possuem ordem de grandeza, em situações de velocidade máximas de sizígias, de cerca de 500.000 m³/s, muito superiores à vazão fluvial inicialmente considerada. Vale recordar, que dentre as simplificações adotadas no modelo numérico, uma importante se refere à batimetria da área de estudo. Onde foram “fechados” a região dos Estreitos, o Rio Tocantins e o Rio Guamá, uma vez que não foram consideradas vazões fluviais contribuintes.

Desta forma, o modelo mostrou-se consistente e exeqüível, habilitando assim a realização da calibração e validação do mesmo.

5.2 - Calibração do Modelo Numérico

5.2.1 - Correção das velocidades do modelo no perfil vertical

O processo de calibração do modelo numérico usou duas bases de dados diferentes, a primeira se refere aos dados da variação de maré e trajetórias de derivadores obtidos a partir de INPH (2001) e a segunda se refere aos dados de velocidade e direção da corrente obtidos a partir da OCEANOTÉCNICA (1991). Destacando que as duas bases de dados referem-se à Área Portuária de Vila do Conde.

Primeiramente, é importante ressaltar que as velocidades extraídas do modelo numérico são uma média numérica do perfil, não retratando, necessariamente, a velocidade na profundidade onde foi realizada a medição real. Desta forma, é necessária a realização de correções das velocidades, objetivando uma melhor comparação das mesmas.

A correção das velocidades seguiu a seqüência de cálculo apresentada no Capítulo 2, Item 2.2.3, onde o dado de entrada foi a velocidade média em um instante de tempo, a profundidade total, a profundidade onde se deseja descobrir a velocidade e o diâmetro característico do sedimento de fundo. De modo a simplificar a determinação do fator de correção, adotaram-se os seguintes parâmetros para os cálculos:

- Velocidade média: 0,8 m/s, 0,4 m/s e 0,2 m/s;
- Profundidade total: 20 m (a partir da batimetria);
- Distância em relação ao fundo do canal onde se deseja comparar as velocidades (Para o caso das medições do INPH): 13 m -obtida da subtração da profundidade total (20 m) da profundidade do leme de deriva dos flutuadores (7 m);

- Distância em relação ao fundo do canal onde se deseja comparar as velocidades (Para o caso das medições da OCEANOTÉCNICA): 17 m - obtida da subtração da profundidade total (20 m) menos a espessura da camada líquida de 3 m a partir da superfície;
- Diâmetro dos grãos do fundo: nesse momento encontrou-se outra dificuldade, devido à completa falta de dados. Desta forma foram utilizados dois diâmetros:
 - Areia grossa com os seguintes diâmetros: $D_{50} = 0,0003$ m e $D_{90} = 0,0006$ m;
 - Areia fina com os seguintes diâmetros: $D_{50} = 0,0001$ m e $D_{90} = 0,0002$ m;

Os valores das velocidades (V_y) obtidas para as distâncias de 13 m e 17 m em relação ao fundo do canal são apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Comparação das Velocidades no Perfil

Tipo de Areia	Velocidade Média (m/s)	Velocidade - V_y (m/s)	k_s (m)
Distância em relação ao fundo: 13 m - INPH (2001)			
Fina	0,2	0,215	0,005
	0,4	0,435	0,120
	0,8	0,87	0,100
Grossa	0,2	0,215	0,140
	0,4	0,425	0,180
	0,8	0,865	0,340
Distância em relação ao fundo: 17 m - OCEANOTÉCNICA (1991)			
Fina	0,2	0,215	0,005
	0,4	0,440	0,120
	0,8	0,880	0,100
Grossa	0,2	0,220	0,140
	0,4	0,440	0,180
	0,8	0,890	0,340

A partir da análise de sensibilidade dos dados apresentados na Tabela 5.2, pode-se concluir que o valor adequado para a correção das velocidades junto à superfície é de 1,1, ou seja as velocidades obtidas no modelo foram majoradas em 10% com objetivo de se equipararem às velocidades reais, que são mais superficiais. As Figuras 5.1 e 5.2, a título de

ilustração, apresentam o perfil logarítmico de velocidade da seção, tomando-se como velocidade média 0,4 m/s e uma profundidade total de 20 m.

Figura 5.1 - Velocidades para Areia Fina

Figura 5.2 - Velocidades para Areia Grossa

5.2.2 - Calibração do Modelo Numérico utilizando os dados do INPH (2001)

O próximo passo foi a calibração do modelo numérico com os dados do INPH. Nessa etapa procurou-se adequar as velocidades e direções do modelo frente aos dados reais. A calibração do modelo ficou a cargo da variação da rugosidade do fundo, onde procedeu-se à entrada de 3 valores distintos para o K de Strickler (32, 40 e 50), equivalendo a um n de Manning de 0,0312, 0,025 e 0,02, respectivamente, isto é, partiu-se de um valor mais rugoso, que apresentaria menor velocidade, para um mais liso, com maior velocidade. Os outros dados de entrada foram:

- Os dois marégrafos (Cabo Maguari e Ilha dos Guarás) para a simulação da variação do nível d'água na entrada da borda molhada, destacando que a variação entre os dois dados foi tomada como linear;
- O vento não foi considerado;
- Não foram consideradas vazões fluviais;
- O período de simulação considerado foi de 05 a 11/04/2001, coincidindo com os valores da variação de maré e de direção do derivadores apresentados pelo INPH (2001), destaca-se que devido à necessidade de estabilização, procedeu-se a simulação a partir do dia 04/04/2001 .

Os resultados das intensidades das correntes, variando-se a rugosidade apresentaram variação semelhante ao listado na simulação prévia, com diferença de cerca de 1,5 a 2% nas velocidades. Em virtude da pouca diferença atestada optou-se por adotar $K=40$, uma vez que o valor ajusta-se mais adequadamente à condição estuariana, de acordo com a Figura 2.8. De

qualquer forma, a análise de sensibilidade mostrou pequena diferença entre os valores de K extremos.

Primeiramente procedeu-se à simulação utilizando-se os dados anteriores para a Área 1. De posse dos dados da simulação da Área 1, procedeu-se à extração de bordas, isto é seções molhadas que foram utilizadas como limites para a Área 2. Procedeu-se de forma análoga para a Área 2, obtendo as bordas da Área 3 (mais específica, no entorno da Área Portuária de Vila do Conde).

O ponto escolhido para a extração dos dados foi o (224,309), nas proximidades do píer, local onde foi locado o marégrafo real. As Figuras 5.3 a 5.8, contêm 3 séries de dados por dia de medição ao longo de todo o período da campanha de campo do INPH: a primeira referente aos dados reais da variação da maré no período supracitado, intitulado marégrafo real, os dados relativos à variação do nível d'água extraídos do modelo (Ponto: 224,309), intitulado de “Maré Modelo”, e a terceira, referente à simulação harmônica da maré realizada pelo modelo numérico, utilizando as constantes harmônicas da Ficha Maregráfica de Vila do Conde, intitulada “Previsão Harmônica”.

Figura 5.3 - Comparação do nível d'água em Vila do Conde. Data 05/04/2001

Figura 5.4 - Comparação do nível d'água em Vila do Conde. Data 06/04/2001

Figura 5.5 - Comparação do nível d'água em Vila do Conde. Data 07/04/2001

Figura 5.6 - Comparação do nível d'água em Vila do Conde. Data 08/04/2001

Figura 5.7 - Comparação do nível d'água em Vila do Conde. Data 09/04/2001

Figura 5.8 - Comparação do nível d'água em Vila do Conde. Data 10/04/2001

A partir das comparações apresentadas nas figuras anteriores pode-se concluir que: a variação do nível d'água extraída do modelo numérico (Ponto 224,309) não retrata a realidade, apresentando um abatimento médio em relação ao real de cerca de 25% em todos os dias, obrigando à realização de uma correção da velocidade no modelo numérico. Destaca-se, por outro lado, que a maré simulada com as constantes harmônicas da ficha maregráfica de Vila do Conde se ajusta ao real, ressaltando que as pequenas diferenças encontradas no gráfico se devem mais a erros gráficos quando da obtenção dos dados da maré a partir do relatório do INPH (2001).

Tomando-se o valor de α igual a 1, isto é considerando comportamento linear na expressão da velocidade máxima da maré (ver item 2.2.3), as velocidades do modelo foram corrigidas para mais em 25% em relação ao abatimento da maré. Conclui-se que as velocidades extraídas do Modelo Numérico devem ser corrigidas em $1,25 \times 1,10$, totalizando 1,375 para mais, objetivando uniformizar a comparação com as velocidades reais, sendo 1,25 referentes às correções do abatimento da maré e 1,10 da correção da velocidade média.

Objetivando refinar a calibração, foram utilizados gráficos com dados reais de trajetórias de flutuadores lançados no Porto de Vila do Conde. Para tanto, no MIKE 21 foram simulados lançamentos de derivadores em pontos próximos aos dos reais, nos mesmos instantes, procurando abranger a área portuária.

É importante ressaltar que o espaçamento de grade da Área 3 (30 x 30 m) não permitiu, na maioria dos casos, o lançamento do derivador no ponto exato, uma vez que o programa apenas permite o lançamento nos nós da grade, originando um erro espacial de no máximo 21,21 m (diagonal do retângulo 15 x 15 m, metade do espaçamento da grade).

As Figuras de 5.9 a 5.17 apresentam os 9 lançamentos realizados pelo INPH (2001), destacando que as linhas em preto representam os lançamentos simulados no MIKE21 e as linhas em vermelho os lançamentos reais.

Figura 5.9 - Comparação da trajetória dos derivadores reais e simulados - 1º lançamento

Figura 5.10 - Comparação da trajetória dos derivadores reais e simulados - 2º lançamento

Figura 5.11 - Comparação da trajetória dos derivadores reais e simulados - 3º lançamento

Figura 5.12 - Comparação da trajetória dos derivadores reais e simulados - 4º lançamento

Figura 5.13 - Comparação da trajetória dos derivadores reais e simulados - 5º lançamento

Figura 5.14 - Comparação da trajetória dos derivadores reais e simulados - 6º lançamento

Figura 5.15 - Comparação da trajetória dos derivadores reais e simulados - 7º lançamento

Figura 5.16 - Comparação da trajetória dos derivadores reais e simulados - 8º lançamento

Figura 5.17 - Comparação da trajetória dos derivadores reais e simulados - 9º lançamento

As direções obtidas no modelo numérico mostraram-se, no geral, bastante aderentes às reais, obtidas pelo INPH (2001), comprovando a calibração do modelo para essa série de dados.

5.2.3 - Calibração do Modelo Numérico utilizando os dados da OCEANOTÉCNICA (1991)

Os dados da OCEANOTÉCNICA não apresentaram informações referentes à variação do nível d'água, com isso a calibração se restringiu à velocidade e direção das correntes. Os dados de entrada utilizados para a simulação foram:

- Os dois marégrafos (Cabo Maguari e Ilha dos Guarás) para a simulação da variação do nível d'água na entrada da borda molhada, destacando que a variação entre os dois dados foi tomada como linear;
- O vento não foi considerado;
- Não foram consideradas vazões fluviais;
- Rugosidade: K de Strickler igual a 40, equivalendo a um n de Manning igual a 0,025;
- O período de simulação considerado foi de 26/04/1991 a 02/05/1991, coincidindo com os valores de direção e intensidade das correntes, contudo devido a necessidade de estabilização do modelo, procedeu-se a simulação a partir de 24/04/1991.

De maneira análoga à realizada com os dados do INPH, primeiramente procedeu-se à simulação utilizando-se os dados anteriores para a Área 1. De posse dos dados da simulação da Área 1, procedeu-se à extração de bordas, isto seções molhadas que foram utilizadas como

limites para a Área 2. Procedeu-se de forma análoga para a Área 2, obtendo as bordas da Área 3 (mais específica, no entorno da Área Portuária de Vila do Conde).

O ponto escolhido foi o mesmo usado na calibração com os dados do INPH (224,309), situados nas proximidades do píer (cerca de 50 m de distância do píer, de modo a não sofrer interferências com as manobras das embarcações). Nos resultados de saída do modelo procedeu-se às correções citadas no item 5.2.2 nas intensidades das correntes, entretanto a variação da maré não foi corrigida, isto é está abatida em 25% com relação à amplitude real. A Figura 5.18 apresenta gráfico resumo com a variação do nível d'água, intensidade e direção das correntes.

Figura 5.18 - Correlação entre amplitudes de maré, direção e velocidades de corrente.

As velocidades obtidas no modelo numérico se aproximam bastante das medidas pela OCEANOTÉCNICA (1991), obedecendo à mesma lei de variação utilizada na calibração com os dados do INPH, os valores de velocidades obtidos são da ordem de 0,55 m/s, valor pouco inferior ao medido (0,60 m/s).

As direções e intensidades corrigidas obtidas no modelo numérico para uma profundidade de 3 m são apresentadas na Figura 5.19. Na Figura 5.20 é reapresentada a rosa obtida pela OCEANOTÉCNICA (1991).

Figura 5.19 - Rosa de direções e correntes para o Porto de Vila do Conde, extraída do modelo a uma profundidade de 3 metros.

Figura 5.20 - Distribuição de frequência da direção da corrente - OCEANOTÉCNICA (1991)

A comparação comprova a aderência dos dados obtidos no modelo numérico com os dados observados, considerando-se calibrado o modelo numérico.

5.3 - Validação do Modelo Numérico

A validação do modelo é a ultima fase da simulação computacional propriamente dita. Tem por objetivo, em um primeiro momento, atestar a fidelidade do modelo, ou seja, verificar se as grandezas encontradas nas simulações realizadas na calibração estão compatíveis com as observadas. Caso os dados verificados sejam validados, o modelo possui grande potencial de retratar a realidade. É importante destacar que a base de dados utilizada na validação do modelo consistiu em:

- Dados batimétricos da ÁREA 1;
- Dados de maré astronômica da borda molhada do modelo. Os marégrafos utilizados foram os do Cabo Maguari e Ilha dos Guarás. O período de simulação compreendeu os dias 14 a 16/04/1991, pois neste período a amplitude de maré em Belém atingiu 3,10 m, como assinalado para a Carta de Correntes de Maré;
- A distribuição da variação do nível d'água foi tomada como linear entre os marégrafos;
- Carta de Correntes de Maré (DHN, 1962), de onde foram obtidas as intensidades e direções das correntes de maré;
- Rugosidade: K de Stricler igual a 40, equivalendo a um n de Manning igual a 0,025;
- O vento não foi considerado;
- Não foram consideradas vazões fluviais;
- Dados de maré astronômica do marégrafo localizado no Porto de Belém, através da qual foram definidos os horários de preamar, usados com referência na comparação dos dados;
- Dados de maré astronômica do marégrafo localizado em Colares.

O primeiro passo, propriamente dito, da validação foi a realização da simulação computacional da ÁREA 1 do modelo, onde foram adotados os seguintes parâmetros:

- Período de simulação considerado: 00:00 hs do dia 14/04/1991 até 24:00 hs do dia 16/04/1991, contudo, devido a necessidade de estabilização, a simulação iniciou-se no dia 13/04/1991;
- Alturas de referência, de forma que o programa considere a área como alagada ou seca;

- Altura do nível d'água inicial: 0,5 m;
- Coeficiente de viscosidade turbulenta: igual a zero nesse caso;
- Número de Manning: 0,025;
- Ondas e vento: não consideradas no estudo;

De posse de todo os elementos anteriormente citados foi realizada a simulação computacional. Em concomitância, foram selecionados os dados digitalizados da carta de corrente de maré. Os dados de velocidade reais foram extraídos diretamente da carta, sendo os dados das direções obtidos graficamente com auxílio do software AutoCad. É importante destacar que os valores apresentados na carta de corrente de maré correspondem à velocidade e direções em dois momentos bem distintos, um em função da maré de Belém e outro em função da maré em Salinópolis, destacando que os dados relativos a Salinópolis não foram considerados.

No presente estudo apenas foram considerados os dados em relação à Belém, uma vez que os outros (Relativos a Salinópolis) se encontram foram da área de estudo sendo, portanto, desconsiderados. Os períodos escolhidos para a comparação foram: 6 horas antes da preamar, 5 horas antes da preamar, 4 horas antes da preamar, 3 horas antes da preamar, 2 horas antes da preamar, 1 hora antes da preamar, preamar, 1 hora depois da preamar, 2 horas depois da preamar, 3 horas depois da preamar, 4 horas depois da preamar, 5 horas depois da preamar e 6 horas depois da preamar. As Figuras 5.21 a 5.33 apresentam os períodos escolhidos para a comparação, destacando que os dados utilizados são os em azul (relativos a Belém).

Figura 5.21 - Dados relativos a Carta de Corrente - 6 horas antes da preamar

Figura 5.22 - Dados relativos a Carta de Corrente - 5 horas antes da preamar

Figura 5.23 - Dados relativos a Carta de Corrente - 4 horas antes da preamar

Figura 5.24 - Dados relativos a Carta de Corrente - 3 horas antes da preamar

Figura 5.25 - Dados relativos a Carta de Corrente - 2 horas antes da preamar

Figura 5.26 - Dados relativos à Carta de Corrente - 1 hora antes da preamar

Figura 5.27 - Dados relativos à Carta de Corrente - Preamar

Figura 5.28 - Dados relativos à Carta de Corrente -1 hora depois da preamar

Figura 5.29 - Dados relativos à Carta de Corrente - 2 horas depois da preamar

Figura 5.30 - Dados relativos à Carta de Corrente - 3 horas depois da preamar

Figura 5.31 - Dados relativos à Carta de Corrente - 4 horas depois da preamar

Figura 5.32 - Dados relativos à Carta de Corrente - 5 horas depois da preamar

Figura 5.33 - Dados relativos à Carta de Corrente - 6 horas depois da preamar

Na sequência foram extraídas séries de dados em pontos específicos, visando à comparação com os dados da Carta de Corrente de Maré. O período utilizado foi o mesmo usado nas medições de correntes realizadas pela OCEANOTÉCNICA (1991). Essa decisão justifica-se pela comparação em um mesmo período temporal de dados em vários locais.

É importante destacar que no processo de obtenção dos dados, a Carta de Correntes de Maré foi devidamente digitalizada e referenciada, utilizando o mesmo processo que ocorreu para as Cartas Náuticas. A escolha dos pontos de comparação deveu-se, primeiramente, à existência de indicação numérica das velocidades na Carta de Correntes de Maré. Foram escolhidos 3 pontos na Carta, os quais foram referenciados na grade da Área 1. Os pontos são os seguintes (ver Figura 5.34):

- Ponto (610, 551): Proximidades do Porto de Belém;
- Ponto (564, 657): Canal de Acesso ao Porto de Belém;
- Ponto (536, 768): Baía de Marajó.

Figura 5.34 - Localização dos pontos escolhidos para a Validação do Modelo

Realizada a extração, o próximo passo foi o tratamento estatístico dos mesmos. É importante destacar que a extração dos dados realizada pelo MIKE21 é em função do tempo, desta forma tanto as velocidades quanto as direções, possuem valores distintos para cada intervalo de tempo, que no caso desta saída foi de 20 minutos, sendo o mesmo intervalo utilizado na modelagem da maré. A similaridade não é mera coincidência, muito pelo contrário, procurou-se usar o mesmo intervalo, de forma a facilitar a comparação dos dados.

A Carta de Corrente da Maré não apresenta delimitação muito aproximada do período de medição dos dados, resumindo-se a indicações em função da preamar no Porto de Belém. Desta forma os dados de previsão da maré no Porto de Belém foram cruzados com os dados extraídos nos três pontos, determinando os valores de intensidade e direção das correntes em cada instante. Realizada a classificação, os dados foram tratados estatisticamente e comparados com os da carta de correntes. A partir dessa comparação concluiu-se que:

- A limitação espacial do modelo, nas proximidades de Belém, impossibilita a utilização dos Pontos (551,610) - Porto de Belém e (564, 657) - Canal de Acesso ao Porto de Belém. Para os dois pontos a simplificação imposta ao modelo não retratou a realidade, uma vez que, para o caso do Porto de Belém, adotou-se um contorno fechado no rio Guamá. Essa decisão deveu-se, por um lado, a não ser a região objeto direto do estudo e, sobretudo, pela não existência de informação a respeito da batimetria. Em relação ao Canal de Acesso ao Porto de Belém, a decisão da não utilização deveu-se à escassa batimetria existente, que resultou em grandes discrepâncias de valores;

Os dados relativos às direções e intensidade já corrigidas das correntes, tanto da Carta de Corrente quanto as obtidas no modelo numérico para o Ponto (536,768), destacando que os

dados do modelo representam a média dos três dias de simulação, são sumarizados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Comparação dos dados de direções e intensidades de correntes

Horário	Carta de Corrente		Dados do Modelo	
	Velocidade (m/s)	Direção (°NV)	Velocidade (m/s)	Direção (°NV)
6 horas antes	1,13	12	0,87	173
5 horas antes	0,21	14	0,89	26
4 horas antes	0,87	208	0,72	202
3 horas antes	1,59	212	1,40	205
2 horas antes	1,85	208	1,61	204
1 hora antes	1,85	204	1,47	204
Preamar	0,87	202	0,99	204
1 hora depois	0,21	142	0,28	200
2 horas depois	0,77	52	0,65	28
3 horas depois	1,39	43	1,13	25
4 horas depois	1,95	27	1,32	25
5 horas depois	2,06	22	1,38	25
6 horas depois	1,34	18	1,32	24

A partir dos dados acima pode-se concluir que:

- As direções extraídas do modelo para o Ponto (536, 768) - Baía de Marajó apresentam-se muito próximas às obtidas na Carta de Correntes de Maré, principalmente para 1 hora antes da Preamar e Preamar, onde os valores foram rigorosamente os mesmos. As direções apresentaram diferença média de 1,56% (equivalendo a 5,61°), excetuando-se o valor obtido para 6 horas antes da preamar, uma vez que o valor mostrou-se completamente incoerente, representando enchente no modelo e vazante no real. Essa exclusão justifica-se por ser um período de estofo de maré e pela resolução temporal adotada na saída dos dados. Excluindo-se o valor de 6 horas antes da preamar, a maior diferença encontrada foi de 16,66 % na primeira hora depois da Preamar, sendo que essa diferença já era esperada, uma vez que os horários muito próximos ao estofo (preamar e baixa-mar) não possuem direções bem definidas, tanto no modelo quanto no real;

- As velocidades extraídas no modelo, por outro lado, não apresentaram tão boa similaridade com as observadas na Carta de Correntes de Maré. No Ponto (536, 768), as velocidades extraídas do modelo representam um valor médio 70% do valor das velocidades reais, excetuando-se os dados de 5 horas antes da Preamar, justificado pela proximidade da baixa-mar. De um modo geral, as velocidades mostraram-se abaixo das verificadas na Carta de Correntes de Maré;
- As velocidades extraídas apresentam valores, em relação à da Carta de Correntes de Maré, menores tanto para a situação de enchente quanto vazante, descartando assim a possível influência da não utilização de contribuição fluvial;

Visando facilitar a análise dos dados obtidos na modelagem são apresentados a seguir uma rosa com as direções e intensidades corrigidas e um gráfico de correlação entre maré e direção e intensidade corrigidas de corrente (Ver Figuras 5.35 e 5.36).

Salienta-se que a variação da maré não foi corrigida, e apresenta abatimento semelhante ao verificado em Vila do Conde, conforme comentado no Capítulo 6. Já as velocidades foram corrigidas e majoradas através do fator 1,375.

Figura 5.35 - Rosa com a comparação das direções e velocidades (Validação do Modelo)

Figura 5.36 - Correlação entre amplitudes de maré, direção e velocidades de corrente (Validação do Modelo)

Visando comprovar a correlação entre os dados de direção e intensidade corrigidas das correntes foram elaborados dois gráficos, que são apresentados nas Figuras 5.37 e 5.38.

Figura 5.37 - Ajuste das direções dos pontos obtidos na carta de correntes e no modelo (Validação do Modelo).

Figura 5.38 - Ajuste das velocidades dos pontos obtidos na carta de correntes e no modelo (Validação do Modelo)

6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A calibração do modelo numérico mostrou-se satisfatória, no âmbito do contexto de dados disponíveis. A partir dos dados de maré medidos no Porto de Vila do Conde em 2001 pelo INPH foi possível realizar correção das velocidades, que juntamente com as amplitudes de maré estão abatidas em 25% em relação aos do real. Esse abatimento também foi notado, quando da validação com os dados da Carta de Correntes de Maré, uma vez que o valor esperado para a variação de maré no Ponto (536,768) seria algo muito parecido com a maré em Belém, ou seja, uma variação de 3,1 m.

De fato, a comparação das diferenças entre a média das preamares e baixa-mares de sizígia das Estações Maregráficas do Porto de Belém (Tabela 2.2) e de Colares (Tabela 6.1), a mais próxima do Ponto (536,768), realizada através de previsão harmônica utilizando-se as constantes apresentadas nas respectivas fichas, resultou em valores muito próximos de variação de nível d'água, o que justificou a aplicação da correção de 1,375 nos valores das intensidades da corrente para o Ponto (536,768). A provável justificativa deste desajuste sistemático deve ser atribuída à hipótese feita na embocadura, entre o Cabo Maguari e a Ilha dos Guarás, de interpolação linear para a linha cotidal.

A correção de 25% somada com a correção proveniente do perfil logarítmico (cerca de 10%), originou uma correção total de 37,5% nas velocidades superficiais, que se assemelharam com as medidas no real, tanto no caso da calibração, quanto na validação. Os dados da OCEANOTÉCNICA (1991) para o Porto de Vila do Conde indicam velocidades máximas 0,60 m/s, enquanto o modelo numérico forneceu velocidades máximas de 0,55 m/s, ou seja muito próximas aos do real. Na validação, com a utilização da Carta de Correntes de Maré, as velocidades extraídas do modelo numérico mostraram-se bastantes aderentes nas situações de enchente e ligeiramente inferiores nas vazantes, contudo não invalidando o ajuste

do modelo. De fato, é importante lembrar que a localização do ponto com informação quantitativa na Baía de Marajó, referente à Carta de Correntes de Maré, representa uma região não qual pode ocorrer a intensidade assinalada; o que de fato o modelo traduz, conforme pode ser visualizado nas Figuras 6.1 a 6.13.

Em relação à direção, o modelo mostrou-se bastante consistente e fiel à realidade. As simulações utilizando-se de lançamento de derivadores apresentaram-se sugestivas deste aspecto, com resultados muito bons. Destacando-se que os eventuais desvios notados nos mesmos devem-se principalmente à batimetria simplificada quando da digitalização das Cartas Náuticas, onde não existiu uma riqueza de detalhes, mas somente com isóbatas de 5 em 5 metros, situação não interessante para regiões localizadas, como é o caso da Área Portuária de Vila do Conde. Outra aproximação importante se refere ao local de lançamento dos derivadores, uma vez que o modelo permite apenas a locação nos pontos de grade, ocasionando um erro máximo de 21,21 m no ponto de lançamento. Em relação aos 9 lançamentos executados, apenas o primeiro mostrou-se divergente, tendo os demais um bom ajuste. Os dados relativos às direções extraídos do modelo numérico do ponto de Vila do Conde para o ano de 1991 mostrou-se bastante semelhante ao real, possuindo direção preferencial NE e ENE nas vazantes e WSW e SW nas enchentes. A boa correlação das direções ficou evidente quando da validação do modelo numérico utilizando-se a Carta de Correntes de Maré. Com essa base de comparação, as diferenças de direção encontradas foram de 1,65%, evidenciando boa correlação com os dados reais.

Com base na análise da calibração e da validação do modelo, foram propostas correções para o perfil de velocidades na superfície e nas amplitudes de maré, e, por conseguinte, nas velocidades do modelo numérico, que ajustou-se de modo conveniente à realidade.

Finda a calibração, e validado o modelo, a última fase do trabalho consiste na apresentação dos resultados da circulação de corrente de maré para o Rio Pará e Baía de Marajó, onde procurou-se seguir o padrão da Carta de Correntes de Maré (DHN, 1962).

Foram geradas saídas gráficas, abrangendo, respectivamente os períodos de 6, 5, 4, 3, 2 e 1 hora antes da Preamar em Belém e 1, 2, 3, 4, 5 e 6 horas depois da Preamar em Belém, mesmos períodos apresentados na Carta de Correntes de Maré. As saídas gráficas obtidas do modelo numérico podem ser divididas em duas séries distintas. A primeira série é representada por 13 saídas gráficas referentes à Área 1, abrangendo toda a área do estudo (Ver Figuras 6.1 a 6.13). A segunda série é representada por 13 saídas gráficas referentes à Área 3, abrangendo o entorno da área Portuária de Vila do Conde (Ver Figuras 6.14 a 6.26). Salienta-se que as saídas se referem aos dias 14 a 16/04/1991, apresentando além dos vetores de velocidades, as saídas apresentam isolinhas com mesma faixa de velocidade. Destaca-se que as velocidades apresentadas nas saídas já possuem correção, isto é, foram majoradas.

A primeira série de saídas gráficas é a primeira base de comparação e apresenta-se mais geral. Contudo, a segunda série possui maior resolução, cumprindo o compromisso do trabalho no sentido da obtenção de resultados aplicáveis à Engenharia Portuária.

Destaca-se que, os resultados obtidos não consideram o efeito da ação de vento sobre a circulação de correntes, uma vez que constatou-se que as intensidades médias reinantes no mês de abril na Baía de Marajó e Rio Pará são da ordem de 5 nós. Nestas condições, este efeito corresponderia, segundo COSTA & CARMO (1999) a acréscimos ou reduções nas correntes superficiais de 5 a 10 cm/s apenas. Evidentemente, ventos mais intensos alterariam significativamente as velocidades das correntes superficiais.

Tabela 6.1 - Ficha Maregráfica de Colares

FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR <i>Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras</i>					
Nome da Estação :		COLARES – PA			
Localização :		Na Ponta Bacurí – Farol Colares			
Organ. Responsável :		DHN			
Latitude :		00° 55,0' S	Longitude :		48° 17,5' W
Período Analisado :		26/10/59 a 27/11/59	Nº de Componentes :		36
Análise Harmônica :		Método Tidal Liverpool Institute			
Classificação :		Maré Semidiurna.			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		IX H 22 min	Nível Médio (Zo):		174 cm acima do NR.
Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :		331 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		242 cm acima do NR.
Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :		18 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		106 cm acima do NR.
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU ₂	13,2	018
Ssa	-	-	N ₂	22,3	243
Mm	4,5	034	NU ₂	4,3	243
Mf	-	-	M ₂	112,4	268
MTM	-	-	L ₂	6,6	329
Msf	2,4	317	T ₂	2,6	311
Q ₁	0,7	170	S ₂	44,3	311
O ₁	8,7	265	K ₂	12,1	311
M ₁	2,6	169	MO ₃	5,4	092
P ₁	2,9	298	M ₃	0,4	241
K ₁	8,9	298	MK ₃	8,2	117
J ₁	2,8	233	MN ₄	5,3	080
OO ₁	5,8	230	M ₄	12,4	118
MNS ₂	-	-	SN ₄	4,6	287
2N ₂	3,0	218	MS ₄	9,1	155
Referências de Nível: RN cravada em concreto a 0,5 m da quina direita da casa em frente ao farol.					
Obs: Outros Períodos : 30/03/80 a 30/04/80; 04/04/82 a 02/05/82					

Código BNDO: 10545

- 49 -

Fonte: FEMAR (2003).

Figura 6.1 - Saída de direções e velocidades - 06 horas antes da Preamar em Belém

Figura 6.2 - Saída de direções e velocidades - 05 horas antes da Preamar em Belém

Figura 6.3 - Saída de direções e velocidades - 04 horas antes da Preamar em Belém

Figura 6.4 - Saída de direções e velocidades - 03 horas antes da Preamar em Belém

Figura 6.5 - Saída de direções e velocidades - 02 horas antes da Preamar em Belém

Figura 6.6 - Saída de direções e velocidades - 01 hora antes da Preamar em Belém

Figura 6.7 - Saída de direções e velocidades - Preamar em Belém

Figura 6.8 - Saída de direções e velocidades - 01 hora depois da Preamar em Belém

Figura 6.9 - Saída de direções e velocidades - 02 horas depois da Preamar em Belém

Figura 6.10 - Saída de direções e velocidades - 03 horas depois da Preamar em Belém

Figura 6.11 - Saída de direções e velocidades - 04 horas depois da Preamar em Belém

Figura 6.12 - Saída de direções e velocidades - 05 horas depois da Preamar em Belém

Figura 6.13 - Saída de direções e velocidades - 06 horas depois da Preamar em Belém

Figura 6.14 - Saída de direções e velocidades na Área 3 - 06 horas antes da Preamar em Vila do Conde

Figura 6.15 - Saída de direções e velocidades na Área 3 - 05 horas antes da Preamar em Vila do Conde

Figura 6.16 - Saída de direções e velocidades na Área 3 - 04 horas antes da Preamar em Vila do Conde

Figura 6.17 - Saída de direções e velocidades na Área 3 - 03 horas antes da Preamar em Vila do Conde

Figura 6.18 - Saída de direções e velocidades na Área 3 - 02 horas antes da Preamar em Vila do Conde

Figura 6.19 - Saída de direções e velocidades na Área 3 - 01 hora antes da Preamar em Vila do Conde

Figura 6.20 - Saída de direções e velocidades na Área 3 - Preamar em Vila do Conde

Figura 6.21 - Saída de direções e velocidades na Área 3 - 01 hora depois da Preamar em Vila do Conde

Figura 6.22 - Saída de direções e velocidades na Área 3 - 02 horas depois da Preamar em Vila do Conde

Figura 6.23 - Saída de direções e velocidades na Área 3 - 03 horas depois da Preamar em Vila do Conde

Figura 6.24 - Saída de direções e velocidades na Área 3 - 04 horas depois da Preamar em Vila do Conde

Figura 6.25 - Saída de direções e velocidades na Área 3 - 05 horas depois da Preamar em Vila do Conde

Figura 6.26 - Saída de direções e velocidades na Área 3 - 06 horas depois da Preamar em Vila do Conde

7 - CONCLUSÕES

Apesar da baixa resolução espacial e temporal dos dados disponíveis para a calibração e validação do modelo numérico, além da dificuldade na obtenção de informações de acesso restrito, isto é, a grande limitação no levantamento de informações, os resultados obtidos indicam a possibilidade de uso uma ferramenta com grande potencial para a Engenharia Portuária, a qual pode vir a ser aprimorada à medida que novos levantamentos hidrográficos venham a ser realizados.

O objetivo primordial do trabalho foi alcançado, uma vez que os resultados obtidos tanto para Área 1 quanto 3, possibilitam o melhor entendimento a respeito do funcionamento das correntes de maré no Rio Pará e Baía de Marajó, destacando que os mesmos possuem com características particulares uma maior definição na escala e maior amplitude em relação as informações atualmente disponíveis.

De fato, o conhecimento das correntes de maré atuantes são fundamentais para a definição das dimensões planimétricas de canais de acesso (PIANC, 1997); bem como de estratégias operacionais de manobras de navios (CIAGA, 1999), particularmente na Área Portuária de Vila do Conde, na qual não são utilizados rebocadores. Outro aspecto importante diz respeito à estimativa de forças sobre os planos de amarração de navios atracados (OCIMF, 1978). Este conhecimento propicia um incremento na segurança e possibilita a otimização nas manobras de atracação e desatracação dos navios nos píeres.

O entendimento do funcionamento das correntes de maré poderá subsidiar também a elaboração de planos de contingências para possíveis vazamentos de granéis líquidos na área portuária. Nesse aspecto, como sugestão de trabalhos futuros, propõe-se a utilização do vento com uma das entradas de dados.

Objetivo maior do trabalho não foi o de esgotar o assunto e sim de ser um ponto de partida para a realização de novos trabalhos, que virão a somar esforços no entendimento do funcionamento das correntes de maré na Baía de Marajó e Rio Pará. Destacando-se que o trabalho representa um elemento para o planejamento portuário e hidroviário interior, com repercussões locais, regionais e nacionais, como a seleção de novas áreas portuárias, bem como a melhoria das atuais, com reflexos na operação e melhoria das hidrovias, meio de transporte tão importante em uma região carente de outro modo de transporte.

8. BIBLIOGRAFIA

AGERSCHOW, H. et al. **Planning and design of port and marine terminals**. Chichester: John Wiley and Sons, 1983. 320 p. p. 60-90.

ALFREDINI, P. **Análise de métodos de modelação física da ação de correntes sobre leito móvel**. São Paulo, 1983. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

ALFREDINI, P. **A técnica de traçadores em modelos de fundo fixo aplicada a estudos sedimentológicos**. São Paulo, 1988. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

ALFREDINI, P. **Obras e gestão de portos e costas**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO - ANTAQ. **Terminal da Pará Pigmentos**. Disponível em: http://www.transportes.gov.br/bit/terminais_mar/parapigmentos. Acesso em: 12 de nov de 2004.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO - ANTAQ. **Terminal da Rio Capim Caulim**. Disponível em: <http://www.transportes.gov.br/bit/terminais_mar/imerys> Acesso em: 12 de nov de 2004.

ARAÚJO, R. N. **O cálculo do transporte de sedimentos litorâneos: Estudo de caso das praias de Suarão e Cibratel, município de Itanhaém, São Paulo**. São Paulo, 2000. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

ARAÚJO, R. N. **Manual para criação de grades batimétricas**. Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo-Convênio DAEE-USP. Nov, 2002.

BAPTISTELLI, S. C. **Modelação da circulação de correntes de maré e induzidas pelo**

- vento aplicada a estudos de disposição oceânica de efluentes na Praia Grande - SP.** São Paulo, 2003. 168 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- BEARDSLEY, R.C et al. The M2 tide on the Amazon shelf. **Journal of Geophysical Research**, vol. 100, n° C2, p. 2283-2319, 1995.
- CAMPOS, E. J. D. **Estudos da circulação oceânica do Atlântico tropical e na região oeste do Atlântico subtropical sul.** São Paulo, 1995. 114p. Tese de Livre-Docência - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo.
- CARREITO, R. P. **A navegação na Amazônia.** Belém: Editora Calderaro Ltda, 1987. 408 p.
- CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA - CIAGA. **Relatório das Manobras nos terminais de ALUNORTE, Pará Pigmentos e Rio Capim Caulim.** Rio de Janeiro: CIAGA - Simulador de Manobras, 1999.
- CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA - CTH. **Levantamento hidrográfico em trechos da rota de navegação que contorna a costa da Ilha de Marajó, Estado do Pará.** São Paulo: Centro Tecnológico de Hidráulica, 1979.
- COMPANHIA DOCAS DO PARÁ - CDP. Belém. **Porto Vila do Conde.** Disponível em: <http://www.cdp.com.br/porto_conde.htm>. Acesso em: 03 de out. 2004.
- COMPANHIA DOCAS DO PARÁ - CDP. Belém. **Ampliação do Porto Vila do Conde.** Disponível em: <http://www.cdp.com.br/pvc_pdz/obras_civis_amplia_pvc.htm> . Acesso em: 03 de out. 2004.
- COMPANHIA DOCAS DO PARÁ - CDP. Belém. **Segurança no Porto Vila do Conde.** Disponível em: <http://www.cdp.com.br/porto_conde_seguranca.htm>. Acesso em: 04 de out. 2004.
- COSTA & CARMO, M. O., J. A. **Evolução de Hidrocarbonetos Derramados em Zonas Costeiras e Estuarinas.** SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE HIDRÁULICA, 1, 1999, Coimbra.

DYER, K. R. **Estuaries: A physical introduction**. 2 ed. England: Wiley, 1997. 192 p.

DANISH HYDRAULIC INSTITUTE - DHI. **Mike 21 User Guide: Coastal Hydraulics and Oceanography**. Denmark: DHI, 2000.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO - DHN. **Roteiro - Costa Norte - Da Baía do Oiapoque ao Cabo Calcanhar, Rios Amazonas, Jari, Trombetas e Pará**. 11ª ed. 2. reimp. Niterói: DHN, 2000. 232p.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO - DHN. **Cartas de corrente de maré - Rio Pará - de Salinópolis à Belém**. Rio de Janeiro: DHN, 1962.

ELETRONORTE. **Publicação Eletrônica** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <paolo.alfredini@poli.usp.br> em 04 de maio de 2004.

ERNST, F. **Port Planning and Development**. USA: John Wiley & Sons, Massachusetts Institute of Technology. 1987. 795p.

FEMAR - FUNDAÇÃO ESTUDOS DO MAR. **Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras**. Disponível em: <<http://www.femar.com.br/biblioteca/emb/tabelas>>. Acesso em: 07 de nov. 2003.

FRANCO, A. S. **Tides: fundamentals, analysis and prediction**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT, 1988.

GARRISON, T. **Oceanography: An Invitation to Marine Science**. 3º ed. USA: Wadsworth Publishing Company, 1999. 552p.

GARRISON, T. **Essentials of Oceanography**. 2º ed. USA: Brooks/Cole, 2001. 361 p.

HERBISCH, J. B. **Handbook of Coastal and Ocean Engineering**. Houston: Gulf Publishing, 1992.

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS - INPH. **Estudo de correntometria com uso de flutuadores no terminal de Vila do Conde - PA**. Rio de Janeiro: INPH, 2001.

IPPEN, A. T. **Estuary and coastline hydrodynamics**. New York: McGraw-Hill, 1966, 744p.

MARINHA DO BRASIL. **Carta Náutica nº 303** - Brasil - Rio Pará - Do baixo do Espardate a Mosqueiro. 2ª ed. 1983. Escala 1:100.002.

___ **Carta Náutica nº 304** - Brasil - Rio Pará - De Mosqueiro a Abaetetuba. 2ª ed. 1983. Escala 1:99.980.

___ **Carta Náutica nº 305** - Brasil - Rio Pará - Da Ilha do Capim à Ilha da Conceição. 1ª ed. 1974. Escala 1:99.960.

___ **Carta Náutica nº 306** - Brasil - Rio Pará - Da Ilha da Conceição aos Estreitos. 2ª ed. 1993. Escala 1:99.960.

___ **Carta Náutica nº 315** - Brasil - Rio Pará - Da Boca da Vigia à Ilha do Mosqueiro. 1961. Escala 1:49.996.

___ **Carta Náutica nº 316** - Brasil - Rio Pará - De Mosqueiro a Belém. 2ª ed. 1980. Escala 1:49.990.

___ **Carta Náutica nº 320** - Brasil - Rio Pará - Porto de Belém. 1961. Escala 1:50.000.

MASON, J. **Obras portuárias**. Rio de Janeiro: Editora Campos, 1981. p 30-87.

MIRANDA, L. B. et al. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo: EDUSP - Editora da Universidade de São Paulo, 2002. 411p.

OCEANOTÉCNICA. **Medições Maregráficas, Correntográficas e Anemográficas no Porto de Vila do Conde**. Rio de Janeiro: Oceanotécnica, 1991.

OCIMF, **Oil Companies International Marine Forum. Orientações e recomendações a amarração com segurança dos petroleiros de grande porte (VLCC) aos píeres e portos oceânicos**. Tradução da Petrobrás, 1978.

PER BRUUN. **Port Enginneering**. Houston: Gulf Publishing Company, 1976. p 382-416.

PEREIRA, J. E. R. **Identificação de sistemas ressonantes: aplicações na plataforma amazônica**. São Paulo, 1999. Tese (Doutorado) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo.

PIANC - Permanent International Association of Navigation Congresses. **Approach channels - guide for design**. Final Report of the Joint Working Group II - 30 PIANC- IAPH in Cooperation with IMPA and IALA. Brussels (Belgium) and Tokyo (Japan), 1997.

SECRETARIA DOS TRANSPORTES DO ESTADO DO PARÁ - SETRAN/PA. Belém. **Porto Vila do Conde**. Disponível em: <http://setran.pa.gov.br/noticias/noticias.asp?cdnoticias=35>>. Acesso em: 04 de out. 2004.

SORENSEN, R. M. **Basic coastal engineering**. 2 ed. New York: Chapman & Hall, 1997, 297 p.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. ESCOLA POLITÉCNICA. SERVIÇO DE BIBLIOTECAS. **Diretrizes para apresentação de dissertações e teses da USP: documento eletrônico em impresso**. 1 ed. São Paulo: SIBi-USP, 2004. 110 p.

VAN RIJN, L. C. **Sediment Transport, Part III: bed formes and alluvial roughness**. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol. 1110, nº 12, dec, 1984.

YALIN, S. **Theory of hydraulic models**. Mac Millan, 1971.