André Lanfer Marquez

**Estudo de agitação, correntes induzidas por ondas e balanço
sedimentar da região do Porto de Tubarão e Praia de Camburí, Vitória /
ES**

**Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da
Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em Ciências, área de Oceanografia
Química e Geológica.**

Orientador:

Prof. Dr. Paolo Alfredini

São Paulo

2009

Universidade de São Paulo
Instituto Oceanográfico

Estudo de agitação, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar da região do
Porto de Tubarão e Praia de Camburí, Vitória / ES.

André Lanfer Marquez

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como
parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de
Oceanografia Química e Geológica

Julgada em ____/____/____

Prof. Dr.

Conceito

Prof. Dr.

Conceito

Prof. Dr.

Conceito

*Oh! Quem não viu vá ver, a onda do mar crescer.
Olha, que brisa é essa que atravessa a imensidão do mar.
(Lenine)*

Agradecimentos

Como é difícil ser justo no momento de agradecer aqueles com quem convivemos ao longo da vida. Portanto, gostaria de agradecer a todos que direta ou indiretamente, colaboraram para a execução deste trabalho. Muito Obrigado!

Primeiramente gostaria de agradecer à Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica – FCTH, pela bolsa de estudos concedida para a realização deste projeto de estudo.

Agradeço também ao *Ministério de Educación y Cultura de Espana (MEC-ESP)*, e ao *G.I.O.C. (Grupo de Ingeniería Oceanográficas y de Costas)*, em particular aos professores Iñigo Losada, Raul Medina, Maurico Gonzáles e Fernando Mendez pelo estágio em seu grupo de pesquisa.

Gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. Paolo Alfredini, primeiramente pela amizade, mas também pela confiança depositada e por sua generosa disposição de me ajudar sempre que foi necessário.

Agradeço ao Prof. Michael Michaelovitch de Mahiques que me incentivou a continuar este trabalho, mesmo quando eu pensava que não conseguiria.

Aos professores Moises Tessler e Elisabeth Braga, pelo que representam em minha vida, são meus exemplos à seguir.

Ao Jair do xérox, ao Pedro da gráfica, à Cida da biblioteca, aos colegas da graduação e da pós-graduação, vocês fizeram parte deste trabalho.

Aos meus pais, que me ensinaram e me ensinam a ver o mundo de uma forma ética. À minha irmã Tânia pelos momentos sonoros e ao meu irmão Fabio pelos momentos inesquecíveis vivenciados dentro da água salgada.

À Mainara, pelo incentivo diário e pela família. Não conseguiria sem você.

Dedico este trabalho aos meus dois motivos de vida: Nairê e Mairá. Obrigado por existirem.

Agradeço à Deus pela vida, não só a minha mas como à todos os seres vivos.

RESUMO

Os ambientes costeiros podem ser caracterizados por sua grade dinâmica, onde existe o embate entre o continente e o mar. A dinâmica sedimentar da linha de costa constitui conhecimento básico em obras de engenharia e na compreensão do ambiente costeiro. Buscou-se compreender os mecanismos do funcionamento dinâmico da região em torno do Porto de Tubarão, Vitória-ES, através de análises de marés, de clima de ondas, agitação marítima, de correntes induzidas por ondas e transporte sedimentar. Os resultados permitiram algumas interpretações tanto de curtíssimo prazo como de longo prazo. As correntes de marés são particularmente importantes, sobretudo próximo as bocas dos canais de Vitória e da Passagem atingindo valores de até 0,7m/s. As ondas atingem a área com alturas significativas variadas, dependendo do grau de exposição. Na praia de Camburi as ondas dificilmente ultrapassam 1 metro de altura significativa, enquanto na praia Mole ondas de 2.5m de altura significativa ocorrem com certa frequência. A direção da corrente na praia Mole está diretamente relacionadas com as direções de incidência das ondas variando de NE até SW, enquanto sua intensidade está relacionada com as alturas e períodos, variando de 0 até 0.44 m/s. A praia de Camburi, por sua vez apresenta correntes rumo ENE independente da direção de propagação das ondas ao largo da Baía do Espírito Santo. As velocidades médias variam entre 0 e 0,3 m/s. O porto de tubarão serve de abrigo às ondas, influenciando na direção média do fluxo de energia nas praias adjacentes. A longo prazo a tendência da praia de Camburi é de sofrer uma rotação acentuando os processos erosivos na porção ocidental.

ABSTRACT

The coastal zones can be characterized by the huge dynamic battle, continent forces against the ocean forces. The sedimentary dynamic of the coast line is a basic knowledge necessary to carry out engineering features and to understand the natural coastal environment. This work tried to understand the mechanisms that control those dynamics in the region near to the Tubarão Harbour, Vitória- ES. The effects of the tides, wind generated wave clima, wave induced currents and sedimentary transport was analyzed in short and long terms. In short terms, tide currents are specially important near the estuaries mouth (Vitória and Passagem channels), with velocities reaching 0.7m/s. The waves reach the coast line with different significant wave heights, depending on the each site expositions to in coming waves. At Cambury beach the waves hardly gets significant wave height over 1meter, in other hand, at Mole beach, waves with 2,5m significant wave height are quite often. At Mole beach, wave induced currents directions are directly correlated with the wave direction in outside zones, oscillating between NE and SW directions. The current velocities, which depends on wave height and wave period, presents values between 0 and 0,44 m/s. At Cambury beach the currents always goes to ENE, independent of outside wave directions. The velocities varies between 0 and 0,3 m/s. The Tubarão harbour acts like a wall creating shadows for the incident waves in the beaches behind. In long terms, the Mole beach seems to be stable and Cambury Beach seems to rotate some degrees of it mean direction, with the intensifications of the erosional process in the oriental portion of the beach.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
2.	OBJETIVOS	10
3.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	11
3.1.	ENTORNO GEOGRÁFICO	11
3.1.1.	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	11
3.1.2.	GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA.....	12
3.1.3.	ESPAÇOS PROTEGIDOS.....	19
3.1.4.	POPULAÇÃO	20
3.1.5.	INFRA-ESTRUTURAS PORTUÁRIAS.....	21
3.2.	DINÂMICA	22
3.2.1.	VARIAÇÃO DO NÍVEL DO MAR E MARÉ ASTRONÓMICA	22
3.2.2.	CLIMA E REGIMES DE VENTO	23
3.2.3.	AGITAÇÃO MARÍTIMA – ONDAS.....	27
3.2.4.	CORRENTES MARÍTIMAS E MASSAS DE ÁGUA.....	27
3.2.5.	SEDIMENTOS	28
4.	METODOLOGIA	31
4.1.	RESUMO DA METODOLOGIA	31
4.2.	MODELOS NUMÉRICOS EMPREGADOS.....	34
4.2.1.	SMC.....	34
4.2.2.	MSP.....	40
4.2.3.	H2D.....	41
4.3.	BATIMETRIA	44
4.4.	MARE.....	46
4.4.1.	MARE ASTRONOMICA	46
4.4.2.	MARE METEOROLOGICA	47
4.4.3.	CORRENTES DE MARÉ.....	48
4.5.	ONDAS EM ÁGUAS PROFUNDAS	50
4.6.	ONDAS EM PROFUNDIDADES REDUZIDAS	52
4.6.1.	DADOS DO ONDOGRAFO - INPH	53
4.6.2.	PROPAGACÕES ESPECTRAIS DOS CENÁRIOS DO INPH	58
4.6.3.	PROPAGACÕES E RECONSTRUÇÕES DA SÉRIE TEMPORAL DO ECMWF	63
4.7.	ONDAS GERADAS PELO VENTO NO INTERIOR DA BAÍA	82
4.8.	ANÁLISE DE LONGO PRAZO	85
4.9.	ANÁLISE DE CURTO PRAZO	86
4.9.1.	MODELO OLUCA – ONDAS.....	87
4.9.2.	MODELO COPLA – CORRENTES INDUZIDAS POR ONDAS	88
4.9.3.	MODELO MOPLA – TRANSPORTE DE SEDIMENTO	88
4.9.4.	MODELO MANOLO – AGITAÇÃO PORTUÁRIA.....	89
4.9.5.	MODELO MANOLO – RESSONANCIA PORTUARIA.....	92

4.10.	CONSTITUIÇÃO DO MODELO DE FUNCIONAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO	94
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	96
5.1.	BATIMETRIA	96
5.2.	MARÉ.....	97
5.2.1.	MARÉ ASTRONÔMICA E MARÉ METEOROLÓGICA	97
5.2.2.	CORRENTES DE MARE	103
5.3.	ONDAS EM ÁGUAS PROFUNDAS	114
5.4.	ONDAS EM PROFUNDIDADES REDUZIDAS	125
5.4.1.	DADOS DO ONDOGRAFO	125
5.4.2.	PROPAGACÕES DOS CENÁRIOS INPH.....	130
5.4.3.	PROPAGACÕES PARA AS RECONSTRUÇÕES DA SÉRIE TEMPORAL	133
5.5.	ONDAS GERADAS PELO VENTO NO INTERIOR DA BAÍA	152
5.6.	ANÁLISE DE LONGO PRAZO	153
5.7.	ANÁLISE DE CURTO PRAZO	158
5.7.1.	MODELO OLUCA – ONDAS.....	158
5.7.2.	MODELO COPLA – CORRENTES INDUZIDAS POR ONDAS	196
5.7.3.	MODELO MOPLA – TRANSPORTE SEDIMENTAR.....	213
5.7.4.	MODELO MSP – AGITAÇÃO PORTUÁRIA	227
5.7.5.	MODELO MSP – RESSONÂNCIA PORTUÁRIA.....	242
5.8.	MODELO DE FUNCIONAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO	244
6.	CONCLUSÕES.....	251
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	253
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	254

oOo

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo.....	11
Figura 2: Compartimentos de relevo do território brasileiro (IBGE, 2003).	13
Figura 3: Geologia regional (modificado de CPRN – Carta Geológica do Brasil ao milionésimo, 2004).	13
Figura 4: Localização e jurisdição das Unidades de Conservação no Estado do Espírito Santo. (modificado de IPEMA, 2005).....	20
Figura 5: Anticiclone Tropical Estacionário, vetores de vento para o dia 01 de janeiro de 2007.	25
Figura 6: Anticiclone Polar Migratório, vetores de vento para o dia 04 de julho de 2007.....	25
Figura 7: Ilustração da área de estudo, destacando os três diques construídos na praia de Camburi (Adaptado de Albino e Oliveira, 2005).	29
Figura 8: Organograma do SMC.	35
Figura 9: Imagem representativa dos pontos e linhas digitalizados separados por carta Náutica.....	45
Figura 10: Localização dos pontos de controle para a simulação de maré.	50
Figura 11: Grade sobre batimetria utilizada para as propagações de ondas de direção Sul.	59
Figura 12: Grade sobre batimetria utilizada para as propagações de ondas de direção Sudeste.	59
Figura 13: Grade sobre batimetria utilizada para as propagações de ondas de direção Este.	60
Figura 14: Espectro frequencial de entrada no modelo para o cenário de 1m - 7s - Sul.	61
Figura 15: Espectro frequencial de entrada no modelo para o cenário de 1m- 7s- Sudeste.	61
Figura 16: Espectro frequencial de entrada no modelo para o cenário de 2,7m - 12s - Sudeste.	61
Figura 17: Espectro frequencial de entrada no modelo para o cenário de 3,4m – 13,2s - Sudeste.	62
Figura 18: Espectro frequencial de entrada no modelo para o cenário de 5,3m - 15s - Sudeste.	62
Figura 19: Espectro frequencial de entrada no modelo para o cenário de 1m- 7s- Este.	62
Figura 20: Dispersão angular em relação à direção principal.	63
Figura 21: Localização dos pontos de controle.	63
Figuras 22 e 23: Distribuição conjunta para o setor 0° - 45° e distribuição conjunta para o setor 45° - 90°, respectivamente.	65
Figuras 24 e 25: Distribuição conjunta para o setor 90° - 135° e Distribuição conjunta para o setor 135 ° - 180 °, respectivamente.	65
Figura 26: Distribuição conjunta para o setor 180 ° - 225 °.	66
Figura 27: Grade de propagação NE e sub-grade NI, para ondas de Nordeste. Águas profundas – boia.	69
Figura 28: Grade de propagação E1 e sub-grade EI, para ondas de Este. Águas profundas –boia.	69
Figura 29: Grade de propagação SE e sub-grade III, para ondas de Sudeste. Águas profundas – boia.	70
Figura 30: Grade de propagação SS e sub-grade SI, para ondas de Sul. Águas profundas – Boia.....	70
Figura 31: Batimetria de edição com a localização da boia virtual (vermelho) coincidente com a boia do INPH.	71

Figura 32: Esquema de obtenção de um valor específico de onda através dos cenários discretizados utilizados pela função Hiper-cubo.....	72
Figura 33: Comparação da série temporal de altura significativa da boia do INPH e da série do nó de retro-análise ERAS-40.....	73
Figura 34: Gráfico de dispersão entre os dados de Hs Boia e Hs Ecmwf.....	73
Figura 35: Comparação entre as séries temporais de períodos de pico para a Boia e para o nó de retro-análise.....	74
Figura 36: Gráfico de dispersão entre os dados de Tp Boia e Tp Ecmwf.....	74
Figura 37: Comparação da série temporal de altura significativa da boia do INPH e da série do nó de retro-análise ERAS-40 propagada e calibrada na posição da boia.....	76
Figura 38: Gráfico de dispersão entre os valores de altura significativa de onda da boia e do nó de retro-análise propagado e calibrado na posição da boia.....	76
Figura 39: Comparação entre as séries temporais de períodos de pico para a Boia e para o nó de retro-análise propagado e calibrado na posição da Boia.	77
Figura 40: Gráfico de dispersão entre os dados de Tp Boia e Tp Ecmwf.....	77
Figura 41: Série temporal completa calibrada no ponto da boia.	77
Figura 42: Histograma direcional de Hs para a série calibrada na posição da boia.....	78
Figuras 43 e 44: Distribuição conjunta para o setor 0° - 45° e Distribuição conjunta para o setor 45 ° - 90 °, respectivamente.	79
Figuras 45 e 46: Distribuição conjunta para o setor 90° - 135° e distribuição conjunta para o setor 135 ° - 180 °, respectivamente.	79
Figura 47: Distribuição conjunta para o setor 180° - 225°.	79
Figura 48: Grade de propagação direção ENE. Boia – Área de estudo.....	80
Figura 49: Grade de propagação direção ESE. Boia - Área de estudo.....	81
Figura 50: Grade de propagação direção SSE.....	81
Figura 51: Localização dos pontos objetivos na área de estudo.....	82
Figura 52: Pistas de vento para o calculo de ondas geradas por vento local.	84
Figura 53: Grade numérica para os casos de agitação portuária.	89
Figura 54: Contornos portuários do Terminal de Tubarão.	90
Figura 55: Distribuição frequencial para os cenários de ondas irregulares.....	91
Figura 56: Dispersão angular a partir da direção principal para os cenários de ondas irregulares.	91
Figura 57: Localização dos pontos de controle para análise de ressonância portuária.	94
Figura 58: Resultado da Interpolação pelo método <i>Krigging</i>	96
Figura 59: Batimetria da zona de estudo destacando os valores batimétricos.	97
Figura 60: Maré astronômica para o Porto de Vitória de 1958 a 2001, prevista pelo método Almirante Franco.	98
Figura 61: Maré meteorológica, maré astronômica e registro do marégrafo para o Porto de Vitória durante os anos de 1961 e 1962.	99

Figura 62: Maré meteorológica, maré astronômica e registro do marégrafo para o Porto de Vitória durante um período do ano de 1983.....	100
Figura 63: Maré meteorológica, maré astronômica e registro de marégrafo para o Terminal de Tubarão de 07 de novembro a 11 de dezembro de 1972.....	100
Figura 64: Maré meteorológica, maré astronômica e registro de marégrafo para o Terminal de Tubarão de 05 de junho a 08 de julho de 1975.....	101
Figura 65: Maré meteorológica, maré astronômica e registro de marégrafo para o Terminal de Tubarão de 01 de maio a 01 de maio de 1979.	101
Figura 66: Maré meteorológica, maré astronômica e registro de marégrafo para o Terminal de Tubarão de 21 de julho a 15 de setembro de 1991.	102
Figura 67: Maré meteorológica, maré astronômica e registro de marégrafo para o Terminal de Tubarão de 01 de agosto a 14 de setembro de 1999.	102
Figura 68: Superfície livre para o instante 03h.	105
Figura 69: Magnitude e vetores de correntes para o instante 03h.	105
Figura 70: Superfície livre para o instante 06h.	106
Figura 71: Magnitude e vetores de correntes para o instante 06h.	106
Figura 72: Superfície livre para o instante 09h.	107
Figura 73: Magnitude de correntes para o instante 09h.	107
Figura 74: Superfície para o instante 12h.....	108
Figura 75: Magnitude e vetores de correntes para o instante 12h.	108
Figuras 76 e 77: Vetores de corrente para um máximo de vazante e gráfico de variação das velocidades de corrente para a boca do canal de Vitória, respectivamente (Extraído de Menezes, 2005).....	110
Figura 78: Superfície livre e as componentes u e v para o ponto 1.	111
Figura 79: Magnitude de correntes para o ponto 1.....	111
Figura 80: Superfície livre e as componentes u e v para o ponto 2.	111
Figura 81: Magnitude de correntes para o ponto 2.....	111
Figura 82: Superfície livre e as componentes u e v para o ponto 3.	111
Figura 83: Magnitude de correntes para o ponto 3.....	111
Figura 84: Superfície livre e as componentes u e v para o ponto 4.	112
Figura 85: Magnitude de correntes para o ponto 4.....	112
Figura 86: Superfície livre e as componentes u e v para o ponto 5.	112
Figura 87: Magnitude de correntes para o ponto 5.....	112
Figura 88: Superfície livre e as componentes u e v para o ponto 6.	112
Figura 89: Magnitude de correntes para o ponto 6.....	112
Figura 90: Superfície livre e as componentes u e v para o ponto 7.	113
Figura 91: Magnitude de correntes para o ponto 7.....	113
Figura 92 : Magnitude de corrente na máxima enchente, as regiões de intensificação estão apontadas pelas setas (Adaptado de Menezes, 2005).	113

Figura 93: Série temporal de altura significativa de onda.....	115
Figura 94: Série temporal de período médio de onda.	115
Figura 95: Histograma direcional de alturas significativas de ondas.....	115
Figura 96: Máximos Mensais.....	116
Figura 97: Ajuste da função Normal para os dados de Altura Significativa ECMWF.....	117
Figura 98: Ajuste da função Weibull de mínimos para os dados de Altura Significativa ECMWF.....	117
Figura 99: Ajuste da função Log-Normal para os dados de Altura Significativa ECMWF.....	117
Figura 100: Ajuste da função Gumbel de máximos para os dados de Altura Significativa ECMWF.	118
Figura 101: Histograma de Alturas Significativas e os respectivos ajustes estatísticos.	118
Figura 102: Regime médio de altura significativa calculado com a função que melhor ajuste obteve (Gumbel de máximos).	119
Figura 103: Função de distribuição dos dados de altura significativa, destacando os valores de inter-quartis.	119
Figura 104: Histograma direcional de altura significativa com os Quartis para cada direção.	120
Figura 105: Ajuste da função Gumbel de máximos para os dados de período de pico ECMWF.	121
Figura 106: Ajuste da função Normal para os dados de período de pico ECMWF.....	121
Figura 107: Ajuste da função Weibul de mínimos para os dados de período de pico ECMWF.	121
Figura 108: Ajuste da função Log-Normal para os dados de período de pico ECMWF.	122
Figura 109: Regime médio de período de pico calculado com a função que melhor ajuste obteve. (Log-normal).....	122
Figura 110: Função de distribuição dos dados de período de pico, destacando os valores de inter-quartis.	122
Figura 111: Histograma direcional de período de pico com os quartis para cada direção.....	123
Figura 112: Regime extremal de alturas significativas.	124
Figura 113: Regime extremal de períodos de pico.....	124
Figura 114: Série temporal de variação de Altura Significativa de Onda.	126
Figura 115: Série temporal de variação do Período de Pico.	126
Figura 116: Histograma direcional para alturas de ondas.	127
Figura 117: Histograma direcional de períodos de pico.	127
Figura 118: Máximos mensais.....	128
Figura 119: Histograma de alturas significativas de ondas e ajustes das funções de distribuição à série de dados.	128
Figura 120: Função de Probabilidade de não superação, ou simplesmente regime médio.....	129
Figura 121: Histograma direcional com os quartis de distribuição de Hs.....	130
Figura 122: Espectro inicial e espectros re-compilados nos três pontos de controle para a simulação 1m 7s Este.....	131
Figura 123: Espectro inicial e espectros re-compilados nos três pontos de controle para a simulação 1m 7s Sul.....	131

Figura 124: Espectro inicial e espectros re-compilados nos três pontos de controle para a simulação 1m 7s Sudeste.....	132
Figura 125: Espectro inicial e espectros re-compilados nos três pontos de controle para a simulação 2,7m 12s Sudeste.....	132
Figura 126: Espectro inicial e espectros re-compilados nos três pontos de controle para a simulação 3,4 m 13,2s Sudeste.....	132
Figura 127: Espectro inicial e espectros re-compilados nos três pontos de controle para a simulação 5,3 m 15s Sudeste.....	133
Figura 128: Figura de localização dos pontos objetivo.....	134
Figura 129: Série temporal de Hs no ponto objetivo 1.....	135
Figuras 130 e 131: Função de distribuição de Hs e Tp no ponto objetivo 1.....	135
Figuras 132 e 133: Histograma direcional de Hs e Tp no ponto objetivo 1.....	135
Figuras 134 e 135: Regime médio e regime extremal para altura significativa para o ponto 1, respectivamente.....	136
Figuras 136 e 137: Regime médio e regime extremal para Período de Pico para o ponto 1, respectivamente.....	136
Figura 138: Série temporal no ponto objetivo 2.....	137
Figuras 139 e 140: Função de distribuição de Hs e Tp no ponto objetivo 2.....	137
Figuras 141 e 142: Histograma direcional de Hs e Tp no ponto objetivo 2.....	137
Figuras 143 e 144: Regime médio e regime extremal para altura significativa para o ponto 2, respectivamente.....	138
Figuras 145 e 146: Regime médio e regime extremal para Período de Pico para o ponto 2, respectivamente.....	138
Figura 147: Série temporal no ponto objetivo 3.....	139
Figuras 148 e 149: Função de distribuição de Hs e Tp no ponto objetivo 3.....	139
Figuras 150 e 151: Histograma direcional de Hs e Tp no ponto objetivo 3.....	139
Figuras 152 e 153: Regime médio e regime extremal para altura significativa para o ponto 3, respectivamente.....	140
Figuras 154 e 155: Regime médio e regime extremal para Período de Pico para o ponto 3, respectivamente.....	140
Figura 156: Série temporal no ponto objetivo 4.....	141
Figuras 157 e 158: Função de distribuição de Hs e Tp no ponto objetivo 4.....	141
Figuras 159 e 160: Histograma direcional de Hs e Tp no ponto objetivo 4.....	141
Figuras 161 e 162: Regime médio e regime extremal para altura significativa para o ponto 4, respectivamente.....	142
Figuras 163 e 164: Regime médio e regime extremal para Período de Pico para o ponto 4, respectivamente.....	142
Figura 165: Série temporal no ponto objetivo 5.....	143

Figuras 166 e 167: Função de distribuição de Hs e Tp no ponto objetivo 5.....	143
Figuras 168 e 169: Histograma direcional de Hs e Tp no ponto objetivo 5.....	143
Figuras 170 e 171: Regime médio e regime extremal para altura significativa para o ponto 5, respectivamente.	144
Figuras 172 e 173: Regime médio e regime extremal para Período de Pico para o ponto 5, respectivamente.	144
Figura 174: Série temporal no ponto objetivo 6.....	145
Figuras 175 e 176: Função de distribuição de Hs e Tp no ponto objetivo 6.....	145
Figuras 177 e 178: Histograma direcional de Hs e Tp no ponto objetivo 6.....	145
Figuras 179 e 180: Regime médio e regime extremal para altura significativa para o ponto 6, respectivamente.	146
Figuras 181 e 182: Regime médio e regime extremal para Período de Pico para o ponto 6, respectivamente.	146
Figura 183: Série temporal no ponto objetivo 7.....	147
Figuras 184 e 185: Função de distribuição de Hs e Tp no ponto objetivo 7.....	147
Figuras 186 e 187: Histograma direcional de Hs e Tp no ponto objetivo 7.....	147
Figuras 188 e 189: Regime médio e regime extremal para altura significativa para o ponto 7, respectivamente.	148
Figuras 190 e 191: Regime médio e regime extremal para Período de Pico para o ponto 7, respectivamente.	148
Figura 192: Série temporal no ponto objetivo 8.....	149
Figuras 193 e 194: Função de distribuição de Hs e Tp no ponto objetivo 8.....	149
Figuras 195 e 196: Histograma direcional de Hs e Tp no ponto objetivo 8.....	149
Figuras 197 e 198: Regime médio e regime extremal para altura significativa para o ponto 8, respectivamente.	150
Figuras 199 e 200: Regime médio e regime extremal para Período de Pico para o ponto 8, respectivamente.	150
Figura 201: Parábola de forma em planta da Praia de Camburi, obtida pelo ponto de difração do molhe de Praia Mole do Porto de Tubarão. (Fluxo Médio de Energia: S44E).	153
Figura 202: Parábola ajustada para a Ponta da Praia de Camburi com o ponto de difração do Costão.....	154
Figura 203: Parábola ajustada para a ponta da Praia de Camburi com o ponto de difração no Ilhote.....	154
Figura 204: Ajuste final, com a composição dos pontos de difração.	155
Figura 205: Perfil de equilíbrio para a porção central da Praia de Camburi.....	156
Figura 206: Gráfico de iso-alturas para a condição Hs= 1m, Tp= 7s e dir =N22,5E.....	160
Figura 207: Gráfico de vetores de onda para a condição Hs= 1m, Tp= 7s e Dir = N22,5E.....	161
Figura 208: Gráfico de iso-alturas para a condição Hs= 2,7m, Tp=10s e Dir = N22,5E.....	162
Figura 209: Gráfico de vetores de onda na condição Hs= 2,7m, Tp=10s e Dir = N22,5E.....	163
Figura 210: Gráfico de iso-alturas para a condição Hs= 1m, Tp=7s e Dir = N67,5E.....	164

Figura 211: Gráfico de vetores de onda para a condição $H_s=1\text{m}$, $T_p=7\text{s}$ e $\text{Dir} = \text{N}67,5\text{E}$	165
Figura 212: Gráfico de iso-alturas para a condição $H_s=2,7\text{m}$, $T_p=10\text{s}$ e $\text{Dir} = \text{N}67,5\text{E}$	166
Figura 213: Gráfico de vetores para a condição $H_s=2,7\text{m}$, $T_p=10\text{s}$ e $\text{Dir} = \text{N}67,5\text{E}$	167
Figura 214: Gráfico de iso-alturas para a condição $H_s=1\text{m}$, $T_p=7\text{s}$ e $\text{Dir} = \text{S}90\text{E}$	168
Figura 215: Gráfico de vetores para a condição $H_s=1\text{m}$, $T_p=7\text{s}$ e $\text{Dir} = \text{S}90\text{E}$	169
Figura 216: Gráfico de iso-alturas para a condição $H_s=2,7\text{m}$, $T_p=10\text{s}$ e $\text{Dir} = \text{S}90\text{E}$	170
Figura 217: Gráfico de vetores para a condição $H_s=1\text{m}$, $T_p=7\text{s}$ e $\text{Dir} = \text{S}90\text{E}$	171
Figura 218: Gráfico de iso-alturas para a condição $H_s=1\text{m}$, $T_p=7\text{s}$, $\text{S}67,5\text{E}$	172
Figura 219: Gráfico de vetores de ondas para a condição $H_s=1\text{m}$, $T_p=7\text{s}$, $\text{S}67,5\text{E}$	173
Figura 220: Gráfico de iso-alturas para a condição $H_s=2,7\text{m}$, $T_p=10\text{s}$, $\text{S}67,5\text{E}$	174
Figura 221: Gráfico de vetores de onda para a condição $H_s=2,7\text{m}$, $T_p=10\text{s}$, $\text{S}67,5\text{E}$	175
Figura 222: Gráfico de iso-alturas para a condição $H_s=1\text{m}$, $T_p=7\text{s}$, $\text{S}45,0\text{E}$	176
Figura 223: Gráfico de iso-alturas para a condição $H_s=1\text{m}$, $T_p=7\text{s}$, $\text{S}45,0\text{E}$	177
Figura 224: Gráfico de iso-alturas para a condição $H_s=2,7\text{m}$, $T_p=10\text{s}$, $\text{S}45,0\text{E}$	178
Figura 225: Gráfico de vetores de ondas para a condição $H_s=2,7\text{m}$, $T_p=10\text{s}$, $\text{S}45,0\text{E}$	179
Figura 226: Gráfico de iso-alturas para a condição $H_s=1\text{m}$, $T_p=7\text{s}$, $\text{S}22,5\text{E}$	180
Figura 227: Gráfico de vetores de ondas para a condição $H_s=1\text{m}$, $T_p=7\text{s}$, $\text{S}22,5\text{E}$	181
Figura 228: Gráfico de iso-alturas para a condição $H_s=2,7\text{m}$, $T_p=10\text{s}$, $\text{S}22,5\text{E}$	182
Figura 229: Gráfico de iso-alturas para a condição $H_s=2,7\text{m}$, $T_p=10\text{s}$, $\text{S}22,5\text{E}$	183
Figura 230: Gráfico de iso-alturas para a condição $H_s=1\text{m}$, $T_p=7\text{s}$, $\text{S}22,5\text{W}$	184
Figura 231: Gráfico de vetores de ondas para a condição $H_s=1\text{m}$, $T_p=7\text{s}$, $\text{S}22,5\text{W}$	185
Figura 232: Gráfico de iso-alturas para a condição $H_s=2,7\text{m}$, $T_p=10\text{s}$, $\text{S}22,5\text{W}$	186
Figura 233: Gráfico de v para a condição $H_s=2,7\text{m}$, $T_p=10\text{s}$, $\text{S}22,5\text{W}$	187
Figura 234: Superfície livre para o cenário $H_s 2\text{m}$, $T_p 8\text{s}$ e $\text{Dir} \text{N}22,5\text{E}$	188
Figura 235: Superfície livre para o cenário $H_s 4\text{m}$, $T_p 8\text{s}$ e $\text{Dir} \text{N}67,5\text{E}$	189
Figura 236: Superfície livre para o cenário $H_s 3\text{m}$, $T_p 8\text{s}$ e $\text{Dir} \text{S}67,5\text{E}$	190
Figura 237: Superfície livre para o cenário $H_s 4\text{m}$, $T_p 10\text{s}$ e $\text{Dir} \text{S}22,5\text{E}$	191
Figura 238: Superfície livre para o cenário $H_s 4\text{m}$, $T_p 10\text{s}$ e $\text{Dir} \text{S}22,5\text{W}$	192
Figura 239: Foto do tipo de arrebentação na Praia de Camburi. (Extraído de Soares, 2005)	195
Figura 240: Vetores magnitude de corrente para o cenário $H_s 1\text{m}$, $T_p 7\text{s}$ e $\text{dir} \text{N}22,5\text{E}$	197
Figura 241: Vetores magnitude de corrente para o cenário $H_s 2,7\text{m}$, $T_p 10\text{s}$ e $\text{dir} \text{N}22,5\text{E}$	198
Figura 242: Vetores magnitude de corrente para o cenário $H_s 1\text{m}$, $T_p 7\text{s}$ e $\text{dir} \text{N}67,5\text{E}$	199
Figura 243: Vetores magnitude de corrente para o cenário $H_s 2,7\text{m}$, $T_p 10\text{s}$ e $\text{dir} \text{N}67,5\text{E}$	200
Figura 244: Vetores magnitude de corrente para o cenário $H_s 1\text{m}$, $T_p 7\text{s}$ e $\text{dir} \text{S}90\text{E}$	201
Figura 245: Vetores magnitude de corrente para o cenário $H_s 2,7\text{m}$, $T_p 10\text{s}$ e $\text{dir} \text{S}90\text{E}$	202
Figura 246: Vetores magnitude de corrente para o cenário $H_s 1\text{m}$, $T_p 7\text{s}$ e $\text{dir} \text{S}67,5\text{E}$	203
Figura 247: Vetores magnitude de corrente para o cenário $H_s 2,7\text{m}$, $T_p 10\text{s}$ e $\text{dir} \text{S}67,5\text{E}$	204
Figura 248: Vetores magnitude de corrente para o cenário $H_s 1\text{m}$, $T_p 7\text{s}$ e $\text{dir} \text{S}45,5\text{E}$	205

Figura 249: Vetores magnitude de corrente para o cenário Hs 2,7m, Tp 10s e dir S45E.....	206
Figura 250: Vetores magnitude de corrente para o cenário Hs 1m, Tp 7s e dir S22,5E.....	207
Figura 251: Vetores magnitude de corrente para o cenário Hs 2,7m, Tp 10s e dir S22,5E.....	208
Figura 252: Vetores magnitude de corrente para o cenário Hs 1m, Tp 7s e dir S22,5W.....	209
Figura 253: Vetores magnitude de corrente para o cenário Hs 2,7m, Tp 10s e dir S22,5W.....	210
Figura 254: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=1m, Tp= 7s e dir= N675E.	215
Figura 255: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=2,7m, Tp= 10s e dir= N67,5E. ...	216
Figura 256: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=1m, Tp= 7s e dir= S90E.	217
Figura 257: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=2,7m, Tp= 10s e dir= S90E.	218
Figura 258: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=1m, Tp= 7s e dir= S67,5E.	219
Figura 259: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=2,7m, Tp= 10s e dir= S67,5E. ...	220
Figura 260: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=1m, Tp= 7s e dir= S45E.	221
Figura 261: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=2,7m, Tp= 10s e dir= S45E.	222
Figura 262: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=1m, Tp= 7s e dir= S22,5E.	223
Figura 263: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=2,7m, Tp= 10s e dir= S22,5E. ...	224
Figura 264: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=1m, Tp= 7s e dir= S22,5W.	225
Figura 265: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=2,7m, Tp= 10s e dir= S22,5W. ...	226
Figura 266: Gráfico de iso-alturas para o cenário 3,4m 13s Este, monocromático.	230
Figura 267: Gráfico de superfície livre para uma fase aleatória para o cenário 3,4m 13s este monocromático.	230
Figura 268: Gráfico de iso-alturas para o cenário 3,4m 13s ESE monocromático.	231
Figura 269: Gráfico de superfície livre para uma fase aleatória para o cenário 3,4m 13s ESE monocromático.	231
Figura 270: Gráfico de iso-alturas para o cenário 3,4m 13s SE monocromático.	232
Figura 271: Gráfico de superfície livre para uma fase aleatória para o cenário 3,4m 13s SE monocromático.	232
Figura 272: Gráfico de iso-alturas para o cenário 3,4m 13s SSE monocromático.	233
Figura 273: Gráfico de superfície livre para uma fase aleatória para o cenário 3,4m 13s SSE monocromático.	233
Figura 274: Gráfico de iso-alturas para o cenário 3,4m 13s Sul monocromático.	234
Figura 275: Gráfico de superfície livre para uma fase aleatória para o cenário 3,4m 13s Sul monocromático.	234
Figura 276: Gráfico de iso-alturas para o cenário 3,4m 13s SWS monocromático.	235
Figura 277: Gráfico de superfície livre para uma fase aleatória para o cenário 3,4m 13s SWS monocromático.	235
Figura 278: Gráfico de superfície livre para o cenário 1m 10s E espectral.	236
Figura 279: Gráfico de iso-alturas máximas para o cenário 1m 10s E espectral.	236
Figura 280: Gráfico de superfície livre para o cenário 1m 10s SE espectral.	237

Figura 281: Gráfico de iso-alturas para o cenário 1m 10s SE espectral.	237
Figura 282: Gráfico de superfície livre para o cenário 1m 10s S espectral.	238
Figura 283: Gráfico de iso-alturas para o cenário 1m 10s S espectral.	238
Figura 284: Gráfico de superfície livre para o cenário 1m 10s SWS espectral.	239
Figura 285: Gráfico de iso-alturas para o cenário 1m 10s SWS espectral.	239
Figura 286: Fração da altura significativa em relação à onda incidente, para o cenário 1m 7s direção este. (Extraído de Soares & Chacaltana, 2006)	241
Figura 287: Fração da altura significativa em relação à onda incidente, para o cenário 1m 7s direção sudeste. (Extraído de Soares & Chacaltana, 2006)	241
Figura 288: Malha de cálculo para o fenômeno de ressonância portuária devido a ondas infra- gravitatórias. Os números representam a localização dos pontos de controle.	243
Figura 289: Resultados da propagação de uma sequência de períodos.	243

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estágios evolutivos desde o final do Terciário até o presente (Adaptado de Suguio, 1999 e Dominguez, 1982).	15
Tabela 3: Cenários propagados até a posição da boia.	66
Tabela 4: Coeficientes de ajuste linear para Altura Significativa por direção.	75
Tabela 5: Coeficientes de ajuste linear para Período de Pico por direção.	75
Tabela 6: Condições de vento analisadas para os ventos locais	84
Tabela 7 : Altura significativa e período de pico para as ondas geradas pelo vento local para a Praia de Camburi.....	152
Tabela 8: Valores médios de correntes obtidos com a execução do modelo Copla para as diferentes condições.....	213

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

As zonas costeiras são caracterizadas por seus diferentes ambientes, e pelo frágil equilíbrio dinâmico entre os o mar a terra e o ar. Os sedimentos encontrados na linha de costa e em ambientes marinhos rasos são provenientes predominantemente das intempéries e erosão de rochas continentais, ou seja, são terrígenos. Os produtos sólidos mais importantes da erosão são os fragmentos de rocha, os grãos de quartzo e os argilo-minerais. O quartzo é o mineral mais abundante em depósitos arenosos, já os argilo-minerais silicáticos são os constituintes mais importantes em regiões lamosas de planícies de maré e estuários. Os argilo-minerais são constituídos de grãos muito finos e que se agregam facilmente dando aos sedimentos as características de coesão. Somente em áreas onde a disponibilidade de sedimentos terrígenos é nula, ou muito limitada, as praias de quartzo são substituídas por areias carbonáticas. De modo similar, as pequenas partículas dos argilo-minerais das lamas de regiões estuarinas e planícies de maré são substituídos por grãos igualmente pequenos de carbonato, formando as lamas carbonáticas.

Os sedimentos do intemperismo e erosão continental são carregados até a margem continental principalmente pelos rios, ventos, gelo e erupções vulcânicas. A importância relativa de cada um destes agentes varia localmente.

Estando na zona costeira, estes sedimentos são afetados pela intensa dinâmica característica destas zonas. A maré, as ondas, as correntes, o tamanho dos grãos, a declividade de fundo e a intensidade e direção dos ventos são fatores que determinam o

transporte de sedimentos costeiros.(Davis, 1985)..De uma forma geral, o transporte de sedimentos pode ocorrer em suspensão, arrasto ou saltitação, sendo que a soma destes determina o chamado transporte total da carga de sedimentos. (White; Grandon, 1996)

Segundo Komar (1979;), o principal agente na erosão costeira são as ondas, as quais devem ser examinadas a geração, as características próprias, a viagem do trem de ondas, o tipo de arrebentação, etc. Alfredini (2005) destaca que existem ao menos dois tipos de movimentos gerados a partir da arrebentação das ondas, que são os longitudinais (*longshore*) e os transversais (*cross-shore*). Estes movimentos têm início quando as ondas ao propagam para águas mais rasas e começam a interagir com o fundo, provocando o avanço oscilatório das partículas de água no rumo da propagação das ondas.

Por outro lado, os ambientes costeiros tendem a um equilíbrio dinâmico, em que energia disponível para carrear sedimentos tende a se equalizar com os tamanhos e quantidade de grãos disponíveis, bem como com as litologias e arcabouços tectônicos. Quando este frágil equilíbrio é perdido, situações erosionais e deposicionais ganham importância. Muehe (1994) sugere que as praias são depósitos de sedimentos, mais comumente arenosos, acumulados por ação de ondas que, por apresentarem mobilidade, se ajustam às condições de ondas e marés. Quando o frágil equilíbrio é perdido, eventos deposicionais e erosivos acontecem.

As mudanças morfológicas podem ocorrer em diversas escalas de tempo:

- (1)Instantânea, de segundo à horas;
- (2) de eventos , da ordem de horas à dias;
- (3) sazonais, de estações do ano,;

-
- (4) anuais, de anos a década;
 - (5) de Engenharia, de décadas até uma centena de anos e
 - (6) geológica de centenas à milênios.

Neste trabalho chamaremos de curto período às variabilidades da ordem de eventos (horas a dias) e de longo período as variabilidades da ordem de tempo de vida útil de obras costeiras de Engenharia (décadas até 100 anos).

No curto período, as principais mudanças ocorrem decorrentes das passagens de sistemas meteorológicos, da frequência e intensidade dos mesmos e do tempo de recuperação da praia.(Morton *et. al.*, 1995)..

Short (1979) e Wright *et al.* (1979) sugeriram que os estados morfodinâmicos de praia e da zona de surf são também outros fatores importantes nos processos erosivos de escala global e de curta duração. Wright & Short (1984) propuseram uma classificação dos estágios morfodinâmicos que variam entre dissipativa e refletiva, do menos energético ao mais energético, com quatro estágios intermediários.

A erosão praial é um dos fenômenos mais impressionantes entre os processos costeiros, transformando-se em um problema emergencial na maioria das áreas costeiras do mundo.(Suguio, 1999).. As relações de causa e efeitos dos processos de erosão costeira têm sido exaustivamente discutidas na literatura. Komar(1983) sugeriu que a erosão costeira é o resultado de uma complexa interação de processos físicos, bem como de movimentos combinados da água induzidos pelas ondas incidentes, marés, ondas de tempestade e correntes litorâneas interagindo com a costa.

A dinâmica de praia constitui, portanto, conhecimento elementar para obras de Engenharia, como construção de avenidas beira-mar, dragagens em desembocaduras de

rios, construção de portos, marinas ou molhes, planos diretores de ocupação da orla, dentre outros. Em outras palavras deve-se tentar compreender como serão afetadas as praias próximas a um futuro empreendimento a fim de minimizar os impactos. Portanto, os estudos de agitação, correntes de maré, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar em regiões costeiras se mostram imprescindíveis para um bom manejo dos recursos naturais e necessidades antrópicas.

Dentre os agentes promovedores do transporte de sedimento, as ondas representam um papel muito importante, devido à sua grande carga energética e poder de ressuspensão, sobretudo em regiões de micro-marés.(Dean & Dalrymple, 2002). Entretanto, estudos de propagação de ondas marítimas em zonas costeiras têm associado um elevado grau de complexidade e morosidade, tanto na preparação de bases batimétricas, como na análise de resultados obtidos através de modelos numéricos e físicos.(Zózimo et. al. 2005). Descrever a hidrodinâmica da propagação e deformação de ondas, com base em um Sistema de Informação Geográfica, é necessário para minimizar a morosidade destes tipos de estudos.

Alguns países vêm desenvolvendo pesquisas de longo período sobre geomorfologia costeira, com caráter interdisciplinar: Austrália, Dinamarca, Espanha, Estados Unidos, França, Holanda, Inglaterra, Portugal, entre outros, com destaque para os trabalhos de Haxel & Holman (2004) e Wright *et al* (1979). No Brasil, ao contrário, têm-se desenvolvido pesquisas isoladas, com caráter interdisciplinar muito incipiente. Vale destacar o trabalho desenvolvido sobre variação temporal de curto período do volume de sedimento por Martins *et al* (2004), Martins (2006) e Karniol-Marquez (2007).

Sobre um outro viés, a utilização de técnicas preditivas vem se mostrando bastante eficaz, tanto no que tange a tendências naturais de um determinado ambiente, como também para mensurar as alterações causadas por uma intervenção antrópica, como a construção ou expansão de um porto.

Focando nas questões portuárias, as análises de agitação, reflexão, energia do sistema, correntes associadas e resultantes sedimentares são de fundamental importância para um planejamento de implantação/expansão portuário adequado. Entretanto, para análises confiáveis de um ambiente costeiro específico é necessário identificar as principais variáveis envolvidas e as teorias que melhor se aplicam para a área de estudo.

No caso dos estudos de ondas, podemos escolher entre teorias mais simples, que descrevem ondas senoidais, passando por teorias de ondas em águas rasas, tais como as equações modificadas de Boussinesq, até teorias baseadas nas equações de conservação de massa e momento, como são as equações hidrodinâmicas de Navier-Stokes. A escolha da teoria de ondas empregada é muito importante na resolução de problemas, sendo fundamental a análise das limitações de cada teoria ao empregá-las em casos reais.

No marco da teoria linear de ondas, Eckart (1952 apud Berkhoff 1972) y Berkhoff (1972, 1976) propuseram uma melhoria, introduzindo a abordagem para duas dimensões, que é adequada para estudar processos de refração e difração em grandes extensões. A esta teoria deram o nome de equação da declividade suave. Uma descrição completa pode ser encontrada em Liu (1990). Em suma, a equação da declividade suave pode ser utilizada desde águas profundas até profundidades reduzidas, sempre e quando a

hipótesees da linearidade for aceitável. Esta teoria é bastante econômica em termos de gasto de tempo de cálculo, ou simplesmente, tempo computacional.

Tão importante quanto a eleição da teoria adequada, ou até mais, são as fontes de dados. Podemos destacar que existem 3 principais tipos de fontes de dados de ondas: Dados observacionais, dados instrumentais e dados oriundos de modelos matemáticos.

Os dados observacionais são aqueles obtidos por meio de um observador, ou seja, uma pessoa que ao olhar para as ondas estima seu tamanho, período e direção. A principal fonte deste tipo de dados são os barcos ou navios em rota, que observam e tomam nota das características das ondas que estão atravessando. Vale frisar que devido às decisões de navegação dos comandantes, estes evitam atravessar grandes tempestades, o que acarreta uma diminuição das alturas máximas observadas, além da possível falta de acurácia e precisão do observador. Outro fator preocupante neste tipo de dados é sua distribuição geográfica, pois estes são restritos às rotas comerciais existentes, não cobrindo todos os rincões dos oceanos. Por outro lado, existem observações de barcos e navios em rota a mais de 5 décadas, o que garante uma grande cobertura temporal.

Os dados instrumentais são aqueles aqisitados por meio de instrumentos de medida. Existe uma grande variedade de sistemas e equipamentos de medida, desde os mais simples, como uma regua métrica colocada na área em que se quer medir as ondas, até os mais sofisticados, passando por sensores de pressão, ondógrafos direcionais, radares e até altímetros instalados em satélites. Os instrumento têm suas vantagens e desvantagens, específicas e inerentes ao método de medição, entretanto podemos

generalizar que os dados instrumentais são bastante precisos e com uma margem de erro conhecida.

Os dados instrumentais de ondas mais comumente encontrados nos oceanos são os adquiridos por meio de ondógrafos. Estes podem ser direcionais (que medem a direção de onda) ou escalares (que não medem a direção). Os ondógrafos têm como principal vantagem a aquisição continuada ao longo do tempo. Embora haja dificuldades técnicas em manter um ondógrafo funcionando por muito tempo, pode-se dizer que a continuidade temporal é garantida. Porém, cada ondógrafo está restrito a um ponto específico no espaço. As séries mais longas têm hoje aproximadamente 4 décadas. Infelizmente, no Brasil, o mais comum são séries de curta duração (meses/alguns anos).

Os dados coletados por altímetros instalados em satélites são relativamente recentes, tendo menos de 20 anos a primeira implementação deste recurso em um satélite. De uma forma geral, dados de altímetros de satélites são muito bons em termos de precisão e distribuição espacial, porém não constituem séries temporais, sendo que a repetição de um mesmo ponto no oceano ao longo do tempo ocorre com uma baixa frequência, ou seja a série temporal é muitíssimo esparsa.

Os modelos numéricos utilizam expressões matemáticas para simular fenômenos físicos e podem auxiliar na compreensão de diversas questões. Hoje em dia já existem banco de dados de ondas gerados por modelos matemáticos, como é o caso dos projetos de retro-análise desenvolvidos pelo NCEP, pela agência Européia ECMWF, pela agência japonesa (JRA), dentre outros. Outro exemplo de aplicação são os modelos matemáticos que simulam a interação das ondas com a batimetria, com o vento e com elas mesmas. Tais modelos têm como vantagem sua versatilidade, em outras palavras, uma

vez com as geometrias iniciais (batimetria e linha de costa) pode-se estudar uma infinidade de casos modificando as condições de ondas. Os modelos matemáticos possuem algumas limitações inerentes às equações, condições de contorno, esquema numérico, validação e rotinas de pré e pós processamento de dados.

Dentro desta perspectiva, o estudo de agitação marítima e suas consequentes correntes induzidas e transportes sedimentares em regiões costeiras pode ser feito utilizando simulações numéricas baseadas em dados de ondas, marés e condicionantes meteorológicas providas de modelos de retro-análise e de dados instrumentais.

Este trabalho buscou compreender como as ondas incidentes impactam a área de estudo tanto no tocante à agitação marítima, como na sua consequente resposta sedimentar, por meio de modelos numéricos e formulações matemáticas. Sendo que a área de estudo está compreendida no litoral central da costa capixaba, mais especificamente na Praia de Camburi e no Terminal de Tubarão, pertencentes ao município de Vitória.

Esta dissertação foi desenvolvida com o apoio financeiro da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica – FCTH, na forma de bolsa de mestrado. Este trabalho contou também com o apoio do *Ministerio de Educación y Cultura de España*, para a realização de um intercâmbio acadêmico internacional no *Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos (GIOC)*, pertencente à *Escuela Técnica Superior de Caminos Canales y Puertos (E.T.S.C.C.P.)* da Universidad de Cantabria (UC) / Espanha, durante Outubro de 2007 à Fevereiro de 2009. Os estudos deste Curso de Mestrado foram realizados no âmbito do

Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Química e Geológica do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.

2. OBJETIVOS

Este estudo teve como objetivo principal elaborar um modelo de funcionamento da área de estudo com relação às dinâmicas hidrossedimentares. A constituição do modelo de funcionamento foi feita sob uma perspectiva inter, multi e trans-disciplinar, com atenção especial na relação entre condições meteorológicas, ação de ondas, marés e transporte sedimentar em duas escalas de tempo diferentes. O objetivo principal foi atingido empregando equações matemáticas e modelos numéricos, bem como dados instrumentais e de retro-análise, com o intuito de dar subsídios à elaboração do modelo de funcionamento da área de estudo. Comprovada esta metodologia, poder-se-ia credenciá-la para aplicações semelhantes em outras localidades da costa brasileira.

Como objetivos específicos, este trabalho almejou avaliar a área de estudo nos seguintes aspectos:

- Análise quantitativa das condições de agitação marítima
- Análise quantitativa das correntes associadas à ondas
- Análise qualitativa e quantitativa dos regimes de variação da superfície livre (maré) e correntes de maré.
- Análise qualitativa das possíveis resultantes sedimentares de correntes da ação de ondas nas praias próximas ao Terminal de Tubarão, ou seja Praia de Camburi e Praia Mole.
- Análise qualitativa de longo prazo para a estabilidade da linha de costa para a Praia de Camburi.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1. ENTORNO GEOGRÁFICO

3.1.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende um segmento da costa do Espírito Santo, mais precisamente o litoral sul e central da costa do Espírito Santo . O enfoque deste trabalho foi nas imediações do Terminal de Tubarão e na Praia de Camburi. (Figura 1).

Figura 1: Localização da área de estudo.

O segmento da costa capixaba contemplada neste estudo foi escolhido com o intuito de realizar um estudo hidrodinâmico enfocando a agitação marítima, circulação de

correntes e balanço sedimentar. Foi dada uma ênfase para a região do Terminal de Tubarão e para a Praia de Camburi, embora possamos dizer que a área de estudo compreende desde Guaraparí até Barra do Riacho, devido ao fato de que as condições de ondas apresentam uma certa uniformidade regional.

A Praia de Camburi está localizada nas coordenadas geográficas (datum : WGS-84) -20,28S e -40,28W e possui uma extensão de aproximadamente 11km.

3.1.2. GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

A área de estudo está compreendida dentro dos escudos Atlânticos com embasamentos pré-cambrianos (Almeida et al., 1973). Esta região costeira está localizada na porção sudeste da margem continental brasileira, classificada como uma margem do tipo Atlântico e caracterizada pela presença de baixa atividade sísmica.

Pode-se dizer que estão presentes na área de estudo diferentes tipologias e litologias de rochas. Destacam-se os depósitos sedimentares quaternários, bacias e coberturas sedimentares fanerozóicas (os tabuleiros terciários) e Cinturões Móveis Neoproterozóicos, pertencentes ao ciclo brasileiro (600 a 650 milhões de anos) (Almeida et al., 1973). Para o litoral capixaba Martin et al. (1996) corroboram que existem três unidades principais, os afloramentos e promontórios cristalinos pré-cambrianos, os tabuleiros terciários da Formação Barreiras e as planícies costeiras quaternárias.

A Figura 02 mostra os principais compartimentos de relevo do Brasil, o retângulo azul destaca a área de estudo, em que se nota a presença de Serras, Tabuleiros e

pequenas Planícies. A Figura 03 apresenta a geologia regional, constituída de rochas sedimentares terciárias, de quaternárias e os embasamentos cristalinos.

Figura 2: Compartimentos de relevo do território brasileiro (IBGE, 2003).

Figura 3: Geologia regional (modificado de CPRN – Carta Geológica do Brasil ao milionésimo, 2004).

Com relação aos arcabouços tectônicos, a região centro-sul do Espírito Santo caracteriza-se por um relevo montanhoso com maciços rochosos realçados, a exemplo da Pedra Azul, ícone do Estado, e da Serra do Caparaó, localizada a oeste da área. Esse setor orogênico insere-se no contexto da formação de uma porção do super-continente Gondwana Oeste, durante a estabilização da Plataforma Sul-americana, no final do Neoproterozóico.. (Almeida *et al.* 2000).

Esta área caracteriza-se pela existência de rochas metamórficas de alto grau e corpos intrusivos relacionados à evolução de um orógeno de idade brasileira. Neste conjunto desenvolveu-se um arcabouço tectônico com zonas de cisalhamento dúcteis de alto ângulo regionais, com espessuras variadas, formadas por rochas miloníticas que mostram, em planta, um padrão estrutural anastomosado.(Karniol & Machado)

A formação Barreiras é o nome dado ao conjunto de sedimentos, geralmente inconsolidados, de origem continental, de idade terciária, que atualmente, se encontram dispostos ao longo da região costeira, sua abrangência vai desde o Norte do Estado do Rio de Janeiro até o Estado do Pará. (Bigarella & Andrade, 1964 apud Santos, 2005). São bastante comuns, principalmente na porção centro-norte do litoral capixaba.

A evolução sedimentar Quaternária e Holocênica das plataformas internas continentais e linha de costa é condicionada, em parte, pelas variações relativas do nível do mar. Martin *et. al* (1982) apontam que ao longo do Quaternário todo o litoral brasileiro esteve submetido a eventos de transgressões e regressões marinhas, que estão relacionados a eventos isostáticos, podendo estes ser de origem tectônica-tectonoeustasia, de alteração do geóide – geoidoeustasia e/ou climática –

glaucoeustasia. A tabela 01 apresenta os estágios evolutivos para a formação do litoral do Estado do Espírito Santo, bem como de grande parte da costa brasileira.

Tabela 1: Estágios evolutivos desde o final do Terciário até o presente (Adaptado de Suguio, 1999 e Dominguez, 1982).

<p>ESTAGIO A</p> <p>Foi nesta a fase em que os sedimentos que constituem a Formação Barreiras foram depositados. O período geológico correspondente era o Plioceno (3 a 4 milhões de anos A.P.). O nível do mar encontrava-se mais baixo que o atual e as condições climáticas eram secas com chuvas escassas.</p>
<p>ESTAGIO B</p> <p>A deposição da Formação Barreiras foi interrompida, pois o clima passou a adquirir condições úmidas, havendo, portanto, uma pequena elevação do nível relativo do mar.</p>
<p>ESTAGIO C</p> <p>Neste período ocorreu a transgressão marinha antiga e a formação das falésias em sedimentos terciários. Após ter ocorrido o máximo da transgressão, e durante a regressão que se seguiu, o clima voltou a adquirir características semi-áridas, o que resultou na formação de novos depósitos continentais na forma de leques aluviais.</p>

ESTAGIO D

Nível máximo alcançado pela última transgressão, ocorrida há aproximadamente 120.000 anos A.P., correspondendo à Transgressão Cananéia. Parte dos sedimentos continentais foi erodida e houve formação de falésias e estuários.

ESTAGIO E

Este estágio é marcado pela regressão do nível do mar que sucedeu à transgressão citada no estágio anterior. Ressalta-se, também, que neste estágio formaram-se os terraços marinhos pleistocênicos.

ESTAGIO F

Período em que o fato de maior relevância foi a última transgressão, Transgressão de Santos, ocorrida há aproximadamente 5.000 anos A.P. A elevação do nível do mar promoveu a erosão e o afogamento das planícies costeiras bem como a escavação de vales na Formação Barreiras o que resultou no desenvolvimento de estuários e ilhas barreiras.

ESTAGIO G

Na área posterior às ilhas barreiras formadas do estágio anterior instalaram-se sistemas lagunares nos quais as desembocaduras fluviais deram origem a deltas intralagunares.

ESTAGIO H

O abaixamento do nível relativo do mar, que sucedeu ao máximo transgressivo, ocorrido há aproximadamente 5.100 anos A.P., traduziu-se na forma de terraços marinhos, a partir da ilha barreira original, com a progradação da linha de costa.

O primeiro grande evento de origem climática, ou glácio - eustático, foi a Transgressão Cananéia, que apresenta diversas correlações pelo mundo e tem um nível máximo de até 8 metros acima do nível atual. Este máximo ocorreu em torno dos 120000 anos AP, e foi seguida de um movimento regressivo bastante intenso, que culminou com um nível mínimo de 110 metros abaixo do nível atual a 18000 AP (Martin, *et. al.*, 1982).

Segundo Suguio & Martin (1978), o evento transgressivo cujo máximo ocorreu a 5100 anos A. P., denominado transgressão Santos, elevou o nível médio do mar em aproximadamente 4m, com relação aos níveis atuais, e deixou vestígios em quase todo o litoral sudeste brasileiro, inclusive em Vitória. Martin *et. al.* (1985) também corrobora que as principais evidências estão concentradas no litoral sudeste brasileiro, o que induz a pensar que se trata a um levantamento regional de toda a superfície geoidal antes de 5100 anos A.P., por não apresentarem correlações em outros locais no mundo. Entretanto, Dominguez (1982), conseguiu reconhecer três gerações de terraços holocênicos correspondentes a três estágios de emersão posteriores a 5100 A. P., para o rio Jequitinhonha. A subsequente regressão, que nos traz aos níveis do mar atuais, foi

responsável pela gradual transformação de lagunas e lagos, culminando pela consolidação do estuário e planície costeira da área de estudo.

Martin *et. al.* (1996), propuseram que o litoral do Estado do Espírito Santo pode ser dividido em cinco setores, que serão descritos a seguir.

O setor um, estende-se da divisa com o Estado da Bahia até a cidade de Conceição da Barra. Este setor apresenta planícies costeiras associadas às desembocaduras de rios. O setor dois corresponde à planície deltaica do Rio Doce, é onde o depósito quaternário tem seu maior desenvolvimento, estando a formação Barreiras relativamente longe da costa. O terceiro setor se estende do município de Barra do Riacho até a Ponta de Tubarão, tendo como característica marcante o fraco, ou às vezes inexistente, desenvolvimento dos depósitos quaternários, sendo que, em determinados locais, as falésias da formação Barreiras estão em contato direto com o mar. O setor quatro se estende da Baía do Espírito Santo até a foz do rio Itapemirim e é caracterizado pelos afloramentos de rochas cristalinas pré-cambrianas em contato com os depósitos quaternários intercalados com afloramentos da Formação Barreiras. Por fim o quinto setor, que está compreendido entre a foz do rio Itapemirim até a divisa com o Estado do Rio de Janeiro, tem como característica marcante seus depósitos quaternários limitados pelas falésias vivas da Formação Barreiras.

A plataforma continental em frente a Vitória é relativamente mais estreita, sendo que a isóbata de 20 metros acompanha a configuração da linha de costa, havendo frequentes paleovales e bancos arenosos isolados (Albino, 1999). A plataforma continental sofre um progressivo alargamento em direção à Bacia de Campos (RJ). O

recobrimento sedimentar é, em sua maioria, de areias terrígenas até a isóbata de 20 metros e de areias e lamas calcárias em profundidades maiores. (Muehe, 1998)

3.1.3. ESPAÇOS PROTEGIDOS

A primeira iniciativa no sentido de se estabelecerem unidades de conservação no Estado do Espírito Santo foi em setembro de 1941, quando o Governo do Estado criou a Reserva Florestal Barra Seca, no município de Linhares, com cerca de 10000 ha, através do Decreto-Lei nº 12.958. A partir deste momento foram sendo criadas as demais áreas de proteção, que existem hoje, no Estado do Espírito Santo (Figura 4).

Podemos destacar o manguesal da Baía de Vitória e as dunas da Praia Mole como sendo as unidades de conservação possivelmente afetadas pelo Terminal de Tubarão.

Figura 4: Localização e jurisdição das Unidades de Conservação no Estado do Espírito Santo. (modificado de IPEMA, 2005)

3.1.4. POPULAÇÃO

A população que vive na zona de influência direta do Terminal de Tubarão está contida nos municípios de Vitória e Vila Velha e somam mais de três milhões de pessoas. Pode-se dizer que a influência do porto vai mais além destes municípios uma vez que o Terminal de Tubarão exporta minérios extraídos principalmente do Estado de Minas Gerais. Portanto, seria conveniente pensar na área de influência de todo o processo produtivo e logístico de forma integrada. Isso suporia uma área de influência muito maior, chegando facilmente a mais de cinco milhões de pessoas.

3.1.5. INFRA-ESTRUTURAS PORTUÁRIAS

O Terminal de Tubarão é um porto privado pertencente à Companhia Vale do Rio Doce. Está localizado no Município de Vitória e é considerado o maior porto marítimo de transporte de minério de ferro e pellets do mundo. O porto está equipado com dois berços capazes de receber navios de até 300 mil pb. Movimenta atualmente 65 milhões de toneladas de minério de ferro e pellets por ano e tem capacidade para movimentar 80 milhões de toneladas por ano. Tubarão também movimenta cerca de 1,5 milhão de toneladas de grãos por ano, com a expectativa de movimentação de 3,5 milhões de toneladas por ano até o ano 2012. Essa movimentação levou o porto a expandir-se, originando o terminal de Produtos Diversos – TPD.

O *Terminal de Produtos Diversos de Tubarão — TPD*, uma extensão do Terminal de Tubarão, constitui-se de três berços, que juntos têm capacidade para 6 milhões de toneladas por ano. São eles: um berço de granéis líquidos, com capacidade de 2 milhões de metros cúbicos, utilizado pela Petrobras; um berço exclusivo para grãos, com capacidade para 3 milhões de toneladas por ano; e, por último, um de cargas gerais, que tem como prioridade a movimentação de contêineres e fertilizantes, com capacidade de movimentar até 40 contêineres por hora.

Além do Terminal de Tubarão, à área de estudo apresenta outro porto importante, o Porto de Vitória. Ele opera com carga geral, principalmente bobina de papel, celulose, açúcar, granéis produtos agrícolas e siderúrgicos. Possui 4 berços de atracação,

totalizando 755 metros de comprimento e profundidades entre 9 e 10,5 metros. (CODESA, 2009).

O Terminal de Regência, de Barra do Riacho, o Terminal Portuário de Vila Velha e o Porto de Ubu, são mais alguns dos portos existentes no Estado do Espírito Santo, conferindo a este Estado uma destacada posição no transporte marítimo brasileiro.

3.2. DINÂMICA

3.2.1. VARIAÇÃO DO NÍVEL DO MAR E MARÉ ASTRONÓMICA

A costa capixaba é caracterizada por regimes de micro-marés, onde a componente meteorológica tem um papel relevante. Segundo as análises harmônicas da Femar – Fundação de Estudos do Mar (FEMAR, 2000), o regime astronômico de maré pode ser caracterizado como sendo semi-diurno e de micro-marés (Tabela 2).

FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR

Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras

Nome da Estação :		TUBARÃO (PORTO) - ES			
Localização :		No Terminal Principal			
Organ. Responsável :		CVRD / DHN			
Latitude :		20° 17,1' S	Longitude :		40° 14,5' W
Período Analisado :		07/06/75 a 08/07/75	N° de Componentes :		36
Análise Harmônica :		Método Tidal Liverpool Institute			
Classificação :		Maré Semidiurna.			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		III H 20 min	Nível Médio (Zo):		82 cm acima do NR.
Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :		148 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		104 cm acima do NR.
Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :		16 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		60 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	3,3	347
Ssa	-	-	N ₂	9,8	069
Mm	7,8	275	NU ₂	1,9	069
Mf	-	-	M ₂	44,2	088
MTM	-	-	L ₂	5,6	135
Msf	11,3	069	T ₂	1,3	092
Q ₁	3,1	056	S ₂	21,9	092
O ₁	9,1	093	K ₂	5,9	092
M ₁	1,3	111	MO ₃	0,2	278
P ₁	1,8	159	M ₃	0,5	174
K ₁	5,5	159	MK ₁	0,5	072
J ₁	1,1	052	MN ₄	0,7	025
OO ₁	1,5	313	M ₄	0,7	087
MNS ₂	-	-	SN ₄	1,3	108
2N ₂	1,3	050	MS ₄	0,4	274
Referências de Nível: RN-1 na cabeceira do Pier, junto ao primeiro cabeço					
Obs: Outros Períodos: 20/10/65 a 20/11/65 ; 09/11/72 a 10/12/72 ; 07/05/65 a 08/07/65 ; 01/05/79 a 01/06/79 . A CVRD dispõe de mais dados. Consta das Tábuas das Marés					

Código BNDO: 40255

- 162 -

Tabela: Constantes harmônicas para o Terminal de Tubarão (FEMAR, 2000).

3.2.2. CLIMA E REGIMES DE VENTO

A compreensão da combinação dos efeitos meteorológicos e oceânicos se faz necessária, uma vez que ventos fortes e temporais, geralmente associados à passagem de sistemas frontais, podem causar um aumento excessivo do nível do mar e afetar, dentre outros, os sistemas de correntes costeiras (Camargo, 1998).

Na latitude da área de estudo (20°S), as condições atmosféricas no Atlântico Sul não são tão severas quanto em seu análogo no Atlântico Norte (20°N), ou ainda as

condições no Mar do Norte ou mesmo no Pacífico, onde ocorrem grandes tempestades e furacões. No entanto, em algumas situações, consideráveis sistemas frontais atingem o litoral brasileiro, provocando estragos significativos (Candella, 1997).

O Brasil é atingido por duas principais massas de ar: provenientes de Anticiclones Subtropicais Marítimos Atlântico e de Anticiclones Polares Migratórios (Fonzar, 1994).

Segundo Fonzar (1994), referindo-se à circulação atmosférica na América do Sul, entre 15° e 40° de latitude sul, comenta que há dois anticiclones subtropicais marítimos: um no Atlântico e outro no Pacífico, ambos com média de 1020 mb de pressão para os meses de janeiro. No mês de julho esta média se mantém para o Pacífico e aumenta para 1025 mb no Atlântico. Uma das características dos Anticiclones Subtropicais Marítimos Atlânticos é de que, nos meses de julho, os campos de pressão se formam mais próximos da costa.

Estes Anticiclones Tropicais são considerados estacionários e conhecidos como anticiclones quentes, geradores dos alísios que atingem a costa leste do continente. Penetram pelo interior do Brasil desde a região Norte brasileira, passando pelo nordeste chegando até o Rio Grande do Sul. Os principais ventos que atingem a zona de estudo são de direção NE, ENE e SE, os dois primeiros correlacionados aos anticiclones Tropicais, chamados de ventos alísios e o ultimo correlacionado ao Anticiclone Polar Mável. (Albino, 1999).

A outra principal massa de ar que atinge o Brasil são os Anticiclones Polares Móveis, formados nas áreas de alta latitude, nas regiões polares e subpolares. Ao contrário dos Anticiclones Tropicais, estes são móveis e frios e se enfraquecem com a altitude e com a diminuição da latitude. Eles também penetram no interior do continente, entretanto isto ocorre geralmente pela costa do Rio Grande do Sul e sobem por dentro,

chegando, as vezes, até a porção sul da Amazônia brasileira. As Figuras 06 e 07 apresentam dois momentos distintos: na primeira predomina o Anticiclone Tropical , caracterizado pelo grande giro atmosférico em cima do Atlântico e na segunda o Anticiclone Polar Móvel, destacado com uma circunferência vermelha.

Figura 5: Anticiclone Tropical Estacionário, vetores de vento para o dia 01 de janeiro de 2007.

Figura 6: Anticiclone Polar Migratório, vetores de vento para o dia 04 de julho de 2007.

Os ventos na área de estudo apresentam direções e intensidades muito variadas. Na tabela 03, extraída do relatório anual da rede automática de monitoramento da

qualidade do ar da Grande Vitória 2007 (SEAMA, 2008),. A estação da Enseada do Suá é a mais próxima da baía, constatando-se que as velocidades máximas dos ventos incidentes na área variaram de 0,0 m/s até 9,2m/s, havendo um predomínio das direções meteorológicas de NNE, NE ENE. Estas direções somadas perfazem mais de 54% do tempo total de ocorrência dos ventos. Os valores médios variaram entre 1,22m/s e 4,98m/s, dependendo da direção considerada. Estes dados mostram que a área apresenta ventos constantes, seja de uma direção ou de outra, o período de calmaria é desprezável, pois sua ocorrência é de apenas 0,04% do tempo para a estação considerada.

Tabela 3: Condições de vento para a região. Dados medidos pela rede automática de monitoramento da qualidade do ar da Grande Vitória. (Extraído de SEAMA, 2008).

ESTACÃO		PARÂMETROS	DIREÇÃO DO VENTO															
			N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
CARAPINA	Vel. Média (m/s)	2,11	2,13	2,91	2,77	1,90	1,78	2,00	1,99	2,43	1,80	1,09	1,13	1,01	0,75	0,99	1,77	0,00
	Vel. Máxima (m/s)	4,40	4,30	5,10	4,40	3,74	3,00	2,80	3,50	4,30	2,70	1,50	1,90	1,40	1,01	1,67	4,06	0,00
	Vel. Mínima (m/s)	0,50	0,50	0,52	0,60	0,84	0,60	0,95	0,60	0,61	0,93	0,60	0,54	0,50	0,50	0,57	0,50	0,00
	Ocorrência (%)	24,14	14,36	19,67	6,87	2,08	2,19	1,87	3,95	4,58	1,14	1,25	1,66	2,39	1,98	2,08	8,32	1,46
ENSEADA DO SUÁ	Vel. Média (m/s)	1,79	2,15	3,19	4,98	4,65	3,03	2,28	2,53	2,86	2,75	2,66	1,48	1,24	1,22	1,62	1,56	0,00
	Vel. Máxima (m/s)	3,70	3,90	6,20	9,20	8,60	5,20	4,30	4,91	5,40	6,74	5,71	3,30	2,00	3,09	1,86	3,35	0,00
	Vel. Mínima (m/s)	1,00	0,80	0,80	0,90	1,60	1,10	0,90	1,00	0,88	0,66	0,60	0,59	0,60	0,60	0,60	0,80	0,00
	Ocorrência (%)	3,90	10,02	25,00	19,05	4,58	3,68	2,40	3,17	4,41	6,51	6,72	2,10	2,10	1,28	2,48	2,57	0,04
CARIACICA	Vel. Média (m/s)	1,91	1,78	2,04	1,96	2,18	2,08	2,39	2,21	2,36	1,95	1,86	1,49	1,01	0,81	0,83	1,22	0,00
	Vel. Máxima (m/s)	4,70	4,20	4,30	4,13	4,00	4,00	4,40	5,30	5,40	5,10	5,80	3,70	3,40	1,70	3,10	3,79	0,00
	Vel. Mínima (m/s)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,00
	Ocorrência (%)	15,54	21,26	14,44	6,49	3,63	2,40	3,53	2,62	4,87	4,61	6,23	5,46	2,29	1,45	1,37	2,59	1,22

3.2.3. AGITAÇÃO MARÍTIMA – ONDAS

Segundo Fonzar (1994), o Anticiclone Tropical Atlântico e o Anticiclone Polar Migratório são os sistemas de ventos geradores de ondas que atingem o litoral do Estado do Espírito Santo. De uma forma geral, pode-se dizer que as ondas que atingem o litoral capixaba apresentam períodos relativamente pequenos, uma vez que as pistas de vento (extensão donde sopra um vento numa mesma direção) são relativamente curtas. Podemos ainda dizer que o Anticiclone Tropical Atlântico possui um caráter estacionário e gera na área de estudo ondas vindas de Leste/Nordeste com alturas da ordem de 0,5 a 1 m e períodos da ordem dos 5 a 7 segundos. Por outro lado, o Anticiclone Polar Migratório é móvel e pode ser gerado em duas regiões distintas: na região patagônica e na região Antártica. Devido ao seu grande “fechth” (pista de sopro de vento) e intensidades de vento mais fortes, estes geram ondas com alturas e períodos maiores, aparecendo por vezes ondas superiores a 2,5m de alturas significativas e períodos de pico superiores a 10 segundos.

3.2.4. CORRENTES MARÍTIMAS E MASSAS DE ÁGUA

A principal corrente de superfície na costa brasileira é a corrente do Brasil, formada por águas quentes e salinas. Esta corrente se forma na bifurcação da corrente Equatorial onde um braço forma a corrente Norte do Brasil e o outro segue rumo ao Sul originando a Corrente do Brasil. Esta corrente apresenta seu núcleo a uma profundidade de

aproximadamente 50m e pode apresentar vórtices estacionários e não estacionários, a partir da região de Abrolhos. (Silvera et al., 2001).

Outro aspecto fundamental da costa brasileira é a mistura de massas de água, que origina a água costeira. As águas costeiras são formadas pela mescla de águas de descarga de rios, pelas águas tropicais (trazidas pela corrente do Brasil e pela Água Central do Atlântico Sul (ACAS), que por ser mais densa flui por debaixo da água tropical e em alguns momentos específicos aflora na plataforma interna da costa brasileira, sobretudo em pontos específicos da costa como em Cabo-Frio- RJ. Estes eventos de ressurgência estão relacionados a condições climáticas específicas e a meandramentos da corrente do Brasil (Campos et al., 1999 e Silveira et al., 2001).

3.2.5. SEDIMENTOS

O transporte de sedimentos em regiões costeiras é fruto da interação entre as diversas dinâmicas existentes na interface água-terra-ar. Entretanto, nas porções mais rasas e próximas à costa, as ondas são o principal agente transportador por meio de suas correntes induzidas. Estas correntes são geradas devido à arrebentação de ondas.

Em 1999, a Praia de Camburi sofreu um processo de engordamento artificial, como solução de um processo erosivo iniciado na década de 1970 com a instalação do Terminal de Tubarão e a urbanização da orla. Foram descartados 730.000 m³ de areia, entre os espigões 1 e 2 (Setor I) (Figura 08) e 240.000 m³ de areia entre os espigões 2 e 3 (Setor II), representando um incremento de 90,22% e 151,81% respectivamente ao volume dos dois setores da praia. (Prata & Albino, 2005).

Figura 7: Ilustração da área de estudo, destacando os três diques construídos na praia de Camburi (Adaptado de Albino e Oliveira, 2005).

Em praias arenosas relativamente extensas, podemos assumir que as variações ocorrem no eixo da praia (Longitudinalmente – em planta) e em perfil. Em outras palavras, pode-se decompor a praia em planta e perfis. Esta abordagem possibilita estudar a praia segundo suas variabilidades (Dean, 1977).

Segundo Pedruzzi & Albino, 2005, que utilizaram o modelo de perfil de equilíbrio proposto por Dean (1977), os resultados obtidos indicam uma tendência estável e progradante da Praia de Camburi, confirmando o sucesso do engordamento de 1999, apesar da perda de materiais finos.

Através da avaliação morfotextural, concluiu-se que existe uma relação entre a granulometria aliada à sua respectiva morfologia praial com a perda de sedimentos finos no perfil emerso e à presença de areia muito fina no início dos perfis submersos. (Pedruzzi & Albino, 2005).

As variações granulométricas sofridas pela Praia de Camburi revelam os diferentes agentes atuantes sobre os sedimentos, ora perdendo materiais finos e ora perdendo materiais de fração mais grossa. (Prata & Albino, 2005).

4. METODOLOGIA

4.1. RESUMO DA METODOLOGIA

A execução deste trabalho foi organizada em três principais etapas: (1) Consulta bibliográfica para obtenção de dados, (2) Utilização de equações matemáticas e de modelos numéricos para estudos hidro-sedimentológicos e (3) Elaboração de um modelo de funcionamento da área e comparação com a literatura.

A obtenção dos dados consistiu na busca em diversas fontes de dados que pudessem ser úteis para a elaboração deste trabalho.

Os cálculos com equações matemáticas e a utilização de modelos numéricos constituíram-se na etapa mais custosa, pois além dos cálculos e execuções propriamente ditos, foram necessários tratamentos dos dados coletados e gerados afim de torná-los utilizáveis, homogêneos e uniformes.

Os dados levantados para a área de estudo estavam em formatos distintos uns dos outros, sendo que muitos precisavam ser tratados de alguma forma. Os tratamentos consistiram basicamente em ajustes matemáticos com o intuito de homogeneizar e completar as séries de dados. Além destes tratamentos foram realizadas análises estatísticas e foram desenhados os resultados destas análises. Por fim, podemos listar os

principais conjuntos de dados utilizados: Dados topobatimétricos, maregráficos, anemométricos, ondométricos, sedimentológicos e sócio-ambientais.

De uma forma geral, através dos modelos numéricos e das equações empregadas foi possível conseguir uma série de sub-produtos não menos importantes entre si.

Foi gerada uma batimetria geral da área por meio de dados de carta náutica e folhas de bordo. Dados de dois marégrafos (Porto de Vitória e Terminal de Tubarão), foram obtidos junto ao BNDO, o que possibilitou a análise de marés astronômicas e meteorológicas.

Foi calibrado um modelo hidrodinâmico bi-dimensional, com intuito de quantificar a importância das correntes de maré na região.

Foram recompostas as séries temporais de ondas do modelo ERAS-40 da agência européia – ECMWF, devidamente calibradas, para sete pontos de interesse. No intuito de verificar a consistência dos modelos matemáticos utilizados, foram analisados os dados de ondógrafo obtidos juntos ao INPH. Os cenários típicos obtidos através deste conjunto de dados foram comparados com os obtidos dos dados de retro-análise da base do ECMWF. A etapa seguinte consistiu em calibrar a série temporal de retro-análise com os dados da boia do INPH.

A situação atual de estabilidade da linha de costa foi analisada de duas formas: estabilidade a longo prazo e variabilidade de curto prazo. Para o longo prazo utilizaram-se as formulações teóricas de Hsu, para determinar a forma de equilíbrio em planta da

linha de costa. Os perfis teóricos de Dean (Dean, 1977) foram utilizados para analisar os perfis de equilíbrio das praias afetadas pela presença do Terminal de Tubarão.

Para a variabilidade de curto prazo utilizou-se o pacote de ferramentas do SMC . Os efeitos da presença do Terminal de Tubarão nas correntes induzidas por ondas e o balanço sedimentar devido a estas correntes foram avaliados por meio de três modelos numéricos. O primeiro calcula as alturas de ondas, levando em consideração os processos de refração-difração, reflexão, dissipação de energia por arrebentação, e interações entre ondas. Trata-se de um modelo que resolve a equação da declividade suave em sua versão parabólica. O segundo modelo empregado é um modelo que calcula as correntes induzidas por ondas através dos resultados de alturas de ondas e direção de propagação do modelo anterior, por meio de equações que resolvem os gradientes de pressão. O terceiro modelo é o de transporte de sedimentos, que utiliza os resultados do modelo de correntes, por meio das equações de transporte de sedimento para fluxos ondulatórios proposto por Soulsby. Este último modelo apresenta apenas resultados qualitativos, ou semi-quantitativos, devido às grandes margens de erros em modelos deste tipo.

O estudo de agitação marítima foi realizado através de um modelo que resolve a equação de declividade suave em sua versão elíptica (Panchang & Demirbilek, 1998), através do modelo MSP desenvolvido pelo grupo de Engenharia Oceanográfica e de Costas da Universidade de Cantábria (GIOC-UC), Espanha.

Para as ondas geradas pelo vento no interior da baía foi utilizada a formulação de GSM , e calculados as alturas e períodos significativos gerados para o ponto central da Praia de Camburi nas diversas direções do vento.

Para o estudo de ressonância de ondas longas também se propôs a utilização de um modelo baseado na equação da declividade suave em sua versão elíptica. Para tal, foram executados cenários de diferentes períodos de ondas longas de 30 a 300 segundos.

Por fim, de posse dos dados levantados nas etapas anteriores, buscou-se compreender o funcionamento hidrodinâmico – sedimentar da área de estudo.

4.2. MODELOS NUMÉRICOS EMPREGADOS

4.2.1. SMC

O *Sistema de Modelado Costero* (SMC) é uma aplicação informática que integra uma série de modelos numéricos que permitem implementar uma metodologia de estudo e projeto de atuações no litoral. Foi desenvolvido pelo *Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas* (G.I.O.C.) da *Universidad de Cantabria* (U.C.), Espanha, como parte do projeto intitulado “*Modelo de Ayuda a la gestión del Litoral*” desenvolvido para a *Dirección General de Costas del Ministerio de Medio Ambiente/ESP*.

O SMC está organizado em cinco módulos fundamentais: *Pré-proceso*, *Corto-plazo*, *Médio y Largo plazo*, *Modelado del terreno* e *Tutor*.

Os módulos de análises propriamente ditas são os de curto prazo e de médio-longo prazo, que por sua vez são divididos em: Curto-prazo: Análises de Perfil e Análises em planta (Ondas – *Oluca*; Correntes – *Copla*; Transporte de sedimentos – *Mopla*).

Longo prazo: Análises de Perfil e Análises em planta. A Figura 09 apresenta um esquema da organização geral do SMC.

Figura 8: Organograma do SMC.

Cada um dos modelos apresenta sua estrutura própria, com equações e esquemas numéricos independentes. Mais informações acerca da estrutura do SMC pode ser encontradas em (SMC, 2004).

4.2.1.1. MODELO OLUCA--SP

O modelo OLUCA é um modelo de propagação de ondas baseado nas equações de declividade suave na versão parabólica. Trata-se de equações integradas na fase, portanto não resolvem a superfície livre para momentos específicos. As equações empregadas neste modelo são baseadas nas equações de quantidade de movimento e de fluxo de massa. Sua principal vantagem reside na possibilidade de calcular a refração e difração em suas equações sem parametrizações. Entretanto, este modelo não leva em conta as interações entre diferentes períodos (interações não lineares). Portanto, os períodos se mantêm ao longo da grade computacional. Com ele é

possível propagar ondas monocromáticas e espectrais. Pode-se informar o espectro de entrada por meio de arquivos ou por meio das formulações empíricas de espectros de ondas desenvolvidas (Rayleigh). O Modelo Oluca permite re-compilar as informações espectrais, em pontos objetivos, possibilitando observar as variações no espectro. Uma das desvantagens deste modelo reside no fato de utilizar o espectro de entrada baseado nas distribuições de Rayleigh, o que pode não representar bem a realidade em determinados casos. A equação (1) apresenta a equação da declividade suave em versão elíptica, nos termos da equação (2) são apresentadas as velocidades de fase (C) e grupo (C_g). A equação (3) apresenta a conhecida relação de dispersão.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \eta) + \frac{\omega^2}{g} \eta = 0, \quad (1)$$

Onde,

$$C = \frac{\omega}{k}, C_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{C}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right), \quad (2)$$

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad (3)$$

Os modelos baseados na equação da declividade suave são válidos para quaisquer valores de kh . No limite assintótico de $kh \gg 1$, a equação se torna a conhecida equação de ondas longas. Já para o caso de valores de $kh \ll 1$, ou seja, para ondas curtas, a equação (1) se reduz à equação de Helmholtz, onde k atende a relação de dispersão (3). Portanto, em ambos os limites pode-se calcular a difração corretamente. A equação da declividade suave serve, portanto, para propagar ondas de águas profundas

até profundidades reduzidas sempre que a hipótese da linearidade seja aceitável (Losada & Liu, 2000).

Uma das grandes dificuldades em se utilizar as equações da declividade suave está na determinação dos contornos na linha de costa, uma vez que não está incluída a arrebentação de ondas, não se conhecendo, portanto, a quantidade de energia dissipada, refletida e propagada. A solução encontrada foi a de utilizar a versão parabólica da equação da declividade suave, que amplia a validade da teoria dos raios até a costa, permitindo a difusão de energia. Esta mudança permite que se calculem ondas propagadas numa certa direção, mas também, em caráter débil na direção contrária. Liu (1990) integrou os cálculos da equação da declividade suave de forma a resolver os tensores de radiação, possibilitando a análise conjunta de correntes geradas pelas ondas.

A resolução numérica se dá por meio de um método de diferenças finitas em grades regulares. Como condição inicial os valores são dados como zero. São definidas as condições de contorno para o fundo, para a superfície livre, para a linha de costa, para o mar aberto e para as laterais abertas ou fechadas. Mais informações sobre este modelo podem ser obtidas em (SMC, 2004a).

4.2.1.2. MODELO COPLA_SP

O modelo COPLA versa sobre as correntes geradas por ondas. Trata-se de um modelo baseado nas equações de Navier-Stokes, considerando as seguintes simplificações:

- O fluido é homogêneo, incompressível e de densidade constante,

- Os movimentos verticais são desprezíveis,
- Os movimentos associados às correntes numa praia são permanentes, ou seja, as equações são integradas no tempo e cada trem de ondas cria seu próprio sistema de correntes,
- Os efeitos de viscosidade molecular são, com exceção em seus contornos, débeis, portanto pode-se considerar que o movimento oscilatório é irrotacional,
- São descartados também os efeitos de Coriolis e a interação das correntes com os novos trens de ondas incidentes.

Assumindo-se as hipóteses descritas anteriormente, chega-se às equações de continuidade (equação 4) e quantidade de movimento com x sendo a direção transversal à praia (5a) e y a direção longitudinal à praia (5b).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (UH)}{\partial x} + \frac{\partial (VH)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial x} (S_{xx}) + \\ & \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial y} (S_{xy}) + \frac{gU}{C^2 H} (U^2 + V^2)^{1/2} - \varepsilon \left[\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (5a)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial x} (S_{xy}) + \\ & + \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial y} (S_{yy}) + \frac{gV}{C^2 H} (U^2 + V^2)^{1/2} - \varepsilon \left[\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (5b)$$

Os tensores de radiação globais devido às ondas incidentes são calculados com base nos tensores de radiação que são gerados por cada uma das componentes de energia. Os principais parâmetros que influem nas correntes deste modelo são: a rugosidade do fundo e a viscosidade turbulenta.

A resolução numérica é feita por meio de diferenças finitas utilizando a mesma grade batimétrica utilizada no modelo OLUCA. .Maiores informações sobre os módulos que compõem o SMC podem ser encontrados em (Losada et. al. 2000) e no documento de referência do COPLA (SMC, 2004b).

4.2.1.3. MODELO MOPLA

O modelo MOPLA, que em conjunto com os dois modelos anteriores formam o subgrupo EROS apresenta duas vertentes: o módulo de erosão e sedimentação inicial (utilizado neste trabalho) e o módulo de evolução morfodinâmica.

O módulo de transporte de sedimentos determina o transporte com base no campo de ondas e no campo de correntes. Neste módulo são utilizadas duas formulações amplamente citadas na literatura: Bailard (1981) (equação 6) e Soulsby – van Rijn (equação 7). Ambas as formulações computam o transporte sólido total, como

sendo a soma do transporte em suspensão e o transporte de fundo. Além das formulações de transporte de sedimento, foram incorporadas formulações de estabilidade do sedimento: diâmetro equivalente para o transporte, módulo de perturbação das ondas por variação do fundo e módulo de perturbação das correntes por variação do fundo. Tais inclusões são descritas em van Rijn (1993).

$$\vec{q}_t = \vec{q}_{bo} - \vec{q}_{bs} + \vec{q}_{so} - \vec{q}_{ss} \quad (6)$$

$$q_t = A_s \bar{U} \left[\left(\bar{U}^2 + \frac{0,018}{C_D} U_{rms}^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \bar{U}_{cr} \right]^{2.4} \quad (7)$$

Maiores informações sobre este modelo podem ser encontrados no manual de referencia (SMC, 2004c).

4.2.2. MSP

O modelo MSP também foi desenvolvido pelo G.I.O.C.-U.C. e versa sobre as questões de agitação portuária. Este modelo é baseado nas equações da declividade suave em versão Elíptica (MSP). Tais equações foram descritas na seção anterior. As principais diferenças entre o MSP e o modelo de propagação baseado na equação da declividade suave em versão parabólica (Oluca) estão relacionadas às questões de contorno. A primeira diferença é que o MSP não apresenta nenhuma restrição no tocante

à direção de propagação em relação à direção da grade computacional, diferentemente do modelo OLUCA que necessita de propagações com ângulos inferiores a 55° em relação à direção principal. A reflexão das ondas incidentes é uma das vantagens em relação à versão parabólica, uma vez que as ondas se propagam em todas as direções.

Diferentemente de modelos como os de Boussinesq, os modelos baseados na equação da declividade suave não resolvem a fase. Em outras palavras, são integrados na fase, o que impede de resolver a superfície livre para cada instante de tempo. Entretanto, podem ser conseguidas imagens genéricas (para uma fase genérica) para a superfície livre e gráficos de iso-alturas máximas. Trata-se assim, como o modelo Oluca, de um modelo frequencial/espectral, baseado em espectros de energia. Em outras palavras, está baseada nas equações de quantidade de movimento e de fluxo de massa. As equações governantes, esquemas numéricos, testes de validação e exemplos de aplicação deste modelo podem ser encontrados em (Hernández, 2006 e).

4.2.3. H2D

O modelo H2D é um modelo hidrodinâmico bidimensional baseado nas equações gerais de ondas longas, que por sua vez são deduzidas através da equação da conservação da quantidade de movimento (equação 8) e da equação de conservação da massa (equação 9) para fluidos incompressíveis.

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\vec{\nabla}p + \rho\vec{F} + \frac{\partial\tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (8)$$

$$\vec{\nabla} \vec{u} = 0 \quad (9)$$

Onde:

$\vec{u}$ = vetor de velocidade u (u, v, w). P = Pressão. F = gravidade;

τ_{ij} = tensões tangenciais sobre o plano j na direção i

$\frac{D}{Dt}$ = Derivada material; ∇ = divergência; $\frac{\partial}{\partial x}$ = derivada parcial na direção x .

Após todas as simplificações e integrando na vertical temos a equação de ondas longas (10).

$$p' = p_a - p_0 + g\rho_0(\eta - z) + g \int_z^\eta \rho' dz \quad (10)$$

Por fim, aplicando a regra de Leibnitz, para eliminar a dependência das três variáveis espaciais chega-se à equação de conservação de quantidade de movimento (equações 11 e 12):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(UH)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_x U^2 H)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta_y UVH)}{\partial y} = -gH \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ - g \frac{H^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial x} + \frac{1}{\rho} [\tau_{xz}(\eta) - \tau_{xz}(-h)] + \frac{H}{\rho} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(VH)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_{yx}VUH)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta_{yy}V^2H)}{\partial y} = -gH \frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{gH^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho_0}{\partial y} \\ + \frac{1}{\rho} [\tau_{yz}(\eta) - \tau_{yz}(-h)] + \frac{H}{\rho} \left[\frac{\partial\tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yy}}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

E para a conservação da massa (equação 13)

$$\frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

Por fim, resolvendo a advecção de temperatura e salinidade por meio da equação de transporte de temperatura e salinidade (equação 14) e a equação de estado (equação 15), obtém-se o conjunto total de equações resolvidas pelo modelo H2D.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left[HD_y \frac{\partial C}{\partial y} \right] + R \quad (14)$$

Onde C = temperatura em graus Celsius ou salinidade (PSU), integrada na vertical; Dx e Dy = coeficientes de difusão horizontal; R = fonte ou sumidouro de temperatura ou salinidade.

$$\rho = \rho(S, \theta, p) \quad (15)$$

O modelo utiliza a tensão tangencial no fundo por meio do coeficiente de Chézy. O coeficiente de viscosidade turbulenta, neste modelo é variável e segue as equações propostas por Madsen et al. (1988). O modelo utiliza um método de diferenças finitas,

implícito, numa grade regular do tipo c de Arakawa. A estabilidade numérica do modelo depende de que se cumpra a condição de Courant e o número de Peclet.

Descrições completas das equações discretizadas e outras informações sobre este modelo podem ser obtidas em Medina e Castanhedo (1996).

4.3. BATIMETRIA

Para elaboração da base batimétrica foram utilizadas as Cartas Náuticas da DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil – 1985) de números: DHN-1410, DHN-1400, DHN-1420 e DHN-1401.

A Figura 09 apresenta os pontos e as linhas que foram digitalizados a partir das cartas náuticas. Ao total foram digitalizados 14327 pontos batimétricos e 204 linhas ou trechos de isóbatas (incluindo a linha de costa).

Figura 9: Imagem representativa dos pontos e linhas digitalizados separados por carta Náutica.

Vale frisar que os valores batimétricos das cartas náuticas foram corrigidos para o zero do Terminal de Tubarão. Em outras palavras, os diferentes marcos de referência foram convertidos ao menor valor de maré registrado no Terminal de Tubarão (zero de porto).

Após esta etapa de calibração dos dados batimétricos, foram realizados diversos testes de interpolação, para a criação de uma batimetria digital, ou um Modelo Numérico de Terreno (MNT). Foram testados os seguintes métodos de interpolação: 'Krigging', 'Afine polinomial', 'Natural Cubic', 'Nearest Neighbour' e triangulação de valores próximos. Por fim, os que apresentaram melhores resultados foram a triangulação de valores próximos (método desenvolvido em MATLAB) e o 'Krigging' (desenvolvido por

meio do Software SURFER). Entretanto por questão de facilidade e manejo do software foi escolhido o método de Krigging para todas as interpolações de batimetrias.

4.4. MARE

As marés podem ser classificadas de acordo com sua periodicidade, podendo ser diurna, semi-diurna, ou mista. Podem ainda ser caracterizadas por sua amplitude em micro-marés, meso-marés e macro-marés. No caso da região de estudo a maré pode ser considerada como sendo de micro-marés e característica semi-diurna (segundo a classificação da FEMAR), assim como visto na caracterização da área de estudo.

Podemos ainda, dividir o fenômeno das marés segundo as duas principais fontes geradoras, a maré Astronômica e a maré Meteorológica.

4.4.1. MARE ASTRONOMICA

A maré astronômica é resultado da interação das massas da Terra com a atração gravitacional dos corpos celestes mais próximos, bem como da interação das forças gravitacionais destes corpos. Sendo a parte líquida da Terra muito mais susceptível a essas forças, a resultante acaba sendo a variação do nível do mar em relação à “terra firme”.

Como os movimentos dos astros são relativamente bem conhecidos e praticamente uniformes, ao menos os que influem nas marés e dentro da escala de

tempo humano, se pode prever o comportamento das marés ao largo do tempo. Sabendo a influência dos continentes, ilhas, plataforma continental e a localização do ponto de interesse se pode recriar uma série temporal das oscilações do nível do mar para esta localidade. Uma das formas de se recriar a série de maré é através de decomposições harmônicas de Fourier, dividindo um sinal de maré em distintas componentes harmônicas. Com os valores de amplitude e fase das distintas componentes harmônicas é possível reconstruir a maré astronômica para qualquer tempo passado ou futuro.

Neste trabalho, os dados de maré astronômica foram gerados a partir de previsões harmônicas, utilizando o método desenvolvido pelo Almirante Franco. Foram recriadas marés astronômicas para duas localidades diferentes, o Porto de Vitória e para o Terminal de Tubarão. Para os cálculos de maré astronômica foram utilizadas as informações constantes nos catálogos da FEMAR (www.femar.com.br). Foram computadas as 12 componentes harmônicas mais significativas. A saber: Q1, O1, P1, K1, N2, M2, S2, K2, M3, MN4, M4 e MS4.

4.4.2. MARE METEOROLOGICA

As marés meteorológicas não são deterministas como são as marés astronômicas e sim estão relacionadas ao empilhamento de água na costa devido a efeitos do vento e da pressão atmosférica.

Os valores de maré meteorológica foram obtidos subtraindo os valores da maré astronômica do registro de um marégrafo. Infelizmente, as séries temporais de dados de altura observada de maré, obtidas junto ao BNDO, dos marégrafos do Terminal de Tubarão e do Porto de Vitória são séries de curta duração.

Devido às pequenas extensões temporais, estas séries do marégrafo não permitiram uma análise probabilística. Entretanto, foram muito úteis para que fossem feitas caracterizações das amplitudes e frequências características da maré meteorológicas da região.

Os registros dos marégrafos se apresentavam na forma de séries temporais com intervalos equidistantes de 1 hora. Destes dados, foram subtraídos os valores de maré astronômicas, obtidos anteriormente. Foi assumido, portanto, que a previsão da maré astronômica, corresponde de fato a 100% da maré astronômicas. Apesar de isso não ser rigorosamente verdadeiro, os valores obtidos com a previsão chegam a percentuais bem elevados, superando a casa dos 98%, uma vez que utiliza as 12 principais componentes de maré.

Por fim, os dados de maré meteorológica foram desenhados para todos os períodos disponíveis.

4.4.3. CORRENTES DE MARÉ

Para uma melhor compreensão da influência da maré na região foi idealizado um modelo hidrodinâmico simples que pudesse mostrar a ordem de grandeza das correntes de maré e a localização dos locais onde a sua intensidade é maior. Trata-se de um modelo hidrodinâmico bi-dimensional integrado na vertical (H2D).

Para este trabalho foi utilizado em versão barotrópica, ou seja, com densidade constante. Para efeito de seus cálculos, assumiu-se uma temperatura de 25 graus e uma salinidade de 33 UPS. A temperatura do ar foi ajustada a 26°C e o coeficiente de intercâmbio de temperatura ar-mar foi de $7,14 \times 10^{-6}$.

O incremento de tempo para os cálculos foi de 6 segundos. As células de grade possuíam um delta x e um delta y de 44,09m. O valor da rugosidade do fundo veio definido pela expressão $C = 18 \cdot \log(12 \cdot H/k)$, ou seja, aproximadamente 0,2.

Como condição de contorno a temperatura e a salinidade mantiveram os valores iniciais da grade. O forçamento de maré foi feito por meio da variação da superfície livre na borda externa, com um sinal senoidal com período de 43200 segundos e amplitude de 0,95m. Este sinal de maré pretende representar uma condição de sizígia na área de estudo.

A batimetria utilizada na mesma interpolada anteriormente, porém o nível do zero foi mudado para o nível médio de maré acrescentando a todos os pontos 0,82 m (valor referente entre o zero de porto e o nível médio de maré). Com isso foi possível utiliza o módulo de *wet-dry*, onde a posição da linha de costa varia com a maré. Para a execução foi definida uma grade regular de 401 por 375 pontos, apresentando espaçamentos de 44,544m tanto na direção X como na direção Y.

Os resultados de superfície livre e correntes na direção X e Y foram gravados para toda a grade a cada 3600 segundos. Também foram gravados os resultados de superfície livre e correntes nas direções X e Y para sete pontos de controle a cada 600 segundos. A Figura 10 apresenta a localização dos pontos de controle bem como todo o domínio utilizado para a simulação de maré

Figura 10: Localização dos pontos de controle para a simulação de maré.

4.5. ONDAS EM ÁGUAS PROFUNDAS

Com o intuito de analisar o clima marítimo em águas profundas, ao largo da Baía de Vitória, foi realizada uma análise dos dados obtidos junto ao projeto de retro-análise ('*Hindcast*') ERAS-40 desenvolvido pela agência europeia ECMWF, para o ponto mais próximo da área de estudo.

O objetivo principal desta etapa foi o de caracterizar o clima marítimo na plataforma continental (em águas profundas) de todo o período compreendido no projeto acima mencionado (1958-2001). Os objetivos específicos são:

- a) Obter os conjuntos de dados referentes à altura significativa de onda, período médio e direção média.
- b) Analisar a consistência destes dados, em relação à continuidade temporal.
- c) Apresentar os gráficos representativos dos dados:

- Histograma direcional para Alturas e Períodos

- Histograma de Alturas de Ondas

- Histograma de Período de Pico

d) Análise estatística dos dados

- Ajuste de uma função de distribuição aos dados de altura de onda e Período

Médio.

- Ajuste de uma função de probabilidade de ocorrência de altura de onda.

e) Ponderar sobre a qualidade dos dados

Os dados de onda provenientes do banco de dados do projeto ERAS 40, constituem uma importante ferramenta para a compreensão do clima marítimo principalmente em regiões onde há uma escassez de dados instrumentais. Esta etapa consistiu na solicitação junto ao ECMWF, recebimento dos dados, pré-tratamento, análises, ajustes estatísticos e ponderações a cerca da qualidade dos mesmos.

Os dados do projeto ERAS 40 (ECMWF, 2002) compreende o intervalo de tempo de 1958 à 2001 e são disponibilizados em formato GRIB. Embora este formato tenha vantagens em termos de armazenamento, ele também apresenta dificuldades inerentes à visualização e processamento dos dados. Portanto, para a análise dos dados foi necessário transformar-los em outro formato mais conveniente para trabalhar. Para tanto, foi elaborado um programa multi-linguagens (grib2ascii.csh) que além de converter arquivos em formato GRIB para formato NetCDF e posteriormente para formato ASCII, também extrai a série temporal do ponto mais próximo ao ponto de interesse. Este programa utiliza as facilidades do software CDO (Schulzweida & Kornblueh, 2008), para converter os dados para NetCDF, depois utiliza o software Ferret para extrair as séries

temporais no ponto de interesse e transforma-lo em formato ASCII. A concatenação dos softwares foi feito por meio de linguagem de “shell” (csh).

Depois de elaborada a metodologia para a obtenção da série temporal para o ponto mais perto da área de interesse (37,5W; 20.,0S), foi feita a análise desta série em questões relativas à qualidade e continuidade temporal.

Para a confecção dos gráficos foram gerados “scripts” de programação (no software MATLAB / OCTAVE) que lêem os dados e geram as Figuras.

As análises estatísticas se basearam em ajustar funções de distribuição conhecidas aos dados de altura significativa de onda e período médio. Para tal foram testadas as funções de distribuição Normal, Log-normal, Weibull de mínimos e Gumbel de máximos. O ajuste das funções foi realizado pelo método de máxima verosimilitude. Com a função que melhor se ajustou, foi elaborada a função de probabilidade de superação, ou seja, o regime médio de ondas. Além do regime médio, foi elaborado o regime extremal destes dados, baseando-se no método POT (valores acima de um limite).

4.6. ONDAS EM PROFUNDIDADES REDUZIDAS

Os dados de ondas em profundidades reduzidas foram obtidos de duas fontes distintas de dados. Foram utilizados os dados coletados pelo INPH entre os anos 1979 e 1980 e propagações das ondas pertencentes ao conjunto de dados do ECMWF para a posição da Boia do INPH.

4.6.1. DADOS DO ONDOGRAFO - INPH

Com o intuito de analisar o clima marítimo da Baía de Vitória, mais precisamente nas imediações do Terminal de Tubarão, foi realizada uma análise dos dados obtidos junto ao INPH (Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias), mais precisamente do relatório técnico de Dados de Onda na Praia Mole-ES (INPH, 1983). Estes dados foram coletados durante os anos de 1979 e 1980 por meio de um ondógrafo escalar do tipo *Wave-Rider*, as direções foram estimadas por meio de um teodolito, apresentando, portanto, um erro inerente a este processo. (INPH,1982)

Os objetivos principais desta etapa foram o de caracterizar o clima marítimo nas proximidades do Terminal de Tubarão e estimar cenários característicos de clima de ondas para a região.

Para tal, foram realizadas várias etapas de processamento dos dados do INPH, entre elas a de digitalizar os dados constantes nos relatórios técnicos, que se encontravam somente em papel.

Após a digitalização foi avaliada a consistência da série temporal, que se revelou homogênea, entretanto foram encontradas inúmeras lacunas, onde, por motivos diversos, os dados não foram coletados. O preenchimento das lacunas foi realizado por meio de interpolações lineares e de tipo *cubic spine*, para os dados de direção e para os dados de altura e período respectivamente. A análise de consistência temporal foi efetuada quantificando os períodos sem dados ante os períodos com dados. Chegou-se a um valor de 85% da série com dados e 15% de lacunas. Em suma, foram contabilizados quantas falhas existiam na série temporal e quais eram os tamanhos destas falhas. Os períodos mais críticos são a partir de março de 1980, em que havia algumas lacunas de dias.

Portanto, foram utilizados neste trabalho os dados contidos entre os meses de março de 1979 e fevereiro de 1980.

Com a série temporal digitalizada e completa foram analisadas as características das ondas da região, por meio de análises no domínio das frequências, análises no domínio do tempo (temporais) e no domínio das probabilidades (estatísticas). Para a confecção dos gráficos foram gerados “scripts” de programação (no software MATLAB / OCTAVE) que lêem os dados, efetuam-se os cálculos e geram as figuras.

As análises no domínio da frequência se resumiram em dividir a série temporal em classes de tamanho (em metros para Hs e em segundos para os períodos) e pintá-los na forma de histograma.

Para as análises no domínio do tempo, foram confeccionadas as séries temporais de altura significativa de onda e período de pico.

As análises estatísticas basearam-se em ajustar funções de distribuição conhecidas aos dados de altura significativa de onda. Para tal foram testadas as funções de distribuição Normal, de Pareto e Gumbel. O ajuste das funções foi realizado pelo método de máxima verossimilitude. Com a função que melhor se ajustou, foi elaborada a função de probabilidade de superação, ou seja, o regime médio de ondas. Devido ao fato de que para o estabelecimento de regimes extremos são necessários dados temporais de longa duração, da ordem de um terço a um quarto do período de retorno desejado, estes não apresentam uma grande confiabilidade. Apesar deste fato, foram gerados os cenários característicos de ondas para a área de estudo, segundo a metodologia descrita a seguir.

4.6.1.1. DETERMINAÇÃO DOS CENÁRIOS CARACTERÍSTICOS COM OS DADOS DO INPH

Para um possível uso em Engenharia e utilizando os dados do INPH como base, foi determinada uma tempestade de cálculo. Esta tempestade de cálculo foi determinada correspondendo ao maior valor de altura significativa existente na série e seu período de pico associado. Este valor foi multiplicado por um fator de risco, embora geralmente se utilize o regime extremal para determinar uma tempestade de cálculo. Devido à pequena duração da série de dados, um regime extremal não seria confiável, portanto optou-se por determinar a maior altura significativa de onda da série e multiplicá-la por um fator de amplificação. Neste caso foi identificada a altura significativa máxima ocorrida em 6 de setembro de 1979 às 8:00h com 2,6m de Altura Significativa e 11 segundos de Período de Pico. O fator utilizado foi de 1,3 para a Altura Significativa de Onda e 1,2 para os Períodos, (estes valores foram utilizados com o intuito de se posicionar ao lado da segurança). Portanto, obteve-se uma tempestade de cálculo com as seguintes características:

- Altura Significativa de 3,4 m
- Período de Pico de 13,2 s
- Período Médio de 9 s

Considerando que a tempestade de cálculo tem duração de aproximadamente 6 horas, e assumindo que as ondas em um estado de mar em oceano aberto possuem uma distribuição de Rayleigh, pode-se obter a altura de onda de cálculo (H_{50} – Altura superada apenas pelas 50 maiores ondas da tempestade de cálculo) que atinge o ponto de medição. Para tal, calcula-se o número de ondas da tempestade (Duração da tempestade em segundos / período médio). Em seguida, necessita-se da relação entre o número de

ondas da tempestade e o número de ondas a serem utilizadas, ou seja, o número efetivo. Utilizando a relação entre H_s e H_{rms} , calcula-se o parâmetro z de Rayleigh (deve ser definido). Com as aproximações de Rayleigh calcula-se a função de erro complementar (explicar o porquê) e com ela, utilizando a função de Rayleigh determina-se o fator de cálculo e aplica-se ao H_{rms} da tempestade de cálculo, obtendo-se desta forma o valor da altura de onda superada apenas por 50 ondas da tempestade de cálculo. (Apesar de que a norma da ABNT não adotar este critério, ele foi utilizado pois possibilita a identificação das máximas alturas de ondas de um evento de tempestade, ou seja possibilita identificar “a onda de cálculo”. Tal metodologia foi empregada com bastante êxito na Costa Espanhola, onde a agencia estatal que controla os portos espanhóis editou um manual de recomendação para obras marítimas (ROM)). Segue abaixo o procedimento de cálculo.

$$6 \cdot 60 \cdot 60 = 21600s$$

$$21600/9 = 2400 \text{ ondas}$$

$$\mathbf{N \text{ de Ondas da Tempestade} = 2400}$$

$$N_{\text{efetivo}} = 2400/50;$$

$$\mathbf{N_{\text{efetivo}} = 48}$$

Segundo a relação de Rayleigh

$$H_{rms} = H_s/1,406;$$

$$H_{rms} = 3,406/1,406;$$

$$\mathbf{H_{rms} = 2,422475 \text{ m}}$$

$$z = \sqrt{\ln(N_{\text{efetivo}})};$$

$$Z = 1,9675;$$

$$\text{erf} = 1 - (1 / (1 + (0,278393 * z) + (0,230389 * z^2) + (0,000972 * z^3) + (0,078108 * z^4))^4);$$

$$\text{erf} = 0,9935; \quad \text{erfc} = 1 - \text{erf};$$

$$\text{erfc} = 0,0065;$$

$$\text{FactorH50} = (((\text{Nefetivo} * \sqrt{\pi}) / 2) * (\text{erfc}) + \sqrt{\log(\text{Nefetivo})});$$

$$\text{FactorH50} = 2,1892;$$

$$\text{H50}_{\text{ray}} = \text{FactorH50} * \text{Hrms};$$

$$\text{H50}_{\text{ray}} = 5,3 \text{ m};$$

Portanto a onda de cálculo para determinações de estabilidade de obras marítimas seria de 5,3 m.

A operacionalidade do porto devido a condições adversas de estado de mar pode ser determinada com o regime médio de ondas, calculado anteriormente. Utilizando o quartil 95% pode-se ter uma idéia se a operacionalidade do porto vai ou não estar afetada pelas condições marítimas. Neste caso em particular, o quartil 95% se refere a ondas com alturas de 2,7 metros.

Segundo os histogramas direcionais de altura de onda e período de pico, podemos constatar que as condições médias são em torno de 1 metro de Altura Significativa e 7 segundos de Período de Pico. A tabela 02 apresenta uma síntese dos cenários que devem ser testados nos modelos de propagação de ondas e consequente transporte sedimentar e agitação marítima.

Tabela 02: Cenários possíveis para a zona de Estudos, segundo a análise dos dados do INPH.

	Altura Significativa (m)	Período de Pico (s)	Direção
Condição média	1	7	SE-E-NE
Condição extrema anual	2,7	12	SE
Condição extrema decadal	3,4	13,2	SE
Condição de projeto	5,3 (monocromático)	15	SE

4.6.2. PROPAGACÕES ESPECTRAIS DOS CENÁRIOS DO INPH

As seguintes propagações de ondas espectrais obedeceram aos cenários estipulados com a análise de dados do ondógrafo do INPH, ou seja, foram realizados os cenários de altura significativa e período de pico: 1m 7s direção Sul, 1m 7s direção Sudeste, 1m 7s direção Este, 2,7m 12s direção Sudeste, 3,4 m 13,2s direção Sudeste e 5,3m 15s direção Sudeste.

Para as propagações dos cenários do INPH com o modelo Oluca, foram utilizadas três grades distintas, sendo uma para cada direção de propagação. (Sul, Sudeste e Este). O fato de serem grades distintas deve-se às limitações de modelos que utilizam as equações de declividade suave em sua versão elíptica para seus cálculos, pois esta limita o ângulo de entrada das ondas a 45 graus em relação à direção da grade.

Todas as grades apresentam espaçamento de 50 m entre cada ponto de grade e são referenciadas ao norte geográfico. A seta azul na borda de cada grade mostra a direção de propagação.

As Figuras 12, 13 e 14 apresentam as grades utilizadas para as propagações.

Figura 11: Grade sobre batimetria utilizada para as propagações de ondas de direção Sul.

Figura 12: Grade sobre batimetria utilizada para as propagações de ondas de direção Sudeste.

Figura 13: Grade sobre batimetria utilizada para as propagações de ondas de direção Este.

Os espectros de frequências de entrada foram calculados segundo os parâmetros de espectro TMA (com $\Gamma=3,3$). Este espectro assemelha-se ao espectro Jonswap, porém incorpora os efeitos da batimetria em ambientes de profundidades intermediárias a reduzidas.

Além da dispersão frequencial, foram aplicados também funções de dispersão direcional, do tipo alfa por co-seno Theta ($\alpha \cos \theta$). A seguir são apresentados, nas Figuras 15, 16, 17, 18, 19 e 20, os espectros de frequência de entrada no modelo para cada cenário. Já na Figura 21 apresenta-se a forma da dispersão direcional utilizada em todos os cenários.

Figura 14: Espectro frequencial de entrada no modelo para o cenário de 1m - 7s - Sul.

Figura 15: Espectro frequencial de entrada no modelo para o cenário de 1m- 7s- Sudeste.

Figura 16: Espectro frequencial de entrada no modelo para o cenário de 2,7m - 12s - Sudeste.

Figura 17: Espectro frequencial de entrada no modelo para o cenário de 3,4m – 13,2s - Sudeste.

Figura 18: Espectro frequencial de entrada no modelo para o cenário de 5,3m - 15s - Sudeste.

Figura 19: Espectro frequencial de entrada no modelo para o cenário de 1m- 7s- Este.

Figura 20: Dispersão angular em relação à direção principal.

Foram estabelecidos três pontos de controle, onde se armazenaram as informações espectrais. A Figura 22 mostra a localização destes pontos de controle.

Figura 21: Localização dos pontos de controle.

4.6.3. PROPAGÇÕES E RECONSTRUÇÕES DA SÉRIE TEMPORAL DO ECMWF

Com a série temporal de ondas em águas profundas (na posição do nó do ECMWF) foi possível ter apenas uma idéia de como é o clima marítimo na zona de estudo, uma vez que as ondas ao adentrarem zonas com menor profundidade sofrem os efeitos da interação onda – fundo. Os efeitos nestas regiões são: refração, empinamento, difração, reflexão e dissipação por arrebentação. Tais efeitos alteram as características

das ondas incidentes, rotacionando, concentrando, espalhando, alterando sua altura e energia. Portanto, faz-se necessário a determinação do clima de ondas ao pé de obra.

Para tal, foram utilizados os dados do Projeto ERAS40 no ponto mais próximo à Baía de Vitória. Esta série temporal foi dividida por direções em octantes (45 graus).

Para tal, foi criado um programa em linguagem OCTAVE/MATLAB (decompoe_m_direções.m) que decompõe a série em oito arquivos independentes, um para cada octante. Os setores foram: 0 - 45, 46 - 90, 91 - 135, 136-180, 181-225, 226-270, 271-315, 316-360. Os setores 226-270, 271-315 e 316-360 foram ignorados, pois não chegam à costa propagações provenientes destas direções.

Para cada um destes novos arquivos, foi feita uma análise de distribuição conjunta de Altura Significativa e Período Médio, por meio da criação de um programa em linguagem OCTAVE/MATLAB (Histograma_Hs_Tm.m). Este programa, além de calcular e graficar os histogramas conjuntos, seleciona os valores periféricos e discretiza o interior das distribuições em pares de altura significativa e período médio. Portanto, para cada um dos octantes foram obtidos os diversos pares de altura significativa e período médio representativos.

Com os diferentes pares, com seus respectivos períodos e alturas, foram elaborados diferentes cenários a serem propagados. Foram propagados os cenários espectrais calculados a partir da distribuição espectral de Jonswap-TMA (Equação 17) para altura e período e uma distribuição angular de Pierson (Equação 16) (Pierson et al, 1955)

$$D(\theta) = \frac{2}{\pi} \cos^2 \theta, \quad -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad (16)$$

$$S(f) = \alpha \cdot H_s^2 \cdot T_p^{-4} \cdot f^{-5} \cdot e^{-1.25 \cdot (T_p \cdot f)^4} \cdot \gamma e^{-\frac{(T_p \cdot f - 1)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (17)$$

As Figuras 23, 24, 25, 26 e 27, apresentam os histogramas bidimensionais de Altura Significativa e Período Médio, para cada setor de 45 graus.

Figuras 22 e 23: Distribuição conjunta para o setor 0° - 45° e distribuição conjunta para o setor 45° - 90°, respectivamente.

Figuras 24 e 25: Distribuição conjunta para o setor 90° - 135° e Distribuição conjunta para o setor 135° - 180°, respectivamente.

Figura 26: Distribuição conjunta para o setor 180° - 225°.

A tabela 03 apresenta os cenários que foram propagados desde a posição do ponto de retro-análise até a localização da boia. No total foram gerados 198 cenários distintos, com as condições mais representativas, sendo 66 para cada uma das três condições de maré (média das preamares de sizigia, nível médio e média das baixamars de sizigia). Os valores de dispersão espectral foram inferidos, como sendo 3,3 para vagas (ondas forçadas pelo vento) e 8 para marulhos (ondas desenvolvidas). Como critério de separação foi adotado que períodos de pico menores que 6 seriam para vagas e acima deste valor para marulhos.

Tabela 2: Cenários propagados até a posição da boia.

H (m)	T (s)	Dir (°NV)	Gama	Dispersão	Malha 1	Malha 2
1	6	22,5	3,3	10	NE	NI
1,5	6	22,5	3,3	10	NE	NI
2	6	22,5	3,3	10	NE	NI
1	8	22,5	8	10	NE	NI
1,5	8	22,5	8	10	NE	NI
2	8	22,5	8	10	NE	NI
2,5	8	22,5	8	10	NE	NI
3	8	22,5	8	10	NE	NI

1	10	22,5	8	10	NE	NI
1,5	10	22,5	8	10	NE	NI
1	6	67,5	3,3	10	NE	NI
1,5	6	67,5	3,3	10	NE	NI
2	6	67,5	3,3	10	NE	NI
0,5	7	67,5	3,3	10	NE	NI
1	7	67,5	3,3	10	NE	NI
1,5	7	67,5	3,3	10	NE	NI
2	7	67,5	3,3	10	NE	NI
1	8	67,5	8	10	NE	NI
1,5	8	67,5	8	10	NE	NI
2	8	67,5	8	10	NE	NI
2,5	8	67,5	8	10	NE	NI
1	10	67,5	8	10	NE	NI
1,5	10	67,5	8	10	NE	NI
1,5	6	112,5	8	10	E1	EI
0,75	8	112,5	8	10	E1	EI
1	8	112,5	8	10	E1	EI
1,5	8	112,5	8	10	E1	EI
2	8	112,5	8	10	E1	EI
2,5	8	112,5	8	10	E1	EI
3	8	112,5	8	10	E1	EI
1,5	10	112,5	8	10	E1	EI
2	10	112,5	8	10	E1	EI
2,5	10	112,5	8	10	E1	EI
1,5	6	157,5	3,3	10	SE	SI
2	6	157,5	3,3	10	SE	SI
1	8	157,5	8	10	SE	SI
1,5	8	157,5	8	10	SE	SI
2	8	157,5	8	10	SE	SI
2,5	8	157,5	8	10	SE	SI
3	8	157,5	8	10	SE	SI
1,5	10	157,5	8	10	SE	SI
2	10	157,5	8	10	SE	SI
2,5	10	157,5	8	10	SE	SI
3	10	157,5	8	10	SE	SI
1,5	12	157,5	8	10	SE	SI
2	12	157,5	8	10	SE	SI
2,5	12	157,5	8	10	SE	SI
1,5	6	202,5	3,3	10	SW	WI
2	6	202,5	3,3	10	SW	WI
2,5	6	202,5	3,3	10	SW	WI
1	8	202,5	8	10	SW	WI
1,5	8	202,5	8	10	SW	WI
2	8	202,5	8	10	SW	WI

2,5	8	202,5	8	10	SW	WI
3	8	202,5	8	10	SW	WI
1,5	10	202,5	8	10	SW	WI
2	10	202,5	8	10	SW	WI
2,5	10	202,5	8	10	SW	WI
3	10	202,5	8	10	SW	WI
1,5	12	202,5	8	10	SW	WI
2	12	202,5	8	10	SW	WI
2,5	12	202,5	8	10	SW	WI
3	12	202,5	8	10	SW	WI
3,5	12	202,5	8	10	SW	WI
2,5	14	202,5	8	10	SW	WI

Os casos seleccionados foram propagados até o ponto de controle através do programa OLUCA-SP, pertencente ao pacote de ferramentas SMC. Para tal foi utilizado um programa em linguagem OCTAVE/MATLAB (Gera_casos_oluca.m) que cria os cenários e configura o programa OLUCA-SP, para a execução das propagações.

Para as propagações de águas profundas até a posição da boia foram criadas 4 diferentes grades e suas 4 sub-grades encadeadas (Figuras 28 a 31).

Figura 27: Grade de propagação NE e sub-grade NI, para ondas de Nordeste. Águas profundas – boia.

Figura 28: Grade de propagação E1 e sub-grade EI, para ondas de Este. Águas profundas – boia.

Figura 29: Grade de propagação SE e sub-grade III, para ondas de Sudeste. Águas profundas – boia.

Figura 30: Grade de propagação SS e sub-grade SI, para ondas de Sul. Águas profundas – Boia.

Figura 31: Batimetria de edição com a localização da boia virtual (vermelho) coincidente com a boia do INPH.

No ponto de controle (Figura 32), que coincide com a localização da boia do INPH ($X=375000$, $Y=7755000$), primeiramente foi reconstruída a série temporal através de uma função de interpolação linear, que utiliza os casos propagados e obtém os valores para cada instante de tempo da série temporal original. A este processo denominamos genericamente Hiper-cubo. A figura 33 mostra um esquema da função Hiper-cubo. Em outras palavras, este método consiste em, sabendo cada um dos valores de altura de onda e período da série temporal em águas profundas, definir sua posição no histograma discretizado, interpolar os coeficientes de propagação para o ponto desejado e obter os valores de H_s e T_m para estes mesmos pontos. Os coeficientes de propagação utilizados são os respectivos para: refração, difração, empinamento de altura de onda, dissipação por fricção e dissipação por arrebentação de onda.

Figura 32: Esquema de obtenção de um valor específico de onda através dos cenários discretizados utilizados pela função Hiper-cubo.

Em seguida, foram comparados os valores de H_s e T_m da boia do INPH com os valores da nova série temporal no ponto da boia virtual, obtidos por meio da propagação dos dados do ECMWF e da interpolação da função Hiper-cubo.

No ponto de controle foi reconstruída a série temporal e comparada com a série da boia. A Figura 34 apresenta um gráfico de série temporal com os valores da boia e do nó de retro-análise do ECMWF. A Figura 35 apresenta um gráfico de dispersão, onde os valores de altura significativa para a boia e para o ponto de controle de retro-análise foram pintados para cada instante de tempo. A linha vermelha representa a bissetriz, onde os valores de H_s Boia são iguais aos valores de H_s Ecmwf. A Figura 36 apresenta um gráfico de série temporal com os valores de Período de Pico para a posição da boia, tanto dos valores propagados do ECMWF como os valores da boia. A figura 37 apresenta um gráfico de dispersão, onde os valores de período de pico para a boia e para as

propagações do ECMWF, foram pintados para cada instante da série temporal. A linha vermelha representa bissetriz.

Figura 33: Comparação da série temporal de altura significativa da boia do INPH e da série do nó de retro-análise ERAS-40.

Figura 34: Gráfico de dispersão entre os dados de Hs Boia e Hs Ecmwf.

Figura 35: Comparação entre as séries temporais de períodos de pico para a Boia e para o nó de retro-análise

Figura 36: Gráfico de dispersão entre os dados de Tp Boia e Tp Ecmwf.

A seguir, foram estabelecidos coeficientes de ajuste para cada cenário. Estes coeficientes foram obtidos por meio de uma função linear que correlaciona os valores da boia com os valores obtidos pela propagação e utilização do hiper-cubo. Os pares de dados do ECMWF em águas profundas foram multiplicados pelos seus respectivos coeficientes de ajuste e os casos foram re-propagados. Este procedimento se repetiu iterativamente até que o coeficiente de ajuste apresentasse valores próximos a 1, com erros gerais inferiores a 10%. Para tal fim foi criado um programa em linguagem

OCTAVE/MATLAB (Calibracao_hipercubo.m) que seleciona os mesmos períodos de tempo em ambas as séries, seleciona os instantes de tempo comum, compara os valores das séries, estabelece os parâmetros médios de correlação, corrige os pares de dados com os coeficientes e propaga novamente.

Os coeficientes de calibração para Altura Significativa foram obtidos para cada direção (octantes) e são apresentados na tabela 04. Pode-se observar que o coeficiente mais significativo, ou seja, mais longe de 1, foi para o octante SSE (135-180) e o menos significativo, mais próximo de 1, foi obtido para o octante SWS (180-225).

Tabela 3: Coeficientes de ajuste linear para Altura Significativa por direção.

Direções (° NV)	Coeficiente a
45-90	0,7861
90-135	0,7386
135-180	0,6963
180-225	0,98748

Os coeficientes de calibração para período de Pico também foram obtidos para cada direção (octantes) e são apresentados na tabela 05. Pode-se observar que os coeficientes maior ajuste foram para o octante SWS (180-225) e o de menor ajuste foi obtido para o octante ENE (45-90).

Tabela 4: Coeficientes de ajuste linear para Período de Pico por direção.

Direções (° NV)	Coeficiente a
45-90	0,92898829
90-135	0,88857657
135-180	0,80254682
180-225	0,80013257

Logo abaixo são apresentados os resultados finais de altura significativa obtidos após as iterações de propagação, reconstrução e calibração. A Figura 38 apresenta a série temporal comparando os valores de altura significativa da boia e do nó de retro-

análise propagado e calibrado para a posição da boia. A Figura 39 mostra o gráfico de dispersão entre os dados da boia e os dados do nó de retro-análise propagado e calibrado para a posição da boia.

Figura 37: Comparação da série temporal de altura significativa da boia do INPH e da série do nó de retro-análise ERAS-40 propagada e calibrada na posição da boia.

Figura 38: Gráfico de dispersão entre os valores de altura significativa de onda da boia e do nó de retro-análise propagado e calibrado na posição da boia.

Logo abaixo são apresentados os resultados finais de período obtidos após as iterações de propagação, reconstrução e calibração. A Figura 40 apresenta a série temporal comparando os valores de período de pico da boia e do nó de retro-análise propagado e calibrado para a posição da boia. A Figura 41 mostra a dispersão dos dados

da boia e do nó de retro-análise propagado e calibrado na posição da boia para os períodos de pico.

Figura 39: Comparação entre as séries temporais de períodos de pico para a Boia e para o nó de retro-análise propagado e calibrado na posição da Boia.

Figura 40: Gráfico de dispersão entre os dados de Tp Boia e Tp Ecmwf.

Figura 41: Série temporal completa calibrada no ponto da boia.

Figura 42: Histograma direcional de Hs para a série calibrada na posição da boia.

As Figuras 42 e 43 mostram os resultados para toda a série do ECMWF, calibrada para o ponto da boia, sendo a Figura 42 a série temporal e a Figura 43 o histograma direcional.

Após a calibração da série temporal de período de pico e altura significativa na posição da boia, a mesma foi dividida por direções e graficados os histogramas de Hs-Tp para cada uma das direções (0-45, 45-90, 90-135, 135-180, 180-225). As Figuras 42 a 46 apresentam os histogramas bidimensionais de Altura Significativa e Período Médio, para cada setor de 45 °.

Figuras 43 e 44: Distribuição conjunta para o setor 0° - 45° e Distribuição conjunta para o setor 45° - 90° , respectivamente.

Figuras 45 e 46: Distribuição conjunta para o setor 90° - 135° e distribuição conjunta para o setor 135° - 180° , respectivamente.

Figura 47: Distribuição conjunta para o setor 180° - 225° .

No total foram gerados 735 cenários distintos, com as condições mais representativas. No total foram utilizadas 7 alturas (0,5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 e 3,5), 7 períodos (4, 5, 6, 7, 8, 10 e 12), 5 direções (NNE, ENE, ESE, SSE e SWS) e 3 níveis de maré (Nível médio das baixa-mares de sizígia, Nível médio e Nível médio das preamares de sizígia) totalizando os 735 casos. Destes foram retirados os casos que não estavam presentes nos histogramas direcionais de altura significativa e período resultando finalmente em 405 casos (135 para cada nível de maré). Como complementos, foram

propagados também os cenários com $H_s=2,7$, $T_p=10$ para as direções NNE, ENE, E, ESSE, SE, SSE, S e SWS, com intuito de representar graficamente os resultados.

Por fim, foram propagados da posição da boia até a área de estudo os 135 casos espectrais, já calibrados, para todos os pontos de interesse com o programa OLUCA-SP. Para tal fim, foram criadas três grades diferentes para as diferentes direções (Figuras 49, 50 e 51).

Figura 48: Grade de propagação direção ENE. Boia – Área de estudo

Figura 49: Grade de propagação direção ESE. Boia - Área de estudo

Figura 50: Grade de propagação direção SSE.

Na área de estudo foram eleitos oito pontos de interesse que podem ser vistos na Figura 52 que apresenta a localização destes pontos objetivo.

Figura 51: Localização dos pontos objetivos na área de estudo.

Nestes pontos de interesse, foram estimados os coeficientes de propagação de cada um dos casos, reconstruídas as séries temporais, calculados os fluxos médios de energia, os regimes médios e extremos de altura significativa e período de pico. Novamente, as reconstruções das séries temporais nos oito pontos objetivo foram feitas através do método Hiper-cubo.

4.7. ONDAS GERADAS PELO VENTO NO INTERIOR DA BAÍA

Para uma correta avaliação da agitação marítima na área de estudo, deve-se compreender como se comportam as ondas que atingem a zona e também como são as ondas geradas pelo vento no interior da baía.

As características das ondas geradas pelo vento dependem de três fatores: a intensidade do vento (velocidade), a duração do vento (unidade de tempo), e a distância por onde sopra (Pista ou "fetch").

O *Shore Protection Manual* (1984) apresenta três formulações para o cálculo das ondas máximas geradas pela ação dos ventos. A mais tradicional foi proposta primeiramente por Stevenson (1874, apud *Shore Protection Manual*, 1984) e foi modificada por Gaillard (1924 apud S.P.M. op. cit.) e Molitor (1935 apud S.P.M. op. cit.), sendo conhecida como método SGM. O segundo método é o SMB (Sverdrup, Munk e Bretschneider), que se baseia em campos de ventos regulares. O terceiro método é o proposto pelo programa Jonswap, para estados de mar plenamente desenvolvido.

O método utilizado neste trabalho foi o SMB seguindo as formulações empíricas apresentadas logo abaixo. A formulação 18 correlaciona a Pista do vento e a intensidade com a altura significativa. A formulação 19, por sua vez, correlaciona estas mesmas grandezas com o período de pico.

$$(g * H_s) / U^2 = 0,283 * \tanh[0,0125 * ((g * F) / U^2)^{0,42}] \quad (18)$$

$$(g * T_s) / 2 * \pi * U = 1,2 * \tanh [0,077 * ((g * F) / U^2)^{0,25}] \quad (19)$$

Onde, H_s = Altura significativa (m), T_s = Período significativo (s), U = velocidade (m/s), g = gravidade (m/s^2) e F = Pista de vento efetiva (km). Este método foi desenvolvido para a geração de ondas em lagos, baías e zonas costeiras, uma vez que

assume que o limitante é a pista de vento, descartando desta forma a duração em que o vento sopra. Assume-se, que o vento é constante tanto em direção como em magnitude,

Foi escolhida a posição central da Praia de Camburi (entre o segundo e terceiro espigão) para a análise das ondas geradas por ventos locais. A Figura 53 mostra as pistas de vento consideradas para esta análise. Foram idealizadas oito pistas de vento cujas intensidades foram extraídas dos dados da SEAMA e estão compiladas na tabela 6.

Figura 52: Pistas de vento para o cálculo de ondas geradas por vento local.

Tabela 5: Condições de vento analisadas para os ventos locais

Direção de onde vem o vento	SW	SWS	S	SSE	SE	ESE	E	ENE
Intensidade (m/s)	6,2	9,2	9,2	9	8	6	4	3,3
Tamanho da Pista (m)	2404	2236	3005	9436	10630	4525	2200	1858

Percebe-se que os ventos de maior intensidade são de do quadrante SWS-SSE, com valores acima de 9 m/s. Já as maiores pistas de vento são as direções SSE e SE.

Nota: foi utilizada a convenção oceanográfica, ou seja, de onde vem. Esta escolha foi feita para manter um padrão durante todo o texto para as diversas variáveis.

4.8. ANÁLISE DE LONGO PRAZO

A análise de longo prazo partiu da premissa de que uma praia pode ser estudada dividindo-a na forma em planta e na forma de perfil, onde ambos estão em equilíbrio dinâmico com os agentes modeladores (meio hidrodinâmico). Ou seja, a praia apresenta uma forma em planta que depende do fluxo médio de energia das ondas incidentes, de acordo com as formulações teóricas de Hsu, já os perfis teóricos são obtidos por meio das formulações de Dean. Com esta linha de raciocínio pretendeu-se analisar o equilíbrio das praias afetadas pela presença do Terminal de Tubarão.

Com a série temporal de ondas no ponto exterior do molhe do Terminal de Tubarão, que foi reconstruída anteriormente, obteve-se a direção do fluxo médio de energia das ondas incidentes. Partindo do pressuposto de que as correntes induzidas por ondas são o principal agente de transporte de sedimentos nas zonas costeiras, e que praias encaixadas adotam sua forma em planta devido à posição de pontos de difração, pode-se determinar as formas de equilíbrio teórico em planta. Para tal utilizou-se o pacote de ferramentas SMC, no seu módulo de longo prazo.

A análise de perfil de equilíbrio foi levada a cabo ajustando a equação proposta por Dean (1977), que calcula o perfil de equilíbrio segundo a granulometria média da área (equação 20).

$$h(x)=A \cdot x^{2/3} \quad (20),$$

Onde, A = é o parâmetro que representa o D50 dos sedimentos, x é a distancia em metros da linha de costa e $h(x)$ é o valor da profundidade teórica.

A profundidade de fechamento da praia foi suposta utilizando os dados de ondas das séries temporais para cada ponto da praia e a formulação teórica de início de transporte de fundo proposta por Dean (equação 21), ou seja, entorno dos 2,4m.

$$\text{Profundidade de fechamento} = 2,28 \cdot H_{s12} - 68,5 \cdot ((H_{s12}^2)/(g \cdot (T_p^2))) \quad (21)$$

Onde: H_{s12} é a altura significativa de onda superada apenas 12 horas por ano; T_p é o período de pico associado e g é a gravidade

Sabendo-se que a Praia de Camburi foi submetida a um processo de engordamento artificial com uma granulometria conhecida, foi comparado o perfil obtido com a interpolação linear dos pontos batimétricos da carta náutica com o perfil teórico obtido pela formulação de Dean para a referida granulometria.

4.9. ANÁLISE DE CURTO PRAZO

Para uma análise de variabilidade costeira de curto prazo necessitamos compreender como atuam as variáveis importantes, tais como altura significativa de ondas, período de pico das ondas, maré, granulometria dos sedimentos, regime de ventos, correntes, etc.

Com relação às variáveis relativas às ondas temos bastante claro seus comportamentos, uma vez que foram calculados anteriormente os regimes médios, regimes extremos e possíveis funções de ajuste. Para os dados de maré possuímos a

série temporal recomposta harmonicamente (maré astronômica) e os dados dos marégrafos: estes dois conjuntos possibilitaram a reconstituição, ao menos para alguns períodos, da maré meteorológica. A ordem de grandeza dos ventos foi obtida dos dados constantes no relatório anual da rede automática de monitoramento da qualidade do ar para a Grande Vitória.

Para esta análise de curto prazo, priorizaram-se as variáveis que mais influem nas dinâmicas de praias, ou seja, as ondas.

Para tal fim foi utilizado o pacote de ferramentas do SMC. Os efeitos do Terminal de Tubarão nas ondas incidentes, nas correntes induzidas por ondas e o balanço sedimentar potencial foram avaliados por meio de três modelos numéricos: o Oluca, o Copla e o Mopla, descritos anteriormente. Os 135 casos propagados para a reconstrução das séries temporais foram executados tanto para as ondas, como para as correntes e para o transporte sedimentar potencial. As grades computacionais utilizadas são as mesmas utilizadas para a reconstrução das séries temporais.

4.9.1. MODELO OLUCA – ONDAS

O primeiro modelo utilizado calcula as características das ondas, levando em consideração os processos de refro-difração, reflexão, dissipação de energia, e interações lineares entre ondas. Com ele foram gerados os cenários de propagação de ondas para a zona de estudo. Com o intuito de visualizar os resultados, foram escolhidos alguns cenários característicos. A visualização foi feita por meio de três tipos de gráficos:

iso - alturas máximas, vetores de propagação de H_s e superfície livre para uma fase aleatória.

4.9.2. MODELO COPLA – CORRENTES INDUZIDAS POR ONDAS

O segundo modelo empregado (Coplá) é um modelo que calcula as correntes induzidas por ondas através da interação com o modelo de ondas (Oluca). Para esta etapa utilizaram-se as mesmas grades utilizadas pelo modelo anterior, e foram pintados gráficos de vetores e magnitudes de correntes para os mesmos cenários apresentados para o caso das alturas de ondas.

4.9.3. MODELO MOPLA – TRANSPORTE DE SEDIMENTO

O terceiro modelo é o de transporte de sedimentos (Mopla), que utiliza os resultados de direção, período e alturas das ondas e os valores de intensidade e direção de corrente obtidos com os modelos Oluca e Copla, respectivamente. Os resultados obtidos foram pintados por meio de gráficos de transporte potencial, para a maioria dos cenários anteriores.

Vale destacar que, apesar de serem obtidos valores de transporte sedimentar, os resultados são qualitativos, uma vez que as incertezas inerentes às formulações matemáticas que descrevem o transporte sedimentar são muito grandes (van Rijn, 1993).

4.9.4. MODELO MANOLO – AGITAÇÃO PORTUÁRIA

A agitação portuária foi obtida por meio da utilização do modelo MSP-MANOLO desenvolvido pelo Grupo de Engenharia de Costas e Portos da Universidade de Cantábria /ESP. Trata-se de um modelo baseado nas equações da declividade suave na sua versão parabólica. Diferentemente dos modelos anteriores, que eram discretizados em diferenças finitas, este modelo utiliza um esquema numérico baseado em elementos finitos. Este fato melhora a resolução dos contornos laterais, uma vez que se adapta a qualquer forma ou geometria portuária. Entretanto, limita um pouco a abrangência da área de estudo, uma vez que o custo computacional é maior. A Figura 54 apresenta a grade computacional utilizada para os cálculos de agitação portuária. Trata-se de uma grade de elementos finitos totalizando 43560 pontos de grade.

Figura 53: Grade numérica para os casos de agitação portuária.

Para este trabalho foram propagadas ondas monocromáticas e ondas irregulares baseadas em espectros de energia. Os casos monocromáticos serviram para uma primeira avaliação dos padrões de agitação. Serviram, também, para aferir se o modelo apresentava resultados confiáveis. Por outro lado, eles trouxeram uma primeira idéia do

funcionamento do porto em termos de agitação, sendo até mais simples de analisar. Os casos com ondas irregulares atestam o grau de agitação no interior e nas proximidades do porto frente a diferentes cenários de ondas.

Tanto para os casos monocromáticos, como para os casos de ondas irregulares foram definidos os índices de reflexão de cada porção do porto. Por facilidade foram definidos três tipos de contorno portuário: parede vertical, molhe de enrocamento e contorno aberto, que apresentam índices de reflexão de 40%, 60% e 0%, respectivamente. A Figura 55 mostra a localização dos tipos de contorno no Terminal de Tubarão. Estes índices seguem os valores médios considerados para estes tipos de estrutura (DHI, 1988).

Figura 54: Contornos portuários do Terminal de Tubarão.

Foram propagados seis casos monocromáticos referentes a seis diferentes direções de propagação (E, ESE, SE, SSE, S e SWS).

Para os casos de ondas irregulares, foram definidos os espectros de energia segundo a distribuição espectral TMA com fator gamma igual a 3,3, o fator de dispersão

angular de permitiu uma dispersão de até 45 graus para cada lado da direção principal. Esta configuração espectral-direcional assemelha-se a uma distribuição típica na costa brasileira, com zonas de geração próximas às zonas costeiras de interesse. A Figura 56 mostra a dispersão espectral utilizada, já a Figura 57 mostra a dispersão angular utilizada.

Figura 55: Distribuição frequencial para os cenários de ondas irregulares.

Figura 56: Dispersão angular a partir da direção principal para os cenários de ondas irregulares.

Para a visualização dos resultados, foram pintados gráficos de superfície livre e de iso-alturas máximas.

4.9.5. MODELO MANOLO – RESSONANCIA PORTUARIA

Em geral, as ondas que atingem a costa são de curto período, da ordem de 10 segundos, entretanto medições em campo demonstram a presença na costa de ondas infra-gravitacionais, com períodos variando de 30 a 300 segundos. Tais ondas foram descritas, primeiramente, por Munk (1949) e as denominaram de *surf beat*. Entretanto sua compreensão só ocorreu quando da descrição da teoria do tensor de radiação de Longuet-Higgins. Tal teoria demonstra que os grupos de ondas curtas levam a uma variação do nível médio associada, ou seja, os grupos de ondas curtas são responsáveis por ondas longas que se conhecem por *set-up/set-down*, ou, simplesmente, ondas vinculadas ao grupo. Entretanto, quando da dissipação da energia das ondas curtas por meio de arrebentação, ou por meio de difração, estas ondas antes vinculadas ao grupo de ondas se tornam ondas livres, que podem ser refletidas para o mar aberto, num caminho de volta (*leaky waves*), ou ficarem presas por refração às proximidades da costa (*edge waves*). A importância relativa destas frente às ondas curtas é bastante variável, dependendo do número de Iribarren e da esbeltez da onda em águas profundas. Apesar de que tais ondas apresentem menos de 10% da energia total do grupo de ondas curtas que a gerou, podem se propagar até áreas abrigadas e portuárias, dando lugar a possíveis problemas de ressonância.

A ressonância portuária é fruto das geometrias das dársenas e da frequência ressonante natural existente mediante tais geometrias. Pode-se entender como frequência ressonante natural, aquela na qual as amplitudes de ondas, numa determinada área, amplificam-se devido à multiplicidade da frequência com as

velocidades de propagação e a posição dos nós e anti-nós gerados quando da reflexão das mesmas no interior desta área.

A sensibilidade do Terminal de Tubarão frente a eventos de ressonância portuária foi obtida também por meio da utilização do modelo MSP-MANOLO. Esta etapa consistiu em propagar ondas longas e medir em pontos de controle as amplitudes geradas devido à incidência das ondas e suas reflexões. Para tal, foram propagadas frequências com períodos entre 30 segundos e 5 minutos, com intervalos de 5s. O objetivo desta etapa foi o de aferir se dentro das frequências características de ondas longas incidentes na costa sudeste brasileira, existia alguma frequência ressonante no Terminal de Tubarão.

A mesma grade de elementos finitos utilizada nos casos de agitação portuária foi utilizada para os casos de ressonância portuária, incluindo a refletividade dos contornos. Dentre todos os pontos de grade foram selecionados 16 pontos de controle para avaliar a ressonância portuária em diferentes pontos das dársenas. A Figura 58 apresenta a grade utilizada com os pontos de controle. Por fim, os períodos que apresentaram ressonância no Terminal de Tubarão foram comparados com os períodos característicos de ondas longas na região.

Figura 57: Localização dos pontos de controle para análise de ressonância portuária.

4.10. CONSTITUIÇÃO DO MODELO DE FUNCIONAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

Após as análises dos dados de curto e longo prazo, foi possível sintetizar um esquema genérico de funcionamento desta área. Portanto, nesta etapa do trabalho foi elaborada uma síntese do funcionamento hidro-sedimentológico, destacando os principais pontos obtidos de todas as análises anteriores.

Tentou-se construir uma síntese que possa descrever dinamicamente o ambiente por meio da compilação dos resultados obtidos e dos compilados anteriormente, a saber: batimetria, marés, correntes de marés, ondas geradas pelo vento, ondas propagadas até a área de estudo, correntes induzidas por ondas, transporte sedimentar, agitação,

ressonância portuária e por fim análise de longo prazo de estabilidade da linha de costa para a Praia de Camburi.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. BATIMETRIA

Como descrito anteriormente, a batimetria da zona foi elaborada digitalizando e interpolando os valores batimétricos das cartas náuticas da DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil – 1985). A Figura 59 apresenta a batimetria digital obtida por meio do método *krigging* para a Área de Estudo, já a Figura 60 apresenta a batimetria final com os valores das isóbatas plotadas no desenho. Nas Figuras 59 e 60 é possível visualizar a grande quantidade de baixios, ilhas e acidentes topográficos da batimetria da região.

Figura 58: Resultado da Interpolação pelo método *Krigging*.

Figura 59: Batimetria da zona de estudo destacando os valores batimétricos.

A batimetria gerada, ou o modelo numérico de terreno elaborado, apresenta grande similaridade com outros desenvolvidos por outros autores, tais como Leme et. al. (2008), Marcondes (2005), entre outros .

5.2. MARÉ

5.2.1. MARÉ ASTRONÔMICA E MARÉ METEOROLÓGICA

As marés na região, conforme visto anteriormente, são semi-diurnas. Entretanto seria interessante conhecer os valores de maré para cada instante de tempo, pois isto ajudaria a identificar os cenários mais relevantes para o nível do mar junto à costa. As marés astronômicas foram previstas pelo método Almirante Franco, para todo o período de existência de dados de ondas, no caso para o período dos dados de retro-análise de

ondas do ECMWF, ou seja, de 01 de Janeiro de 1958 à 31 de dezembro de 2001. (Figura 61)

Figura 60: Maré astronômica para o Porto de Vitória de 1958 a 2001, prevista pelo método Almirante Franco.

As marés meteorológicas foram obtidas subtraindo os valores das marés astronômicas dos registros de maré dos marégrafos do Porto de Vitória e do Terminal de Tubarão. Infelizmente foram conseguidos junto ao BNDO apenas alguns intervalos de tempo destas séries. A Figura 62 apresenta a maré meteorológica e astronômica bem como o registro do marégrafo do Porto de Vitória, para um período consecutivo de 11 meses do biênio de 1961/62. Percebe-se nesta Figura que os valores de maré meteorológica não superam os 50 cm. A Figura 63 apresenta, para a mesma localidade, as mesmas variáveis da Figura anterior, porém para um período de um mês no ano de 1983. Para a localidade do Terminal de Tubarão são apresentados cinco períodos referentes a diferentes intervalos de tempo para os anos de 1972, 1975, 1979, 1991 e

1999 (Figuras 64, 65, 66, 67 e 68, respectivamente). Nelas é possível constatar que as marés meteorológicas variam entre 0 e 70 cm, e que possuem a duração de algumas horas a dias. Infelizmente, nem todo o sinal semi-diurno foi retirado, sendo isto devido a duas principais causas:

A primeira possibilidade é de que a maré prevista harmonicamente não contemple a totalidade do sinal de maré astronômica, a segunda é que o vento é responsável por parte da maré meteorológica, empilhando água na costa, e ele pode apresentar em determinados momentos dois ciclos diários com os ventos alísios (típico da costa brasileira). Acredita-se que ambos os motivos têm sua importância nestes registros apresentados a seguir, entretanto não afetam de forma substancial o objetivo de caracterizar as variações de nível e suas ordens de grandeza.

Figura 61: Maré meteorológica, maré astronômica e registro do marégrafo para o Porto de Vitória durante os anos de 1961 e 1962.

Figura 62: Maré meteorológica, maré astronômica e registro do marégrafo para o Porto de Vitória durante um período do ano de 1983.

Figura 63: Maré meteorológica, maré astronômica e registro de marégrafo para o Terminal de Tubarão de 07 de novembro a 11 de dezembro de 1972.

Figura 64: Maré meteorológica, maré astronômica e registro de marégrafo para o Terminal de Tubarão de 05 de junho a 08 de julho de 1975.

Figura 65: Maré meteorológica, maré astronômica e registro de marégrafo para o Terminal de Tubarão de 01 de maio a 01 de junho de 1979.

Figura 66: Maré meteorológica, maré astronômica e registro de marégrafo para o Terminal de Tubarão de 21 de julho a 15 de setembro de 1991.

Figura 67: Maré meteorológica, maré astronômica e registro de marégrafo para o Terminal de Tubarão de 01 de agosto a 14 de setembro de 1999.

As Figuras apresentadas anteriormente demonstram que as marés meteorológicas possuem uma grande importância relativa no nível do mar junto à costa. Apesar de não dispor de toda a série temporal para uma análise estatística adequada, podemos verificar que a ordem de grandeza é a de dezenas de centímetros, chegando a valores, durante os períodos verificados, de até 70 cm. O regime de marés da região, portanto, deve ser entendido como a soma da maré astronômica com a maré meteorológica, chegando, em eventos extremos a níveis de até 2m acima do nível de referência (NR – DHN).

Foram estabelecidos 3 cenários de maré característicos a serem utilizados na propagações de ondas: maré mínima de sizígia, maré máxima de sizígia e nível médio. A saber: 0,06m, 2,00m e 0,82m, respectivamente.

Para a análise da influência da maré nas correntes da região, foi proposto um cenário de maré semi-diurna com semi-amplitude de 0,95 m, ou amplitude de maré de 1,8m.

5.2.2. CORRENTES DE MARE

Além da variação da superfície livre do mar, as marés são responsáveis pela geração de correntes, sobretudo em regiões costeiras e estuarinas. A área de estudo apresenta um importante estuário, portanto as correntes induzidas pela maré na Baía de Vitória e na Baía do Espírito Santo devem ser analisadas.

A seguir são apresentadas algumas figuras que ilustram os resultados obtidos por meio da execução do modelo numérico hidrodinâmico integrado na vertical em modo

barotrópico (H2DZ). São figuras de superfície livre e de magnitude de correntes com os vetores de direção de propagação sobrepostos.

As figuras de superfície livre (Figuras 69, 71, 73 e 75) mostram claramente que há uma defasagem de fase do nível de maré dentro do estuário e fora dele. O canal de Vitória apresenta uma defasagem que vai aumentando à medida que se adentra ao estuário, sendo que a maré na região do Porto de Vitória é praticamente a mesma (tanto em fase como em amplitude) que a região externa. O canal da Passagem por sua vez, possui uma defasagem ainda maior. É neste canal que ocorre o encontro das ondas de maré que entram no estuário por este canal e pelo canal de Vitória. Na Figura 69 pode-se perceber que enquanto o interior do estuário apresenta um nível de aproximadamente 0,7 acima do nível médio (0,82m), ou seja, 1,52m, a porção externa apresenta valores de 0,3 acima do nível médio, ou seja, 1,12m. Este instante refere-se a um momento de vazante de maré em que a superfície livre no interior do estuário está 40 cm mais alta que a região externa e os vetores de correntes estão direcionados para o exterior do estuário (Figura 70). Pela coloração da Figura 70, podemos concluir que existem alguns pontos, no interior do canal de Vitória, onde há uma amplificação da corrente de maré. Estes pontos coincidem com locais mais estreitos e atingem valores de magnitude superiores a 1,2m/s. Na boca do canal da Passagem as velocidades também são grandes, entretanto perdem logo a intensidade.

As figuras de velocidade de correntes (Figuras 70, 72, 74 e 76) demonstram que há influência das correntes de maré no interior da Baía do Espírito Santo, sobretudo na porção ocidental da baía.

Figura 68: Superfície livre para o instante 03h.

Figura 69: Magnitude e vetores de correntes para o instante 03h.

Figura 70: Superfície livre para o instante 06h.

Figura 71: Magnitude e vetores de correntes para o instante 06h.

Figura 72: Superfície livre para o instante 09h.

Figura 73: Magnitude de correntes para o instante 09h.

Figura 74: Superfície para o instante 12h.

Figura 75: Magnitude e vetores de correntes para o instante 12h.

A seguir são apresentados os resultados de superfície livre e velocidade u e v de correntes nos pontos de controle (Figuras 79, 81, 83, 85, 87, 89 e 91) e de magnitude de

corrente (Figuras 80, 82, 84, 86, 88, 90 e 92). Os pontos com maiores valores de corrente estão localizados no canal de Vitória, são eles os pontos 4 e 6, Figuras 85 - 86 e 89 - 90 respectivamente, com magnitudes máximas entre 0,5 e 0,6 m/s. Nestes dois pontos podemos perceber que a componente mais importante é a componente Este-Oeste, ou seja a componente u . Isto ocorre devido à orientação do canal de Vitória que é basicamente Este-oeste.

As menores magnitudes de correntes são encontradas no ponto 1, que está localizado próximo ao molhe exterior do Terminal de Tubarão. Os valores máximos de correntes para este ponto são da ordem de 0,08 m/s.

A hora zero corresponde a uma situação de máxima preamar, ou seja, a superfície livre está na cota 1,80m. Desta forma, as seis primeiras horas correspondem à vazante, as seis horas seguintes à enchente e assim sucessivamente até completar as 48 horas de simulação utilizadas para a representação gráfica.

Podemos perceber que em todos os pontos existe uma diferença entre os valores de magnitude de correntes na enchente e na vazante. Nota-se que os valores de magnitude de corrente de maré vazante são maiores para os pontos dentro da Baía do Espírito Santo e nas proximidades das bocas dos canais (pontos 1, 2, 3 e 4), enquanto os pontos interiores dos canais (5, 6 e 7) apresentam valores de magnitude de corrente de enchente maiores. Ao serem analisados os valores de magnitude para todos os pontos, podemos perceber que as diferenças são maiores, em números absolutos, nos casos de vazante. Além disso, deve-se atentar que os valores das bocas dos canais são o que definem se um estuário tem fluxo neto de enchente ou vazante. As velocidades obtidas com esta modelagem estão dentro da ordem de grandeza, das obtidas por Chacaltana et.

al. (2003). Estes autores, utilizando um modelo DIVAST com o módulo de alagamento, chegaram a valores de 0.5m/s para a boca do canal de Vitória e de 0,6 para a boca do canal da passagem, valores semelhantes aos obtidos neste trabalho (0.55m/s e 0,4 m/s, respectivamente). A diferença dos valores obtidos para o canal da passagem se deve à escolha do ponto de controle, que está situado, não exatamente na boca, mas já na Baía do Espírito Santo (atenuando significativamente o seu valor de magnitude).

A Figura 77 apresenta os resultados obtidos por Menezes (2005), para uma condição de máximo vazante, também utilizando o modelo DIVAST. Pode-se perceber a similaridade dos fluxos obtidos por esse autor e os obtidos neste trabalho. Já a Figura 78, apresenta uma série temporal de velocidade de correntes para a boca do canal de Vitória. Se comparados os valores deste gráfico com os valores obtidos no ponto de controle 4 (Localizado no Porto de Vitória, Figura 11), pode-se perceber que tanto a assimetria de vazante como os valores de velocidade são bastante equivalentes.

Figuras 76 e 77: Vetores de corrente para um máximo de vazante e gráfico de variação das velocidades de corrente para a boca do canal de Vitória, respectivamente (Extraído de Menezes, 2005).

Figura 78: Superfície livre e as componentes u e v para o ponto 1.

Figura 79: Magnitude de correntes para o ponto 1.

Figura 80: Superfície livre e as componentes u e v para o ponto 2.

Figura 81: Magnitude de correntes para o ponto 2.

Figura 82: Superfície livre e as componentes u e v para o ponto 3.

Figura 83: Magnitude de correntes para o ponto 3.

Figura 84: Superfície livre e as componentes u e v para o ponto 4.

Figura 85: Magnitude de correntes para o ponto 4.

Figura 86: Superfície livre e as componentes u e v para o ponto 5.

Figura 87: Magnitude de correntes para o ponto 5.

Figura 88: Superfície livre e as componentes u e v para o ponto 6.

Figura 89: Magnitude de correntes para o ponto 6.

Figura 90: Superfície livre e as componentes u e v para o ponto 7.

Figura 91: Magnitude de correntes para o ponto 7.

Menezes (2005) encontrou algumas amplificações de correntes em alguns pontos da Baía do Espírito Santo (Figura 93), como nos baixios paralelos à linha de costa e nos cabeços dos molhes. As amplificações encontradas junto aos baixios também foram verificadas nas simulações realizadas nesta dissertação, entretanto as amplificações junto aos cabeços dos molhes de Praia Mole e Tubarão não o foram. Apesar de não terem sido verificadas nas execuções levadas a cabo nesta dissertação, por motivos ainda não esclarecidos, tais amplificações são bastante plausíveis e devem ser consideradas.

Figura 92 : Magnitude de corrente na máxima enchente, as regiões de intensificação estão apontadas pelas setas (Adaptado de Menezes, 2005).

5.3. ONDAS EM ÁGUAS PROFUNDAS

O principal agente modelador e carreador de energia para a área de estudo são as ondas. Compreender o clima marítimo, sua influência no transporte sedimentar e suas condicionantes, é um trabalho que deve ser efetuado por quem almeja compreender as dinâmicas existentes numa determinada baía, praia ou porto.

Sobre os dados do PROJETO ERAS-40, para a localização de 37,5°W e 20°S, pode-se afirmar que se trata de uma série contínua e homogênea. Entretanto, devido às melhorias nos processos de aquisição de dados ao longo das décadas, a precisão dos mesmos vêm aumentando de 1958 até 2001. Para este trabalho, um possível aumento de qualidade/precisão dos dados com o passar do tempo foi ignorado.

As Figuras 94 e 95 apresentam as séries temporais dos dados de altura significativa e período médio para a localização do ponto de retro-análise mais próximo da Baía de Vitória. Pode-se perceber que em águas profundas as ondas apresentam valores oscilando entre 0,7m e 4,5m de altura significativa. Já os períodos médios variam entre 5 e 14 segundos.

A Figura 96 mostra, através de um histograma direcional, que as ondas mais frequentes são as de SE, entretanto ocorrem ondas desde Norte até Sul-Sudoeste.

Figura 93: Série temporal de altura significativa de onda.

Figura 94: Série temporal de período médio de onda.

Figura 95: Histograma direcional de alturas significativas de ondas.

5.3.1.1. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para uma melhor visualização, foram determinadas as alturas significativas máximas mensais (Figura 97). Pode-se perceber que, de acordo com o esperado, as maiores alturas significativas de onda ocorreram entre maio e setembro, sendo o mês de fevereiro o com o menor valor.

Figura 96: Máximos Mensais.

A seguir são apresentados os ajustes estatísticos para as séries de dados. Primeiramente, foram confeccionados histogramas de altura significativa e período de pico para estes dados de águas profundas. Para a confecção dos histogramas, os dados foram divididos em classes, sendo cada classe correspondente a 0,05m e 0,1 segundos para altura significativa e período de pico respectivamente. Em seguida foram calculados os histogramas de classes de altura e período.

Para estes histogramas foram ajustadas quatro funções de distribuição (Normal, log-normal, Weibull de mínimos e Gumbel de máximos). Estes ajustes foram feitos pelo método de máxima verossimilitude. Sendo a função de Gumbel de máximos a que melhor se ajustou. As Figuras 98, 99, 100 e 101 mostram as funções estatísticas ajustadas para altura significativa de onda. A Figura 103 apresenta o regime médio de não superação de altura significativa de onda, feito com base na função de distribuição que apresentou o melhor ajuste. Em seguida foi pintada a função de distribuição para altura significativa (Figura 104). E por fim, foi pintado um histograma direcional destacando os quartis de 0-25%, 25-50%, 50-75% e 75-100% para cada direção (Figura 103).

Figura 97: Ajuste da função Normal para os dados de Altura Significativa ECMWF.

Figura 98: Ajuste da função Weibull de mínimos para os dados de Altura Significativa ECMWF.

Figura 99: Ajuste da função Log-Normal para os dados de Altura Significativa ECMWF.

Figura 100: Ajuste da função Gumbel de máximos para os dados de Altura Significativa ECMWF.

Para uma melhor visualização foram plotados os histogramas com duas das distribuições ajustadas como exemplo. Nitidamente percebe-se que a distribuição de Gumbel ajusta-se melhor (Figura 102).

Figura 101: Histograma de Alturas Significativas e os respectivos ajustes estatísticos.

Já com a função de Gumbel de máximos ajustada com parâmetros $\eta = 1,429$ e $\gamma = 0,2984$, foi elaborado o regime médio para as alturas significativas e pintado o histograma direcional (Figura 105).

Figura 102: Regime médio de altura significativa calculado com a função que melhor ajuste obteve (Gumbel de máximos).

Figura 103: Função de distribuição dos dados de altura significativa, destacando os valores de inter-quartis.

Figura 104: Histograma direcional de altura significativa com os Quartis para cada direção.

Para os períodos de pico foi realizado o mesmo procedimento, sendo a Figura 39 (?) referente à função de distribuição dos períodos de pico. As Figuras 106, 107, 108 e 109 mostram as funções de distribuição ajustadas aos dados. A Figura 110 mostra o regime médio de não superação, Figura 111 apresenta a função de distribuição dos períodos de pico e a Figura 112 destaca as direções e seus quartis através de um histograma direcional.

Figura 105: Ajuste da função Gumbel de máximos para os dados de período de pico ECMWF.

Figura 106: Ajuste da função Normal para os dados de período de pico ECMWF.

Figura 107: Ajuste da função Weibul de mínimos para os dados de período de pico ECMWF.

Figura 108: Ajuste da função Log-Normal para os dados de período de pico ECMWF.

Figura 109: Regime médio de período de pico calculado com a função que melhor ajuste obteve. (Log-normal).

Figura 110: Função de distribuição dos dados de período de pico, destacando os valores de inter-quartis.

Figura 111: Histograma direcional de período de pico com os quartis para cada direção.

A etapa seguinte foi a de elaboração dos regimes extremos com seus respectivos períodos de retorno. Para tal, foi utilizado o método POT. Este método consiste em selecionar os dados que apresentem valores superiores a um determinado valor, no caso superior ao percentil 99,5%. Com estes valores foram calculados seus respectivos percentis e seus correlatos períodos de retorno. Em seguida foi estipulada uma margem de confiança de 10%. As Figuras 113 e 114 mostram os regimes extremos para altura significativa e período de pico. Pode-se observar que o período de retorno para alturas significativas de 4,5m é de 100 anos e para períodos de pico de 14 segundos é de também de 100 anos.

Figura 112: Regime extremal de alturas significativas.

Figura 113: Regime extremal de períodos de pico.

Os resultados obtidos através dos dados do projeto de retro-análise ECMWF refletem as condições de agitação em águas profundas. Os resultados mostram que a porção do Oceano Atlântico que banha a costa brasileira não é muito energética, se comparada a outros locais do planeta, onde ondas de 4,5m de altura significativa ocorrem todos os anos, podemos citar como exemplo a costa da Califórnia-EUA, o mar Cantábrico no Atlântico Norte, a costa leste australiana, a costa chilena e peruana, etc.

Infelizmente, não foi possível uma comparação entre a base de dados do ECMWF com a base de dados do NCEP para a costa brasileira. Entretanto para outras localidades

do mundo alguns autores colocam que os dados de forçamento do vento na superfície do mar são menores no conjunto de dados do NCEP que de outros conjuntos como ECMWF, JRA25 e COADS que são bastante parecidos entre si e com dados de instrumentos fundeados (Josey *et. al.* 2002).

5.4. ONDAS EM PROFUNDIDADES REDUZIDAS

5.4.1. DADOS DO ONDOGRAFO

A Figura 115 apresenta a Série temporal de Dados de Altura Significativa de Onda, a Figura 116 apresenta a Série temporal de Dados de Período de Pico. Pode-se perceber que os períodos estão, de uma forma geral, pouco dispersos, compreendendo-se entre 3 e 11 segundos. Mas a moda situa-se em 6-7 segundos, tanto para período de pico como para período médio. A dependência sazonal se faz notar, sobretudo com a diminuição significativa das alturas de ondas e períodos nos meses de verão. As Figuras 117 e 118 apresentam os histogramas direcionais para altura significativa e período respectivamente, mostrando a grande influência de onda de Sudeste.

Figura 114: Série temporal de variação de Altura Significativa de Onda.

Figura 115: Série temporal de variação do Período de Pico.

Figura 116: Histograma direcional para alturas de ondas.

Figura 117: Histograma direcional de períodos de pico.

5.4.1.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para uma melhor visualização e interpretação destes dados, foram determinadas as alturas significativas máximas mensais (Figura 119). Pode-se perceber que, de acordo com o esperado, as maiores alturas significativas de onda ocorreram entre junho e setembro, sendo os meses de janeiro e fevereiro os com menores valores.

Figura 118: Máximos mensais

Os dados foram divididos em classes de altura de onda, sendo cada classe correspondente a 0,05m, Em seguida foi pintado o histograma de classes de altura de onda (Figura 120). Para este histograma foram ajustadas duas funções de distribuição (Normal e Gumbel). Estes ajustes foram feitos pelo método de máxima verossimilitude. A função que mais se ajustou foi a de Gumbel. O Ajuste da função de Gumbel foi obtido com os seguintes parâmetros: $\psi = 0,3476$; $\delta = 1,6059$.

Figura 119: Histograma de alturas significativas de ondas e ajustes das funções de distribuição à série de dados.

Esta técnica mostrou-se bastante confiável e representativa, entretanto os valores da moda (1m) estão um pouco mais representados na função que no conjunto de dados. Isto pode ser explicado devido à grande ausência de dados nos meses de fevereiro e março de 1980. O erro percentual de ajuste foi de: Erro de Ajuste = 0,0314

Com esta função ajustada, foi obtida a função de probabilidade de não superação, ou seja, o regime médio, com o qual se pode inferir a quantidade de tempo que uma determinada altura de onda é superada ao longo de um ano (Figura 121). Pode-se ler que a probabilidade de ocorrência de ondas de alturas significativas maiores de 1,7 m é de 0,5, ou seja, ao escolhermos aleatoriamente um instante qualquer, é de 50% a probabilidade de serem ondas inferiores a 1,7m. A Figura 122 mostra muito claramente o predomínio da direção sudeste.

Figura 120: Função de Probabilidade de não superação, ou simplesmente regime médio.

Para uma melhor visualização dos dados confeccionou-se um histograma direcional destacando os Quartis para cada setor de distribuição.

Figura 121: Histograma direcional com os quartis de distribuição de H_s .

5.4.2. PROPAGACÕES DOS CENÁRIOS INPH

A seguir são apresentados os resultados obtidos com o modelo Oluca (equação da Declividade Suave Versão Parabólica) para ondas espectrais provenientes dos cenários do INPH. Foram compilados os dados das simulações espectrais nos pontos de controle. As Figuras 123, 124, 125, 126, 127, 128 e 129 apresentam os espectros iniciais e em cada ponto de controle para cada uma das simulações (1m 7s direção Sul, 1m 7s direção Sudeste, 1m 7s direção Este, 2,7m 12s direção sudeste, 3,4 m 13,2s direção sudeste e 5,3m 15s direção sudeste). Pode-se notar que dependendo da direção e da intensidade das ondas incidentes, os espectros finais nos pontos de controle variam mais ou menos. Na Figura 130, para a simulação 1m 7s Este, pode-se observar que o ponto na Praia Mole apresenta um espectro de chegada quase igual ao propagado, já o ponto no interior da baía, mais precisamente na Praia de Camburi (cor marrom), tem uma atenuação quase que total. Na situação com ondas de 1m, 7s sul, em todos os pontos de controle

observam-se atenuações do espectro, entretanto a quantidade de energia recebida no ponto da Praia de Camburi é proporcionalmente maior que no caso anterior.

Nos cenários com as ondas extremas (máximo anual, máximo decadal e condição de projeto), à medida que as ondas vão se tornando maiores, a atenuação também é maior, mesmo que em números absolutos não varie muito (em torno de $4 \text{ m}^2/\text{s}$). Isto ocorre provavelmente devido à arrebentação de ondas. A exceção ocorre com o cenário 2,7m 12s direção sudeste, na localidade da Praia Mole, que recebe basicamente toda a energia incidente.

Figura 122: Espectro inicial e espectros re-compilados nos três pontos de controle para a simulação 1m 7s Este.

Figura 123: Espectro inicial e espectros re-compilados nos três pontos de controle para a simulação 1m 7s Sul.

Figura 124: Espectro inicial e espectros re-compilados nos três pontos de controle para a simulação 1m 7s Sudeste.

Figura 125: Espectro inicial e espectros re-compilados nos três pontos de controle para a simulação 2,7m 12s Sudeste.

Figura 126: Espectro inicial e espectros re-compilados nos três pontos de controle para a simulação 3,4 m 13,2s Sudeste.

Figura 127: Espectro inicial e espectros re-compilados nos três pontos de controle para a simulação 5,3 m 15s Sudeste.

Em uma primeira análise, pode-se perceber que a direção da onda é bastante determinante para a agitação nos diferentes pontos ao redor do Terminal de Tubarão. Analisando os cenários de altura significativa de 1m e período de pico de 7s para as 3 direções (E, SE e S), podemos perceber bem essas diferenças. Embora o pico dos espectros mantenha-se na sua frequência original, a quantidade de energia que atinge os três pontos de controle muda bastante. O ponto localizado na Praia Mole apresenta maior energia quando de ondas provenientes de Este e diminui consideravelmente em ondas vindas de sul. A Praia de Camburi, por sua vez, apresenta um comportamento oposto ao da Praia Mole, chegando mais energia em ondas provenientes de sul. Vale notar que o percentual de energia que chega a Praia de Camburi é relativamente baixo em ondas mais significativas (cenários com $H_s = 2,7\text{m}$ e $3,4\text{m}$), isto provavelmente é fruto da dissipação da energia por arrebentação, nos baixios existentes na Baía do Espírito Santo.

5.4.3. PROPAGACÕES PARA AS RECONSTRUÇÕES DA SÉRIE TEMPORAL

Nos pontos de interesse (Figura 129), foram calculadas as direções dos fluxos médios de energia e reconstruídas as séries temporais. De posse das séries temporais foram elaboradas as funções de distribuição, os histogramas direcionais, os regimes médios e os regimes extremos para cada um dos pontos objetivo.

Figura 128: Figura de localização dos pontos objetivo.

Na série de figuras que são apresentadas a seguir, mostram-se os resultados obtidos para cada um dos pontos objetivo. De uma forma geral, são apresentadas: série temporal de altura significativa, função de distribuição para altura significativa, função de distribuição para período de pico, histograma direcional para altura significativa e período de pico, regime médio e regime extremal, também para altura significativa e período de pico.

Figura 129: Série temporal de Hs no ponto objetivo 1.

Figuras 130 e 131: Função de distribuição de Hs e Tp no ponto objetivo 1.

Figuras 132 e 133: Histograma direcional de Hs e Tp no ponto objetivo 1.

Figuras 134 e 135: Regime médio e regime extremal para altura significativa para o ponto 1, respectivamente.

Figuras 136 e 137: Regime médio e regime extremal para Período de Pico para o ponto 1, respectivamente.

No ponto um, as ondas chegam com bastante intensidade, sendo que superaram algumas vezes a marca dos 2,5 metros (Figura 130). Existe uma probabilidade de 50% de se encontrar ondas inferiores à 0,9 metros de altura significativa (Figura 135). A altura significativa de período de retorno de 100 anos é de aproximadamente 3 metros (Figura 136). Pode-se observar que as maiores ondas vem do quadrante SSE-ESE (Figura 133 e 134).

Figura 138: Série temporal no ponto objetivo 2.

Figuras 139 e 140: Função de distribuição de Hs e Tp no ponto objetivo 2.

Figuras 141 e 142: Histograma direcional de Hs e Tp no ponto objetivo 2

Figuras 143 e 144: Regime médio e regime extremo para altura significativa para o ponto 2, respectivamente.

Figuras 145 e 146: Regime médio e regime extremo para Período de Pico para o ponto 2, respectivamente.

No ponto dois, as ondas chegam com muito menor intensidade, sendo que nunca superaram a marca dos 2,0m de altura significativa (Figura 139). Existe uma probabilidade de 50% de se encontrar ondas inferiores a 0,55 metros de altura significativa (Figura 144). A altura significativa de período de retorno de 100 anos é de aproximadamente 2 metros (Figura 145). Se observa que as ondas que atingem o ponto de controle 2, vem quase que exclusivamente de direção SSE (Figura 146 e 147).

Figura 147: Série temporal no ponto objetivo 3.

Figuras 148 e 149: Função de distribuição de Hs e Tp no ponto objetivo 3.

Figuras 150 e 151: Histograma direcional de Hs e Tp no ponto objetivo 3.

Figuras 152 e 153: Regime médio e regime extremal para altura significativa para o ponto 3, respectivamente.

Figuras 154 e 155: Regime médio e regime extremal para Período de Pico para o ponto 3, respectivamente.

No ponto 3, as ondas chegam muito atenuadas, atingindo apenas uma vez, durante toda a série temporal, a marca de 1m de altura significativa (Figura 148). As ondas atingem este ponto objetivo com direção sul-sudeste e algo de reflexão. Existe uma probabilidade de 50% de se encontrar ondas inferiores a 0,20 metros de altura significativa (Figura 153). A altura significativa de período de retorno de 100 anos é de aproximadamente 1 metro (Figura 154). As direções de ondas não apresentam muita variabilidade, atingindo o ponto 3 com direções de SSE. (Figuras 151 e 152)

Figura 156: Série temporal no ponto objetivo 4.

Figuras 157 e 158: Função de distribuição de Hs e Tp no ponto objetivo 4.

Figuras 159 e 160: Histograma direcional de Hs e Tp no ponto objetivo 4.

Figuras 161 e 162: Regime médio e regime extremal para altura significativa para o ponto 4, respectivamente.

Figuras 163 e 164: Regime médio e regime extremal para Período de Pico para o ponto 4, respectivamente.

No ponto 4 as ondas chegam muito atenuadas, atingindo um máximo de 1,1m de altura significativa (Figura 157). As ondas atingem este ponto objetivo com praticamente uma única direção, sul-sudeste. Existe uma probabilidade de 50% de se encontrar ondas inferiores a 0,35 metros de altura significativa (Figura 162). A altura significativa de período de retorno de 100 anos é de aproximadamente 1,1 metros (Figura 163). Igual ao ponto 3, a variabilidade direcional das ondas incidentes no ponto 4 é muito pequena, chegando basicamente ondas de direção SSE (Figuras 160 e 161).

Figura 165: Série temporal no ponto objetivo 5.

Figuras 166 e 167: Função de distribuição de Hs e Tp no ponto objetivo 5.

Figuras 168 e 169: Histograma direcional de Hs e Tp no ponto objetivo 5.

Figuras 170 e 171: Regime médio e regime extremal para altura significativa para o ponto 5, respectivamente.

Figuras 172 e 173: Regime médio e regime extremal para Período de Pico para o ponto 5, respectivamente.

No ponto 5 as ondas também chegam muito atenuadas, atingindo um máximo de 1,05m de altura significativa (Figura 166). As ondas atingem este ponto objetivo com direções, sul-sudeste e sudeste. Existe uma probabilidade de 50% de se encontrar ondas inferiores a 0,37 metros de altura significativa (Figura 171). A altura significativa de período de retorno de 100 anos é de aproximadamente 1,1 metros (Figura 172). As ondas atingem este ponto basicamente com direções SSE e SE (Figuras 169 e 170).

Figura 174: Série temporal no ponto objetivo 6.

Figuras 175 e 176: Função de distribuição de Hs e Tp no ponto objetivo 6.

Figuras 177 e 178: Histograma direcional de Hs e Tp no ponto objetivo 6.

Figuras 179 e 180: Regime médio e regime extremal para altura significativa para o ponto 6, respectivamente.

Figuras 181 e 182: Regime médio e regime extremal para Período de Pico para o ponto 6, respectivamente.

No ponto 6 as ondas também chegam atenuadas, porém não tanto como nos pontos anteriores. Durante toda a série temporal a marca de 1,5m de altura significativa não é atingida (Figura 175). As ondas atingem este ponto objetivo com direções sudeste e este-sudeste. Existe uma probabilidade de 50% de se encontrar ondas inferiores a 0,45 metros de altura significativa (Figura 180). A altura significativa de período de retorno de 100 anos é de aproximadamente 1,45 metros (Figura 181). As ondas atingem este ponto, basicamente com direções SE e ESE (Figuras 178 e 179).

Figura 183: Série temporal no ponto objetivo 7.

Figuras 184 e 185: Função de distribuição de Hs e Tp no ponto objetivo 7.

Figuras 186 e 187: Histograma direcional de Hs e Tp no ponto objetivo 7.

Figuras 188 e 189: Regime médio e regime extremal para altura significativa para o ponto 7, respectivamente.

Figuras 190 e 191: Regime médio e regime extremal para Período de Pico para o ponto 7, respectivamente.

No ponto 7 as ondas incidentes já apresentam maior importância se comparados aos pontos anteriores. Marcas de 1,75m de altura significativa são alcançadas algumas vezes (Figura 184). As ondas atingem este ponto objetivo com direções sul-sudeste, sudeste e este-sudeste, sendo esta última com um maior número de ocorrências. Existe uma probabilidade de 50% de se encontrar ondas inferiores a 0,65 metros de altura significativa (Figura 189). A altura significativa de período de retorno de 100 anos é de aproximadamente 1,85 metros (Figura 190). As direções de incidência variam de SSE, SE e ESSE (Figuras 187 e 188).

Figura 192: Série temporal no ponto objetivo 8.

Figuras 193 e 194: Função de distribuição de Hs e Tp no ponto objetivo 8

Figuras 195 e 196: Histograma direcional de Hs e Tp no ponto objetivo 8.

Figuras 197 e 198: Regime médio e regime extremal para altura significativa para o ponto 8, respectivamente.

Figuras 199 e 200: Regime médio e regime extremal para Período de Pico para o ponto 8, respectivamente.

No ponto 8 as ondas incidentes apresentam uma grande importância se comparadas aos pontos anteriores. A marca de 2,75m de altura significativa é alcançada (Figura 193). As ondas atingem este ponto objetivo com diferentes direções sul, sul-sudeste, sudeste e este-sudeste, este e este-nordeste. Em outras palavras, basicamente todas as direções que estão presentes em águas profundas estão presentes neste ponto (Figuras 196 e 197). As maiores ocorrências são das direções sul-sudeste e sudeste. Existe uma probabilidade de 50% de se encontrar ondas inferiores a 1,05 metros de

altura significativa (Figura 198). A altura significativa de período de retorno de 100 anos é de aproximadamente 3 metros (Figura 199).

Podemos perceber que o ponto 8 é o ponto onde as alturas significativas de ondas são as maiores, e, por sua vez, o ponto 3 é o que apresenta as menores alturas significativas de ondas.

Percebe-se que os períodos não variam de ponto para ponto, isto deve-se ao fato de que o modelo utiliza as formulações lineares, que não permitem interação entre as diferentes frequências. Existe uma probabilidade de 50% de se encontrar períodos de pico inferiores a 6,9 segundos. O período de retorno de 100 anos revela períodos de pico de 12 segundos (Figuras 137, 138, 146, 147, 155, 156, 164, 165, 173, 174, 182, 183, 191, 192, 200 e 201).

As funções de distribuição mostram que quanto mais restritas são as condições de ondas, mais disforme é a função de distribuição. Isto pode ser verificado com um aumento das probabilidades de ondas muito pequenas, próximas à zero.

Albino *et. al.* (2001), afirmam que as ondas vindas de NE chegam à costa da ilha do Boi, com alturas significativas em média inferiores a 0,6m. Já as ondas de E e SE alcançam a Ilha do Boi com alturas significativas entre 0,5 e 0,8m e as ondas de S e SSE, desenvolvidas durante frentes frias intensas, quando alcançam alturas significativas na Ilha do Boi chegam a 1,0 e 1,4m. Estes números enquadram-se nas informações geradas por este trabalho, validando de alguma forma o trabalho realizado.

Percebe-se que alguma coisa limita o tamanho das ondas na Praia de Camburi a alturas significativas de aproximadamente 1 metro, independente das condições exteriores estarem muito mais “agitadas”.

Nota-se, também, que os períodos pouco mudam de um ponto para outro. Isto deve-se, em parte, ao modelo utilizado nas propagações, o qual não considera as interações não lineares entre as diferentes frequências. Segundo a teoria linear de ondas, os períodos se mantêm, apesar das alturas sofrerem com os efeitos da batimetria e contornos (empinamento, reflexão, refração e difração).

De acordo com as figuras apresentadas anteriormente, podemos perceber que cada porção da área de estudo está sujeita a diferentes condições de ondas.

5.5. ONDAS GERADAS PELO VENTO NO INTERIOR DA BAÍA

As ondas geradas no interior da baía podem ser caracterizadas pelos períodos de pico entre 1 e 3 segundos e alturas significativas variando entre 0 e 0,55m. A tabela 06 apresenta os resultados de altura significativa e período de pico de ondas geradas pelo vento local para a posição central da Praia de Camburi.

Tabela 6 : Altura significativa e período de pico para as ondas geradas pelo vento local para a Praia de Camburi

Direção de onde vem o vento	SW	SWS	S	SSE	SE	ESE	E	ENE
Período de Pico (s)	1,7458	2,1226	2,27	2,91	2,796	1,974	1,34	1,15
Altura Significativa (m)	0,2035	0,3138	0,35	0,55	0,504	0,253	0,11	0,087

5.6. ANÁLISE DE LONGO PRAZO

A verificação da estabilidade da linha de costa para a Praia de Camburi foi verificada através de análises em planta e em perfil, por meio das formulações de Tsu e Dean, respectivamente. As Figuras 202, 203, 204 e 205 mostram os ajustes parabólicos obtidos com as direções de fluxos médios de energia obtidos anteriormente, para diferentes pontos da baía. (1, 3 e 4, da reconstrução das séries temporais, Figura 52) A linha azul representa a posição em planta da praia numa situação de equilíbrio dinâmico ajustado para a área de estudo. A linha em preto representa a linha de costa atual. As linhas cinza mostram outras possíveis linhas de costa paralelas à ajustada e os pontos amarelos ou brancos representam os pontos de difração considerados. A linha curva rosa delimita a área de influência da difração.

Figura 201: Parábola de forma em planta da Praia de Camburi, obtida pelo ponto de difração do molhe de Praia Mole do Porto de Tubarão. (Fluxo Médio de Energia: S44E).

Figura 202: Parábola ajustada para a Ponta da Praia de Camburi com o ponto de difração do Costão.

Figura 203: Parábola ajustada para a ponta da Praia de Camburi com o ponto de difração no Ilhote.

Figura 204: Ajuste final, com a composição dos pontos de difração.

Estes ajustes mostram que a porção oeste e a porção central estão em equilíbrio. Por outro lado, a porção leste da Praia de Camburi, possui um déficit de sedimentos considerável. A presença dos espigões na praia afeta timidamente a forma em planta, recuando a linha de costa à leste dos espigões. Vale destacar que a profundidade máxima que alcançam os espigões é em torno dos 3m. Ou seja, a profundidade de fechamento da praia não é atingida. Portanto, apesar de retardar o processo de deriva litorânea, este processo não é interrompido.

Medina *et. al.* (1994) descrevem a relação entre as formas do perfil e a granulometria da praia, apoiando-se nas formulações de Dean e em observações de campo para o litoral espanhol. Os autores confirmam que quanto maior a classe do sedimento, mais íngreme é o perfil emerso da praia e fazem parametrizações da equação de Dean, com intuito de comprovar se uma determinada praia possui uma tendência de

erosão, uma tendência progradante ou de equilíbrio. Esta metodologia foi empregada neste trabalho chegando a algumas conclusões.

Com relação ao perfil de equilíbrio, foi escolhido um perfil na porção média da praia, sendo que este foi ajustado por meio dos valores de batimetria da carta náutica. Foi calculado o Fator A de ajuste, da fórmula de Dean, e pintado o gráfico. A Figura 206 apresenta o perfil teórico (em vermelho) e os pontos batimétricos oriundos da interpolação dos valores da carta náutica. Pode-se perceber que o perfil é progradante na porção emersa, ou seja, está estável e com tendência a acumular mais sedimentos. Já na porção submersa, indica que há um déficit de material. Em outras palavras, a linha de costa está em equilíbrio, entretanto, em uma análise de longo prazo isto pode não observado.

Figura 205: Perfil de equilíbrio para a porção central da Praia de Camburi.

Conforme descrito em Albino(2003), após o engordamento artificial da Praia de Camburi, esta deixou de recuar terra a dentro. Podemos concluir que a praia não apresenta uma forma em planta típica de uma praia com em equilíbrio, porém, devido à

presença de diques e ao engordamento artificial da praia realizado com sedimentos grossos a praia se encontra em relativo equilíbrio.

Petruzzi & Albino (2005), utilizando amostras de sedimento da Praia de Camburi e as formulações de Dean, chegaram à mesma conclusão de que a praia se encontra em equilíbrio. Os autores destacam que a porção emersa apresenta uma declividade abrupta enquanto que a porção submersa apresenta um perfil muito mais suave. Isto se deve ao fato de que as areias mais grossas estarem dispostas na zona de maior energia (espraçamento), com areias mais finas na porção submersa e junto à berma. Estes autores também destacam que há uma pequena tendência erosiva no início da porção submersa, devido à perda de materiais mais finos em 3 dos 4 perfis realizados.

Prata & Albino (2005) apresentam o monitoramento das variações granulométricas dos sedimentos após o engordamento artificial realizado na Praia de Camburi e destacam a perda de materiais finos e muito grossos, com a manutenção de areias médias a grossas. Os autores destacam que, de uma forma geral, as lamas foram totalmente retiradas da porção emersa de todas as porções da praia e parte dos materiais mais grosseiros, como grânulos, foram retirados de algumas porções da praia pelas dinâmicas atuantes.

Albino & Prata (*op. cit.*) mostram que o volume de sedimento perdido entre os anos de 1999 e 2003 é de aproximadamente 28%, devido, sobretudo, à perda de materiais finos.

Com isso podemos concluir que, em longo prazo (décadas), em se mantendo as condições de ondas e níveis de marés atuais, a praia necessitará de um novo

engordamento, a fim de manter sua faixa de areia com as mesmas dimensões da atual. Sobretudo devido às perdas nas porções submersas do perfil e a configuração em planta, que sugere uma rotação na porção mais oriental da praia.

Pode-se dizer que o engordamento artificial obteve êxito, pois as frações granulométricas utilizadas no engordamento são mantidas e que a taxa de perda de materiais está em níveis considerados normais.

5.7. ANÁLISE DE CURTO PRAZO

5.7.1. MODELO OLUCA – ONDAS

Propagações de ondas espectrais dos cenários discretizados da série temporal calibrada do ECMWF.

Os cenários obtidos diretamente da análise dos dados da boia são diferentes dos cenários obtidos analisando toda a série temporal calibrada do ECMWF. Esta diferença se dá principalmente devido ao tamanho das séries, ou seja, o período de abrangência, ou sua duração temporal. Os dados da boia apresentam algo em torno de um ano de dados, o que impossibilita, ou ao menos reduz, a precisão dos regimes extremos. Por outro lado, os dados do ECMWF apresentam uma duração de 44 anos (1958 – 2001), tornando-os uma ferramenta muito valiosa para estimar os cenários mais importantes. Outro ponto desfavorável dos dados da Boia do INPH, reside no seu intervalo de amostragem (8 em 8 horas) contra 3 em 3 dos dados do ECMWF.

Portanto, foram pintados alguns exemplos dos casos propagados na execução do hiper-cubo com o intuito de ilustrar as diferentes condições à qual está submetida a Baía do Espírito Santo. Foram pintados três tipos de gráficos diferentes: gráficos de iso-alturas de ondas, gráficos de vetores de propagação de onda e gráficos de superfície livre calculados com fases aleatórias.

As condições escolhidas para serem pintadas, na forma de gráficos, foram as condições de 1 e 2,7m de altura significativa com período de pico de 7 e 10s ,respectivamente, para as direções NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE e SWS.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Altura significativa

Caso espectral: GID4
GI: Malha_interior_NNE
D4:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
Hs: 1 m
h: 40 m
fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s)
 γ : 3.3
Nº Comp.: 5
Espectro direcional
 θ_m : 57.79 ° (N22.5E)
 σ : 10 ° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 206: Gráfico de iso-alturas para a condição Hs= 1m, Tp= 7s e dir =N22,5E.

Projeto: Agitação Marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de altura significativa

Caso espectral: GID4
GI: Malha_interior_NNE
D4:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
Hs: 1 m
h: 40 m
fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s)
 γ : 3.3
Nº Comp.: 5
Espectro direcional
 θ_m : 57.79 ° (N22.5E)
 σ : 10 ° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 207: Gráfico de vetores de onda para a condição $H_s = 1\text{m}$, $T_p = 7\text{s}$ e $\text{Dir} = \text{N}22,5\text{E}$.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Altura significativa

Caso espectral: GID8
GI: Malha_interior_NNE
D8:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

f_p: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ: 3.3

Nº Comp.: 5

Espectro direcional

θ_m: 57.79 ° (N22.5E)

σ: 10 ° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 208: Gráfico de iso-alturas para a condição Hs= 2,7m, Tp=10s e Dir = N22,5E

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de altura significativa

Caso espectral: GID8
GI: Malha_interior_NNE
D8:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

fp: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ : 3.3

Nº Comp.: 5

Espectro direcional

θ_m : 57.79° (N22.5E)

σ : 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 209: Gráfico de vetores de onda na condição Hs= 2,7m, Tp=10s e Dir = N22,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Altura significativa

Caso espectral: HID3
HI: Malha_interior_NE
D3:

Características da simulação

OLUCA-SP
Espectro frequencial (TMA)
Hs: 1 m
h: 40 m
fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s)
 γ : 8
Nº Comp.: 5
Espectro direcional
 θ_m : 18.55° (N67.5E)
 σ : 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 210: Gráfico de iso-alturas para a condição $H_s=1\text{m}$, $T_p=7\text{s}$ e $\text{Dir} = \text{N}67,5\text{E}$

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de altura significativa

Caso espectral: HID3
HI: Malha_interior_NE
D3:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
Hs: 1 m
h: 40 m
fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s)
 γ : 8
Nº Comp.: 5
Espectro direcional
 θ_m : 18.55° (N67.5E)
 σ : 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 211: Gráfico de vetores de onda para a condição $H_s = 1\text{m}$, $T_p = 7\text{s}$ e $\text{Dir} = \text{N}67,5\text{E}$

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Altura significativa

Caso espectral: HID7
HI: Malha_interior_NE
D7:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

fp: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ : 8

Nº Comp.: 5

Espectro direcional

θ_m : 18.55° (N67.5E)

σ : 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 212: Gráfico de iso-alturas para a condição Hs= 2,7m, Tp=10s e Dir = N67,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de altura significativa

Caso espectral: HID7
HI: Malha_interior_NE
D7:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

f_p: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ: 8

Nº Comp.: 5

Espectro direcional

θ_m: 18.55° (N67.5E)

σ: 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 213: Gráfico de vetores para a condição Hs= 2,7m, Tp=10s e Dir = N67,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Altura de significativa

Caso espectral: QIE3
QI: Malha_interior_ESE
E3:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
 Hs: 1 m
 h: 40 m
 fp: 0.142856 Hz (Tp: 7.00006 s)
 γ : 8
 Nº Comp.: 5
 Espectro direcional
 θ_m : 13.81 ° (E)
 σ : 10 ° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 214: Gráfico de iso-alturas para a condição $H_s = 1\text{ m}$, $T_p = 7\text{ s}$ e $\text{Dir} = \text{S90E}$.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de altura significativa

Caso espectral: QIE3
QI: Malha_interior_ESE
E3:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
 Hs: 1 m
 h: 40 m
 fp: 0.142856 Hz (Tp: 7.00006 s)
 γ : 8
 N° Comp.: 5
 Espectro direcional
 θ_m : 13.81 °(E)
 σ : 10 ° - N° Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 215: Gráfico de vetores para a condição $H_s = 1\text{m}$, $T_p = 7\text{s}$ e $\text{Dir} = \text{S90E}$.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Altura significativa

Caso espectral: QIE4
QI: Malha_interior_ESE
E4:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

fp: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ : 8

Nº Comp.: 5

Espectro direcional

θ_m : 13.81 ° (E)

σ : 10 ° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 216: Gráfico de iso-alturas para a condição Hs= 2,7m, Tp=10s e Dir = S90E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de altura significativa

Caso espectral: QIE4
QI: Malha_interior_ESE
E4:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

fp: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ : 8

Nº Comp.: 5

Espectro direccional

θ_m : 13.81 ° (E)

σ : 10 ° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 217: Gráfico de vetores para a condição Hs= 1m, Tp=7s e Dir = S90E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Altura significativa

Caso espectral: QID2
QI: Malha_interior_ESE
D2:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
Hs: 1 m
h: 40 m
fp: 0.142867 Hz (Tp: 6.99952 s)
 γ : 8
Nº Comp.: 5
Espectro direcional
 θ_m : -8.69° (S67.5E)
 σ : 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 218: Gráfico de iso-alturas para a condição $H_s=1$ m, $T_p=7$ s, S67,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vectores de altura significativa

Caso espectral: QID2
QI: Malha_interior_ESE
D2:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
Hs: 1 m
h: 40 m
fp: 0.142867 Hz (Tp: 6.99952 s)
 γ : 8
Nº Comp.: 5
Espectro direcional
 θ_m : -8.69° (S67.5E)
 σ : 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 219: Gráfico de vetores de ondas para a condição $H_s=1$ m, $T_p=7$ s, S67,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Altura significativa

Caso espectral: QID6
QI: Malha_interior_ESE
D6:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

fp: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ : 8

Nº Comp.: 5

Espectro direcional

θ_m : -8.69° (S67.5E)

σ : 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 220: Gráfico de iso-alturas para a condição $H_s=2,7$ m, $T_p=10$ s, S67,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores da altura significativa

Caso espectral: QID6
QI: Malha_interior_ESE
D6:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

f_p: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ: 8

Nº Comp.: 5

Espectro direcional

θ_m: -8.69° (S67.5E)

α: 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 221: Gráfico de vetores de onda para a condição Hs=2,7 m, Tp=10s S67,5E

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Altura significativa

Caso espectral: QIE2
QI: Malha_interior_ESE
E2:

Características da simulação

OLUCA-SP
Espectro frequencial (TMA)
Hs: 1 m
h: 40 m
fp: 0.142856 Hz (Tp: 7.00006 s)
 γ : 8
Nº Comp.: 5
Espectro direcional
 θ_m : -31.19° (S45.0E)
 σ : 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 222: Gráfico de iso-alturas para a condição $H_s=1$ m, $T_p=7$ s, S45,0E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de altura significativa

Caso espectral: QIE2
QI: Malha_interior_ESE
E2:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
Hs: 1 m
h: 40 m
fp: 0.142856 Hz (Tp: 7.00006 s)
 γ : 8
Nº Comp.: 5
Espectro direcional
 θ_m : -31.19° (S45.0E)
 σ : 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 223: Gráfico de iso-alturas para a condição Hs=1 m, Tp= 7s, S45,0E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Altura significativa

Caso espectral: QIE1
QI: Malha_interior_ESE
E1:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

f_p: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ: 8

Nº Comp.: 5

Espectro direcional

θ_m: -31.19° (S45.0E)

σ: 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 224: Gráfico de iso-alturas para a condição Hs=2,7 m, Tp= 10s, S45,0E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de altura significativa

Caso espectral: QIE1
QI: Malha_interior_ESE
E1:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

f_p: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ: 8

Nº Comp.: 5

Espectro direcional

θ_m: -31.19° (S45.0E)

σ: 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 225: Gráfico de vetores de ondas para a condição Hs=2,7 m, Tp= 10s, S45,0E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Altura significativa

Caso espectral: ISD9
IS: Malha_interior_SUL
D9:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
Hs: 1 m
h: 40 m
fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s)
 γ : 8
Nº Comp.: 5
Espectro direcional
 θ_m : 16.32° (S22.5E)
 σ : 15° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 226: Gráfico de iso-alturas para a condição Hs=1 m, Tp= 7s, S22,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de altura significativa

Caso espectral: ISD9
IS: Malha_interior_SUL
D9:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
Hs: 1 m
h: 40 m
fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s)
 γ : 8
Nº Comp.: 5
Espectro direcional
 θ_m : 16.32° (S22.5E)
 σ : 15° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 227: Gráfico vetores de ondas para a condição $H_s=1$ m, $T_p=7$ s, S22.5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Altura significativa

Caso espectral: ISE0
IS: Malha_interior_SUL
E0:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

fp: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ : 8

Nº Comp.: 5

Espectro direcional

θ_m : 16.32° (S22.5E)

α : 15° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 228: Gráfico de iso-alturas para a condição $H_s=2,7$ m, $T_p=10$ s, S22,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de altura significativa

Caso espectral: ISE0
IS: Malha_interior_SUL
E0:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2,7 m

h: 40 m

f_p: 0,1 Hz (Tp: 10 s)

γ: 8

Nº Comp.: 5

Espectro direcional

θ_m: 16,32° (S22,5E)

σ: 15° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 229: Gráfico de iso-alturas para a condição Hs=2,7 m, Tp= 10s, S22,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Altura significativa

Caso espectral: ISD1
IS: Malha_interior_SUL
D1:

Características da simulação

OLUCA-SP
Espectro frequencial (TMA)
Hs: 1 m
h: 40 m
fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s)
 γ : 8
Nº Comp.: 5
Espectro direcional
 θ_m : -28.68° (S22.5W)
 σ : 15° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 230: Gráfico de iso-alturas para a condição Hs=1 m, Tp= 7s, S22,5w.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vectors de altura significativa

Caso espectral: ISD1
IS: Malha_interior_SUL
D1:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
Hs: 1 m
h: 40 m
fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s)
 γ : 8
Nº Comp.: 5
Espectro direcional
 θ_m : -28.68° (S22.5W)
 σ : 15° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 231: Gráfico de vetores de ondas para a condição $H_s=1$ m, $T_p=7$ s, S22,5w.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Altura significativa

Caso espectral: ISD5
IS: Malha_interior_SUL
D5:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

fp: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ: 8

Nº Comp.: 5

Espectro direcional

θm: -28.68° (S22.5W)

σ: 15° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

MOPLA 2.0: IH Cantabria

Programa desarrollado por

Figura 232: Gráfico de iso-alturas para a condição Hs=2,7 m, Tp= 10s, S22,5w.

Projecto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores da altura significativa

Caso espectral: ISD5
IS: Malha_interior_SUL
D5:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

fp: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ : 8

Nº Comp.: 5

Espectro direccional

θ_m : -28.68° (S22.5W)

σ : 15° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

MOPLA-SP

Figura 233: Gráfico de v para a condição $H_s=2,7$ m, $T_p=10$ s, S22,5w.

Figura 234: Superfície livre para o cenário Hs 2m, Tp 8s e Dir N22,5E.

Figura 235: Superfície livre para o cenário Hs 4m, Tp 8s e Dir N67,5E.

Figura 236: Superfície livre para o cenário Hs 3m, Tp 8s e Dir S67,5E.

Figura 237: Superfície livre para o cenário Hs 4m, Tp 10s e Dir S22,5E.

Figura 238: Superfície livre para o cenário Hs 4m, Tp 10s e Dir S22,5W.

As figuras anteriores demonstram a grande variabilidade de condições que experimentam os arredores do Terminal de Tubarão. As figuras de iso-alturas de ondas e as de vetores de propagação evidenciam as áreas expostas e protegidas em cada um dos casos propagados.

Pode-se perceber que nos casos de ondas de N22,5E, a Baía do Espírito Santo fica totalmente abrigada das ondas incidentes, independente do tamanho da onda, por outro lado, a região da Praia Mole fica bastante exposta a estas ondas. Para estes cenários as ondas atingem a Praia Mole de forma oblíqua (Figuras 207, 208, 209 e 210).

As ondas de N67,5E (Figuras 211, 212, 213 e 214) adentram principalmente na porção ocidental da Baía do Espírito Santo, sendo que algumas ondas chegam a adentrar o canal de Vitória. O tamanho das ondas (H_s e T_p) relaciona-se com a quantidade de energia que se difrata no molhe de Praia Mole Terminal para dentro da Baía de Vitória. Entretanto é a região da Praia Mole que é mais impactada, com as ondas atingindo a praia de forma oblíqua.

As ondas de direção E (Figuras 215, 216, 217 e 218), assim como nos cenários de ENE, atingem o interior da baía, sobretudo nas porções do canal de Vitória, nas ilhas do Frade e do Boi. Na Praia Mole as ondas atingem a praia com frentes praticamente paralelas à linha de praia.

As ondas de direção ESE, ou seja, S67,5E, (Figuras 219, 220, 221 e 222) já entram com certa intensidade na Baía do Espírito Santo, atingindo a porção mais ocidental da Praia de Camburi. A Praia Mole continua recebendo as ondas de forma direta, entretanto a obliquidade das ondas incidentes é quase nula.

No caso de ondas de direção S45,0E (Figura 223, 224, 225 e 226) e S22,5E (Figuras 227, 228, 229 e 230), a incidência das ondas é bastante direta em toda a Baía do Espírito Santo, sendo a influência do molhe de Praia Mole bastante reduzida. Na Praia Mol as ondas já chegam com alguma obliquidade, porém com valores angulares positivos em relação à ortogonal da praia.

As ondas de SSE, e as ondas de SWS, ou seja, S22.5W (Figuras 231, 232, 233 e 234), mostram que as ondas são bastantes afetadas pelos parcéis e ilhas existentes na porção sul da área de estudo. Atingem tanto a Praia de Camburi como a Praia Mole de forma indireta, por meio da difração.

As figuras de superfície livre com fases aleatórias (Figuras 235, 236, 237, 238 e 239) mostram os efeitos da batimetria nas frentes de ondas. Nas condições de ESE, ENE e NNE o molhe de Praia Mole influi bastante nas ondas que chegam até a Praia de Camburi. As ondas que atingem a Praia Mole são alteradas pelo respectivo molhe, principalmente nos cenários de onda de direção SWS, SSE e SE.

Soares (2005), durante trabalhos de campo, encontrou alturas significativas na zona de arrebentação muito próximas aos valores de ondas em águas profundas, para os dias de 01, 22, 23, 27 e 28 de setembro de 2004. Soares (op. cit) destaca que em águas profundas as ondas variaram de 0,9 a 1,2m de altura significativa e períodos de pico de 6 a 10 segundos com direções de SE. Na zona de arrebentação essas mesmas ondas chegaram com alturas de 0,8 a 1m de altura significativa e períodos. Comparando os resultados de Soares com os das propagações de SE realizadas neste trabalho, percebe-se que as alturas significativas deste estão um pouco menores que as alturas

medidas na arrebentação no trabalho de Soares (*op. cit.*), entretanto apresentam uma boa correlação.

Isto pode ocorrer devido a alguns fatores. O tamanho das células de grade ,utilizadas neste trabalho, são de 50 por 50 metros, portanto a precisão das alturas de ondas na arrebentação da Praia de Camburi se vê um pouco prejudicada, uma vez que esta praia pode ser classificada como sendo refletiva dentro da classificação de estados morfodinâmicos de praia proposta por Wrigth & Short (1984) e a arrebentação é do tipo colapsante à mergulhante, dependendo do trecho da praia (Albino *et. al.*, 2001). Ou seja, o empinamento das ondas ocorre de maneira muito brusca e perto da costa, a não mais de 20-30 metros , como pode atestar a foto da Figura 240. A segunda causa provável é de que as alturas significativas medidas por Soares (*op. cit.*), com balizas métricas, não reflitam muito bem as alturas significativas reais, pois, além de serem medidas com réguas e operadores, não levou em conta um número mínimo de ondas para seus cálculos (foram utilizadas apenas cinco medidas de ondas para a determinação das alturas). A terceira e última causa provável desta discrepância, de cerca de 0,15 cm em média, é o fato de o modelo utilizado não computar as ondas geradas por vento local, nem permitir a interação entre os períodos.

Figura 239: Foto do tipo de arrebentação na Praia de Camburi. (Extraído de Soares, 2005)

Em suma, os dados de ondas apresentados têm boa concordância com dados da literatura, com erros inferiores a 0,20 cm.

5.7.2. MODELO COPLA – CORRENTES INDUZIDAS POR ONDAS

De posse dos valores de altura significativa, período de pico, direção de onda e estimando a localização média dos pontos de arrebentação em toda a grade de cálculo para todos os cenários, foi possível calcular as correntes induzidas por ondas na região de estudo. Foram calculadas as correntes induzidas para todos os cenários discretizados da série temporal calibrada na posição da boia. A seguir são apresentados alguns gráficos de vetores e magnitude de correntes para as condições de ondas apresentadas na seção anterior.

De uma forma geral, pode-se observar que as derivas litorâneas na Praia de Camburi são em direção a leste da praia, independente das direções das ondas incidentes na plataforma continental adjacente. Já para a Praia Mole a direção da deriva litorânea está intimamente ligada à direção de propagação das ondas na plataforma continental adjacente.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de corrente

Caso espectral: GID4
GI: Malha_interior_NNE
D4:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
 Hs: 1 m
 h: 40 m
 fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s)
 γ: 3.3
 Nº Comp.: 5
Espectro direcional
 θm: 57.79° (N22.5E)
 σ: 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de
 Nikuradse
 Kswc: 1 m
 Viscosidade
 turbulenta
 ε: 12 m²/s

MOPLA-SP

Figura 240: Vetores magnitude de corrente para o cenário Hs 1m, Tp 7s e dir N22,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de corrente

Caso espectral: GID8
GI: Malha_interior_NNE
D8:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m
 h: 40 m
 fp: 0.1 Hz (Tp: 10 s)
 γ: 3.3
 N° Comp.: 5
Espectro direcional
 θm: 57.79° (N22.5E)
 σ: 10° - N° Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de
 Nikuradse
 Kswc: 1 m

Viscosidade de
 remolho
 ε: 12 m²/s

MOPLA-SP

Figura 241: Vetores magnitude de corrente para o cenário Hs 2,7m, Tp 10s e dir N22,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de correntes

Caso espectral: HID3
HI: Malha_interior_NE
D3:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
 Hs: 1 m
 h: 40 m
 Tp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s)
 γ: 8
 N° Comp.: 5
 Espectro direcional
 θm: 18.55° (N67.5E)
 σ: 10° - N° Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de
 Nikuradse
 Kswc: 1 m

MOPLA-SP

Viscosidade
 turbulenta
 ε: 25 m²/s

Figura 242: Vetores magnitude de corrente para o cenário Hs 1m, Tp 7s e dir N67,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de corrente

Caso espectral: HID7
HI: Malha_interior_NE
D7:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

fp: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ : 8

Nº Comp.: 5

Espectro direcional

θ_m : 18.55° (N67.5E)

σ : 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de
Nikuradse
Ksw: 1 m

Viscosidade de
remolinho
 ϵ : 25 m²/s

MOPLA-SP

Figura 243: Vetores magnitude de corrente para o cenário Hs 2,7m, Tp 10s e dir N67,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de corrente

Caso espectral: QIE3
QI: Malha_interior_ESE
E3:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
 Hs: 1 m
 h: 40 m
 fp: 0.142856 Hz (Tp: 7.00006 s)
 γ : 8
 N° Comp.: 5
 Espectro direcional
 θ_m : 13.81 ° (E)
 σ : 10 ° - N° Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de Nikuradse
 Ksw: 1 m

Viscosidade turbulenta
 ϵ : 25 m²/s

MOPLA-SP

Figura 244: Vetores magnitude de corrente para o cenário Hs 1m, Tp 7s e dir S90E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vectores de corrente

Caso espectral: QIE4
QI: Malha_interior_ESE
E4:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

fp: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ : 8

Nº Comp.: 5

Espectro direcional

θ_m : 13.81 ° (E)

σ : 10 ° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de
Nikuradse
Ksw: 1 m

Viscosidade
Turbulenta
 ϵ : 25 m²/s

MOPLA-SP

Figura 245: Vetores magnitude de corrente para o cenário Hs 2,7m, Tp 10s e dir S90E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de corrente

Caso espectral: QID2
QI: Malha_interior_ESE
D2:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
 Hs: 1 m
 h: 40 m
 fp: 0.142867 Hz (Tp: 6.99952 s)
 γ : 8
 N° Comp.: 5
 Espectro direcional
 θ_m : -8.69° (S67.5E)
 σ : 10° - N° Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de Nikuradse
 Ksw: 1 m

Viscosidade turbulenta
 ϵ : 25 m²/s

MOPLA-SP

Figura 246: Vetores magnitude de corrente para o cenário Hs 1m, Tp 7s e dir S67,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de corrente

Caso espectral: QID6
QI: Malha_interior_ESE
D6:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m
 h: 40 m
 fp: 0.1 Hz (Tp: 10 s)
 γ : 8
 Nº Comp.: 5
Espectro direcional
 θ_m : -8.69° (S67.5E)
 σ : 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidad de Nikuradse
 Ksw: 1 m

Viscosidad de remolino
 ϵ : 25 m²/s

MOPLA-SP

Figura 247: Vetores magnitude de corrente para o cenário Hs 2,7m, Tp 10s e dir S67,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de corrente

Caso espectral: QIE2
QI: Malha_interior_ESE
E2:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
 Hs: 1 m
 h: 40 m
 fp: 0.142856 Hz (Tp: 7.00006 s)
 γ: 8
 N° Comp.: 5
 Espectro direcional
 θm: -31.19° (S45.0E)
 σ: 10° - N° Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de Nikuradse
 Kswc: 1 m
 Viscosidade Turbulenta
 ε: 25 m²/s

MOPLA-SP

Figura 248: Vetores magnitude de corrente para o cenário Hs 1m, Tp 7s e dir S45,5 °E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de corrente

Caso espectral: QIE1
QI: Malha_interior_ESE
E1:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m
 h: 40 m
 fp: 0.1 Hz (Tp: 10 s)
 γ: 8
 Nº Comp.: 5

Espectro direcional

θm: -31.19° (S45.0E)
 σ: 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de
 Nikuradse
 Kswc: 1 m

Viscosidade
 Turbulenta
 ε: 25 m²/s

MOPLA-SP

Figura 249: Vetores magnitude de corrente para o cenário Hs 2,7m, Tp 10s e dir S45E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de corrente

Caso espectral: ISD9
IS: Malha_interior_SUL
D9:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
 Hs: 1 m
 h: 40 m
 fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s)
 γ : 8
 Nº Comp.: 5
Espectro direcional
 θ_m : 16.32° (S22.5E)
 σ : 15° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de
 Nikuradse
 Kswc: 1 m
 Viscosidade
 Turbulenta
 ϵ : 25 m²/s

MOPLA-SP

Figura 250: Vetores magnitude de corrente para o cenário Hs 1m, Tp 7s e dir S22,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de corrente

Caso espectral: ISE0
IS: Malha_interior_SUL
E0:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

fp: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ : 8

Nº Comp.: 5

Espectro direcional

θ_m : 16.32° (S22.5E)

α : 15° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de
Nikuradse
Kswc: 1 m

Viscosidade
turbulenta
 ϵ : 25 m²/s

MOPLA-SP

Figura 251: Vetores magnitude de corrente para o cenário Hs 2,7m, Tp 10s e dir S22,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e blanço sedimentar

Gráfico: Vetores de corrente

Caso espectral: ISD1
IS: Malha_interior_SUL
D1:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
 Hs: 1 m
 h: 40 m
 fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s)
 γ: 8
 N° Comp.: 5
Espectro direccional
 θm: -28.68° (S22.5W)
 σ: 15° - N° Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidad de Nikuradse
 Kswc: 1 m

MOPLA-SP

Viscosidad de remolino
 ε: 25 m²/s

Figura 252: Vetores magnitude de corrente para o cenário Hs 1m, Tp 7s e dir S22,5W.

Projecto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vectores corrente

Caso espectral: ISD5
IS: Malha_interior_SUL
D5:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

fp: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ : 8

Nº Comp.: 5

Espectro direccional

θ_m : -28.68° (S22.5W)

σ : 15° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidad de

Nikuradse

Kswc: 1 m

Viscosidad de

remolinos

ϵ : 25 m²/s

MOPLA-SP

Figura 253: Vetores magnitude de corrente para o cenário Hs 2,7m, Tp 10s e dir S22,5W.

As figuras anteriores mostram claramente que as correntes induzidas por ondas variam bastante conforme varia a direção da onda. Tomando como referência a Praia Mole, pode-se generalizar que com ondas vindas de N22,5E, N45E e N67,5E a corrente litorânea, ou corrente longitudinal, flui em direção ao sul. Com ondas vindas de N67,5E e S90E a corrente continua indo em direção ao sul, entretanto já se percebem algumas componentes indo em direção a este. Com ondas provenientes de S67,5E e S45E a corrente já se torna basicamente este-oeste, ou seja a corrente longitudinal perde importância, e as correntes transversais ganham. Já com ondas de S22,5E a corrente na Praia Mole já flui para norte/nordeste.

Com ondas vindas de S22,5W ocorre um fato curioso. Com ondas pequenas (1m 7s dir S22,5W , Figura 253) a corrente flui sentido sul, já com ondas maiores (2.7m 10s dir S22,5W, Figura 254) a corrente flui para norte. Este fato ocorre devido à influência do molhe de Praia Mole. Para ondas pequenas (1m 7s dir S22,5W) o molhe funciona basicamente como um anteparo às ondas, sendo que as alturas incidentes na Praia Mole devido à difração são muito pequenas, a ponto de não gerarem correntes de Sul para Norte. Neste caso o gradiente de alturas de ondas é o responsável por gerar uma leve corrente em direção a sul. Nas condições mais energéticas (2,7m 10s dir S22,5W) o molhe de Praia Mole funciona como um ponto de difração onde as ondas giram e atingem a Praia Mole com orientação de sul, gerando correntes de sul para Norte com certa intensidade.

As intensidades de corrente variam de acordo com a direção da onda e com o aumento de altura e período. Foram encontradas velocidades entre 0,05 a 0,7 m/s.

Na Praia de Camburi os cenários de NNE (N22,5E) não geram correntes significativas na praia, uma vez que a praia é abrigada de ondas desta direção. As ondas de ENE e E com $H_s = 1\text{ m}$ e $T_p = 7\text{ s}$ também não geram correntes na praia, entretanto com ondas mais importantes ($H_s = 2,7$ e $T_p = 10\text{ s}$) já são observadas correntes de deriva litorânea de baixa intensidade com direção à porção oriental da praia. Com ondas de ESE (S67,5E) as correntes na Praia de Camburi também fluem em direção à porção oriental da praia. As ondas de S45E criam correntes de deriva litorânea em direção NE. As ondas vindas de SSE (S22,5E), por sua vez, resultam em duas direções de correntes na Praia de Camburi, sendo que do segundo espigão da praia até o primeiro as correntes vão em direção à porção ocidental da praia e após o segundo espigão, com correntes indo em direção à porção oriental da praia. Vale destacar que com estas condições são formados dois sistemas circulatórios de correntes, como mostra a Figura 252, no cenário de maior intensidade. Entretanto, a corrente mais forte e evidente continua sendo em direção à porção oriental da praia. Os cenários de S22,5W também geram correntes de deriva litorânea em direção à porção oriental da praia, porém com menor intensidade do que para a direção S22,5E.

Convém destacar que são geradas correntes nos arredores das ilhas e baixios existentes na área de estudo. Também são geradas correntes na boca do canal de Vitória, principalmente com ondas vindas do quadrante ENE -ESE.

A tabela 8 apresenta os valores médios de correntes obtidos nas localidades das praias, Mole e de Camburi, compilados dos cenários apresentados anteriormente. Nota-se que as velocidades de correntes variaram entre 0 e 0,3 m/s. Estes valores estão compatíveis com valores de correntes encontrados em outras praias. E também estão

coerentes com os resultados obtidos em campo por Soares (2005), que mediram velocidades médias entre 0,10 e 0,36 m/s na Praia de Camburi. Apesar da ordem de grandeza ser a mesma, os valores encontrados por Soares (op. cit.) são ligeiramente maiores. Isto se deve ao fato que o vento local interfere na corrente de deriva litorânea. Fato também destacado no trabalho de Soares (op. cit.).

Tabela 7: Valores médios de correntes obtidos com a execução do modelo Copla para as diferentes condições.

Localidade	Condição	NNE	ENE	E	ESE	SE	SSE	SWS
Praia Mole	1m 7s	0,08	0,04	0,08	0,07	0,05	0,09	0,02
	2,7m 10s	0,22	0,15	0,24	0,20	0,18	0,26	0,30
Praia de Camburi	1m 7s	0	0	0	0,09	0,09	0,02	0,01
	2,7m 10s	0	0,04	0,12	0,22	0,18	0,10	0,08

5.7.3. MODELO MOPLA – TRANSPORTE SEDIMENTAR

O transporte potencial de sedimentos foi calculado utilizando os resultados obtidos no modelo de correntes e por meio das formulações de transporte de sedimentos em fluxos ondulatórios de Soulsby. Para tal foram utilizados como parâmetros médios os seguintes valores: $D_{50} = 0,2\text{mm}$, $D_{90} = 0,3\text{mm}$, duração do evento = 12h, ângulo de repouso = 35° , porosidade = 0,4, densidade do sedimento = $2,65\text{ t/m}^3$ e variância = 1,2. Em outras palavras, foi utilizado um único tipo de sedimento para que pudessem ser

feitas comparações de transporte potencial dentro de toda a área de estudo, possibilitando desta forma uma descrição das áreas mais passíveis de sofrerem transporte.

Infelizmente, não foi possível a utilização de um mosaico, com os diferentes tipos de sedimentos, para a caracterização da cobertura de fundo da área de estudo.

A seguir são apresentadas Figuras relativas a transporte potencial para alguns casos característicos.

Os resultados de transporte de sedimentos mostram de uma forma geral que a principal zona de transporte de sedimentos litorâneos é a região da Praia Mole. Assim como ocorria com as correntes, ora o transporte se dá num sentido ora em outro, dependendo da orientação da onda incidente. Dentro da Baía do Espírito Santo podemos destacar a influência dos baixios e das ilhas, pois estes locais apresentam grandes potenciais de transporte. A Praia de Camburi, por sua vez, apresenta direções de transporte potencial geralmente oeste – este, ou seja, em direção à porção oriental da Praia de Camburi.

Proyecto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de transporte e magnitude

Caso espectral: HID3
HI: Malha_interior_NE
D3:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 1 m
h: 40 m
fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s)
 γ : 8
Nº Comp.: 5
Espectro direcional
 θ_m : 18.55° (N67.5E)
 σ : 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de
Nikuradse
Kswc: 1 m

Viscosidade
Turbulenta
 ϵ : 25 m²/s

MOPLA-SP

D50: 0.20 mm

Duração: 12.0 h

Formulação:
Soulsby

Figura 254: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=1m, Tp= 7s e dir= N675E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Gráfico combinado de vetores de transporte e magnitude

Caso espectral: HID7
HI: Malha_interior_NE
D7:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

fp: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ : 8

Nº Comp.: 5

Espectro direcional

θ_m : 18.55° (N67.5E)

σ : 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de
Nikuradse

Kswc: 1 m

Viscosidade de
remolho

ϵ : 25 m²/s

MOPLA-SP

D50: 0.20 mm

Duração: 12.0 h

Formulação:
Soulsby

Figura 255: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=2,7m, Tp= 10s e dir= N67,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de transporte em magnitude

Caso espectral: QIE3
QI: Malha_interior_ESE
E3:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
Hs: 1 m
h: 40 m
fp: 0.142856 Hz (Tp: 7.00006 s)
 γ : 8
Nº Comp.: 5
Espectro direcional
 θ_m : 13.81 ° (E)
 σ : 10 ° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de Nikuradse
Ksw: 1 m

Viscosidade turbulenta
 ϵ : 25 m²/s

MOPLA-SP

D50: 0.20 mm

Duração: 12.0 h

Formulação:
Soulsby

Figura 256: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=1m, Tp= 7s e dir= S90E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de transporte e magnitude

Caso espectral: QIE4
QI: Malha_interior_ESE
E4:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

fp: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ : 8

Nº Comp.: 5

Espectro direcional

θ_m : 13.81 ° (E)

σ : 10 ° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

Kswc: 1 m

Viscosidade

turbulenta

ϵ : 25 m²/s

MOPLA-SP

D₅₀: 0.20 mm

Duração: 12.0 h

Formulação:

Soulsby

Figura 257: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=2,7m, Tp= 10s e dir= S90E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vectores de transporte e magnitude

Caso espectral: QID2
QI: Malha_interior_ESE
D2:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
 Hs: 1 m
 h: 40 m
 fp: 0.142867 Hz (Tp: 6.99952 s)
 γ: 8
 N° Comp.: 5
 Espectro direcional
 θm: -8.69° (S67.5E)
 σ: 10° - N° Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de
 Nikuradse
 Ksw: 1 m
 Viscosidade
 turbulenta
 ε: 25 m²/s

MOPLA-SP

D50: 0.20 mm
 Duração: 12.0 h
 Formulação:
 Soulsby

Figura 258: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=1m, Tp= 7s e dir= S67,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de transporte e magnitude

Caso espectral: QID6
QI: Malha_interior_ESE
D6:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
 Hs: 2.7 m
 h: 40 m
 fp: 0.1 Hz (Tp: 10 s)
 γ: 8
 Nº Comp.: 5
 Espectro direcional
 θm: -8.69° (S67.5E)
 σ: 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de Nikuradse
 Ksw: 1 m
 Viscosidade turbulenta
 ε: 25 m²/s

MOPLA-SP

D50: 0.20 mm
 Duração: 12.0 h
 Formulação: Soulsby

Figura 259: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=2,7m, Tp= 10s e dir= S67,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vectores de transporte e magnitude

Caso espectral: QIE2
QI: Malha_interior_ESE
E2:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
 Hs: 1 m
 h: 40 m
 fp: 0.142856 Hz (Tp: 7.00006 s)
 γ: 8
 Nº Comp.: 5
 Espectro direcional
 θm: -31.19° (S45.0E)
 α: 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de Nikuradse
 Ksw: 1 m
 Viscosidade turbulenta
 ε: 25 m²/s

MOPLA-SP

D₅₀: 0.20 mm
 Duração: 12.0 h
 Formulação: Soulsby

Figura 260: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=1m, Tp= 7s e dir= S45E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de transporte e magnitude

Caso espectral: QIE1
QI: Malha_interior_ESE
E1:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

fp: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ : 8

Nº Comp.: 5

Espectro direcional

θ_m : -31.19° (S45.0E)

σ : 10° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

Ksw: 1 m

Viscosidade

turbulenta

ϵ : 25 m²/s

MOPLA-SP

D50: 0.20 mm

Duração: 12.0 h

Formulação:

Soulsby

Figura 261: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=2,7m, Tp= 10s e dir=S45E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de transporte e magnitude

Caso espectral: ISD9
IS: Malha_interior_SUL
D9:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
 Hs: 1 m
 h: 40 m
 fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s)
 γ: 8
 Nº Comp.: 5
 Espectro direcional
 θm: 16.32° (S22.5E)
 σ: 15° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de Nikuradse
 Ksw: 1 m
 Viscosidade Turbulenta
 ε: 25 m²/s

MOPLA-SP

D₅₀: 0.20 mm
 Duração: 12.0 h
 Formulação: Soulsby

Figura 262: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=1m, Tp= 7s e dir= S22,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vetores de transporte e magnitude

Caso espectral: ISE0
IS: Malha_interior_SUL
E0:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

fp: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ : 8

Nº Comp.: 5

Espectro direcional

θ_m : 16.32° (S22.5E)

σ : 15° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

Ksw: 1 m

Viscosidade

turbulenta

ϵ : 25 m²/s

MOPLA-SP

D50: 0.20 mm

Duração: 12.0 h

Formulação:

Soulsby

Figura 263: Vetores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=2,7m, Tp= 10s e dir= S22,5E.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vectores de transporte e magnitude

Caso espectral: ISD1
IS: Malha_interior_SUL
D1:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
 Hs: 1 m
 h: 40 m
 fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s)
 γ : 8
 N° Comp.: 5
 Espectro direcional
 θ_m : -28.68° (S22.5W)
 σ : 15° - N° Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de Nikuradse
 Ksw: 1 m

Viscosidade turbulenta
 ϵ : 25 m²/s

MOPLA-SP

D50: 0.20 mm

Duração: 12.0 h

Formulação: Soulsby

Figura 264: Vectores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=1m, Tp= 7s e dir= S22,5W.

Projeto: Agitação marítima, correntes induzidas por ondas e balanço sedimentar

Gráfico: Vectores de transporte e magnitude

Caso espectral: ISD5
IS: Malha_interior_SUL
D5:

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.7 m

h: 40 m

fp: 0.1 Hz (Tp: 10 s)

γ : 8

Nº Comp.: 5

Espectro direcional

θ_m : -28.68° (S22.5W)

σ : 15° - Nº Comp.: 5

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

Ksw: 1 m

Viscosidade

turbulenta

ϵ : 25 m²/s

MOPLA-SP

D50: 0.20 mm

Duração: 12.0 h

Formulação:

Soulsby

Figura 265: Vectores e magnitude de transporte potencial para o caso Hs=2,7m, Tp= 10s e dir= S22,5W.

As figuras de transporte potencial demonstram que os transportes sedimentares atingem valores importantes quando de eventos de maior intensidade. As direções de transporte seguem, obviamente, o mesmo padrão das correntes induzidas por ondas.

Na Praia de Camburi as derivas litorâneas potenciais fluem em direção à porção leste da praia em praticamente todos os casos, com exceção dos casos de direção S22,EW e S22,5E, nos quais os transportes de sedimentos ocorrem para os dois lados da praia, partindo do segundo espigão.

Na Praia Mole o transporte ocorre para Norte nas condições de S22,5W, S22,5E e S45E. Nos cenários S67,5E e E, o transporte *onshore-offshore* é predominante, embora no caso S67,5E ainda haja alguns vetores que apontam para Norte. Nos casos de N67.5E, N45E e N22.5E o transporte ocorre para sul.

Os valores encontrados podem nos dar uma ordem de grandeza do transporte sedimentar nas proximidades da praia Mole e da praia de Camburi.

5.7.4. MODELO MSP – AGITAÇÃO PORTUÁRIA

A agitação portuária pode ser entendida como sendo a interação das ondas incidentes com a geometria portuária. Em outras palavras, objetivou-se estimar as alturas e os padrões de agitação no interior das dársenas, bem como nas proximidades do Terminal de Tubarão, por meio das simulações com o modelo MSP, que é baseado nas equações da declividade suave em sua versão parabólica, tanto em casos monocromáticos, como em casos espectrais (ondas irregulares). Para uma melhor visualização foram pintados os gráficos de superfície livre e iso-alturas, tanto para os cenários monocromáticos, como para os cenários com ondas irregulares.

A Figura 267 apresenta o gráfico de iso-alturas máximas para o caso monocromático com altura de onda de 3,4 m, período de 10 segundos e direção este (90°). Percebe-se que na porção exterior ao porto existe um padrão de alturas máximas que revela a reflexão das ondas incidentes formando nós e antinós. As alturas encontradas são de aproximadamente o dobro das ondas incidentes. Nota-se também que a ponta do molhe de Praia Mole funciona como um ponto difrator das ondas incidentes, girando as ondas para dentro da baía e também, em menor escala, para dentro do Terminal de Tubarão. As alturas dentro do porto são bastante atenuadas pelo molhe de Praia Mole. A Figura 268 apresenta um gráfico de superfície livre para uma fase aleatória, com o mesmo cenário da Figura 267, onde é possível observar as cristas e os cavados das ondas incidentes. Implicitamente, pode-se observar o padrão de agitação para este cenário, onde a difração de ondas permite a entrada de ondas cada vez menores à medida que se adentra ao porto. Pode-se perceber também uma descontinuidade na difração para dentro do porto, causada pela reflexão das ondas no molhe exterior do porto.

O cenário monocromático de ESE (Figuras 269 e 270) é bastante similar ao cenário descrito anteriormente (direção E), entretanto aumenta a energia propagada para o interior do porto pela difração e muda um pouco o padrão anastomosado das ondas próximas, que fica um pouco mais esguio na porção exterior do porto.

Os cenários de SE e SSE apresentam um padrão de agitação exterior diferente que os dois cenários anteriores (ESE e E). Ao invés de um padrão anastomosado é encontrado um padrão onde os nós e antinós estão alinhados, sendo que o cenário de SE apresenta um ângulo, com o molhe, positivo e o caso de SSE apresenta um ângulo

negativo em relação a ortogonal ao molhe. Com relação às alturas significativas encontradas no interior do porto, o molhe de Praia Mole continua impedindo a incidência direta das ondas, mesmo que os valores de altura sejam maiores que os encontrados nos cenários anteriores, evidenciando desta forma que a difração se vê facilitada.

Nos cenários de Sul e SWS o padrão anastomosado, em frente ao molhe de Praia Mole é novamente formado, embora com uma direção de incidência oposta aos cenários de E e ESE. Nestes cenários as ondas atingem a parte interior do porto com certa importância, já que não só ondas difratadas, como também ondas diretas, atingem a porção interna. A reflexão no interior do porto passa a ser importante nestes cenários. Fica evidenciada a importância da reflexão pelo padrão anastomosado junto ao molhe de Tubarão e à área de retro-porto. No cenário de SWS essa importância é maior que no cenário de Sul, uma vez que as ondas atingem o interior do porto com mais facilidade devido a direção de propagação.

Após os cenários monocromáticos podemos concluir que os molhes do Terminal de Tubarão abrigam bem as dársenas na maior parte do tempo, entretanto em condições de onda de quadrante SWS–SSE, a agitação interior pode se tornar importante dependendo do tamanho da onda.

Figura 266: Gráfico de iso-alturas para o cenário 3,4m 13s Este, monocromático.

Figura 267: Gráfico de superfície livre para uma fase aleatória para o cenário 3,4m 13s este monocromático.

Figura 268: Gráfico de iso-alturas para o cenário 3,4m 13s ESE monocromático.

Figura 269: Gráfico de superfície livre para uma fase aleatória para o cenário 3,4m 13s ESE monocromático.

Figura 270: Gráfico de iso-alturas para o cenário 3,4m 13s SE monocromático.

Figura 271: Gráfico de superfície livre para uma fase aleatória para o cenário 3,4m 13s SE monocromático.

Figura 272: Gráfico de iso-alturas para o cenário 3,4m 13s SSE monocromático.

Figura 273: Gráfico de superfície livre para uma fase aleatória para o cenário 3,4m 13s SSE monocromático.

Figura 274: Gráfico de iso-alturas para o cenário 3,4m 13s Sul monocromático.

Figura 275: Gráfico de superfície livre para uma fase aleatória para o cenário 3,4m 13s Sul monocromático.

Figura 276: Gráfico de iso-alturas para o cenário 3,4m 13s SWS monocromático.

Figura 277: Gráfico de superfície livre para uma fase aleatória para o cenário 3,4m 13s SWS monocromático.

Figura 278: Gráfico de superfície livre para o cenário 1m 10s E espectral.

Figura 279: Gráfico de iso-alturas máximas para o cenário 1m 10s E espectral.

Figura 280: Gráfico de superfície livre para o cenário 1m 10s SE espectral.

Figura 281: Gráfico de iso-alturas para o cenário 1m 10s SE espectral.

Figura 282: Gráfico de superfície livre para o cenário 1m 10s S espectral.

Figura 283: Gráfico de iso-alturas para o cenário 1m 10s S espectral.

Figura 284: Gráfico de superfície livre para o cenário 1m 10s SWS espectral.

Figura 285: Gráfico de iso-alturas para o cenário 1m 10s SWS espectral.

Pode-se perceber que com ondas irregulares a difração perde um pouco a importância, visto que as diferentes frequências e direções de um cenário espectral diluem a energia dos trens de ondas, o que também foi observado por Leme *et. al.* (2008). Os autores (op. cit) destacaram a importância da reflexão dentro de regiões portuárias em um estudo para o Terminal Portuário da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), nas proximidades da Praia Mole.

Os resultados dos cenários espectrais demonstram que a agitação no interior do porto, assim como demonstrado nos casos monocromáticos, são maiores nos casos de ondas vindas de direção Sul e SWS. Os casos espectrais conseguem mostrar um padrão bastante mais realista da agitação da superfície livre.

Soares & Chacaltana (2006), aplicando a teoria dos raios em condições de ondas de 1m de altura significativa e 7 segundos de período de pico chegaram a padrões de alturas compatíveis com os apresentados nesse trabalho para as mesmas direções. As Figuras 287 e 288 apresentam os resultados obtidos pelos autores citados anteriormente para as direções sudeste e este, respectivamente. Nestas Figuras, os valores representados indicam, numa escala de zero a um, a fração da altura exterior.

Comparando os resultados da Figura de iso-alturas do cenário 1m 10s direção este (Figura 279) com a Figura 287, referente ao cenário 1m 7s direção este dos autores acima (op. cit), percebe-se que os valores de altura são praticamente os mesmos encontrados em ambos os estudos. O mesmo ocorre para o cenário 1m 10s direção sudeste (Figura 282 e 288)

Figura 286: Fração da altura significativa em relação à onda incidente, para o cenário 1m 7s direção este. (Extraído de Soares & Chacaltana, 2006)

Figura 287: Fração da altura significativa em relação à onda incidente, para o cenário 1m 7s direção sudeste. (Extraído de Soares & Chacaltana, 2006)

5.7.5. MODELO MSP – RESSONÂNCIA PORTUÁRIA

Como descrito anteriormente, a ressonância portuária é um fenômeno muito comum em portos, onde as ondas infra-gravitatórias se amplificam de forma repentina e com curta duração. O fenômeno ocorre, fundamentalmente, devido à coincidência entre as frequências de oscilação natural do corpo de água com aquelas frequências de oscilação de ondas externas, que se propagam para o interior do porto, funcionando como elemento forçante. Isto ocorre pois possuem o mesmo período que o período natural de ressonância do porto, acarretando assim em uma amplificação destas ondas. As ondas infra-gravitatórias, ou simplesmente ondas longas, são geradas de algumas maneiras. A principal forma de geração de ondas infra-gravitacionais é devido à interação de ondas de gravidade de períodos próximos (Hernandez, 2006).

Durante episódios ressonantes a superfície livre sofre uma elevação extraordinária em um pequeno lapso de tempo dentro dos limites portuários, chegando em certas ocasiões a superar as cotas de coroamento das dársenas, ocasionando inundações repentinas, impactando as estruturas portuárias existentes.

Os resultados obtidos nesta etapa mostram, para os diversos pontos de controle, quais são as possíveis frequências (períodos) que podem resultar em amplificações nas dársenas portuárias. A Figura 289 mostra a grade de elementos finitos utilizada para a execução dos testes de ressonância portuária e os respectivos pontos de controle.

A Figura 290 apresenta os resultados obtidos com o modelo MSP para uma gama de períodos variando de 30s a 300s. Podemos perceber que os pontos 5 e 7 são susceptíveis a eventos ressonantes. Para o ponto 7, períodos da ordem de 205 segundos

podem acarretar em ressonâncias superiores a amplificações de 5 vezes. Já para o ponto 12, o período ressonante está em 150 segundos atingindo amplificações de até 4 vezes.

Figura 288: Malha de cálculo para o fenômeno de ressonância portuária devido a ondas infra-gravitatórias. Os números representam a localização dos pontos de controle.

Figura 289: Resultados da propagação de uma sequência de períodos.

Os resultados apresentados anteriormente, com amplificações de 0 a 5 vezes, estão de acordo com valores de ressonância obtidos em outros portos do

munho,.Destaque-se o estudo realizado por Hernández (2008), que utilizando o mesmo modelo para o mar Cantábrico obteve valores de amplificação variando de 0 a 8 vezes.

5.8. MODELO DE FUNCIONAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

Com os dados gerados anteriormente foi possível elaborar uma síntese de como a dinâmica marinha atua na região, e quais podem ser os possíveis desdobramentos desta dinâmica nas questões de sedimentação atual. A constituição deste modelo de funcionamento do ambiente, trás a possibilidade de se analisar o ambiente de uma forma integrada e multi e trans-disciplinar.

A batimetria da região é bastante complexa, com diversos acidentes topográficos, ilhas, canais, páleo-vales, etc.

A plataforma continental adjacente apresenta uma largura de aproximadamente 75km, e apresenta uma importante cadeia submarina que se denomina Alinhamento estrutural Vitória-Trindade. A plataforma interna apresenta diversas evidências de paleoambientes costeiros originados durante a ultima grande regressão marinha, além de uma grande quantidade de parciais e ilhas, sobretudo na porção ao sul da Baía do Espírito Santo. Dentro da Baía do Espírito Santo um dos principais acidentes batimétricos/topográficos é o baixio com alinhamento SW-NE, que atravessa quase toda a baía. Outra característica marcante da batimetria da região é a existência dos canais de acesso aos portos de Tubarão e Vitória, que apresentam profundidades superiores a 10m. As ilhas do Frade ,do Boi e também o ilhote em frente à Praia de Camburi também são, aparentemente, dinamicamente importantes.

As marés na região são semi-diurnas e podem ser classificadas como micro-marés. A maré astronômica apresenta uma amplitude de maré que varia de 0,4 a 1,6 m em quadratura e sizígia, respectivamente. As marés meteorológicas oscilam entre 0 e 50 cm. Portanto, o limite máximo de subida de maré está em torno dos 2,2 m, referenciados ao zero do Terminal de Tubarão. Apesar das marés serem classificadas como micro-marés e suas amplitudes não serem das maiores encontradas no território brasileiro, apresentam uma importante contribuição nos valores de corrente devido ao estuário adjacente que deságua na Baía do Espírito Santo. Estas correntes são importantes, sobretudo nas proximidades das bocas dos canais da Passagem e de Vitória, onde podem atingir magnitudes de até 0,7 m/s.

As ondas em águas profundas revelam que essa porção da costa brasileira não é das mais energéticas, se comparadas com outras localidades do mundo. A altura significativa do período de retorno de 100 anos é de 4,5 m para águas profundas e o período de pico para o evento dos 100 anos é de 14,5 segundos. As direções médias de ondas em águas profundas variam de N à SW, apresentando uma grande variabilidade direcional. As direções mais comuns, para estas profundidades, são do quadrante NE – SE.

As ondas na plataforma interna, nas imediações do Terminal de Tubarão são caracterizadas por ondas vindas basicamente de direções entre NE e SWS. As alturas significativas não ultrapassaram os 4,2 m durante os anos de 1958 a 2002, sendo que em 98% do tempo as ondas não ultrapassam alturas significativas de 2,2 m. Os períodos de pico não ultrapassaram os 14 segundos durante toda a série temporal.

Podemos dizer que as ondas incidentes na Praia de Camburi não são muito altas, pois estão limitadas pelas pequenas profundidades, pelos baixios da Baía do Espírito Santo, pelo Terminal de Tubarão e pela ponta de Ubu (Vila Velha). As maiores ondas que atingem a praia são as que chegam na porção externa adjacente à Baía do Espírito Santo com direções de SSE e SE. As ondas de nordeste, este-nordeste e este são barradas, ao menos em parte, pelo molhe de Praia Mole e do Terminal de Tubarão. As alturas significativas de ondas na Praia de Camburi não ultrapassam nunca valores de 1,2 m, em nenhuma condição de agitação exterior. Já as alturas significativas de ondas na Praia Mole estão mais relacionadas à agitação exterior, apresentando, por vezes, alturas significativas superiores a 2,5 metros e as direções de incidência também são muito variadas, devido à sua grande exposição.

O Terminal de Tubarão serve de anteparo à Praia de Camburi para as ondas de quadrante Este-Nordeste e para a Praia Mole para as ondas vindas de sul (?). Entretanto as ondas vindas de SE, ESE, E e ENE atingem a Praia Mole de forma contundente.

O cabeço do molhe de Praia Mole funciona como um ponto de difração de ondas, ou seja, as ondas “giram” nele. Esta difração faz com que as ondas que incidem na Praia de Camburi apresentem pouca variabilidade direcional, atingindo a praia com ângulos que variam de 149° a 160°, na porção central da praia. A Praia de Camburi tem o eixo transversal ao alinhamento médio em torno dos 165 °.

A diferença entre a direção média da Praia de Camburi e as direção das frentes de ondas na zona de arrebentação revela que as ondas incidem na praia de forma oblíqua, gerando, portanto, uma corrente de deriva litorânea. Esta corrente, independente

da direção das ondas na plataforma interna, sempre flui em direção à porção oriental da praia, sendo que as intensidades variam de 0 a 0,4 m/s.

Já na Praia Mole a direção de incidência das ondas varia bastante com a variação da direção das ondas na plataforma interna. Os ângulos de incidência das ondas variam de 45º à 175º, sendo a ortogonal à direção média da praia próxima a 140º. As correntes geradas pelas ondas na Praia Mole fluem para sul nos cenários de ondas vindas de NNE, NE, ENE e E. e para norte nos cenários de SWS, S e SSE. Em casos de ondas de SE e ESSE as correntes de deriva litorânea perdem importância relativa, sendo a principal corrente à transversal a praia, ou seja, *onshore –offshore*.

O molhe de Praia Mole, além de funcionar de abrigo para as ondas incidentes, também reflete parte destas as ondas, tornando-as, nas proximidades do porto, maiores e mais “picadas”. Os diferentes padrões de agitação dependem basicamente do ângulo de incidência das ondas com o molhe. O padrão de agitação em linhas paralelas ao molhe ocorre com ondas incidentes de SSE e SE e os padrões anastomosados (tipo “caixa de ovos”) para as demais direções. Não só o molhe de Praia Mole reflete as ondas incidentes, mas também o molhe de Tubarão, onde são encontrados os maiores índices de reflexão junto às paredes verticais das dársenas. Ondas do octante SWS–SSE são importantes para a agitação portuária, pois incidem diretamente no molhe de Tubarão e se propagam para os berços de atracação. Os pontos particularmente vulneráveis são os berços de atracação de graneis líquidos, de grãos e de carga geral (Terminal de Produtos Diversos de Tubarão –TPD). Além disso, ondas longas associadas a trens de ondas, devido aos mecanismos de *set - up / set – down*, com períodos da ordem de 200 segundos podem ser amplificadas, devido ao fenômeno de ressonância portuária,

sobretudo em alguns pontos mais vulneráveis, como por exemplo no molhe de Praia Mole.

Estes padrões de agitação no interior do porto dificilmente acarretam em transportes sedimentares resultantes de grande significância. Uma vez que os movimentos são muito mais verticais, de sobe e desce, do que laterais. As correntes de marés, que carregam materiais mais finos, podem “largar” parte de sua carga nas dársenas, uma vez que suas capacidades de transporte decaem bastante no interior do porto. Por outro lado, junto ao cabeço do molhe de Praia Mole existe uma certa concentração de energia tanto das ondas de marés com das onda de gravidade.

O transporte sedimentar é decorrente basicamente da incidência de ondas e suas consequentes correntes, atuando principalmente nas zonas de arrebentação. Os principais pontos onde existe um grande transporte potencial, devido às ondas incidentes, são as praias Mole e Camburi e também nos parcéis e ilhas existentes em toda a porção sudoeste da área de estudo.

Entretanto, deve-se atentar que o transporte sedimentar também é realizado pelas correntes de maré, sobretudo de materiais mais finos carregados estuários a fora, uma vez que ele apresenta uma característica de predomínio de vazante. Desta forma, é de se esperar que se encontrem “*paths*” de materiais finos por toda a Baía do Espírito Santo, uma vez que a principal fonte de sedimento é, sem dúvida, o estuário. Outro ponto importante é o aporte de material fino na porção mais ocidental da Praia de Camburi, carregados pelas correntes de maré do canal da Passagem. Desta forma, o canal da Passagem constitui-se numa fonte de sedimentos, sobretudo de areias finas e médias, para a praia.

De uma forma geral, na Praia de Camburi, independentemente das características das ondas na plataforma interna adjacente, o transporte de sedimentos, quando existe, é em direção à porção oriental da praia.

As análises sedimentares de longo prazo atestam que a Praia de Camburi não apresenta uma configuração em planta em situação de equilíbrio. De fato, embora os perfis, após o engordamento artificial, estejam em situação progradante, a associação da análise em planta e da análise em perfil leva a acreditar que ao menos uma porção dos sedimentos não estáveis dos perfis possam ser carregados. Em outras palavras, deve ocorrer uma perda de materiais finos, a serem transportados em direção à porção mais oriental da praia e também carregados em suspensão para posições mais distantes da praia, próximos à profundidade de fechamento da praia. Este transporte sedimentar pode ser retardado pela existência dos espigões, entretanto, como a profundidade máxima de assentamento dos espigões (2m) não chega à profundidade de fechamento (2,5m), eles não impedem totalmente o transporte de deriva litorânea. Enfim, a tendência de longo prazo, é que a praia se torne mais íngreme na porção emersa, com a perda dos finos e estes venham a ser depositados a leste da praia. Com isso, a praia sofreria uma certa mudança de sua forma em planta, ou seja, sofreria uma leve rotação. Tal mudança seria, provavelmente bastante sutil, uma vez que o engordamento artificial da praia utilizou um sedimento grosseiro (areia média a muito grossa). Os sedimentos finos trazidos pelas correntes de marés na porção ocidental da praia fluem com a corrente de deriva litorânea rumo à porção oriental da praia, influenciando na rotação descrita anteriormente. Entretanto, além das alterações da forma em planta, podem ocorrer alterações nas formas dos perfis. Uma vez que parte dos sedimentos finos são perdidos, ora para a corrente de deriva

litorânea, ora para a porção submersa do perfil, a declividade da porção emersa da praia tende a aumentar. De forma análoga, a porção submersa do perfil tende a se tornar menos íngreme.

Na Praia Mole não há evidências de que a praia irá recuar ou progradar, entretanto os volumes re-mobilizados, quando da passagem de sistemas meteorológicos importantes, são grandes.

Lembrando que esta praia está encaixada entre o Terminal de Tubarão e terminal de barcaças, onde seus molhes estão em profundidades um tanto superiores à profundidade de fechamento da praia, existem inversões nas direções das correntes de deriva e também destaca-se a grande importância relativa das correntes transversais em determinados cenários. É de se esperar que apesar da praia sofrer rotações em sua direção média, estas rotações não resultam em perdas significativas de sedimentos.

6. CONCLUSÕES

Este estudo aplicou uma metodologia que visava elucidar o funcionamento dinâmico da Baía do Espírito Santo, com relação à agitação marítima, correntes induzidas por ondas e marés e balanço sedimentar em praias.

Para a constituição do modelo de funcionamento foram utilizados modelos numéricos e equações matemáticas endossadas por dados instrumentais e de retro-análise obtidos na literatura.

As diferentes vertentes abordadas para a constituição do modelo de funcionamento, mostraram-se complementarias, facilitando a elaboração do modelo de funcionamento.

Foram estudadas as características de maré da região, incluindo suas correntes associadas. Foram recriadas as climatologias de ondas para águas profundas e em 7 pontos de interesse muito próximos à costa, calibrados com dados instrumentais e validados com resultados obtidos na literatura. Foram calculadas as correntes induzidas por ondas e os consequentes transportes sedimentares potenciais, sendo também validados com resultados encontrados na literatura. Foi realizado estudo de agitação portuária e de ressonância portuária para o Terminal de Tubarão. Por fim, foi analisada a estabilidade da linha de costa da Praia de Camburi em um cenário de longo prazo.

Os resultados específicos de cada uma das vertentes estudadas independentemente mostraram-se muito coerentes com outros estudos existentes na literatura para a área de estudo, tornando-o, desta forma, bastante plausível.

A utilização deste modelo de funcionamento permite prever as variações do ambiente frente a diferentes cenários e condições meteo-oceanográficas de curto prazo, e condições de estabilidade de linha de costa para médio prazo (décadas) constituindo-se, portanto, numa importante ferramenta para possíveis futuros projetos de Engenharia na linha de costa na área de estudo. Por consequência, considera-se validada a metodologia para a aplicação noutras localidades costeiras.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de este estudo apresentar um modelo de funcionamento bastante coeso, algumas recomendações e sugestões de aprimoramentos podem ser indicadas para trabalhos futuros.

Em futuros trabalhos, deve-se pensar em acoplar as correntes geradas por marés e diferenças por densidade ao modelo de propagação de ondas, uma vez que o campo de ondas influi no campo de correntes e vice-versa. Ou seja, para uma análise mais realista, aconselha-se empregar modelos numéricos que considerem as correntes e as ondas simultaneamente. Esta recomendação também foi apontada por Cavaleri et al. (2007), como sendo um dos avanços a serem conseguidos para os próximos anos.

A título de sugestão, destaca-se a possibilidade de utilização de mapas de cobertura sedimentar complexos, em detrimento de um único índice granulométrico, como base para os estudos de transporte potencial, transformando-os em estudos de erosão e sedimentação mais realísticos.

Por fim, pode-se empregar esta metodologia para prever quais seriam as consequências de uma alteração na linha de costa devido a obras de Engenharia, como por exemplo uma possível expansão do porto, nas ondas, correntes e transporte sedimentar. Para tal, bastaria repetir toda a metodologia para a nova configuração da linha de costa e comparar os resultados entre as simulações sem a intervenção e com a intervenção.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBINO, J. Processos de sedimentação atual e morfodinâmica das Praias de Bicanga a Povoação, ES. Tese de doutoramento. Programa de Pós-graduação em Geologia Sedimentar. Instituto de Geociências USP. 1999.
- ALBINO, J. & OLIVEIRA, R.M.S. 2005. *Monitoramento topográfico e granulométrico das areias da praia de Camburi antes, durante e após o engordamento artificial*. In: *Simpósio sobre Praias Arenosas, Anais de resumos expandidos*. UNIVALI Itajaí – SC. 355- 56p.
- ALBINO, J., PAIVA, P. S., MACHADO, G.M.V. 2001. *Tipologia e vulnerabilidade erosiva das praias do litoral do Espírito Santo*. **Geografares**. V2:63-67
- ALFREDINI P. 2005. *PROCESSOS LITORÂNEOS*. In: Alfredini P. *Obras e gestão de portos e costas*. A técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental. São Paulo, Editora Edgard Blücher. 111-164
- ALMEIDA F. F. M., AMARALI G., CORDANI U. G., KAWASHITA K. 1973. *The precambrian evolution of the south american cratonic margin south of Amazon river*. In: E. M. Nairn & F. G. Stehli (eds.) *The ocean basins and margins*. Plenum, New York, p. 411-446
- ALMEIDA J.C.H. 2000. *Zonas de cisalhamento dúctil de alto grau do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 190 p.

BERKHOFF, J. C. W.. 1972. *Computacional of combined refraction and diffraction. Proceedings of the 13th Internacional Coastal Engineering Conference, ASCE*, 471-490.

BERKHOFF, J. C. W.. 1976. *Mathematical models for simple harmonic linear water wave refraction and diffraction. Tese de doutorado*, Delft Technical University of Technology 212P.

CAMARGO, R. de. 1998. *Estudo numérico das circulações atmosférica e oceânica na região da Baía de Paranaguá. Tese de doutorado*. Instituto Astronômico e Geofísico. Universidade de São Paulo. 181p.

CAMPOS, E.J.D.; VELHOTE, D.; SILVERA, I.C.A.; 1999. *Shelf Break Upwelling Driven by Brazil Current Cyclonic Meanders. Geophysical Research Letters*, vol 27, no.6, Pag. 751-754.

CANDELLA, R. N. 1997. *Estudo de casos de ondas no Atlântico Sul através de modelagem numérica. Tese de doutorado*. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 80p.

CAVALERI, The WISE Group, L., ALVES, J. H. G. M., ARDHUIN, F., BABANIN, A., BANNER, M., BELIBASSAKIS, K., BENOIT, M., DOLEAN, M., GROENEWEG, J., HERBERS, T.H.C., HWANG, P., JANSSEN, P.A.E.M., JANSSEN, T., LAVRENOV, I.V., MAGNE, R., MONBALIU, J., ONORATO, M., POLNIKOV, V., RESIO, D., ROGERS, W.E., SHEREMET, A, McKEE, J. S., TOLMAN, H.L., van VLEDDER, G., WOLF, J., YOUNG, I. 2007. *Wave modelling - The state of the art – Review . Progress in Oceanography*. 75: 603-674.

CODESA, 2009. Porto de Vitória. Em: <http://www.codesa.gov.br/>. Em fevereiro de 2009.

-
- CPRM. 2004 *Cartas geológicas do Brasil ao Milionessimo*. www.cprm.gov.br. Acessado em 20/06/2008.
- DAVIS, R. A. 1985 *Beach and nearshore zone*. **Coastal Sedimentary Environments**. 2 ed New York: Springer-Verlag, p379-532.
- DEAN R.G.1977. *Equilibrium beach profiles: US Atlantic and Gulf coasts*. **Ocean Engineering Report**, 12: 231-287, University of Delaware, Newark.
- DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. *Coastal processes with engineering applications*. USA: Cambridge University Press, 2002.
- DHI, 1998. **MIKE 21 – User guide and reference manual, release 2.7. Technical report**, Danish Hydraulic Institute. Denmark, 98p.
- DOMINGUEZ, J. M. L., BITTENCOURT, A. C, S, P., MARTIN, L. 1982. Esquema evolutivo da sedimentação quaternária nas feições deltáicas do rio São Francisco, Jequitinhonha (BA), Doce (ES) e Paraíba do Sul (RJ). *Revista Brasileira de Geociência*. Rio de Janeiro 11:227-237.
- FEMAR. Fundação de Estudos Marinhos. www.femar.org.br acessado em 10/2008.
- FONZAR, B. C. 1994. *A circulação atmosférica na América do Sul: os grandes sistemas planetários e subsistemas regionais que atingem o continente: Localização e trajetórias*. Rio de Janeiro. **Caderno de Geociências**. 11: 11-33.
- IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2003. Mapas das Unidade de Relevo. Rio de Janeiro. Escala 1: 5.000.000
- INPH,1982. Relatório final das medições de ondas realizadas nas proximidades de Praia Mole – ES.Divisão de apoio técnico e científico -DIATEC.Rio de janeiro. 145p.

-
- IPEMA. 2005. *Lista da fauna e flora ameaçadas de extinção no estado do espírito santo*. Disponível: <http://www.ipema-es.org.br/hp/faunameacada.htm>
Acessado em maio de 2008.
- HAXEL, J. H. & HOLMAN, R. A. 2004. *The sediment response of a dissipative beach to variations in wave climate*. **Mar. Geol.** 206: 73-99.
- HERNANDEZ, G. D. 2006. **Análisis de resonancia portuaria: Generación, transitoriedad, no linealidad y acoplamiento geométrico**. Tese de Doutorado. Univesidad de Cantabria –ES. 445p
- JOSEY, S. A.; KENT, E. C., TAYLOR, K. P.. 2002. Wind Stress Forcing of the Ocean in the SOC Climatology: Comparisons with the NCEP-NCAR, ECMWF, UVM/COADS and Hellerman and Rosenstein Datasets. *Journal of Physical Oceanography*, v32 7:1993-2019.
- KARNIOL T. R., MACHADO, R. 2004. Análise geométrica e cinemática de um segmento na região do baixo Rio Doce entre Aimorés (MG) e Colatina (ES). **Revista Brasileira de Geociências**, 34: 373-382.
- KARNIOL-MARQUEZ, M. da R., 2007. **Morfodinâmica de um segmento da Praia da Ilha Comprida, litoral sul do Estado de São Paulo**. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo.123p.
- KOMAR, P. D. 1976. **Beach processes and sedimentacion**. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 409p.
- KOMAR, P. D. 1983. **Handbook of coastal Processes and Erosion**. Florida CRC Press. 305p.

-
- LEME, R. B. P., CARVALHO, V. C., ACETTA, D., MEIRELLES, S. 2008. *Modelagem física e computacional de ondas geradas pelo vento em um terminal portuário: o desempenho do modelo swan 40.51 em ua região com elevada reflexão e difração*. **Revista Brasileira de Geofísica**. 26(1):45-59.
- LIU, P. L. –F. 1990. *Wave transformation in the sea*. Wiley – **Interscience Publication**. 9: 27-63.
- LOSADA, I. J.; LIU, P. L. F., 2000. *Modelos matemáticos y numéricos para el estudio de agitación portuária*. **Revista de Estudios y investigaciones marinas**. 1: 47 -67.
- MARCONDES, A. C. J., 2005. **Vulnerabilidade erosiva da praia do Nenel, Ilha Bela (Ilha do Boi), Vitória –ES**. Monografia de conclusão de curso. UFES. Vitória –ES. 77p
- MARINHA DO BRASIL. 1985. ***Diretório de Hidrografia e Navegação***. Carta sul. 3º edição. N° 1400, 1401, 1410 e 1420.
- MARTIN, L., MORNER, N. A., FLEXOR, J. M., SUGUIO, K. .1982 *Reconstrução de antigos níveis marinhos do Quaternário*. **Publicação especial da Comissão Técnica-científica do Quaternário**. Sociedade Brasileira de Geologia. São Paulo. 154p
- MARTIN, L., FLEXOR, J. M., BLITZKOW, W. D., SUGUIO, K. .1985. *Geoids change indicators along the Brazilian coast during the last 7.000 years*. In; **International Coral Reef Congress, 5**. Tahiti. Proceedings. 3:85-90.
- MARTIN, L, SUGUIO, K., FLEXOR, J. M.. 1993. *As flutuações de nível do mar durante o Quaternário superior e a evolução geológica de “deltas” brasileiros*. In: **Boletim IG – USP**. 15:186p

-
- MARTIN, L., SUGUIO, K. FLEXOR, J.M., ARCHANJO, J. D.. 1996. Coastal quaternary formations of the southern part of the state of Espírito Santo. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. v 68, p. 389-404.
- MARTINS, C. C.; MARONE, E.; ANGULO, R.J.; NOERNBERG, M. A.; QUADROS, C. J. L. de;. 2004. *Dinâmica da zona rasa de shoaling e o transporte de sedimentos na desembocadura sul do complexo estuarino de Paranaguá – PR*. **Boletim Paranaense de Geociências**, 54: 51-64.
- MARTINS, C. C.. 2006 **Morfodinâmica de praia refletiva: estudo de caso na Praia da Sununga, litoral norte do Estado de São Paulo**. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. Instituto Oceanográfico. 209p.
- MEDINA, R.; LOSADA, M. A.; LOSADA, I. J.; VIDAL, C., 1994. *Temporal and spatial relationship between grain size and beach profile*. **Marine Geology**. 118:195-206.
- MEDINA, R.; CASTAÑEDO, S. 1996. **Manual de referencia del H2D**. Universidad de Cantabria. 91p
- MENEZES, G. S. C. 2005. **Modelagem de correntes residuais na baía do Espírito Santo**. Monografia de conclusão de curso. UFES. Vitória –ES. 55p
- MORAES, A. C. R. 1999. **Contribuições para a gestão da zona costeira do Brasil**. Editora Hucitec, Edusp. 229p.
- MORTON, R. A. GILBEAUT, J. C. & PAINE, J. G. 1995. *Meso-scale transfer of sand during and after storms: implications for prediction of shoreline movement*. **Mar. Geol.**, 126:161-179.

-
- MUEHE, D. 1994. *Geomorfologia costeira*. In: Guerra, A. J. T. & Cunha, S. B. **Geomorfologia. Uma atualização de bases e conceitos**. São Paulo, Editora Afiliada. 253-297.
- MUEHE, D. 1998. O litoral Brasileiro e sua compartimentação. In: Guerra, A.J.T. & Cunha, S. B, da (organizadores). **Geomorfologia do Brasil**. Rio de Janeiro. Editora Bertrand do Brasil. 273-349p.
- MUNK, W. 1949. *Surf Beat*. **American Geophysical Union**, 30(6), pp 849-854.
- PANCHANG, V.; DEMIRBILEK, Z. 1998. *A Coastal Surface Water Wave Model of the Mild Slope Equation*. **Technical Report CHL.98**.
- PIERSON W. J., G. NEUMANN, and R. JAMES, 1955. *Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics*. **H.O. Publ.** 603, U. S. Navy Hydrographic Office, 284 pp.
- SANTOS, L., 2005. **Classificação do litoral de Marataizes, Espírito Santo, quanto à vulnerabilidade erosiva**. Monografia de conclusão de curso. UFES, Vitória –ES.
- SEAMA, 2008. Relatório da qualidade do ar na região da grande Vitória. Relatório técnico. Cariacica.
- SILVERA, I. C. A; SCHMIDT, A.C.K.; CAMPOS, E.J.D.; GODOI, S.S . ; 2001. *A corrente do Brasil ao largo da Costa Leste do Brasil*. **Revista. Brasileira de Oceanografia**.
- SHORT, A. D. 1979. *Three dimensional beach-ridge model*. **Journal of Geology**, 87: 553-571.

-
- SMC, 2004. **Manual de referencia del grupo de modelos SMC**. Universidad de Cantábria, Espana. 66p
- SMC, 2004a. **Manual de referencia OLUCA-MC/SP**. Universidad de Cantábria, Espana. 83p.
- SMC, 2004b. **Manual de referencia COPLA-MC/SP**. Universidad de Cantábria, Espana. 77p.
- SMC, 2004c. **Manual de referencia MOPLA/EROS-MC/SP**. Universidad de Cantábria, Espana. 83p.
- SOARES, S. B. 2005. **Avaliação experimental da taxa longitudinal de transporte de sedimentos e sua previsão usando formulações globais na zona de surfe da Praia de Camburi Vitória-ES**. Dissertação de mestrado. Centro tecnológico-UFES
- SOARES, S. B.; CHACALTANA, J. T. A. 2004. Refração e difração de ondas em zonas costeiras. In: ABES. 121:17-24.
- SOMMERFELD, B. G.; MASON, J. M.; KRAUS, N. C. & LARSON, M. 1994. *Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Washington, DC. Instruction Report CERC - 93 - 2*, U.S. 65p.
- SOULSBY, R. 1997. **Dynamics of marine sands**. Thomas Telford Publications, Londres 239p.
- SUGUIO, K. 1999. **Geologia do Quaternário e Mudanças ambientais. (Passado + Presente = Futuro ?)**. São Paulo. Paulo's Comunicação e Artes Gráficas. 365p
- SUGUIO, K., MARTIN, L. 1978. *Formações Quaternárias marinhas do litoral paulista e sul fluminense*. In: **Internacional Symposium on Coastal Evolution in the**

Quaternary. Special Publication. Sociedade Brasileira de Geologia. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo.

PASSOS R.S. 2004. *Variação Morfotextural da Praia de Camburi, Vitória –Es, Após engordamento artificial.* Monografia de conclusão de curso. UFES. Vitória

PRATA, P. M., ALBINO, J.; 2005. *Variação das diversas frações granulométricas das areias da Praia de Camburi, Vitória – ES, após engordamento artificial.* **ABEQUA** 2005.

PEDRUZZI, C. V., ALBINO, J.; 2005. *Perfil Praial de Equilibrio da Praia de Camburi Vitória – ES.* **ABEQUA** 2005.

US ARMY COASTAL ENGINEERING REERCH CENTER. 1984. Shore Protection Manual. Third Edition, Volumes 1 and 2 . Washington, D. C. US. Department of the Army Corps of Engineers.

Van RIJN, L. C. 1993. **Principle of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas.** Acqua Publications, Amsterdam. 258p

WHITE, T. E.; GRANDON, J. F. Longshore sediment transport: A comparison of energetics-based total-load models. **Internal Report- Department of the Army Corps of Engineers**, 61 p, 1996.

WRIGHT, L. D.; CHAPPELL, B. G.; THOM, M. P.; BRADSHAW, P. & COWELL, P. 1979. *Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems: Southeastern Australia.* **Mar. Geol.** 32: 105-140.

WRIGHT, L. D. & SHORT, A. D. 1984. *Morphodynamic variability of suf zones and beaches: a syntesis.* **Mar. Geol.** 56: 93-118.

ZÓZIMO, A. C.; A. GONÇALVES; C. FORTES & N. CHARNECA 2005. *Ferramentas SIG para modelos de propagação de ondas, desenvolvimentos preliminares. Relatório técnico.* Univ. do Porto Dept. de Eng., Portugal.