

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

MARCO ANTÔNIO RÍGOLA ROMEU

**MÉTODO OPERACIONAL PARA DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE
MAR PRÓXIMO À COSTA: APLICAÇÃO À ILHA DE SANTA CATARINA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutor em Engenharia Ambiental.

Orientador: Eloi Melo Fº, Ph.D.

FLORIANÓPOLIS

2007

R763m

ROMEU, Marco Antônio Rígola.

Método operacional para determinação do estado de mar próximo à costa: aplicação à ilha de Santa Catarina / Marco Antônio Rígola Romeu .__ Florianópolis : [s.n.], 2007.
103 p.

Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina.

1. Previsão de ondas. 2. Modelo de refração-difração. 3. Oceanografia física.

CDU : 466.4

Banca Examinadora:

Orientador - Eloi Melo F^o, Ph.D.

Davide Franco, Dr.

Maurício Felga Gobbi, Ph.D.

Valéria Souza Rego, Dr^a.

Dedico este trabalho a Yukiko, Minami,
seu Hugo e a dona Iara.

AGRADECIMENTOS

A Deus que permitiu a conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador prof. Eloi Melo pelos ensinamentos, orientação, confiança e ajuda ao longo de vários anos de trabalho no LaHiMar.

Ao prof. Davide Franco pelas incontáveis dicas e valiosas sugestões.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq/CT-Hidro – Brasil pela bolsa de estudos que viabilizou a realização deste trabalho.

A quem mais contribuiu com este trabalho e não foi citado.

RESUMO

ROMEU, M.A.R. **Método operacional para determinação do estado de mar próximo da costa: Aplicação à Ilha de Santa Catarina.** [s.n.] : Florianópolis, 2007. (Tese de Doutorado).

Este trabalho apresenta uma nova metodologia para a determinação do estado do mar próximo da costa a partir de condições conhecidas ao largo (espectro direcional) usando modelos parabólicos lineares de refração-difração sob a hipótese de linearidade do fenômeno. Essa metodologia difere de outras similares em dois aspectos fundamentais: (i) a utilização simultânea de várias grades computacionais com diferentes orientações em relação à costa e (ii) o fato de que a transformação de cada componente espectral é calculada a priori uma única vez na grade que se mostrar mais adequada e armazenada para uso posterior. A hipótese de linearidade possibilita a determinação de um dado estado do mar em águas mais rasas através de uma mera superposição das soluções (pré-calculadas) das componentes espectrais devidamente pesadas pela energia existente ao largo. O uso de grades de cálculo com diferentes orientações elimina a restrição do ângulo de incidência das ondas em relação à costa inerente a modelos parabólicos e possibilita otimizar a precisão do cálculo da refração. Para minimizar os problemas ocasionados por ruído numérico, comuns em modelos ref-dif, ilhas e similares são modeladas como áreas localizadas de dissipação de energia em lugar de películas de pequena profundidade. A metodologia proposta torna o cálculo da refração-difração de ondas sobre a plataforma continental extremamente rápido e eficiente e se presta particularmente bem para, em combinação com previsões ou medições de ondas ao largo, determinar as condições de mar próximo a costa de forma operacional. O método desenvolvido neste trabalho foi finalmente aplicado a Ilha de Santa Catarina e testado em dois estados de mar típicos da região com espectros direcionais previstos por um modelo de geração de ondas de grande escala (WW3). Apesar da inexistência de medições em águas rasas, observações visuais do mar feitas em várias praias da ilha sugerem resultados favoráveis.

Palavras Chave: Previsão de ondas. Modelo de refração-difração. Oceanografia Física.

ABSTRACT

ROMEU, M.A.R. **Operational method for the determination of the nearshore sea state: Application to Santa Catarina Island.** [s.n.] : Florianópolis, 2007. (Doctorate Thesis).

This work presents a new methodology for determining the sea state near the coast from known conditions (directional spectra) offshore using linear parabolic refraction-diffraction models under the hypothesis of linearity of the phenomenon. The methodology differs from similar ones in two fundamental aspects: (i) the simultaneous use of several computational grids with different orientations with respect to the coast, and (ii) the fact that each spectral component transformation is calculated a priori one single time in the grid that is more adequate, and stored for later use. The linearity hypothesis allows the determination of a given Sea State by means of a mere superposition of (pre-calculated) solutions of the spectral components weighted accordingly to the existing energy offshore. The use of computational grids with different orientations eliminates the restriction regarding the angle of wave incidence with respect to the coast inherent to parabolic models and optimizes the precision of refraction calculations. To minimize problems caused by numerical noise, common in ref-dif models, island and similar features are modeled as areas of localized energy dissipation instead of areas of very low depth. The proposed methodology makes the calculation of wave refraction-diffraction on the continental shelf extremely rapid and efficient and, in combination with predictions or measurements of waves offshore, lends itself particularly well for determining nearshore sea conditions in an operational fashion. The method developed herein was finally applied to the Santa Catarina Island and tested in two sea state situations typical of the region with directional spectra predicted by a large scale wave generation model (WW3). Despite the inexistence of shallow water measurements, visual wave observations performed at several beaches along the island suggest favorable results.

Key-words: Wave forecast. Refraction-diffraction model. Physical oceanography.

SUMÁRIO

	LISTA DE FIGURAS	.....	IX
	LISTA DE TABELAS	.....	XIII
	LISTA DE SÍMBOLOS	.....	XV
I	INTRODUÇÃO	.....	1
II	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	.....	3
2.1	Hipóteses Fundamentais	.....	3
2.2	Processos Físicos Relevantes	.....	4
2.3	Opções de Modelos	.....	6
2.4	Modelo de Refração-Difração	.....	9
2.4.1	Equação do Declive Suave	.....	9
2.4.2	Aproximação Parabólica	.....	10
2.4.3	Equação da Amplitude Complexa	.....	11
III	METODOLOGIA	.....	14
3.1	Introdução	.....	14
3.2	Grades de Cálculo	.....	18
3.3	Refração-Difração das Componentes	.....	18
3.4	Esquema de Sobreposição das Soluções	.....	19
3.5	Determinação do Espectro de Frequência	.....	19
3.6	Uso de Áreas de Dissipação de Energia	.....	20
IV	ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MODELO	.....	22
4.1	Introdução	.....	22
4.2	Organização dos Testes	.....	23
4.3	Etapa 1 da Análise	.....	27
4.4	Etapa 2 da Análise	.....	36
4.4.1	Ângulo Efetivo de 0 grau	.....	39
4.4.2	Ângulo Efetivo de 10 graus	.....	40
4.4.3	Ângulo Efetivo de 20 graus	.....	41
4.4.4	Ângulo Efetivo de 30 graus	.....	42
4.4.5	Ângulo Efetivo de 40 graus	.....	43
4.4.6	Ângulo Efetivo de 50 graus	.....	44

4.4.7	Ângulo Efetivo de 60 graus	.....	45
4.4.8	Ângulo Efetivo de 70 graus	.....	46
4.4.9	Ângulo Efetivo de 80 graus	.....	47
4.4.10	Ângulo Efetivo de 89 graus	.....	48
V	DETERMINAÇÃO DAS GRADES COMPUTACIONAIS	.....	50
5.1	Introdução	.....	50
5.2	Tabela Geral	.....	52
5.3	Tabela de Índices	.....	54
5.4	Tabela Final de Análise	.....	55
5.5	Grades Computacionais	.....	59
VI	APLICAÇÃO DO SISTEMA COMPUTACIONAL	.....	61
6.1	Diagrama de Fluxo	.....	61
6.2	Região de Aplicação	.....	62
6.3	Regime de Ondas da Região	.....	63
6.4	Determinação das Grades Computacionais	.....	66
6.4.1	Tabela Final de Análise	.....	69
6.4.2	Grades Computacionais	.....	71
6.5	Sobreposição das Soluções Numéricas	.....	75
6.6	Características do Modelo de Geração WW3	.....	80
6.7	Áreas de Dissipação de Energia	.....	81
6.8	Aplicações	.....	83
6.8.1	Aplicação 1	.....	83
6.8.2	Aplicação 2	.....	88
VII	CONSIDERAÇÕES FINAIS	.....	94
	REFERÊNCIAS	.....	97
	APÊNDICES		
A	SOLUÇÃO ANALÍTICA PARA REFRAÇÃO	.....	100
B	INCLUSÃO DE ÁREAS DE DISSIPACÃO DE ENERGIA	.....	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Ilustração da opção 1 de modelação.	15
Figura 3.2	Ilustração da opção 2 de modelação.	15
Figura 3.3	Ilustração das opções (1), (2) e (3) de modelação para o ângulo de 20° em relação à direção normal às linhas batimétricas.	16
Figura 3.4	Ilustração do ângulo efetivo, do ângulo de incidência das ondas na grade e do ângulo de rotação da grade computacional em relação aos contornos batimétricos.	17
Figura 4.1	Esquema ilustrativo da grade com contornos batimétricos paralelos a seu eixo-y.	23
Figura 4.2	Grades computacionais: (a) b20, (b) b40.	24
Figura 4.3	Mapas de Erro Relativo Quadrático Médio (Percentual).	29
Figura 4.4	Mapas de Erro Relativo na profundidade 0.05L (Percentual).	31
Figura 4.5	Mapas de Erro Relativo na profundidade 0.05L0 (Percentual).	33
Figura 4.6	Esquema representativo do setor de 0° à 89° de ângulos efetivos.	36
Figura 4.7	Possibilidades simétricas para modelar o ângulo efetivo de 30°.	37
Figura 4.8	Valores de altura de onda e ângulo efetivo de 0°.	39
Figura 4.9	Valores de direção de onda e ângulo efetivo de 0°.	39
Figura 4.10	Valores de altura de onda e ângulo efetivo de 10°.	40
Figura 4.11	Valores de direção de onda e ângulo efetivo de 10°.	40
Figura 4.12	Valores de altura de onda e ângulo efetivo de 20°.	41
Figura 4.13	Valores de direção de onda e ângulo efetivo de 20°.	41
Figura 4.14	Valores de altura de onda e ângulo efetivo de 30°.	42
Figura 4.15	Valores de direção de onda e ângulo efetivo de 30°.	42

Figura 4.16	Valores de altura de onda e ângulo efetivo de 40°.	43
Figura 4.17	Valores de direção de onda e ângulo efetivo de 40°.	43
Figura 4.18	Valores de altura de onda e ângulo efetivo de 50°.	44
Figura 4.19	Valores de direção de onda e ângulo efetivo de 50°.	44
Figura 4.20	Valores de altura de onda e ângulo efetivo de 60°.	45
Figura 4.21	Valores de direção de onda e ângulo efetivo de 60°.	45
Figura 4.22	Valores de altura de onda e ângulo efetivo de 70°.	46
Figura 4.23	Valores de direção de onda e ângulo efetivo de 70°.	46
Figura 4.24	Valores de altura de onda e ângulo efetivo de 80°.	47
Figura 4.25	Valores de direção de onda e ângulo efetivo de 80°.	47
Figura 4.26	Valores de altura de onda e ângulo efetivo de 89°.	48
Figura 4.27	Valores de direção de onda e ângulo efetivo de 89°.	48
Figura 5.1	Esquema representativo do setor de chegada de ondas num plano inclinado genérico.	51
Figura 6.1	Ilha de Santa Catarina e a plataforma continental adjacente.	62
Figura 6.2	Distribuição sazonal, Primavera e Verão, de períodos de pico por direções dominantes, extraídos de Araújo et al (2003)	64
Figura 6.3	Distribuição sazonal, Outono e Inverno, de períodos de pico por direções dominantes, extraídos de Araújo et al (2003)	65
Figura 6.4	Contornos batimétricos e o setor de direções de chegada de ondas na região de interesse. A linha de cor azul representa a batimétrica de 80m.	65
Figura 6.5	Batimetria da área de interesse e linhas batimétricas com inclinação 15° N.	66
Figura 6.6	Plano inclinado hipotético e setor de chegada de ondas relativas a ilha de Santa Catarina.	67
Figura 6.7	Grade 1 e os respectivos raios das direções limites.....	72
Figura 6.8	Grade 2 e os respectivos raios das direções limites.....	73

Figura 6.9	Grade 3 e os respectivos raios das direções limites.....	73
Figura 6.10	Grade 4 e os respectivos raios das direções limites.....	74
Figura 6.11	Grade 5 e os respectivos raios das direções limites.....	75
Figura 6.12	Área de interesse, comum a todas as grades computacionais.	75
Figura 6.13	Grade 1 e a área de interesse comum a todas grades computacionais.	77
Figura 6.14	Grade 2 e a área de interesse comum a todas grades computacionais.	77
Figura 6.15	Grade 3 e a área de interesse comum a todas grades computacionais.	78
Figura 6.16	Grade 4 e a área de interesse comum a todas grades computacionais.	78
Figura 6.17	Grade 5 e a área de interesse comum a todas grades computacionais.	79
Figura 6.18	Exemplo 1 de utilização de áreas de dissipação de energia	81
Figura 6.19	Exemplo 2 de utilização de áreas de dissipação de energia	82
Figura 6.20	Espectro de frequência para o dia 23 de março de 2006, 9:00 horas.	83
Figura 6.21	Espectro de direcional para o dia 23 de março de 2006, 9:00 horas.	84
Figura 6.22	Praia do Moçambique e praia do Camping da Barra, dia 23 de março de 2006.	84
Figura 6.23	Praia da Barra da Lagoa dia 23 de março de 2006.....	85
Figura 6.24	Praia Mole e praia da Joaquina no dia 23 de março de 2006.	85
Figura 6.25	Campo de alturas significativas (em metros), determinado pelo sistema computacional para o dia 23 de março de 2006 às 9:00 horas.	86
Figura 6.26	Variação espacial de Hs ao longo da batimétrica de 10 metros.	87

Figura 6.27	Varição espacial de Hs ao longo da batimétrica de 20 metros.	87
Figura 6.28	Espectro de frequência para o dia 24 de abril de 2006, 9:00 horas.	88
Figura 6.29	Espectro direcional para o dia 24 de abril de 2006, 9:00 horas.	88
Figura 6.30	Praia do Moçambique no dia 24 de abril de 2006.	89
Figura 6.31	Praia do Camping da Barra e praia da Barra da Lagoa dia 24 de abril de 2006.	89
Figura 6.32	Praia Mole no dia 24 de abril de 2006.	90
Figura 6.33	Praia da Joaquina e praia do Campeche no dia 24 de abril de 2006.	90
Figura 6.34	Campo de alturas significativas (em metros), determinado pelo sistema computacional para o dia 24 de abril de 2006 às 9:00 horas.	91
Figura 6.35	Varição espacial de Hs ao longo da batimétrica de 10 metros.	92
Figura 6.36	Varição espacial de Hs ao longo da batimétrica de 20 metros.	92
Figura A .1	Características dos raios de onda refratando sobre uma batimetria idealizada.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Possibilidades de modelação para os ângulos efetivos	38
Tabela 5.1	Tabela que relaciona as direções de chegada de onda no plano inclinado com as diferentes opções de modelação dos ângulos efetivos.	53
Tabela 5.2	Tabela de Geral para a diferença simples de altura de onda na profundidade de 0.05L0.	54
Tabela 5.3	Tabela de Índices para a diferença simples na profundidade de 0.05L0, para cálculo de altura de onda. Para o nível de aceitação e erro igual a 1%.	55
Tabela 5.4	Tabela final de análise para a batimetria plano inclinado, com as possíveis opções de modelação.	58
Tabela 5.5	Tabela que indica as seis grades computacionais escolhidas e seus respectivos setores de incidência de onda.	59
Tabela 6.1	Tabela que relaciona as direções do setor de chegada de ondas no plano inclinado hipotético com os ângulos efetivos correspondentes.	68
Tabela 6.2	Tabela final de análise para a Região da Ilha de Santa Catarina, com as possíveis opções de modelação.	69
Tabela 6.3	Tabela que indica as cinco grades computacionais escolhidas e seus respectivos setores de incidência de onda.	70
Tabela 6.4	Tabela que relaciona as grades com seu ângulo de rotação, o setor de incidência de ondas e os respectivos limites de cada setor em relação ao Norte.	70
Tabela 6.5	Posição geográfica da origem da grade 1 nos referenciais utilizados.	72
Tabela 6.6	Posição geográfica da origem da grade 2 nos referenciais utilizados.	72
Tabela 6.7	Posição geográfica da origem da grade 3 nos referenciais utilizados.	73

Tabela 6.8	Posição geográfica da origem da grade 4 nos referenciais utilizados.	74
Tabela 6.9	Posição geográfica da origem da grade 5 nos referenciais utilizados.	74
Tabela 6.10	Posição geográfica da origem da área comum nos referenciais utilizados.	76
Tabela 6.11	Frequências e os períodos equivalentes utilizados pelo modelo WW3.	80
Tabela 6.12	Direções do espectro direcional do WW3 em relação ao Norte geográfico.	80

LISTA DE SÍMBOLOS

Maiúsculas Romanas

A	Amplitude complexa
A_R	Parte real da amplitude complexa
A_I	Parte imaginária da amplitude complexa
C	Velocidade de fase da onda
C_g	Velocidade de grupo da onda
H	Altura de Onda
H_0	Altura inicial de onda.
H_S	Altura significativa de onda.
E	Energia
L_0	Comprimento de onda inicial
L	Comprimento de onda
T	Período de onda
W	Taxa de dissipação de energia

Minúsculas Romanas

f_d	Fator de dissipação
g	Módulo da aceleração da gravidade
h	Profundidade local
\vec{k}	Vetor número de onda
k	Módulo do vetor número de onda
k_0	Numero de onda de referência no início da propagação.
k_c	Número de onda
K_D	Número de onda equivalente com dissipação de energia
i	Unidade imaginária
l_0	Espaçamento entre raios no início da propagação
m_0	Momento espectral de ordem zero
t	Tempo
x, y, z	Dimensões espaciais

Maiúsculas Gregas

∇	Operador gradiente
∇_H	Operador gradiente horizontal
∂	Operador derivada parcial
Φ	Potencial de velocidade
ξ	Campo de ondas
ξ_+	Campo de ondas transmitido
ψ	Argumento da amplitude complexa

Minúsculas Gregas

η	Posição da superfície livre
ϕ	Parte horizontal do potencial de velocidade
ϕ_+	Parte horizontal do potencial de velocidade do campo de ondas transmitido
σ	Frequência angular da onda
α	Estimativa de direção da onda obtida da aproximação parabólica.
θ_0	Direção inicial de incidência de onda

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O contínuo avanço do conhecimento humano sobre os fenômenos da natureza aliado à disponibilidade de computadores cada vez mais poderosos e a instrumentos de medição cada vez mais acurados e sofisticados tem propiciado um grande progresso nas ciências naturais. Um dos exemplos mais expressivos dessa evolução vem da área de meteorologia onde a previsão científica das condições atmosféricas a partir de modelos matemáticos já permite prognosticar com precisão bastante satisfatória vários fenômenos de grande importância para o cotidiano da sociedade.

Na área de oceanografia também houve progressos. O monitoramento das condições de agitação do mar, por exemplo, já pode ser realizado por diversos tipos de equipamentos com dados sendo transmitidos em tempo real. Além disto, com a evolução dos modelos de geração de onda pelo vento, a previsão das condições do mar já é feita operacionalmente por varias instituições no nosso país.

Num esforço para acompanhar esses avanços, o Laboratório de Hidráulica Marítima (LaHiMar) do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC conduziu de 2001 a 2005 um pioneiro programa de monitoramento de ondas, intitulado Programa de Informação Costeira on line - P.I.C. -, o qual disponibilizava em tempo real via internet diagnósticos do estado de agitação do mar ao largo da Ilha de Santa Catarina. O monitoramento era feito por um ondógrafo direcional Datawell Mark II, os dados medidos eram analisados e disponibilizados gratuitamente ao público via Internet na web-site do laboratório: <http://www.lahimar.ufsc.br/pic/> [Melo et al (2003)].

Quanto a previsão de ondas, o LaHiMar também dispõe de um sistema operacional com informações disponibilizadas via Internet (<http://www.lahimar.ufsc.br/pic/proas.php>). O modelo de geração utilizado é o Wave Watch III v 2.22 forçado com ventos obtidos via Internet do NCEP/NOAA. O WW3 é um modelo de domínio público com código aberto e

acessível via Internet. No entanto, a previsão feita pelo WW3 e outros modelos semelhantes refere-se, por via de regra, a condições de mar em águas profundas.

As informações sobre as condições de mar ao largo, medidas pelo ondógrafo ou previstas pelo modelo de geração, necessitam ainda ser trabalhadas para se obter as condições de onda próximas à costa. Esta nova etapa requer o cálculo das transformações sofridas pelas ondas ao propagarem-se sobre a plataforma continental em direção à costa.

O presente trabalho está inserido neste contexto e seu objetivo fundamental é estabelecer um sistema computacional que permita determinar de forma rápida e eficiente às condições do mar próximo à costa a partir do espectro de ondas ao largo, complementando, portanto, as informações obtidas por modelos de geração ou medidas por ondógrafos.

Um dos "produtos" mais úteis dessa modelação será a elaboração de mapas de altura significativa de onda em águas mais rasas, para áreas escolhidas. Nestes mapas será possível perceber como as condições do estado de mar ao largo são modificadas pela plataforma continental. Tais mapas permitirão, por exemplo, avaliar a variação de altura significativa das ondas ao longo da costa em todas as praias da região em estudo e poderão ser disponibilizados em tempo real via Internet.

Os componentes básicos do sistema computacional de previsão de ondas em águas rasas incluem: um modelo numérico de propagação de ondas, uma estratégia de modelação, os procedimentos de cálculo para a determinação do campo de alturas significativas e grades computacionais que representem satisfatoriamente o relevo do fundo do mar determinadas com o conhecimento do regime de ondas ao largo.

O capítulo 2 contém a fundamentação teórica deste trabalho, no capítulo 3 está uma discussão das possibilidades de modelação que podem ser aplicadas e os procedimentos necessários para o cálculo das condições de mar próximo à costa. No capítulo 4 encontra-se uma análise de desempenho do modelo numérico monocromático utilizado em relação ao cálculo da refração das ondas, com estes resultados no capítulo 5 foi determinado um número mínimo de grades batimétricas para o plano inclinado e no capítulo 6, o sistema computacional para a região da Ilha de Santa Catarina foi aplicado para dois casos utilizando espectros previstos pelo modelo de geração. No capítulo 7, estão as considerações finais deste trabalho.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Hipóteses Fundamentais

A metodologia a ser desenvolvida para determinar as transformações sofridas pelas ondas leva em conta as seguintes hipóteses fundamentais:

(i) O espectro direcional de ondas ao largo é espacialmente uniforme em distâncias da ordem de dezenas de km ao longo da costa.

(ii) Na sua propagação até a costa (distâncias da ordem de poucas dezenas de km) as transformações sofridas pelas ondas se devem exclusivamente à sua interação com a plataforma continental sendo os efeitos: (a) do vento local, (b) de (possíveis) correntes e (c) de interações não-lineares entre componentes espectrais de importância secundária.

A primeira hipótese se justifica em função do fato de que ao largo as ondas ainda não estão sendo afetadas pelo fundo e, portanto, as características do campo de ondas expressas pelo seu espectro direcional dependem exclusivamente da ação dos ventos sobre o oceano. Como os sistemas atmosféricos que geram as ondas têm tipicamente, dimensões da ordem de centenas de quilômetros é razoável supor que o estado do mar ao largo não apresente variações significativas em distâncias da ordem de algumas dezenas de quilômetros. Assim sendo, o espectro direcional especificado num único ponto ao largo pode ser utilizado como condição de contorno para um modelo de propagação de ondas que vai transformar esse dado pontual numa previsão do estado do mar válida para um trecho de costa de algumas dezenas de quilômetros de extensão.

A segunda hipótese se justifica em função das características locais. A costa S-SE do Brasil caracteriza-se por ter um clima de ondas dominado por ondulações. Esse fato faz com que o efeito de ventos que porventura estejam soprando na vizinhança do litoral seja pouco importante para a determinação das características das ondas próximo à costa.

A plataforma continental interna dessa região tem dimensões da ordem de dezenas de km, distâncias essas menores do que as necessárias para que haja transferência de quantidade significativa de energia da atmosfera para o campo de ondas (que são da ordem de centenas de quilômetros).

Para que o efeito de correntes se torne importante na transformação das ondas, é preciso que suas velocidades sejam uma fração significativa da velocidade de propagação das ondas, Peregrine (1976). Na região costeira, tal situação pode ocorrer nas proximidades de estuários ou entradas de baía ou, em geral, em locais que apresentem grandes variações de maré. As correntes costeiras encontradas no litoral S-SE brasileiro, entretanto, são tipicamente da ordem de 0.5 m/s, significativamente menores que a velocidade de propagação de ondas tipicamente encontradas na região que é da ordem de 10 m/s. Este fato é, na verdade, bastante fortuito, pois a inclusão do efeito de correntes na transformação das ondas necessitaria o conhecimento do campo de correntes sobre a plataforma continental o que raramente se verifica na prática.

A experiência tem demonstrado que desprezar as interações não-lineares entre componentes espectrais durante a sua propagação desde o largo até a costa é uma boa aproximação até profundidades da ordem de 10 metros [Guza & Thornton (1980)]. A partir dessa profundidade efeitos não-lineares vão tornando-se gradativamente mais importantes levando, finalmente, à arrebentação das ondas na praia. Entretanto, alturas de onda próximas à zona de arrebentação previstas a partir de modelos espectrais totalmente lineares ainda têm se mostrado úteis e compatíveis com a maioria das aplicações práticas de interesse.

Os argumentos apresentados substanciam a hipótese de que os processos causadores das transformações das ondas resultam apenas das suas interações com a plataforma continental interna. Adicionalmente, tornam clara a conveniência de se usar modelos de simples propagação, não havendo assim a necessidade de utilizar modelos que incluam geração de ondas.

2.2 Processos Físicos Relevantes

Quatro tipos de processos físicos desempenham papel fundamental na interação das ondas com o relevo submerso da plataforma continental interna: refração, difração, empinamento ("shoaling") e a dissipação por atrito.

A refração de ondas oceânicas é um processo análogo à refração da luz. Da mesma forma que raios luminosos têm sua direção de propagação e sua intensidade alterada quando atravessam meios com propriedades distintas, variações de profundidade resultam em mudanças na direção de propagação das ondas que, por sua vez, acarretam alterações na sua altura. Dessa forma, o relevo da plataforma é capaz de redirecionar a energia proveniente do oceano criando tanto zonas de convergência ou "focalização" - onde as ondas terão maior altura - quanto zonas de divergência ou "desfocalização" - onde as alturas serão menores. A correta determinação do processo de refração é de crucial importância para se prever as condições de onda em águas mais rasas.

As focalizações ocasionadas por feições do fundo podem resultar no surgimento de fortes gradientes locais de energia, os quais dão origem ao fenômeno da difração - um processo de natureza difusiva capaz de espalhar lateralmente a energia das ondas. Fenômenos difrativos surgem, portanto, sempre que houver situações propícias a causar variações abruptas no campo de ondas. Isto é exatamente o que acontece na presença de obstáculos (ilhas, cabos, promontórios, quebra-mares, etc.) que interrompem parcialmente a propagação das ondas. Nesse caso, de forma análoga ao que ocorre, por exemplo, com a luz, o fenômeno da difração encarregar-se-á de enviar uma parcela de energia para as chamadas zonas de sombra que, desta maneira, ficam apenas parcialmente abrigadas da ação das ondas.

O empinamento da onda consiste numa variação de altura que surge em resposta a alterações na velocidade de propagação da energia (a chamada velocidade de grupo) de um trem de ondas. Tais variações ocorrem quando as ondas se propagam numa região onde as profundidades diminuem progressivamente como no caso de uma costa com praias arenosas. Este processo se torna importante a partir de profundidades da ordem de um quarto do comprimento de onda.

Finalmente, experimentos de laboratório e medições de campo indicam que o escoamento induzido pela passagem de ondas superficiais é muito pouco influenciado pela viscosidade da água exceto em águas mais rasas onde efeitos viscosos tornam-se importantes numa fina camada junto ao fundo (a chamada "camada limite"). Em trechos onde a plataforma continental apresenta profundidades reduzidas por grandes extensões, o efeito cumulativo do "atrito" pode ser capaz de dissipar quantidades consideráveis de energia causando uma atenuação da altura das ondas. Esse tipo de interação pode se tornar

importante em alguns trechos de costa, entretanto este tipo de relevo submarino não é comum na costa S e SE brasileira em geral e na costa de Santa Catarina em particular.

As considerações desta seção, portanto, sugerem que o modelo numérico mais indicado para calcular as transformações das ondas sobre a plataforma continental seja tal que possibilite calcular, da forma mais precisa possível, os fenômenos da refração, difração e empinamento das ondas.

2.3 Opções de Modelos

Uma primeira opção para o cálculo das transformações das ondas seriam modelos do tipo Boussinesq, Kirby (1997). Modelos de Boussinesq são bastante poderosos, pois descrevem de forma precisa eventuais efeitos não lineares, além de incluírem intrinsecamente os processos físicos da refração, difração e empinamento. Entretanto, a possibilidade do uso desse tipo de modelo de forma operacional para trechos de costa da ordem de centenas de km não se mostra viável em vista da capacidade computacional requerida. Sua utilização parece mais indicada para áreas de menores dimensões próximas a arrebentação, onde os efeitos não-lineares necessitam ser bem determinados e em situações onde não haja restrições quanto ao tempo de execução do modelo.

Outra possível opção seriam modelos de refração espectral, como o SWAN, por exemplo. Entretanto, uma característica comum na costa S-SE brasileira, em particular na região da ilha de Santa Catarina, introduz dificuldades para o uso deste tipo de modelo: a existência de ilhas nas vizinhanças da costa. De fato, modelos de refração pura não são capazes de descrever fenômenos difrativos de forma satisfatória.

Em face destas peculiaridades, o tipo de modelo aqui considerado foi o de refração-difração espectral parabólico com base na equação do declive suave (EDS). Este tipo de modelo, além de não demandar muito esforço computacional, descreve de forma razoavelmente precisa tanto a refração quanto a difração de ondas. Sua maior limitação reside no fato deste ser um modelo linear. Entretanto, acredita-se que efeitos não-lineares não sejam importantes o suficiente para o tipo de aplicação que se almeja no presente trabalho. Modelos Ref-Dif parabólicos descreveram satisfatoriamente a propagação de ondas irregulares sobre fundo com batimetria complexa em laboratório, [Vicent e Briggs (1989)] para ondas irregulares e em regiões costeiras abertas [O'Reilly e Guza (1991) e O'Reilly e Guza (1993)].

A aplicação de modelos de refração-difração parabólicos deve atender a três requisitos:

1. As variações do meio devem ser suaves, em distâncias da ordem do comprimento de onda.
2. Existência de uma direção preferencial de propagação de ondas.
3. Ondas refletidas devem ser desprezíveis.

A primeira condição é geralmente observada no litoral S-SE brasileiro, no entanto, nas proximidades de ilhas, costões e pontais rochosos, a inclinação do fundo pode tornar-se demasiadamente íngreme. Para estes casos, existem procedimentos que minimizam as conseqüências deste tipo de relevo na grade de cálculos, a forma como este problema é tratado pelos modelos de Refração-Difração é discutida a seguir. É também na presença de ilhas, costões e quebra-mares que se observa a existência de ondas refletidas, neste caso o campo de ondas de interesse é posterior a estes anteparos e ondas refletidas não estão presentes. Em relação ao segundo requisito, no qual é necessário que as ondas não se afastem muito da direção dominante de propagação, sua não observância, poderá sim ser uma fonte de falta de acurácia nos cálculos, o procedimento de cálculo proposto por este trabalho lida exatamente com esta questão!

Dois modelos parabólicos se apresentaram como candidatos: o primeiro desenvolvido por Melo (1990) com aperfeiçoamentos recentes [Melo (2007)], e o segundo, desenvolvido por Kirby e colaboradores, Kirby e Ozkan (1994).

A principal diferença entre os dois modelos é que o modelo de Kirby utiliza uma equação parabólica obtida diretamente a partir da equação do declive suave enquanto que a equação parabólica de Melo foi desenvolvida a partir de uma versão modificada da equação do declive suave, chamada EDS “reduzida”. Com o aperfeiçoamento introduzido recentemente [Melo (2007)] pode-se verificar que os dois modelos são matematicamente equivalentes.

Em ambos os modelos, a hipótese da linearidade do campo de ondas permite construir versões espectrais a partir de soluções monocromáticas através de uma simples sobreposição de efeitos, Kirby e Ozkan (1994). Entretanto, a versão espectral do modelo Kirby, utiliza um procedimento de cálculo que não explora de forma otimizada a capacidade do modelo parabólico, como discutido a seguir.

Um primeiro aspecto refere-se ao fato deste modelo utilizar uma única grade computacional para propagar todo um espectro de ondas, a qual é usualmente montada com a direção principal aproximadamente normal à costa. Para espectros com grande espalhamento angular, por exemplo, a grade normal à costa implicaria em dificuldades para atender a segunda hipótese fundamental. Esse problema seria particularmente agravado em situações onde o espectro incidente é bi-modal com direções principais diferentes. De maneira geral, para locais em que o setor de incidências de onda seja bastante amplo, haveria necessidade de se modelar ondas que se aproximam da costa segundo ângulos bastante variados. A direção de incidência das ondas, portanto, pode ficar bastante oblíqua em relação à normal à costa (direção principal). Desta forma, a modelação de todas as direções de chegada de ondas não poderá ser realizada em uma única grade, sem violar a hipótese 2.

Em relação ao cálculo da difração de ondas, que ocorre quando as ondas têm de se propagar para as regiões posteriores a ilhas, quebra-mares ou similares, a aproximação parabólica utilizada é confiável para o cálculo num setor de até mais ou menos 45° em relação à direção preferencial de propagação [Kirby (1986b), Dalrymple & Kirby (1988)], (esta informação é também fornecida junto com o modelo). Assim, pelo mesmo motivo do parágrafo anterior, o cálculo da difração também pode ficar comprometido com a utilização de uma única grade de cálculos em espectros com grande espalhamento angular.

Adicionalmente, o modelo Kirby utiliza o dispositivo de Kirby & Dalrymple (1986) para a inclusão de ilhas, costões, quebra-mares ou mesmo regiões costeiras. Neste dispositivo, essas feições são substituídas por áreas submersas com uma fina camada ou película com profundidade de alguns centímetros. As ondas que passam por estas películas de água têm sua altura reduzida de tal forma que para efeitos práticos, a onda é aniquilada definitivamente. Esse procedimento causa o aparecimento de ruído numérico na solução, que pode comprometer os resultados em toda a malha de cálculo. Um filtro passa baixa é normalmente utilizado neste tipo de modelo para amenizar o problema, porém, no caso do modelo espectral de Kirby não é possível realizar a filtragem do ruído componente a componente.

Existe também a questão do tempo de execução utilizado pelo modelo espectral de Kirby para propagar um espectro de ondas desde ao largo até a praia. Com este modelo, os campos de alturas significativas são calculados caso a caso, ou seja, para cada diferente espectro ao largo os cálculos tem de ser refeitos. Isto porque, as componentes espectrais são propagadas simultaneamente à medida que os cálculos avançam na grade computacional, implicando em um elevado tempo de execução, o que já não seria recomendável para a operacionalização do método em tempo real.

Conforme apresentado a seguir, o método operacional para a determinação do estado de mar próximo à costa utiliza um procedimento de cálculo diferente do de Kirby e Ozkan (1994). O procedimento é baseado no modelo de refração-difração desenvolvido originalmente por Melo, utilizando diferentes grades computacionais para o cálculo da refração-difração de cada componente isoladamente. Além disso, um procedimento alternativo, investigado por Romeu (2000), é utilizado para a inclusão de ilhas visando diminuir o aparecimento e a intensidade do ruído numérico. Nesse procedimento, ilhas, costões e as regiões costeiras serão modelados utilizando áreas localizadas de dissipação de energia.

2.4 Modelo de Refração-Difração

2.4.1 Equação do Declive Suave

A suavidade do declive do fundo suporta a hipótese de que a onda seja capaz de ajustar-se à nova profundidade sem refletir e de que a solução do problema potencial para profundidade constante seja válida localmente. Baseado nessa hipótese, Berkhoff (1972) deduziu a seguinte equação diferencial que permite descrever a propagação de ondas periódicas de pequena amplitude sobre um fundo com inclinação suave, incluindo efeitos de empinamento, reflexão, refração e difração.

$$\nabla_H \cdot (CC_g \nabla_H \phi) + k^2 CC_g \phi = 0 \quad (2.1)$$

Onde:

∇_H é o operador gradiente horizontal.

k é o número de onda local.

C é a velocidade de fase da onda.

Cg é a velocidade de grupo, e C e Cg estão relacionados pela equação:

$$C_g = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = \frac{C}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (2.2)$$

k está relacionado com a profundidade local h , e a frequência angular σ pela relação de dispersão:

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \quad (2.3)$$

$\phi(x, y)$ é a parte horizontal do potencial de velocidade $\Phi(x, y, z, t)$, dado por :

$$\Phi(x, y, z, t) = -\frac{ig}{\sigma} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \phi(x, y) e^{-i\sigma t} \quad (2.4)$$

$\phi(x, y)$ está relacionado com o deslocamento da superfície livre η por:

$$\eta(x, y) = \text{Re} \left(\phi(x, y) e^{-i\sigma t} \right) \quad (2.5)$$

A equação do Declive Suave (2.1) é válida para ondas de pequena amplitude. Perdas de energia por fricção e quebra podem ser incorporadas de forma simplificada.

Uma das dificuldades da EDS é que ela é uma equação elíptica cuja solução deve ser calculada para todo o domínio simultaneamente com condições de contorno prescritas em todo o perímetro. Esse fato motivou o aparecimento das versões parabólicas da EDS, como descrito a seguir.

2.4.2 Aproximação Parabólica

O propósito básico é converter a EDS em uma equação ou em um conjunto de equações parabólicas capazes de descrever um campo de ondas que se propaga numa direção preferencial, porém considerando efeitos de difração na direção transversal.

Existem na literatura várias maneiras diferentes para se obter as aproximações parabólicas: Radder (1979); Booij (1981); Darymple et al (1984); Liu et al (1986); Liu (1991).

O primeiro passo dessa técnica é fazer uma troca de variáveis:

$$\xi = \phi \sqrt{CC_g} \quad (2.6)$$

Em termos da nova função ξ , a EDS, equação (2.1) toma a forma “reduzida”:

$$\nabla^2 \xi + k_c^2 \xi = 0 \quad (2.7)$$

Onde para fundo de inclinação suave, $k_c = k$

Utilizando a técnica de parabolização descrita em Liu (1991), com alguns aperfeiçoamentos, a seguinte aproximação parabólica é obtida da equação 2.7: [Melo (2007)].

Aproximação “Padé” ou de ordem superior:

$$\frac{\partial \xi_+}{\partial x} + \frac{1}{4k_c^2} \frac{\partial^3 \xi_+}{\partial x \partial y^2} - ik_c \xi_+ - \frac{3i}{4k_c} \frac{\partial^2 \xi_+}{\partial y^2} + \frac{1}{2k_c} \frac{\partial k_c}{\partial x} \xi_+ - \frac{3}{8k_c^3} \frac{\partial k_c}{\partial x} \frac{\partial^2 \xi_+}{\partial y^2} = O(\varepsilon^2) \quad (2.8)$$

Onde:

ξ_+ é o campo transmitido (i.e. ondas propagando-se na *dir-x* positiva).

A equação 2.8 difere da equação usada no modelo original de Melo (1990), pela inclusão do termo $(-\frac{3}{8k_c^3} \frac{\partial k_c}{\partial x} \frac{\partial^2 \xi_+}{\partial y^2})$.

2.4.3 Equação da Amplitude Complexa.

A equação para a amplitude complexa $A(x, y)$ do campo transmitido ξ_+ é obtida substituindo:

$$\xi_+(x, y) = A(x, y) e^{ik_o x} \quad (2.9)$$

na equação 2.8.

Onde k_o é um número de onda de referência normalmente considerado como em águas profundas.

A equação que descreve o campo da amplitude complexa, neste trabalho é:

$$\frac{\partial A}{\partial x} + \left[i(k_o - k_c) + \frac{1}{2k_c} \frac{\partial k_c}{\partial x} \right] A + \frac{1}{4k_c^2} \frac{\partial^3 A}{\partial x \partial y^2} + \left[i \left(\frac{k_o}{4k_c^2} - \frac{3}{4k_c} \right) - \frac{3}{8k_c^3} \frac{\partial k_c}{\partial x} \right] \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = 0 \quad (2.10)$$

O potencial do campo de ondas transmitido (ϕ_+) é obtido de A invocando as equações (2.6) e (2.9):

$$\phi_+(x, y) = (CC_g)^{-1/2} A(x, y) e^{ik_0 x} \quad (2.11)$$

A posição da superfície (η) é determinada usando (2.5),

$$\eta(x, y, t) = \text{Re}[\phi_+(x, y) e^{i\sigma}] = \text{Re}\left[(CC_g)^{-1/2} |A(x, y)| e^{i(\Psi(x, y) + k_0 x)} e^{i\sigma}\right] \quad (2.12)$$

Onde, $|A|$ e ψ são, respectivamente, o módulo e o argumento da amplitude complexa A , dados, por:

$$|A| = \sqrt{A_R^2 + A_I^2} \quad (2.13)$$

$$\Psi = \tan^{-1}\left(\frac{A_I}{A_R}\right) = \text{Im}[\ln A] \quad (2.14)$$

Sendo A_R e A_I as partes real e imaginária de A .

Portanto, a altura de onda H num ponto qualquer do domínio é obtida da variável A de acordo com:

$$H = (CC_g)^{-1/2} 2|A| \quad (2.15)$$

É possível também estimar num ponto qualquer do domínio uma “direção” para a onda. Observa-se, todavia, que o conceito de direção está intrinsecamente associado à existência de ondas planas ou, pelo menos, aproximadamente planas. A especificação duma “direção” para uma situação em que isso não se verifique pode produzir uma informação de difícil interpretação.

Admitindo que a onda apresente-se aproximadamente plana nas imediações do ponto (x, y) , é possível escrever a seguinte expressão a partir de (2.10), (2.11) e (2.12):

$$\eta(x, y, t) = \text{Re}\left[\frac{H}{2} e^{i\left(\int_x k_c \cos \alpha dx + \int_y k_c \sin \alpha dy\right)} e^{i\sigma}\right] = \text{Re}\left[(CC_g)^{-1/2} |A| e^{i(\Psi(x, y) + k_0 x)} e^{i\sigma}\right] \quad (2.16)$$

Onde α é a estimativa de direção da onda obtida da aproximação parabólica no ponto em questão.

Da equação (2.13) obtém-se:

$$\int_x k_c \cos \alpha dx + \int_y k_c \sin \alpha dy = \Psi + k_o x \quad (2.17)$$

O ângulo α pode ser calculado a partir das derivadas de (2.17) em relação a x e y pela equação:

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{\partial \Psi}{\partial y}}{\frac{\partial \Psi}{\partial x} + k_o} \right] \quad (2.18)$$

A condição inicial na fronteira externa para uma onda plana de altura H_o incidente segundo o ângulo θ_o em relação a x é obtida da expressão (2.17) com $x = 0$ e $k_c = k_o$ e $\alpha = \theta_o$.

$$|A(0, y)| = \frac{H_o}{2} (CC_g)^{1/2} \quad (2.19)$$

$$\Psi(0, y) = k_o \sin \theta_o y \quad (2.20)$$

Finalmente, a posição da superfície é estimada por:

$$\eta(x, y, t) = \frac{H(x, y)}{2} \cos(\Psi(x, y) + k_o x - \sigma t) \quad (2.21)$$

A equação (2.10) é a equação utilizada para o cálculo das transformações sofridas pelas ondas na passagem sobre a plataforma continental incluindo efeitos de empinamento, refração e difração. A versão numérica desta equação é obtida pelo método de diferenças finitas com formulação de Crank-Nicolson, implicando numa drástica redução do esforço computacional em relação a outras soluções numéricas da EDS.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 Introdução

Conforme já argumentado, a existência de uma direção dominante de propagação nos modelos parabólicos aponta para a necessidade de se utilizar grades computacionais com orientações diferentes da direção normal à praia, principalmente se a região em estudo apresentar um setor de incidência de ondas bastante amplo. Uma questão importante se coloca neste ponto: a orientação da grade computacional afeta o cálculo da refração das ondas nos modelos ref-dif parabólicos? Esta questão é de suma importância para este trabalho, visto que, de uma maneira geral, a plataforma continental pode ser interpretada, em primeira aproximação, como um plano inclinado com linhas batimétricas aproximadamente paralelas a linha de costa. Assim sendo, a refração das ondas torna-se a principal responsável pelas transformações ocorridas com as ondas na sua viagem desde o largo até a praia. Se a orientação da grade computacional fizer diferença na acurácia do cálculo da refração, o número de grades computacionais e suas respectivas orientações poderão ser escolhidos de modo a se otimizar o cálculo da refração de ondas e melhorar a acurácia do método desenvolvido neste trabalho.

Esta pergunta poderá ser respondida avaliando-se o desempenho do modelo numérico no cálculo da refração de ondas num plano inclinado, cuja solução analítica é bem conhecida e pode ser calculada pela lei de Snell. A forma de calcular a solução analítica de refração num plano inclinado utilizando a lei de Snell está no apêndice A.

Inicialmente, faz-se necessário definir as diferentes opções de modelação que podem ser utilizadas. A maneira “tradicional” de modelação utilizada nos modelos Ref-Dif considera que o eixo-x da grade computacional tenha direção normal à praia (direção do eixo-y paralela à linha de costa). Desta forma, uma onda que incida obliquamente à costa

terá uma direção inicial formando um ângulo θ em relação ao eixo-x (direção principal) da grade computacional. A princípio, essa abordagem seria aceitável para ângulos de até 45° . Esta maneira de modelar ondas é denominada neste trabalho por opção (1) de modelação.

Nas figuras a seguir, as setas cortadas por duas linhas paralelas representam a direção de propagação das ondas.

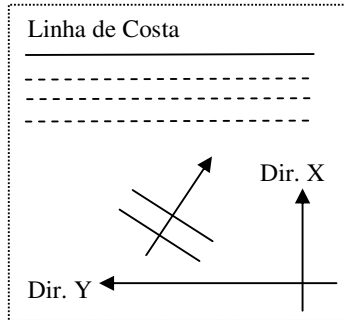


Figura 3.1 Ilustração da opção 1 de modelação.

Nesse caso, as linhas batimétricas são todas paralelas ao eixo-y (ângulo de rotação da grade computacional igual a 0°), o que facilita a especificação do fundo. Seja qual for a direção de incidência ao largo, o efeito da refração é de aproximar a direção da onda da direção normal à praia à medida que esta penetra em águas mais rasas.

Uma forma alternativa para modelar ondas com grandes ângulos de incidência é usar grades computacionais com os contornos batimétricos rotacionados em relação aos eixos da grade. Uma possibilidade seria fazer o eixo-x da grade computacional coincidir com a direção de incidência das ondas (eixo-y da grade forma um ângulo com a linha de costa). Esta maneira de modelar ondas é denominada neste trabalho de opção (2) de modelação.

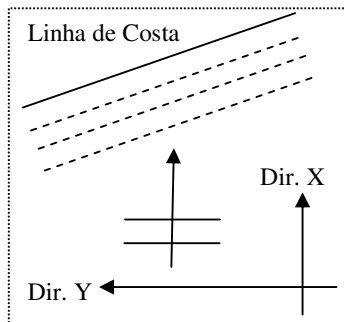


Figura 3.2 Ilustração da opção 2 de modelação.

Neste caso, o foco é a onda incidente e não a direção da costa. O ângulo de incidência da onda em relação à direção principal da grade é zero e o efeito da refração é o de afastar a direção de propagação da onda da direção x à medida que esta penetra em

águas mais rasas. Do ponto de vista prático, a especificação da batimetria nessa situação é menos “natural”, pois as linhas batimétricas apresentam-se rotacionadas em relação à direção x da grade computacional.

A opção (2) de modelação é a opção normalmente utilizada, nos casos em que a direção das ondas forma ângulos relativamente grandes em relação à direção do eixo- x da grade computacional na opção (1) de modelação, no entanto, esta opção ficou por muito tempo sem ser investigada na literatura, em trabalho paralelo a esta tese, Barletta (2006) também testou esta opção de modelação.

Existe ainda uma terceira opção a ser considerada: quando ambos, os contornos batimétricos e a direção principal de propagação das ondas, forem oblíquos ao eixo- x da grade computacional. Esta é uma posição intermediária entre as duas opções anteriores e é denominada por este trabalho de opção (3) de modelação.

Neste caso, a direção do eixo- x da grade computacional não é coincidente nem com a direção normal à costa, nem com a direção da onda ao largo. A condição inicial ao largo é de uma onda que incide segundo um ângulo β em relação à direção principal da grade. Esse ângulo, porém é menor do que o da primeira opção. Mais próximo da costa, o efeito da refração é também de afastar a direção de propagação da onda da direção x da grade computacional, porém aqui também de uma forma mais suave se comparado à segunda opção.

Por exemplo, para se modelar ondas incidindo com um ângulo de 20° em relação à normal às linhas batimétricas, poder-se-ia ter as seguintes três configurações:

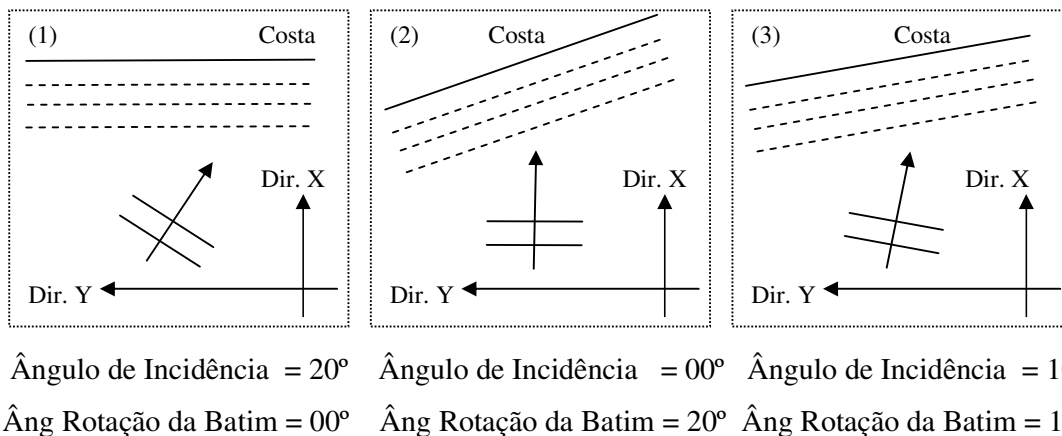


Figura 3.3 Ilustração das opções (1), (2) e (3) de modelação para ondas incidindo com 20° em relação à normal às linhas batimétricas.

A figura 3.3 ilustra o fato que existem diferentes opções de modelação em função da orientação relativa entre a grade computacional, às linhas batimétricas e o ângulo de incidência das ondas. Em qualquer uma destas opções, o problema físico é o mesmo e, portanto, a solução não pode depender do sistema de coordenadas utilizado. Entretanto, foram observadas diferenças significativas na avaliação do desempenho do modelo para as diferentes opções de modelação que indicam que a orientação da grade computacional tem papel relevante no cálculo da refração das ondas.

Neste trabalho, convencionou-se que o valor absoluto da diferença entre o ângulo de incidência das ondas na grade e a direção normal às linhas batimétricas de **ângulo efetivo**. No caso da figura 3.3, o ângulo efetivo é de 20° , independente das opções de modelação.

Na figura 3.4 estão identificados: o ângulo de incidência na grade computacional representado pela letra “t”, inicial de teta “ θ ”, o ângulo de rotação da grade computacional em relação aos contornos batimétricos representado pela letra “b” e o ângulo efetivo representado pela letra “e”.

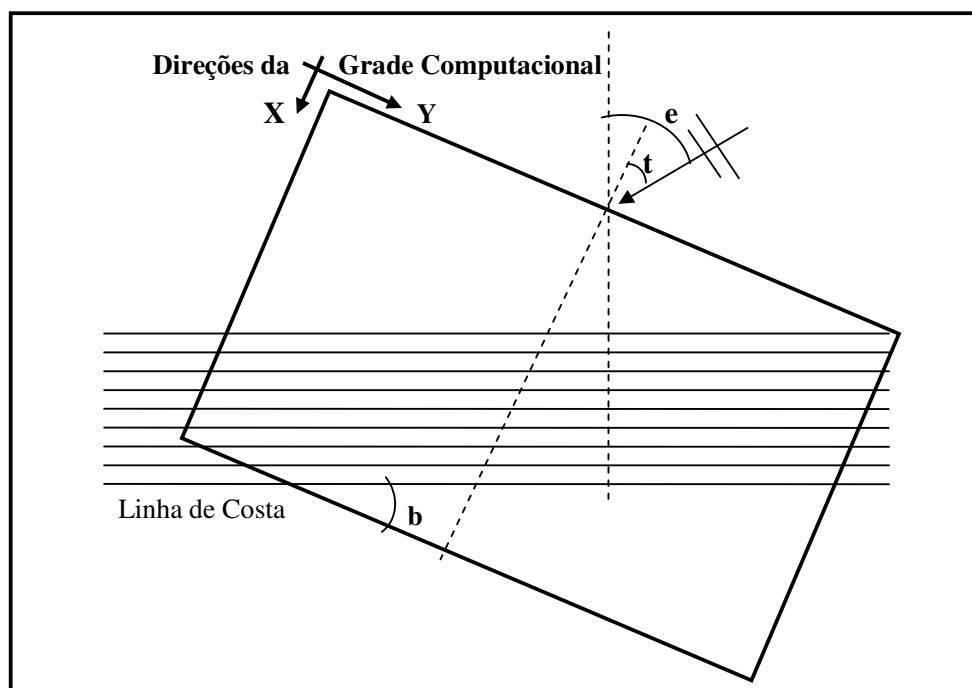


Figura 3.4 Ilustração do ângulo efetivo, do ângulo de incidência das ondas na grade e do ângulo de rotação da grade computacional em relação aos contornos batimétricos.

Da mesma forma, na apresentação dos resultados deste trabalho, introduziu-se a notação “t” para representar o ângulo de incidência das ondas. Incidência de onda normal à grade é representada por “t00”; incidência de 10° por “t10”; incidência de 20° por “t20” e assim sucessivamente. Analogamente, introduziu-se a notação “b” para representar o ângulo de rotação das grades computacionais em relação aos contornos batimétricos, mais detalhes de como foi definida esta nomenclatura no próximo capítulo.

Os procedimentos para o cálculo da refração-difração espectral desenvolvidos neste trabalho diferenciam-se da metodologia usada por Kirby e Ozkan (1994), principalmente: (a) pela utilização de várias grades de cálculo; (b) pelo fato de que as soluções numéricas de cada componente espectral são calculadas preliminarmente à aplicação do método e (c) pelo uso de áreas localizadas de dissipação de energia para representar ilhas e similares.

3.2 Grades de Cálculo

O número e a orientação das grades computacionais, bem como os respectivos setores de incidência de onda em cada uma delas são determinados tendo como base principalmente o regime de ondas da região à qual se deseja aplicar o método e a análise de desempenho do modelo numérico apresentada no próximo capítulo.

3.3 Refração-Difração das Componentes

Como o objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema computacional que funcione de forma operacional, as soluções numéricas de cada uma das possíveis componentes individuais do espectro ao largo são calculadas **antecipadamente** e uma **única vez** na respectiva grade computacional definida pelos setores de incidência de ondas. As soluções numéricas calculadas são normalizadas pela altura inicial de onda ao largo e armazenadas em arquivos específicos.

A versão espectral do modelo parabólico de Melo (1990) tem como hipótese básica a linearidade. Assim, o estado de mar próximo da costa poderá ser obtido através de uma simples sobreposição das soluções numéricas. Entretanto, como estes cálculos são realizados em grades computacionais diferentes, é necessário desenvolver uma maneira de se ter uma grade única, onde as diferentes soluções numéricas possam ser sobrepostas sem dificuldade.

3.4 Esquema para Sobreposição das Soluções

Para viabilizar a sobreposição das soluções numéricas obtidas em diferentes grades computacionais que, inevitavelmente, apresentam pontos não coincidentes demarcou-se uma área de interesse próxima à costa comum a todas as grades computacionais. A grade correspondente a essa área demarcada possui orientação N-S, (ou seja, não há rotação em relação à direção E). Com isso, seus respectivos eixos horizontal e vertical podem ser expressos em metros utilizando o referencial geográfico UTM, (Transverse Mercator Projection -22).

Para que esta área possa ser reconhecida pelo modelo numérico utilizado, seu código teve de ser modificado de modo que os dois novos eixos, um vertical com orientação S-N e outro horizontal com orientação O-E, pudessem ser calculados em função dos eixos X e Y da grade computacional. A posição da origem da nova grade em UTM, o ângulo de rotação da grade de cálculo em relação à direção O-E e os vértices da área demarcada em UTM devem ser fornecidos no início da utilização do modelo. Desta forma, a área comum pode ser vinculada às grades computacionais utilizadas para o cálculo das soluções numéricas e as soluções numéricas determinadas pelo modelo podem ser arquivadas neste novo referencial exclusivamente nos pontos pertencentes a esta área comum.

Com as soluções numéricas determinadas na área demarcada, pode-se gerar para todas as componentes do espectro uma nova grade de alturas de ondas com espaçamentos longitudinais e transversais pré-definidos utilizando o método do vizinho mais próximo, (Nearest Neighbor). Com estas novas grades de alturas normalizadas confeccionadas, têm-se agora todas as soluções numéricas vinculadas a pontos coincidentes da área de interesse.

3.5 Determinação do Espectro de Frequência

Como as soluções numéricas de todas as possíveis componentes espectrais já foram calculadas antecipadamente, pode-se calcular o estado de mar próximo da costa sem que haja a necessidade da utilização do modelo numérico de propagação.

Com todas as respectivas soluções numéricas, normalizadas, armazenadas e referenciadas a pontos coincidentes da grade da área de interesse, pode-se calcular as

condições de mar próximo da costa para qualquer espectro largo. Para isto, utiliza-se também a quantidade de energia existente em cada componente espectral ao largo. A contribuição de cada solução numérica no cálculo é determinada proporcionalmente à energia existente no espectro ao largo.

Desta forma, o espectro de frequência de todos os pontos da área demarcada pode ser montado, fazendo uma simples sobreposição da contribuição de cada componente.

Com o espectro de frequência calculado para cada ponto da área, pode-se também calcular o valor da altura significativa (H_s) em cada ponto e confeccionar o campo de alturas significativas da área de interesse.

Os valores de H_s podem ser calculados pela expressão:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (3.1)$$

Onde m_0 é o momento espectral de ordem zero, definido por:

$$m_0 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S(f, \theta) df d\theta \quad (3.2)$$

Sendo que o espectro de energia $S(f, \theta)$ descreve a distribuição em frequência f e em direção θ da energia das ondas.

O valor de m_0 pode ser calculado pela área do espectro de frequência ou equivalentemente, como sendo a energia total do espectro. Assim, este valor pode ser determinado para cada ponto de grade, somando-se a respectiva energia associada a cada solução numérica em cada ponto, este procedimento de cálculo foi também utilizado por Rego (1992). Com os valores de m_0 calculados, o campo de alturas significativas pode finalmente ser determinado utilizando a equação 3.1 para todos os pontos da grade da área de interesse.

3.6 Uso de Áreas de Dissipação de Energia

Modelos numéricos de Refração-Difração baseados na aproximação parabólica da equação do declive suave padecem da presença de ruído numérico. Ilhas com flancos

íngrimes, pontais rochosos submersos, quebra-mares etc. quando incluídos na grade computacional obrigam o fundo a ter uma forte declividade contrariando sua hipótese básica.

A diminuição da profundidade implica em elevação da altura de onda, o que, junto com a presença de um perímetro de arrebentação nos limites laterais das ilhas, ocasiona um forte gradiente de altura de onda na direção transversal (entre a parte da onda arrebentada e a parte da onda não arrebentada), o qual induz o aparecimento do ruído numérico. O ruído numérico é caracterizado por perturbações transversais que se propagam pelo interior da grade de cálculo podendo comprometer todo o campo de altura de ondas calculado pelo modelo, Romeu et al (2006).

Uma forma alternativa a representação de ilhas por películas com profundidade de alguns centímetros, é possível à luz do trabalho de Dalrymple et al (1984). Neste caso, a ilha ou similar pode ser representada como uma área localizada de dissipação de energia, a qual é capaz de efetivamente aniquilar a onda no local desejado, só que gradativamente, diminuindo significativamente a intensidade do ruído.

No apêndice B encontra-se uma revisão da metodologia necessária para incluir áreas de dissipação de energia na equação do Declive Suave.

A aplicação de áreas localizadas de dissipação de energia teve como base os estudos realizados por Romeu (2000) e Romeu et al (2006), onde foram calculados perfis de decaimento de altura de onda para diferentes fatores de dissipação, equação (B.4). Estes perfis foram utilizados como referência na escolha dos valores utilizados neste trabalho, além disto, em algumas áreas das grades computacionais foram também utilizados fatores de dissipação variáveis, proporcionais à profundidade e/ou ao período da onda.

Para evitar o aparecimento de ruído numérico em áreas próximas da praia, este recurso foi também utilizado a partir da profundidade de 5 metros, assim a altura de onda foi diminuída lenta e gradativamente até as menores profundidades. Na aplicação da dissipação de energia, em ilhas, as profundidades menores de 2 m foram substituídas por um plano horizontal de profundidade igual a 2 m, profundidades maiores que esta não foram alteradas.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MODELO

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta uma análise de desempenho do modelo numérico parabólico no cálculo da refração de ondas sobre um plano inclinado, no respeito da solução analítica de refração de onda calculada utilizando a lei de Snell (Apêndice A).

A análise de desempenho foi realizada em duas etapas.

Na primeira etapa, investigou-se se a orientação das grades computacionais afeta o cálculo da refração. Para isso, ondas com ângulos efetivos selecionados foram propagadas em duas grades computacionais orientadas segundo as opções de modelação (1) e (2). O desempenho do modelo foi comparado com a solução analítica por meio de diferentes métodos de avaliação.

Sabe-se que o tamanho dos espaçamentos longitudinais e transversais também afeta a acurácia do modelo numérico. Assim, nesta primeira etapa, também foram utilizados diferentes espaçamentos de grade longitudinais e transversais a fim de poder-se identificar a situação na qual o modelo numérico apresenta melhor desempenho.

Já considerando a possibilidade de que a orientação das grades computacionais afete o cálculo da refração de ondas, a acurácia do modelo foi avaliada para duas profundidades diferentes. Essas avaliações serão úteis para a segunda etapa de análise.

Na segunda etapa, com o objetivo de identificar a melhor opção de modelar ondas incidentes num plano inclinado, o desempenho do modelo numérico foi avaliado para ângulos efetivos de 0° a 89° , avaliados de 10° em 10° , com exceção ao ultimo intervalo que foi de 9° .

4.2 Organização dos Testes

Grades Computacionais

Para quantificar o desempenho do modelo numérico em relação à solução analítica de refração, confeccionou-se uma batimetria do tipo plano inclinado definida a partir de dois valores: a profundidade máxima (profundidade no início do plano inclinado) e a sua declividade. A declividade escolhida foi de 0.01 m/m, característica da plataforma continental da região S-SE brasileira. A profundidade máxima foi prescrita em 80 metros, pois essa era a profundidade em que o ondógrafo realizava as medições de onda e também por ser esta a profundidade na qual o modelo de geração de ondas está programado para obter os espectros direcionais.

Inicialmente, confeccionou-se uma grade computacional com uma rampa com linhas batimétricas paralelas a linha de costa, (batimétricas alinhadas com a direção y da grade de cálculo).

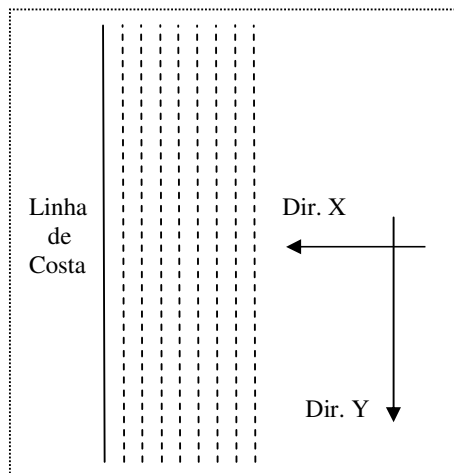


Figura 4.1 Esquema ilustrativo da grade com contornos batimétricos paralelos ao eixo-y.

Grades computacionais como as da figura 4.1 foram denominadas de grades zero grau, serão representadas por “b00”, pois o ângulo de rotação entre a direção y da grade de cálculo em relação aos contornos batimétricos é de zero grau. Grades computacionais com ângulo de rotação de 10° são representadas por “b10”, com ângulo de rotação de 20° por “b20” e assim sucessivamente.

A grade computacional da figura 4.1 será utilizada para modelar ondas pela maneira tradicional, ou seja, opção (1) de modelação.

Além da grade b00, todas as grades necessárias às análises realizadas neste trabalho foram montadas a partir do mesmo plano inclinado. Como as condições de onda ao largo são prescritas na profundidade de 80 metros, introduziu-se um trecho de profundidade constante de 80 m. de modo a garantir que esta profundidade fosse a profundidade em toda extensão da fronteira externa de todas as grades computacionais. Entende-se por fronteira externa como a face a partir da qual o modelo numérico começa o cálculo de propagação das ondas.

A título de exemplo, a figura 4.2, apresenta em diferentes escalas as grades computacionais b20 e b40. As fronteiras externas localizam-se do lado direito.

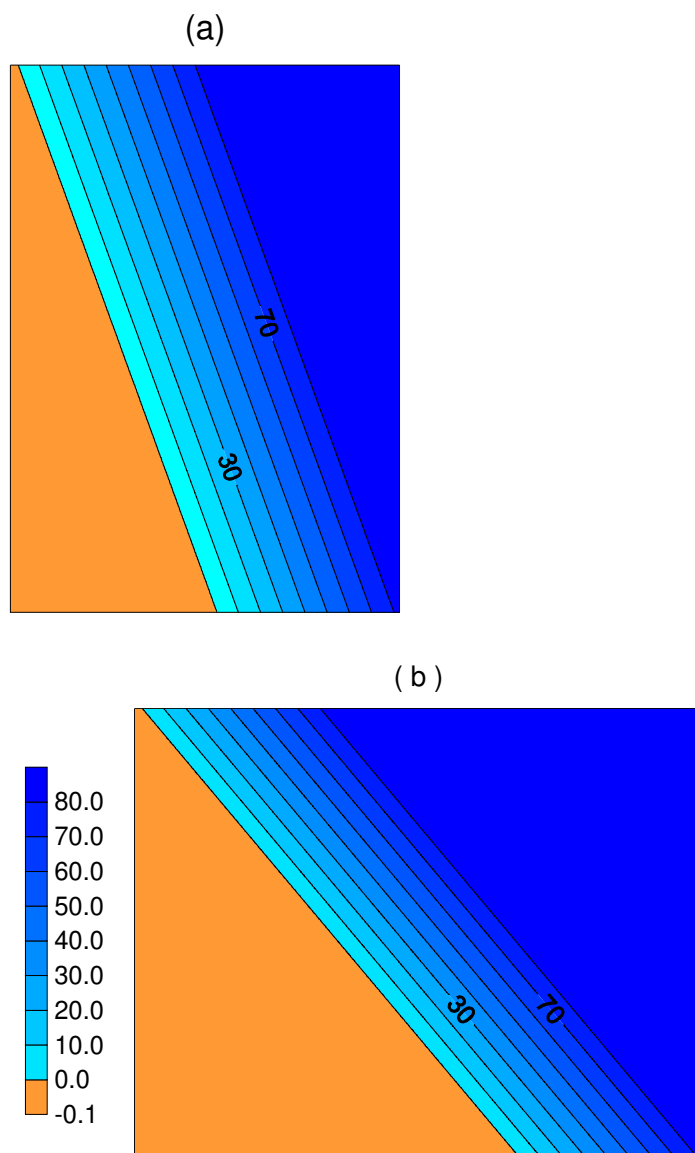


Figura 4.2 Grades computacionais: (a) b20, (b) b40.

Métodos de Avaliação do Modelo

Para poder-se avaliar o desempenho do modelo numérico foi necessário quantificar a acurácia das soluções numéricas, para isto, utilizou-se como referência a solução analítica de refração de ondas, calculada através da lei de Snell, (apêndice A). Os desempenhos dos modelos numéricos foram quantificados em termos de diferenças medidas nos campos de altura e direção de onda de duas maneiras diferentes:

A) Em profundidades específicas, estas foram: 1) Na profundidade limite entre águas intermediárias e águas rasas $0.05 L$ ou $h = 0.05L$, onde L é o comprimento de onda local e h a profundidade local e 2) na profundidade de $0.05 L_0$, esta profundidade é sugerida por este trabalho e localiza-se em águas intermediárias um pouco mais profundas do que $0.05 L$.

B) Perfis longitudinais, onde o limite inicial foi definido como sendo a fronteira entre águas profundas e águas intermediárias $(L/h) = 0.5$ e o ponto final do corte foi localizado em diferentes profundidades: 1) No limite entre águas intermediárias e águas rasas $0.05 L$ ou $(L/h) = 0.05$, e 2) na profundidade de $0.05 L_0$.

Os métodos de avaliação do desempenho do modelo numérico no cálculo da altura de onda na **etapa 1** foram:

1.A- Para cada ponto do perfil longitudinal e para os pontos de profundidade específica, calculou-se o erro relativo à solução analítica.

$$ER = \frac{SN - SA}{SA}, \text{ onde:}$$

ER = erro relativo em cada ponto

SN = solução numérica em cada ponto

SA = solução analítica em cada ponto

OBS: O Erro Relativo será expresso em porcentagem da solução analítica.

1.B- Para todos os pontos do perfil longitudinal, calculou-se o erro relativo quadrático médio.

$$ERQM = \sqrt{\frac{\sum (ER^2)}{n}}, \text{ onde:}$$

$ERQM$ = erro relativo quadrático médio para o corte longitudinal

ER = erro relativo em cada ponto

n = número de pontos no corte longitudinal

OBS: Erro Quadrático Médio será expresso em porcentagem da solução analítica.

Os Métodos de avaliação do desempenho do modelo numérico no cálculo da altura de onda na **etapa 2** foram:

2.A- Para cada ponto do perfil longitudinal e para os pontos de profundidade específica, calculo-se a diferença simples entre a solução numérica e a solução analítica.

$HDS = SN - SA$, onde:

HDS = diferença simples em altura em cada ponto

SN = solução numérica em cada ponto

SA = solução analítica em cada ponto

OBS: A Diferença Simples para altura de onda, será expressa em porcentagem da altura da onda na fronteira externa da grade computacional.

2.B Para todos os pontos do perfil longitudinal, calculou-se a diferença quadrática média para altura de onda.

$$HDQM = \sqrt{\frac{\sum (HDS^2)}{n}}, \text{ onde:}$$

$HDQM$ = Diferença quadrática média em altura para o corte longitudinal

HDS = diferença simples em altura em cada ponto

n = número de pontos no corte longitudinal.

OBS: A Diferença Quadrática Média em Altura, será expressa em porcentagem da altura da onda na fronteira externa da grade computacional.

Os Métodos de avaliação do desempenho do modelo numérico no cálculo da direção da onda, na **etapa 2** foram:

1- Para cada ponto do perfil longitudinal e para os pontos de profundidade específica, calculou-se a diferença simples entre a solução numérica e a solução analítica.

$DS = DirSN - DirSA$, onde:

DS = diferença simples em cada ponto

$Dir SN$ = direção da onda da solução numérica em cada ponto

$Dir SA$ = direção da onda da solução analítica em cada ponto

2- Para todos os pontos do perfil longitudinal, calculou-se a diferença quadrática média para a direção de onda.

$$DQM = \sqrt{\frac{\sum(DS^2)}{n}}, \text{ onde:}$$

DQM = diferença quadrática média para o corte longitudinal

DS = diferença simples em cada ponto

n = número de pontos no corte longitudinal.

OBS: Tanto a Diferença Simples quanto a Diferença Quadrática Média para direção de onda serão expressas em graus.

Período da Onda de Teste

As avaliações dos modelos foram feitas entre as profundidades limites dos regimes de águas profundas e águas rasas. Como a profundidade máxima das grades é de 80 m, o período da onda mereceu especial atenção para ser definido, visto que a relação entre a profundidade (h) e o comprimento de onda (L) define o regime de propagação no qual a onda se encontra. O período escolhido foi de 10.14 s já que na profundidade de 80 metros esta apresenta $L = 160$ metros. Desta forma, a onda começa a propagar-se no início da rampa exatamente no limite do regime de águas profundas normalmente aceito que é $h = L/2$. Além disto, este período é característico do regime de ondas da região S-SE brasileira.

4.3 Etapa 1 de Análise

Resolução Espacial das Grades Computacionais

A influência dos espaçamentos longitudinal e transversal das grades no desempenho do modelo numérico foi avaliada a partir de grades computacionais com diferentes combinações de espaçamentos. As grades computacionais foram montadas de tal forma que o tamanho dos espaçamentos fossem múltiplos entre si. Com isso, os pontos pertencentes às grades de espaçamentos maiores também estão presentes nas grades de espaçamentos menores.

Os espaçamentos, por sua vez, foram escolhidos de modo que o espaçamento maior fosse igual a metade do comprimento de onda inicial; O segundo maior espaçamento fosse um quarto desse comprimento; O terceiro maior espaçamento fosse

um oitavo do comprimento; O menor espaçamento foi estabelecido como um dezesseis avos do comprimento de onda inicial.

Como o comprimento de onda no início da grade computacional é de 160 metros, os espaçamentos longitudinais e transversais utilizados para mapear o desempenho do modelo numérico foram respectivamente: 80, 40, 20 e 10 metros.

Os valores dos espaçamentos das grades computacionais apresentados nos mapas de erros do desempenho do modelo numérico, descritos adiante, estão adimensionalizados pelo comprimento de onda inicial, tornando os mapas independentes do valor do período da onda.

Mapas de Erros

Nesta análise preliminar, foram utilizadas somente as opções de modelação (1) e (2). Os campos de altura de onda e direção foram calculados para os seguintes ângulos efetivos de modelação: 0° (direção normal), 10° , 20° , 30° e 40° .

Para o ângulo efetivo de 0° tem-se apenas uma opção de modelação: b00 e t00 (maneira “tradicional”). O ângulo efetivo de 10° é modelado na opção (1) com b00 e t10 e na opção (2) com b10 e t00. O ângulo efetivo de 20° , na opção (1) com b00 e t20 e na opção (2) com b20 e t00. O ângulo efetivo de 30° , na opção (1) com b00 e t30 e na opção (2) com b30 e t00. O ângulo efetivo de 40° , na opção (1) com b00 e t40 e na opção (2) com b40 e t00.

É interessante ressaltar que o problema físico da refração depende apenas do ângulo efetivo da onda, entretanto, a solução numérica depende também do sistema de coordenadas utilizado.

Na apresentação dos resultados as opções de modelação (1) e (2) estão dispostas lado a lado para facilitar a comparação.

Erro Relativo Quadrático Médio

Inicialmente, apresentam-se os mapas de erro relativo quadrático médio “ERQM” em função dos respectivos espaçamentos da grade computacional.

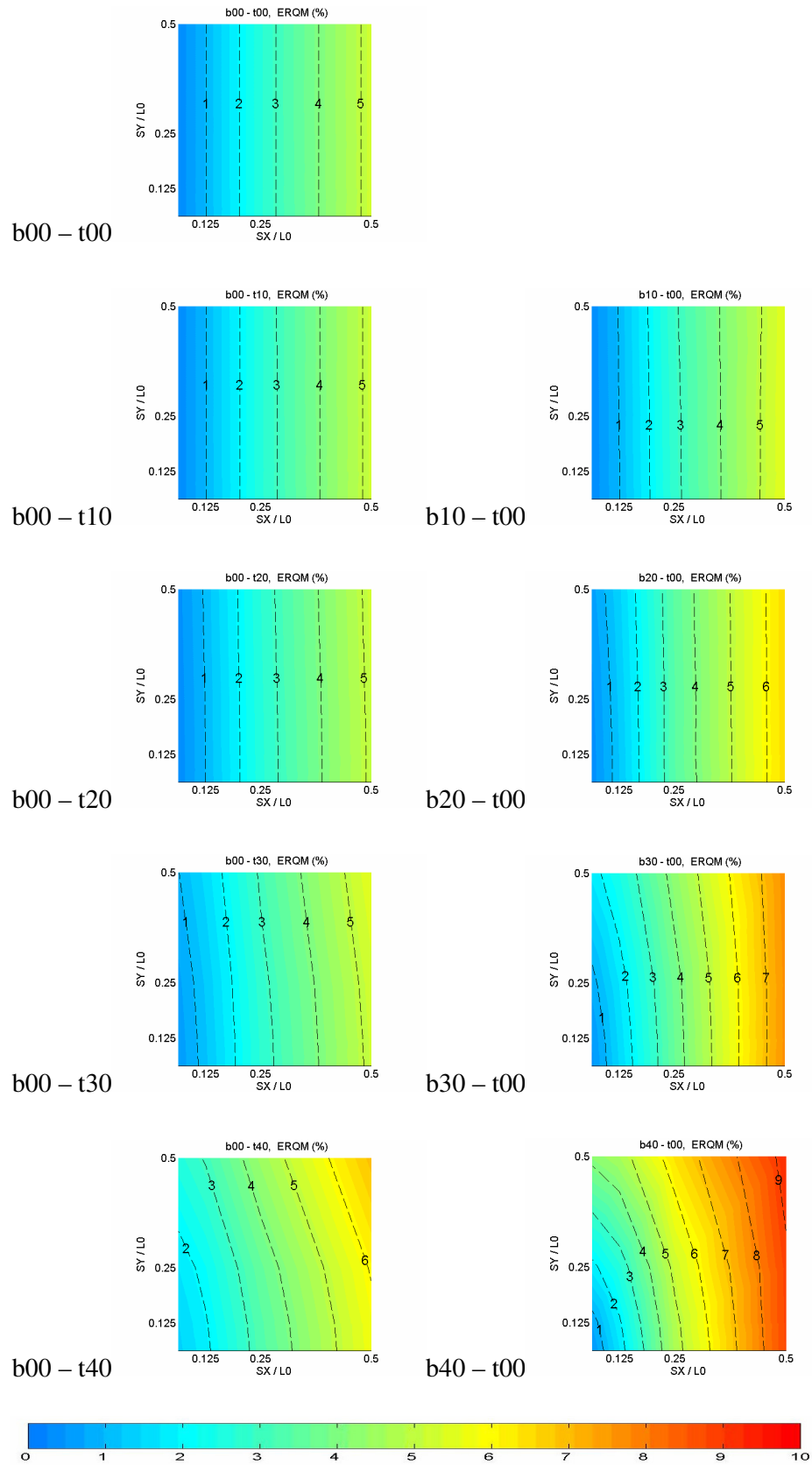


Figura 4.3 Mapas de Erro Quadrático Médio (Percentual).

Para os ângulos efetivos de 10 e 20 graus, tanto para opção (1) como opção (2) os efeitos de refração são ainda pequenos e os contornos de erro são bastante semelhantes ao caso de ondas incidindo normalmente aos contornos batimétricos (b00-t00), apesar da semelhança dos contornos, para o ângulo efetivo de 20° a maneira tradicional apresenta erro menor do que a maneira alternativa.

Para os ângulos efetivos de 30 e 40 graus, apesar do ângulo de incidência nas grades ser ainda relativamente pequeno para opção tradicional, a situação se inverte, nos menores espaçamentos onde estão os melhores desempenhos, a opção (2) apresenta erro menor do que opção (1). Estes resultados já indicam a influência da orientação da grade computacional no cálculo da refração.

Outra característica observada para estes ângulos é que a maneira alternativa, opção (2), de modelar-se ondas apresentou melhores resultados para espaçamentos longitudinais menores e a maneira tradicional apresentou melhores resultados para espaçamentos longitudinais maiores.

Em relação aos espaçamentos longitudinais é nítida a influência destes nos cálculos do modelo, quanto menores foram os espaçamentos longitudinais utilizados menores foram os erros observados e conseqüentemente maior foi a acurácia do modelo. Em relação aos espaçamentos transversais, a diminuição destes para os ângulos efetivos de 30 e 40 graus melhorou significativamente o desempenho do modelo.

Erro Relativo na Profundidade de 0.05 L

Neste trabalho serão utilizadas duas profundidades de referência na análise desempenho do modelo numérico. A primeira delas é a profundidade limite entre o regime de ondas intermediárias e o regime de ondas de águas rasas. Esta profundidade é exatamente o ultimo ponto dos corte longitudinal utilizado para o cálculo do erro quadrático médio.

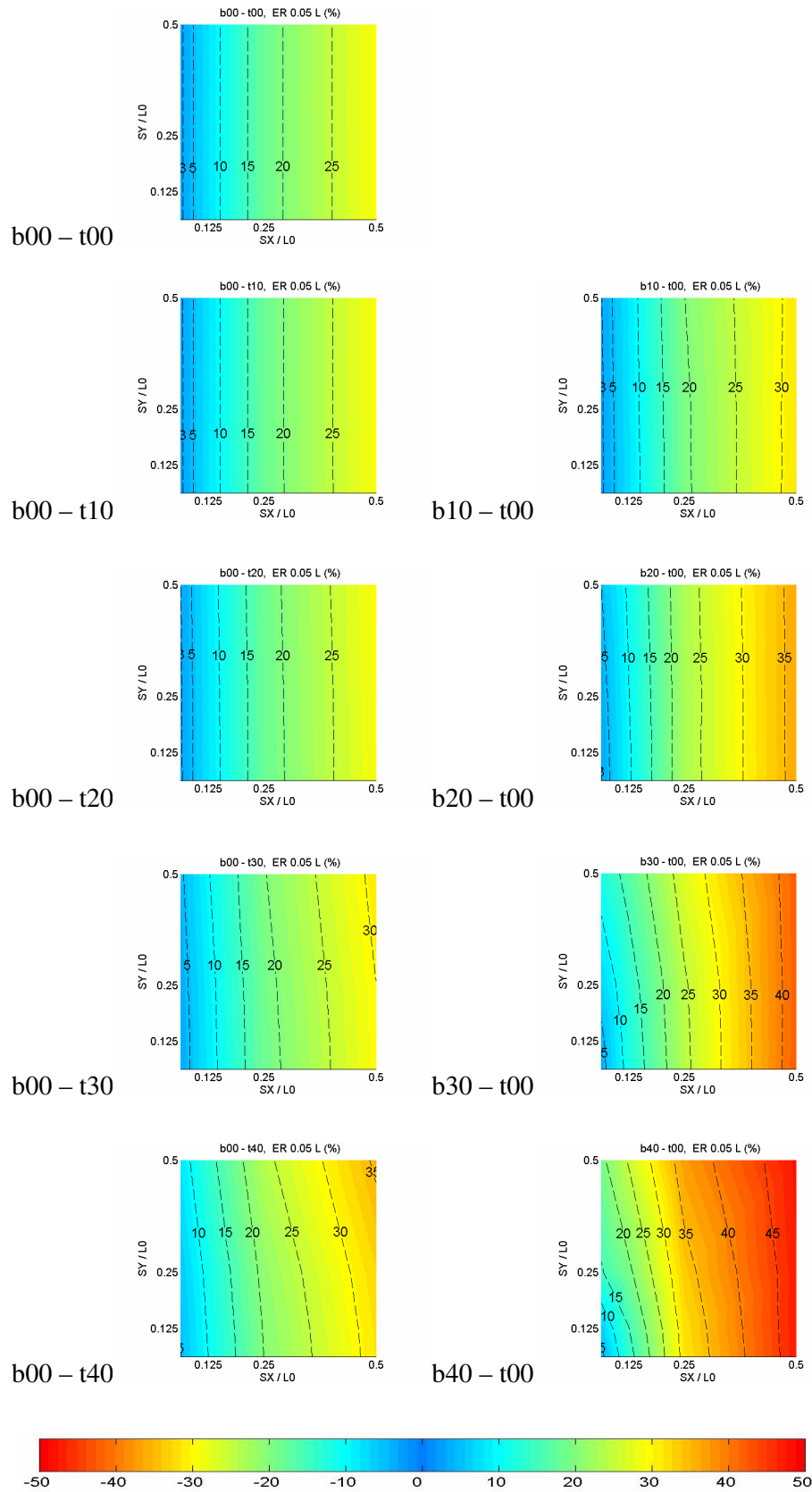


Figura 4.4 Mapas de Erro Relativo na profundidade $0.05L$ (Percentual).

De uma maneira geral, os contornos de erro relativo na profundidade de 0.05L apresentaram o mesmo padrão observado nos contornos obtidos anteriormente para o erro relativo quadrático médio no corte longitudinal. Porém, para esta profundidade a maneira tradicional apresentou melhores resultados para todos os ângulos efetivos, para os menores espaçamentos os resultados obtidos pelas duas opções de modelação foram bastante parecidos.

A maneira alternativa de modelação mostrou-se novamente bastante sensível à diminuição dos espaçamentos transversais nos ângulos efetivos de 30 e 40 graus.

Para esta profundidade, nos menores espaçamentos de grade longitudinal e transversal o nível de acurácia do modelo para ambas às opções de modelação manteve-se próximo a um erro relativo de 5 %.

Dimensionalização da Profundidade de 0.05 L

Como o problema está adimensionalizado, pode-se relacionar a profundidade de 0.05L, com uma profundidade correspondente a de grades computacionais com contornos batimétricos reais. Para isto utiliza-se a equação:

$$h = gT^2 0.05^2 \quad (4.1)$$

que relaciona a profundidade limite de águas rasas (dimensional) com o período de onda utilizado.

Considerando como períodos mínimo e máximo de interesse os valores de 5 s. e 18 s. e utilizando a equação (4.5) é possível determinar a faixa de profundidade real (dimensional) correspondente a 0.05 L.

Para o caso de ondas com período de 10.14 segundos, a profundidade 0.05L, corresponde a 2.52 metros. Para ondas com período de 5 segundos, a profundidade é de 0.61 metros, e para ondas com período de 18 segundos, 7.94 metros.

Estes valores são os valores de profundidade (dimensional) onde as respectivas ondas entram no regime de águas rasas. Para esta profundidade os valores de erro relativo se mostraram próximos a 5%.

Erro Relativo na Profundidade de 0.05 L0

Nesta seção apresentam-se os mapas de erro relativo, em águas um pouco mais profundas do que a da seção anterior, a nova profundidade definida é 0.05 L0, onde L0 é o valor do comprimento de onda no início da grade computacional.

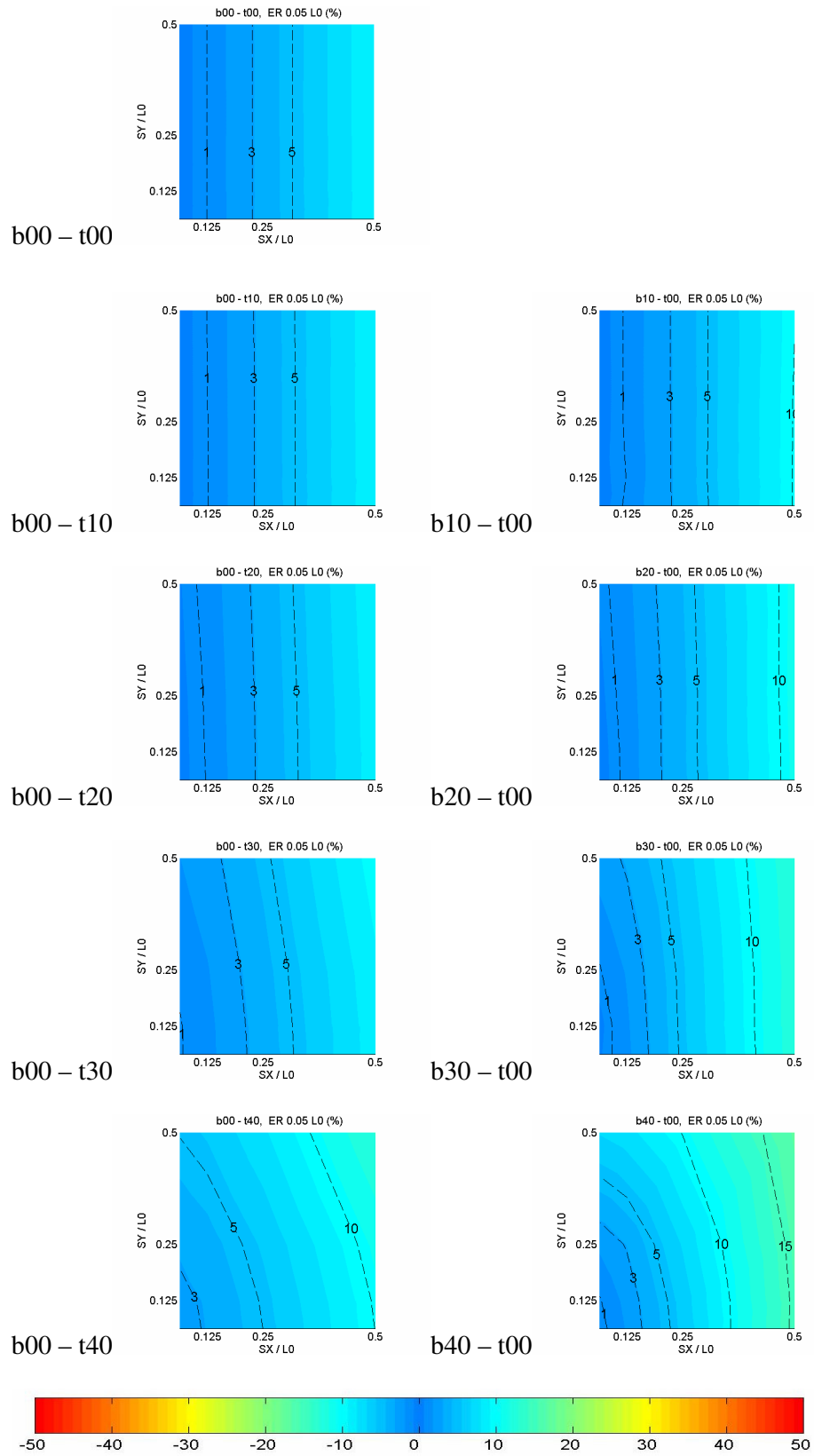


Figura 4.5 Mapas de Erro Relativo na profundidade 0.05 L0 (Percentual).

Os contornos de erro relativo apresentam padrões idênticos aos observados tanto para erro relativo quadrático médio como para o erro relativo na profundidade de 0.05L, entretanto seus valores mostraram-se num melhor nível de acurácia.

Nesta nova profundidade, assim como já se havia observado nos resultados encontrados para o corte longitudinal, nos ângulos efetivos de 30 e 40 graus, nos menores espaçamentos a opção (2) apresenta erro menor do que opção (1), estes resultados confirmam a influência da orientação da grade computacional no cálculo da refração.

Pôde-se mais uma vez observar que, para espaçamentos de grade longitudinais maiores a maneira tradicional de modelação apresentou melhores resultados e para espaçamentos de grade menores a maneira alternativa de modelar-se apresentou menores erros relativos.

Para esta profundidade, nos menores espaçamentos de grade o nível de acurácia do modelo manteve-se num valor de erro relativo próximo de 1 %.

Relacionando a Profundidade de 0.05L0

Esta nova profundidade 0.05 L0 pode também ser relacionada a profundidades correspondentes em grades computacionais com contornos batimétricos reais.

O procedimento para encontrar as profundidades equivalentes é simples, sabe-se que a profundidade inicial das grades computacionais é de 80 metros, sabendo-se o período das ondas, pode-se calcular o comprimento de onda no início da grade computacional e com este valor determinado basta multiplicar por 0.05 e encontrar a profundidade correspondente.

Para o caso de ondas com período de 10.14 segundos, o valor de L0 já foi determinado anteriormente. $L0 = 160$ metros logo a profundidade que corresponderia aos mapas de erros é de 8 metros.

Para o caso de ondas com período de 5 segundos, o valor de L0 seria de 39.03 metros logo a profundidade que corresponderia aos mapas de erros seria de aproximadamente 2 metros.

Para o caso de ondas com período de 18 segundos, o valor de L_0 seria de 420.73 metros, logo a profundidade que corresponderia aos mapas de erros seria de aproximadamente 21 metros.

Assim, nos cálculos do modelo numérico em grades computacionais com contornos batimétricos reais, pode-se esperar uma acurácia semelhante em profundidades 8 e 20 metros, isto porque períodos altos como 18 segundos não são comuns.

Resumo dos Resultados da Etapa 1

Nesta etapa de análise foi possível concluir que a orientação da grade computacional afeta o cálculo da refração, tendo como base os resultados encontrados nos mapas de erro quadrático médio e erro relativo na profundidade de $0.05L_0$. Desta forma faz-se necessário uma análise detalhada do desempenho do modelo para que se possa otimizar o cálculo da refração das ondas na confecção das grades computacionais a serem utilizadas no sistema computacional desenvolvido neste trabalho.

Definiram-se as duas profundidades que serão utilizadas como referência na próxima etapa de análise: a primeira é a profundidade limite entre o regime de propagação de ondas em águas intermediárias e águas rasas, $0.05L$. A segunda profundidade em águas um pouco mais profundas é a profundidade de $0.05L_0$.

Ficaram definidos os espaçamentos longitudinais e transversais das grades a serem utilizados no sistema computacional, em todos os mapas de erros os melhores desempenhos foram encontrados justamente nos menores espaçamentos utilizados, ou seja, recomenda-se que sejam utilizados os espaçamentos de tamanho $0.0625 L_0$, (dezesseis pontos de grade em um comprimento de onda inicial) tanto para espaçamento longitudinal como espaçamento transversal, nestes espaçamentos, o erro relativo em relação a solução analítica foi da ordem de 5 % na profundidade de $0.05L$ e 1% na profundidade de $0.05L_0$ para o cálculo da altura de onda.

4.4 Etapa 2 de Análise

O objetivo desta análise é identificar para o caso de um plano inclinado qual a melhor forma de modelar a refração de ondas para ângulos efetivos entre 0° e 89° .

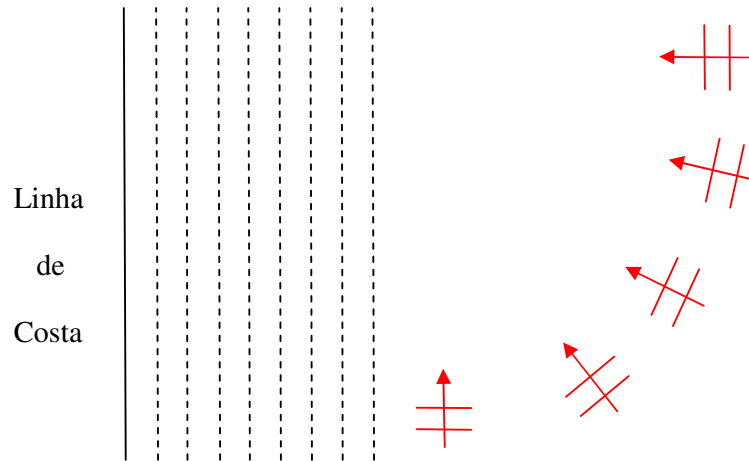


Figura 4.6 Esquema representativo do setor de 0° à 89° de ângulos efetivos.

De forma a simplificar a interpretação do texto, convencionou-se neste trabalho que a palavra “**incidência**” será utilizada exclusivamente com o sentido de incidência de onda em grades computacionais, assim como já foi utilizada. Reservou-se para a palavra “**chegada**” o sentido de ângulo de aproximação sem estar vinculado a alguma grade computacional. Desta forma, a figura 4.6 mostra um esquema representativo do setor de chegada de ondas dos ângulos efetivos que se deseja modelar.

Inicialmente, foi necessário investigar se o sentido de rotação dos contornos batimétricos influencia no desempenho do modelo. Foram testados diversos ângulos efetivos em grades com contornos rotacionados em sentidos opostos, as diferenças encontradas nos campos de altura e direção de onda foram desprezíveis. Desta forma a avaliação do modelo numérico pode ser realizada em grades com contornos rotacionados para um sentido apenas, sabendo-se que os resultados são também válidos para grades com contornos rotacionados no sentido oposto. As grades com contornos batimétricos deste trabalho, tiveram seus contornos rotacionados no sentido anti-horário como no caso das figuras 4.2 e 4.7(a).

Como exemplo destes testes apresentam-se duas possibilidades de modelação para o ângulo efetivo de 30 graus, utilizando-se: (a) b20 e t-10 e (b) b-20 e t10

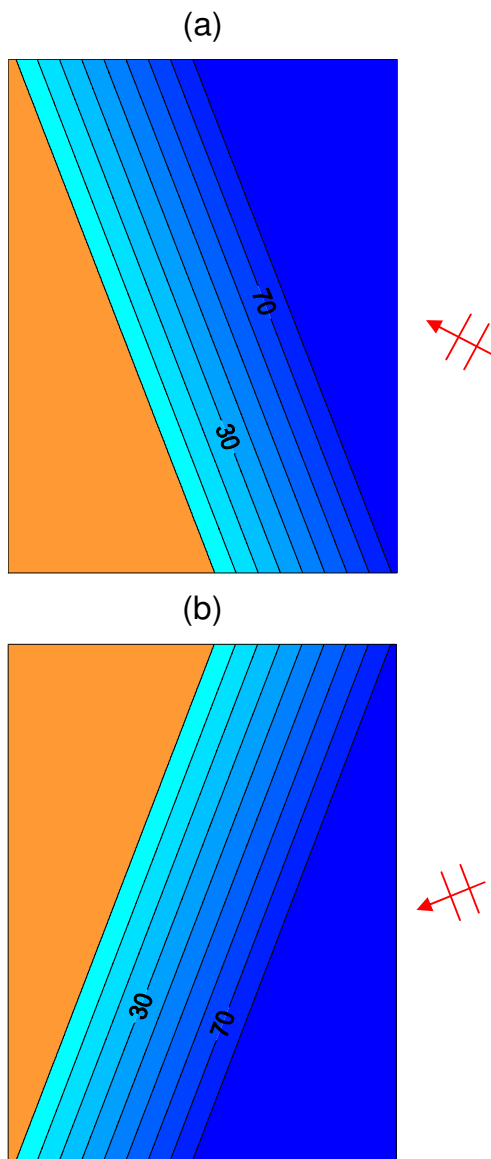


Figura 4.7 Possibilidades simétricas para modelar o ângulo efetivo de 30°. (a) b20 e t-10, (b) b-20 e t10

Ângulos de Incidência

Foi também necessário definir os ângulos de incidência de onda limites de utilização a partir da fronteira externa nas grades computacionais, optou-se por utilizar as direções limites de -40° até 40° com intervalos de 10°.

Resolução Espacial das Grades Computacionais

A resolução espacial das grades computacionais em todos os testes desta etapa foi definida como $\Delta x = \Delta y = (1/16)L_0$, ou seja, 10 metros.

Na tabela a seguir estão todas as possibilidades de modelação para os ângulos efetivos de 0° à 89° nas grades computacionais: b00, b10, b20, b30, b40, b50, b60, b70 e b80 e os respectivos ângulos de incidência na grade.

ângulos efetivos	Grades Computacionais								
	b00	b10	b20	b30	b40	b50	b60	b70	b80
0°	b00 t00	b10 t10	b20 t20	b30 t30	b40 t40				
10°	b00 t10	b10 t20	b20 t30	b30 t40					
		b10 t00	b20 t10	b30 t20	b40 t30	b50 t40			
20°	b00 t20	b10 t30	b20 t40						
		b10 t-10	b20 t00	b30 t10	b40 t20	b50 t30	b60 t40		
30°	b00 t30	b10 t40							
		b10 t-20	b20 t-10	b30 t00	b40 t10	b50 t20	b60 t30	b70 t40	
40°	b00 t40								
		b10 t-30	b20 t-20	b30 t-10	b40 t00	b50 t10	b60 t20	b70 t30	b80 t40
50°									
		b10 t-40	b20 t-30	b30 t-20	b40 t-10	b50 t00	b60 t10	b70 t20	b80 t30
60°									
			b20 t-40	b30 t-30	b40 t-20	b50 t-10	b60 t00	b70 t10	b80 t20
70°									
				b30 t-40	b40 t-30	b50 t-20	b60 t-10	b70 t00	b80 t10
80°									
					b40 t-40	b50 t-30	b60 t-20	b70 t-10	b80 t00
89°									
						b50 t-39	b60 t-29	b70 t-19	b80 t-09

Tabela 4.1 Possibilidades de modelação para os ângulos efetivos.

Percebe-se que as grades computacionais: b10, b20 e b30 foram utilizadas duas vezes na modelação do ângulo efetivo de 10°. Que as grades computacionais: b10 e b20 também foram utilizadas duas vezes na modelação do ângulo efetivo de 20° e que a grade b10 foi novamente utilizada duas vezes na modelação do ângulo efetivo de 30°.

Nas figuras mostradas a seguir, a cor vermelha representa os valores referentes à profundidade de 0.05L, a cor azul os valores referentes à profundidade de 0.05L0. Na legenda dos gráficos pode-se também encontrar a informação dos valores de altura e direção de onda referentes a solução analítica para cada um dos ângulos efetivos testados.

4.4.1 Ângulo Efetivo de 0 grau.

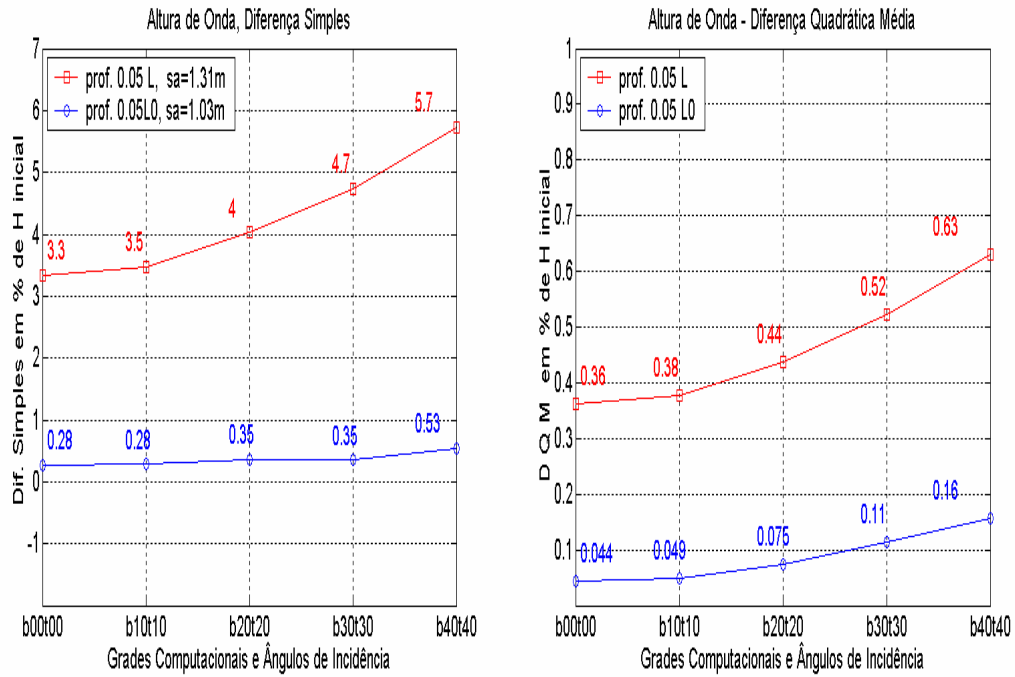


Figura 4.8 Valores de altura de onda e ângulo efetivo de 0°.

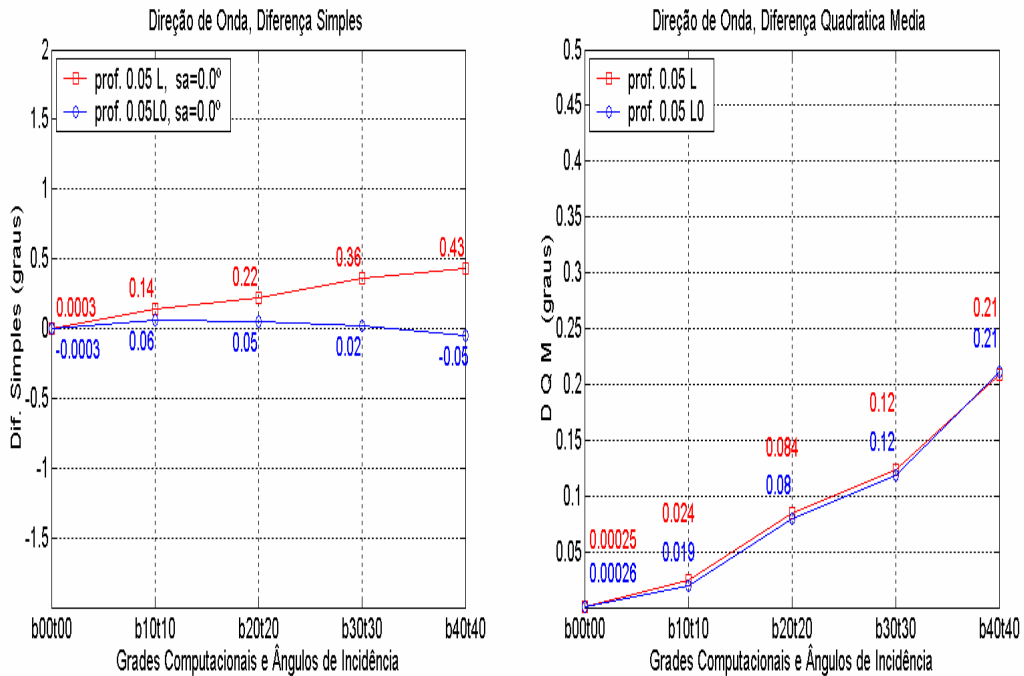


Figura 4.9 Valores de direção de onda e ângulo efetivo de 0°.

4.4.2 Ângulo Efetivo de 10 graus.

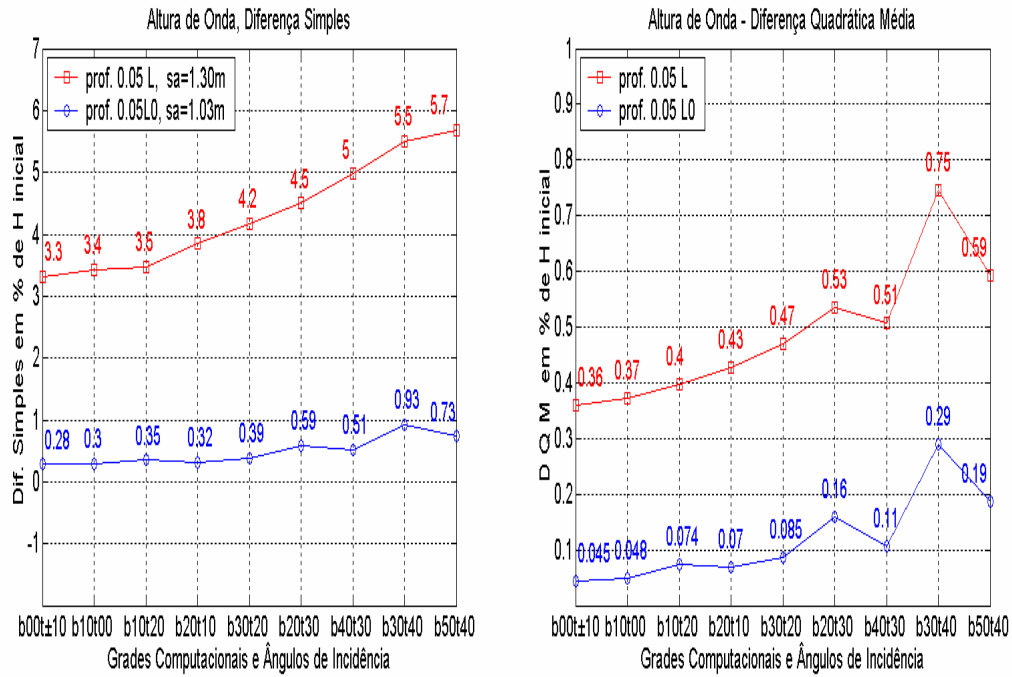


Figura 4.10 Valores de altura de onda e ângulo efetivo de 10°.

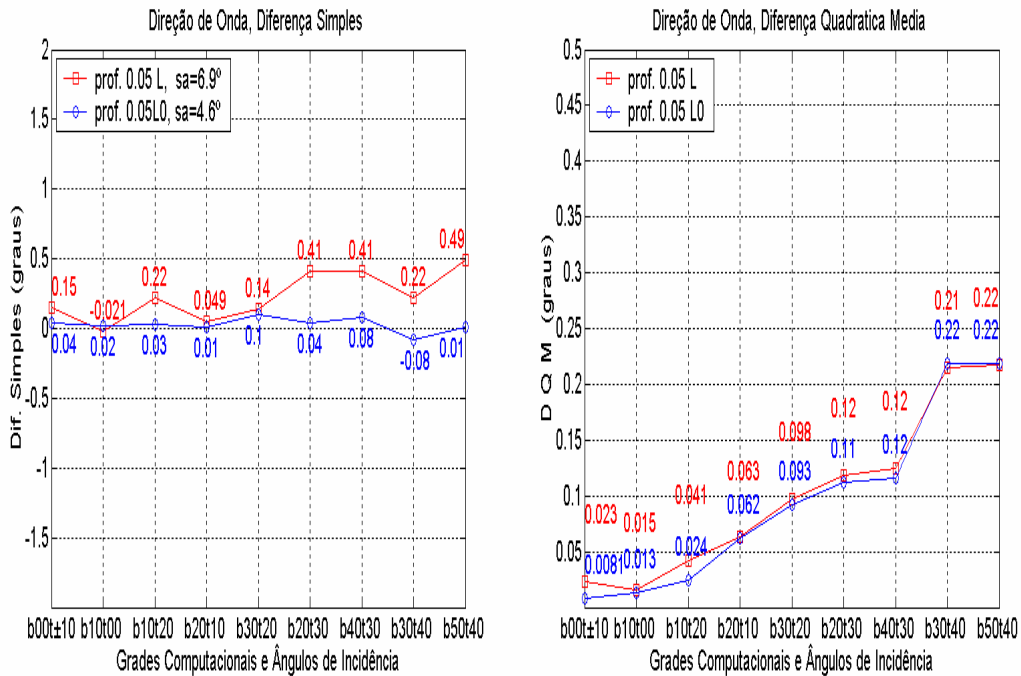


Figura 4.11 Valores de direção de onda e ângulo efetivo de 10°.

4.4.3 Ângulo Efetivo de 20 graus.

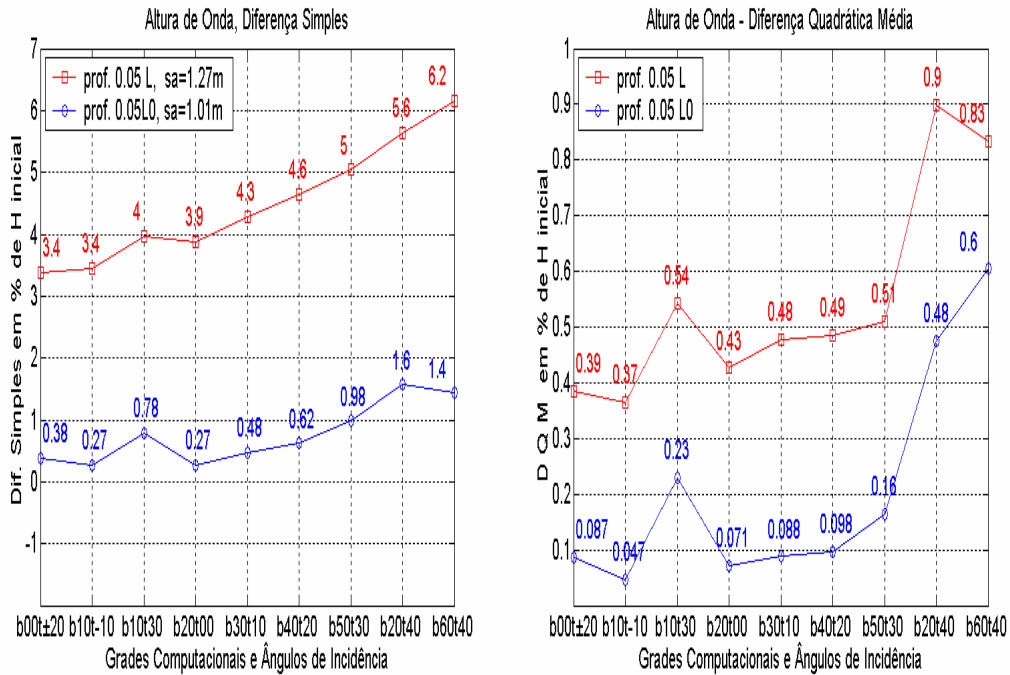


Figura 4.12 Valores de altura de onda e ângulo efetivo de 20°.

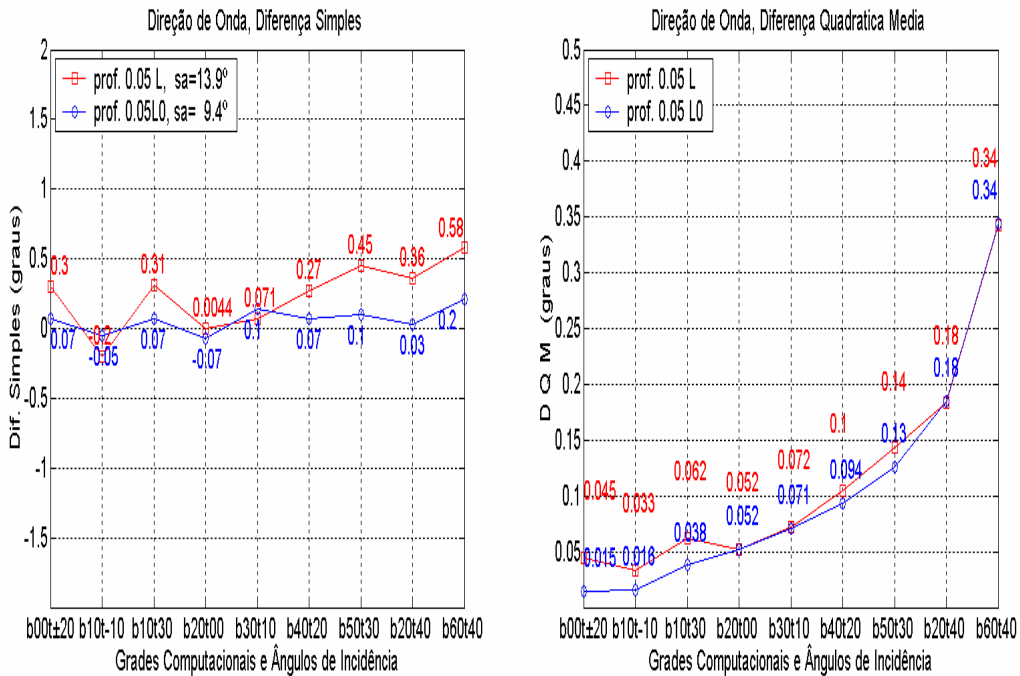


Figura 4.13 Valores de direção de onda e ângulo efetivo de 20°.

4.4.4 Ângulo Efetivo de 30 graus.

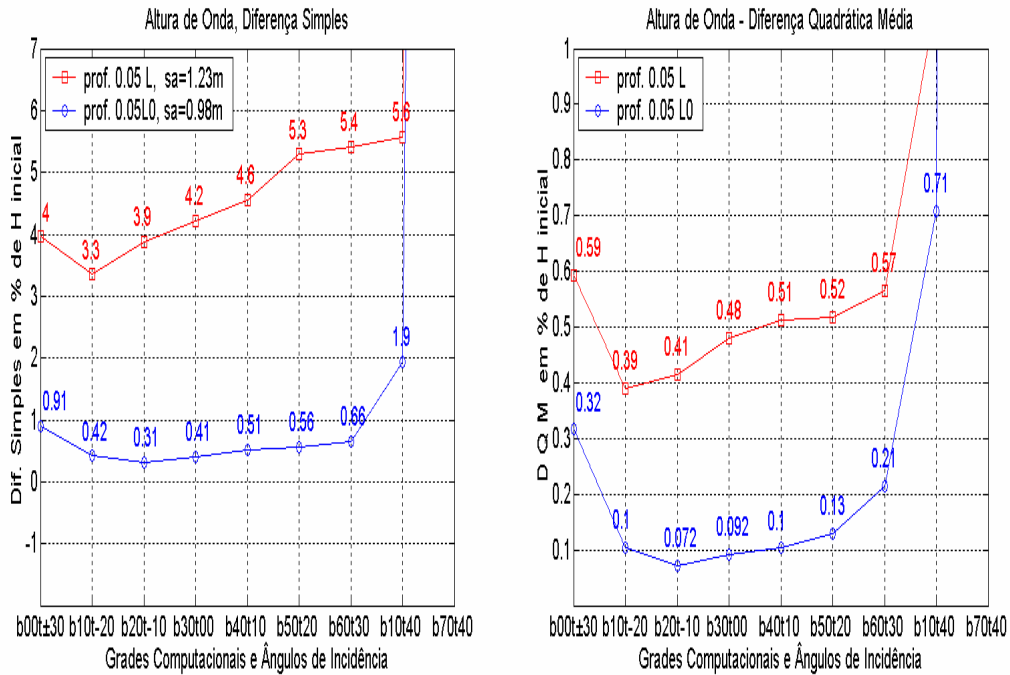


Figura 4.14 Valores de altura de onda e ângulo efetivo de 30°.

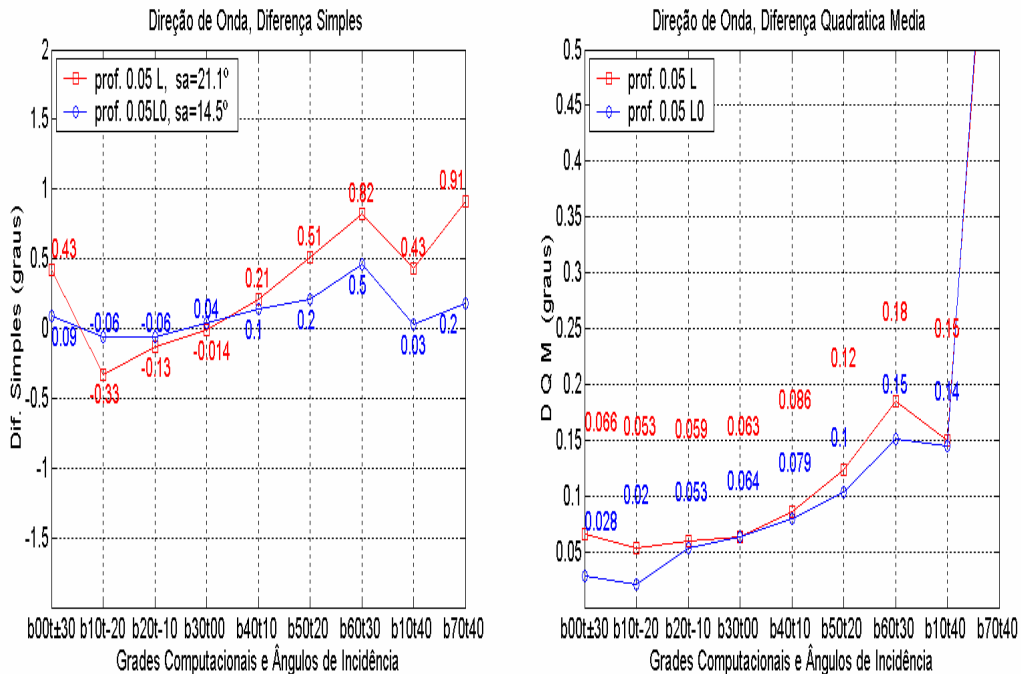


Figura 4.15 Valores de direção de onda e ângulo efetivo de 30°.

4.4.5 Ângulo Efetivo de 40 graus.

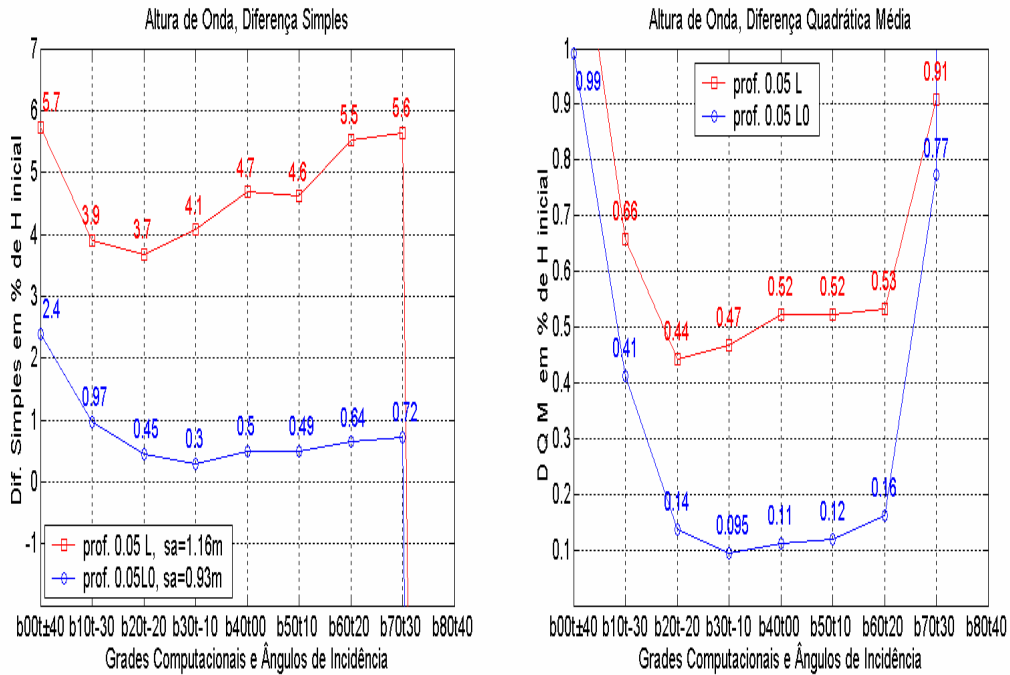


Figura 4.16 Valores de altura de onda e ângulo efetivo de 40°.

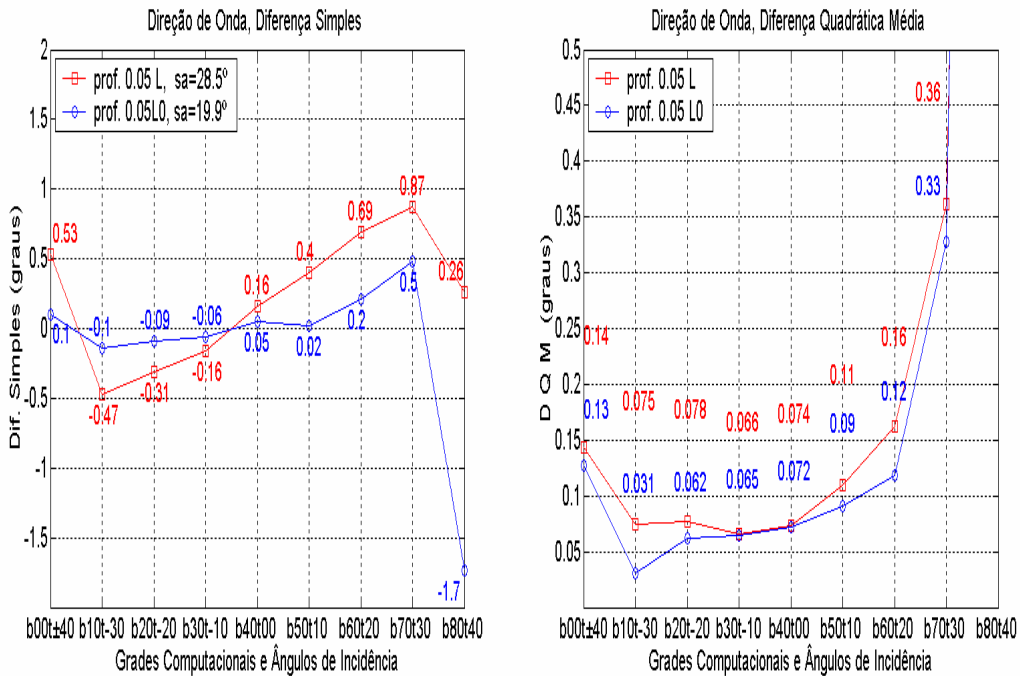


Figura 4.17 Valores de direção de onda e ângulo efetivo de 40°.

4.4.6 Ângulo Efetivo de 50 graus.

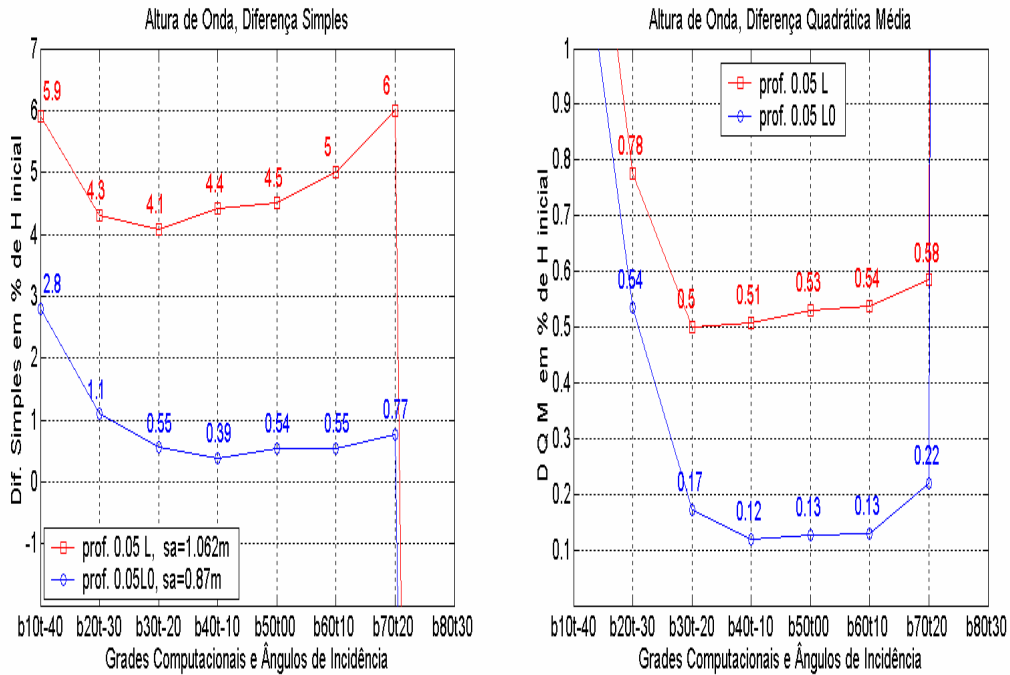


Figura 4.18 Valores de altura de onda e ângulo efetivo de 50°.

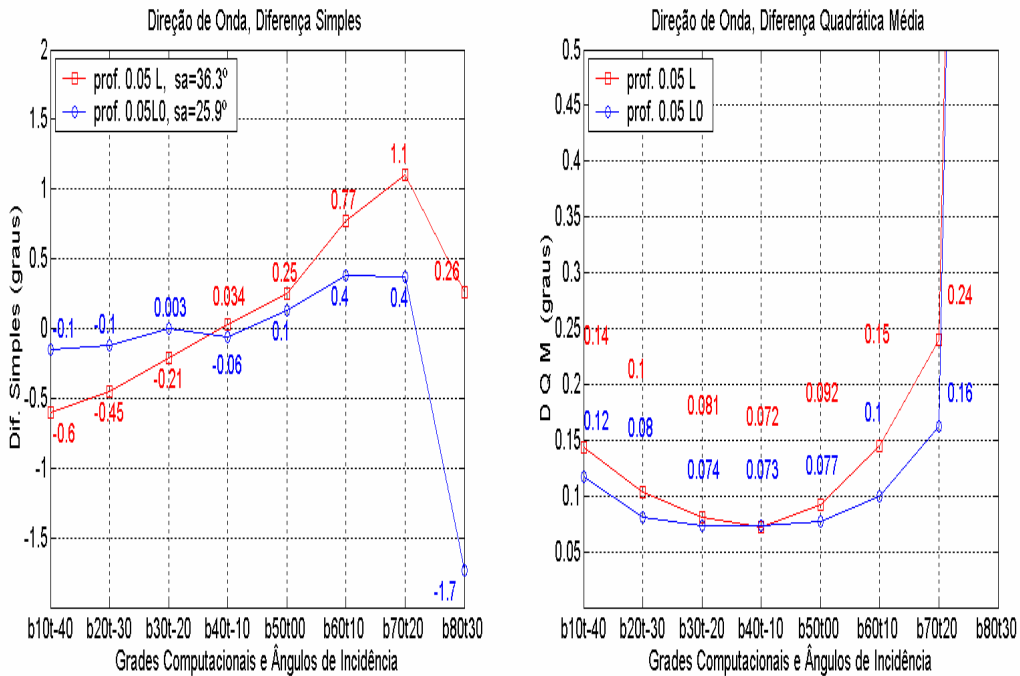


Figura 4.19 Valores de direção de onda e ângulo efetivo de 50°.

4.4.7 Ângulo Efetivo de 60 graus.

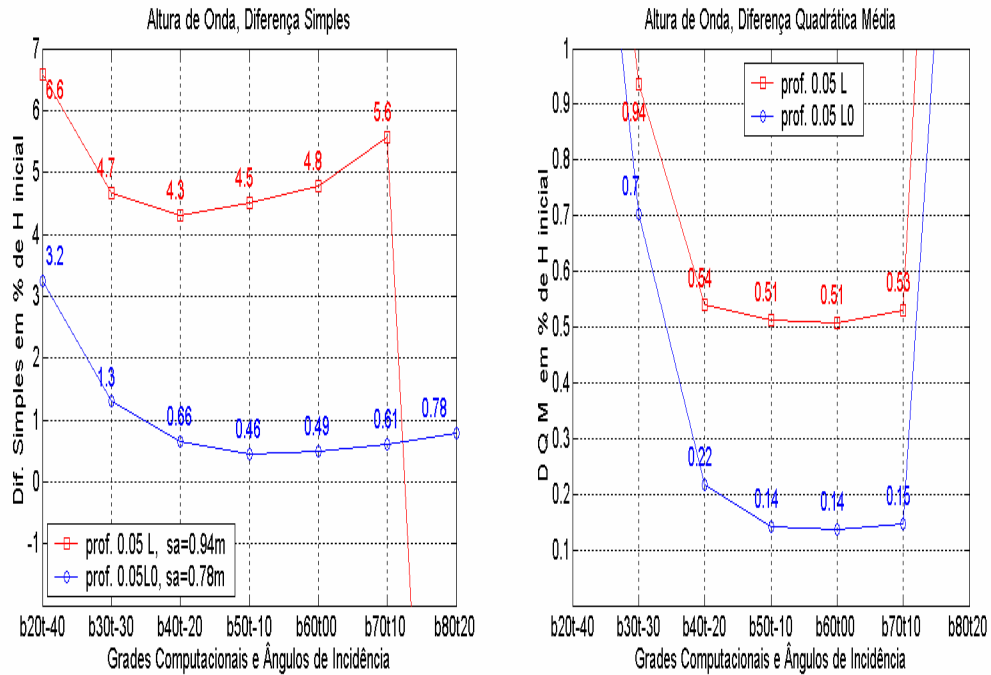


Figura 4.20 Valores de altura de onda e ângulo efetivo de 60°.

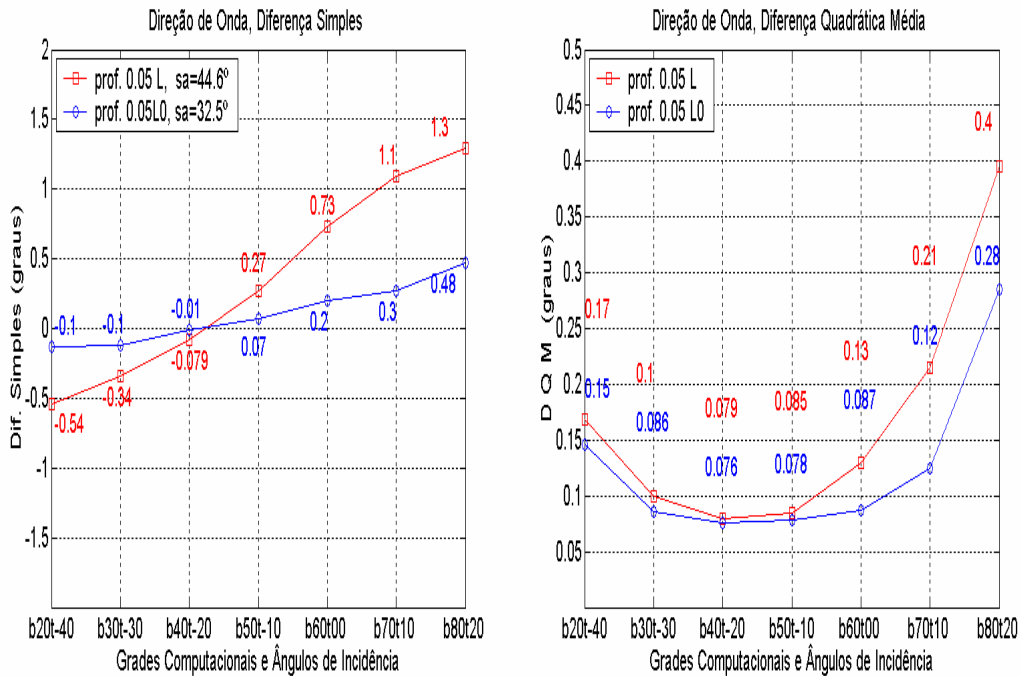


Figura 4.21 Valores de direção de onda e ângulo efetivo de 60°.

4.4.8 Ângulo Efetivo de 70 graus.



Figura 4.22 Valores de altura de onda e ângulo efetivo de 70°.

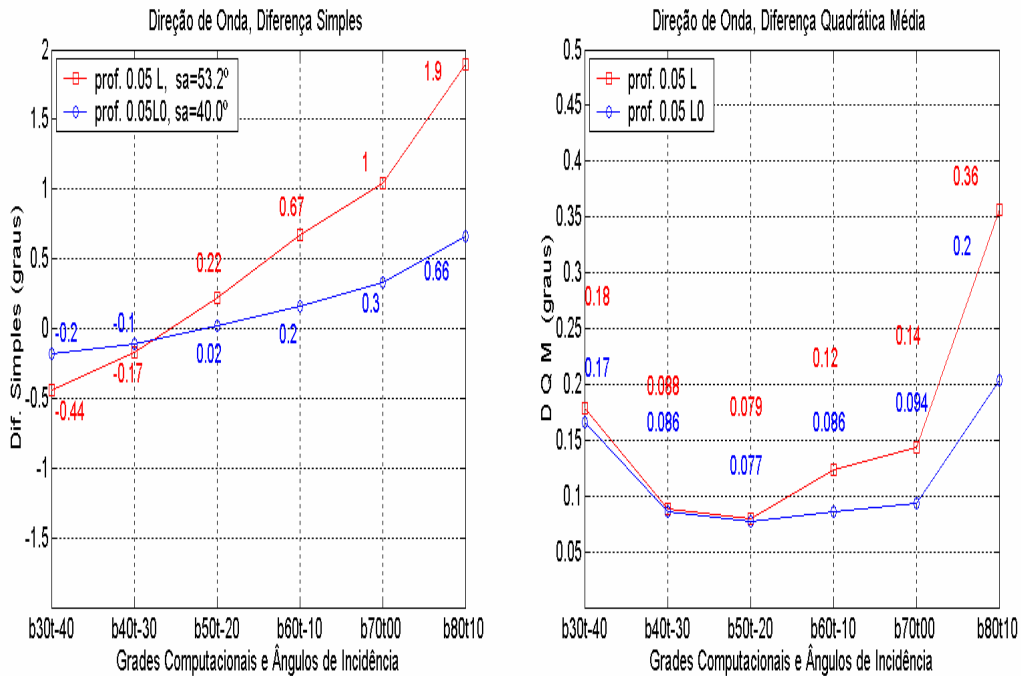


Figura 4.23 Valores de direção de onda e ângulo efetivo de 70°.

4.4.9 Ângulo Efetivo de 80 graus.

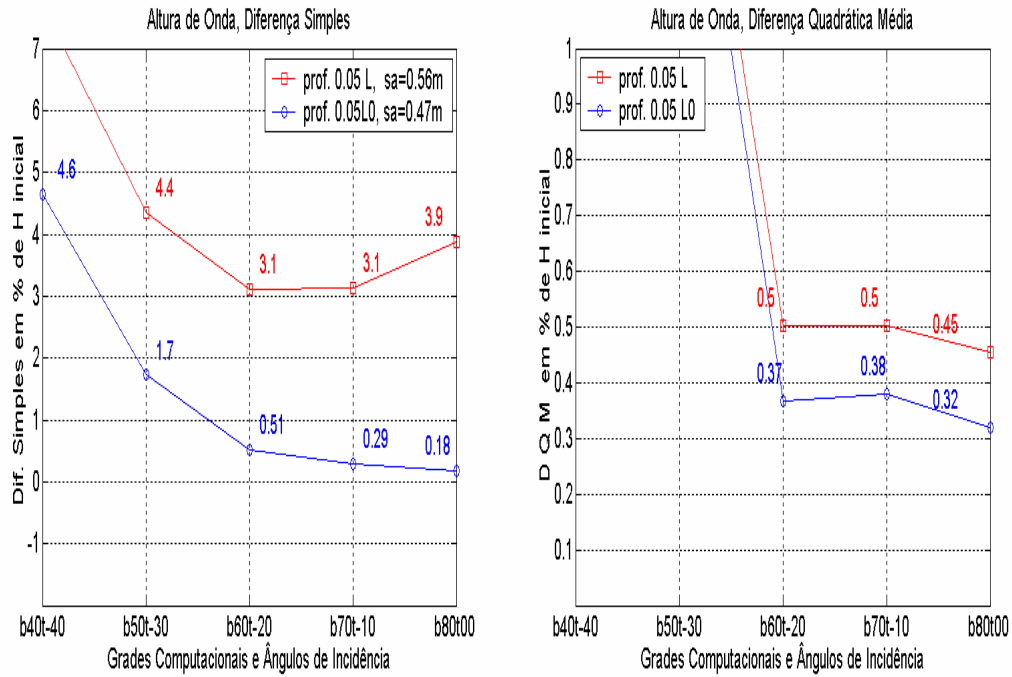


Figura 4.24 Valores de altura de onda e ângulo efetivo de 80°.

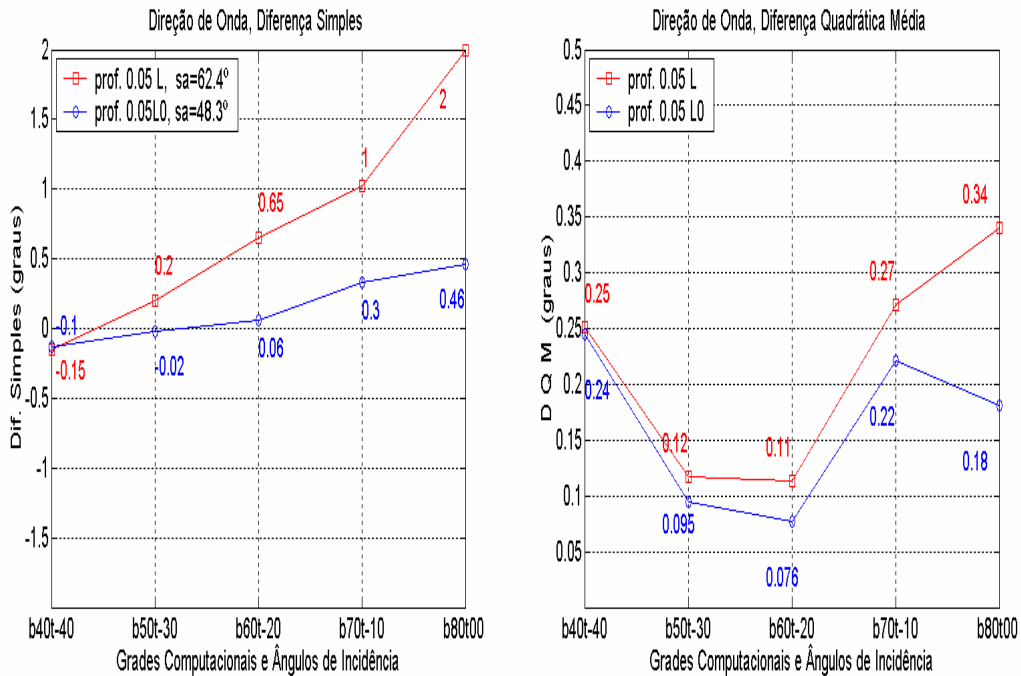


Figura 4.25 Valores de direção de onda e ângulo efetivo de 80°.

4.4.10 Ângulo Efetivo de 89 graus.

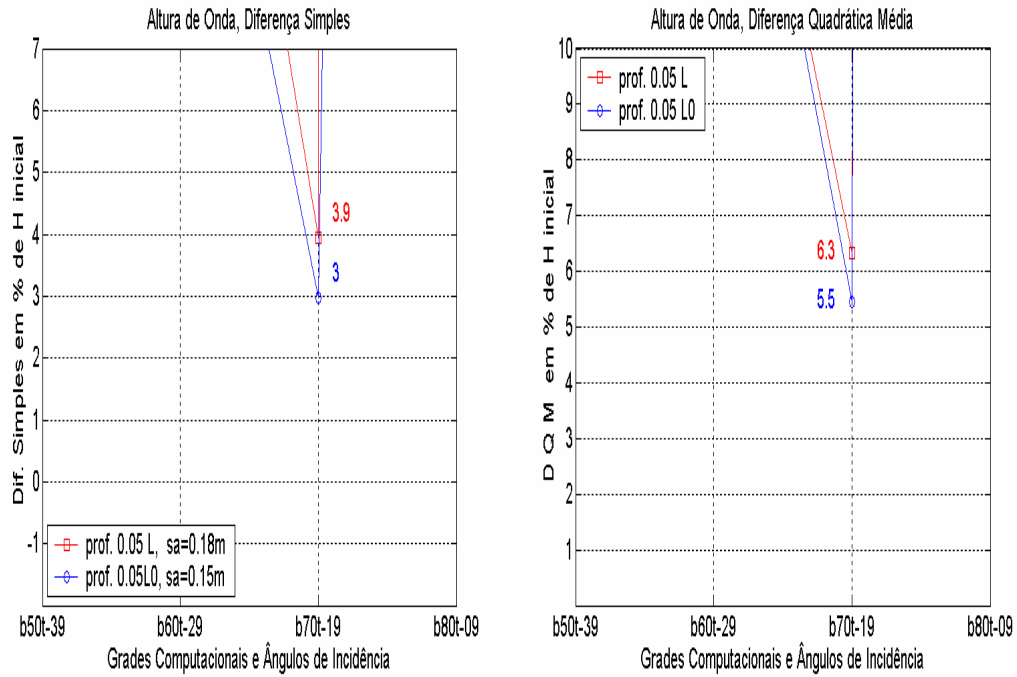


Figura 4.26 Valores de altura de onda e ângulo efetivo de 89°.

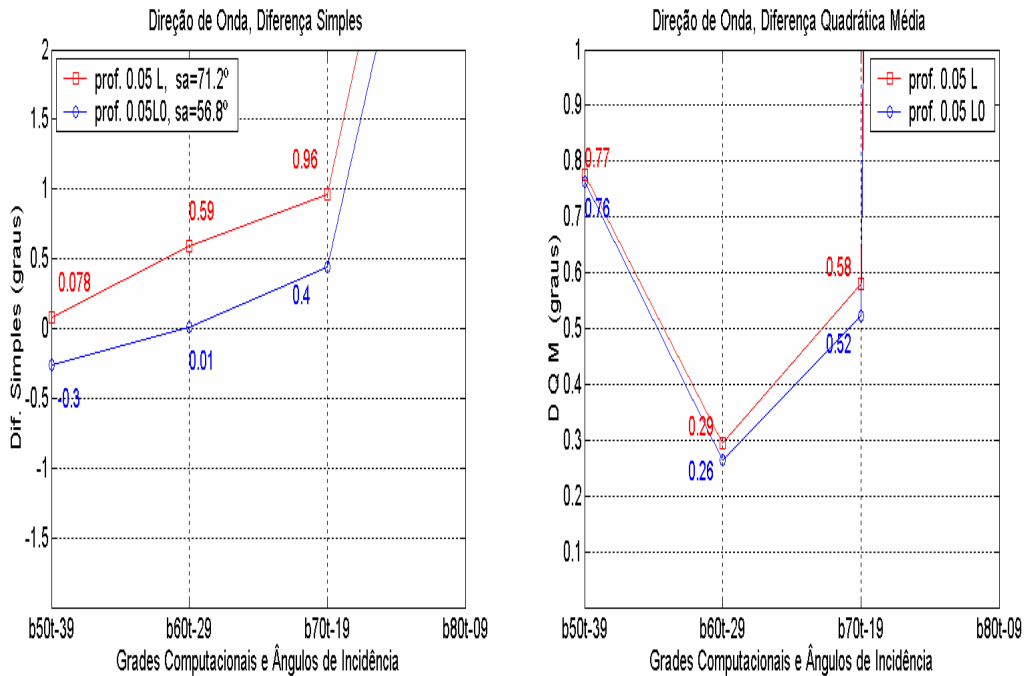


Figura 4.27 Valores de direção de onda e ângulo efetivo de 89°.

Resumo dos Resultados da Etapa 2

Os testes realizados permitiram identificar, para cada ângulo efetivo, qual a opção de modelação que produziu o melhor desempenho do modelo, de acordo com os diferentes métodos de avaliação.

Em relação ao cálculo da altura de onda percebeu-se que, para os menores ângulos efetivos, incidência normal e 10° a melhor opção é a opção (1), ou seja os pontos de menores erros foram utilizando a grade computacional b00. Já para o ângulo efetivo de 20° , nota-se que os melhores resultados ocorreram para opção (3) com b10t-10. Da mesma forma, para ângulos efetivos de 30° , a melhor modelação ocorreu para b20 t-10; para ângulos efetivos de 40° , a melhor modelação ocorreu para b30 t-10, e assim sucessivamente até ângulo efetivo de 70° . Para ângulo efetivo de 80° a opção (2) de modelação apresentou os melhores resultados.

Em relação ao cálculo da direção da onda, percebeu-se que as melhores maneiras de calcular a direção das ondas também ocorreram para a opção (3) de modelação.

De maneira geral, estes resultados indicam que a melhor forma de modelar a refração num plano inclinado é utilizar uma grade orientada na opção de modelação (3). Uma explicação pode ser o fato de que na opção (3), em relação às outras duas opções de modelação a onda propaga-se por direções que divergem menos da direção principal da grade computacional, ou seja, propaga-se desde ao largo até a costa em ângulos mais próximos aos da direção do eixo-x da grade computacional.

CAPÍTULO 5

DETERMINAÇÃO DAS GRADES COMPUTACIONAIS

5.1 Introdução

Os resultados encontrados na análise de desempenho do modelo numérico são a base para que se possa otimizar o cálculo da refração de ondas utilizando o modelo de refração-difração parabólico escolhido. Com estes valores, pode-se determinar o número e as respectivas orientações bem como os respectivos setores de incidência de ondas das grades computacionais para uma batimétrica plano inclinado.

Dependendo do nível de acurácia que se deseja é possível escolher diversas possibilidades de modelação e um número muito variado de grades computacionais para modelar todos os ângulos efetivos analisados. A mais direta delas, que implicaria no maior número de grades computacionais seria, por exemplo, identificar-se um ângulo de rotação de grade computacional para cada um dos ângulos efetivos avaliados e confeccionar uma grade computacional para cada um destes ângulos. O setor de incidência de onda seria de 10° para cada uma das grades.

Neste trabalho, a análise realizada no capítulo anterior será utilizada para determinar o número mínimo, as respectivas orientações e os respectivos setores de incidência de ondas nas grades computacionais para se modelar todas as possíveis direções de chegada de onda numa batimetria plano inclinado. Estas direções são de -89° até $+89^\circ$ em relação à direção normal a linha de costa. Para que esta meta seja alcançada, os cálculos serão feitos com o auxílio de tabelas, que serão montadas a partir de valores limites de aceitação para cada um dos critérios de avaliação utilizados na análise de desempenho do modelo numérico nas duas profundidades de referência.

A figura 5.1 mostra um esquema representativo do setor de chegada de ondas para um plano inclinado genérico que se deseje modelar.

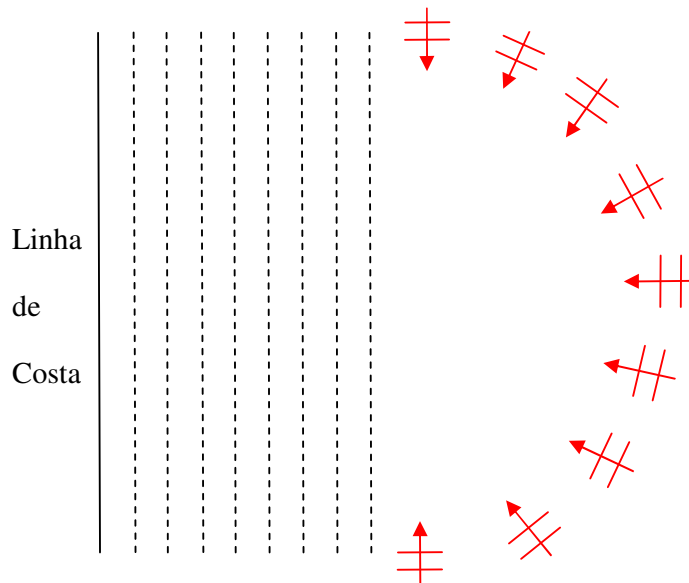


Figura 5.1 Esquema representativo do setor de chegada de ondas num plano inclinado genérico.

É importante ressaltar que os contornos batimétricos e a direção dos ângulos efetivos na figura 5.1 não estão vinculados a nenhuma grade batimétrica.

Tomando-se como referência a direção normal à praia, pode-se identificar dois setores de chegada de ondas simétricos e idênticos ao setor de chegada de onda dos ângulos efetivos, já analisados no capítulo anterior.

Utilizando os mesmos intervalos de direções, definidos no capítulo anterior, pode-se associar para cada ângulo efetivo dois ângulos simétricos e de mesmo valor absoluto do setor de direções de chegada de onda no plano inclinado genérico, por exemplo: para as direções -10° e 10° , o ângulo efetivo é de 10° , para as direções -20° e 20° o ângulo efetivo é de 20° para as direções -30° e 30° , o ângulo efetivo é de 30° e assim sucessivamente.

Para a direção normal, logicamente, o ângulo efetivo é de zero grau.

Com os ângulos efetivos identificados, pode-se agora confeccionar as tabelas que auxiliarão na determinação do número de grades computacionais, suas respectivas orientações e os setores de incidência de onda que serão modelados em cada grade.

5.2 Tabela Geral

Inicialmente, será confeccionada uma tabela Geral, relacionando as formas de modelação utilizadas para cada ângulo efetivo em cada grade com as direções equivalentes do setor de chegada de ondas no plano inclinado.

Para montar esta tabela, deve-se identificar, para cada um dos ângulos efetivos uma única opção de modelação em cada uma das grades computacionais. Desta forma, é necessário analisar primeiramente os casos em que o mesmo ângulo efetivo, foi modelado com mais de uma opção de modelação. Estes casos já foram mencionados anteriormente na tabela 4.1 e são:

Para o ângulo efetivo de 10° , as grades computacionais: a)“b10” b)“b20” e c)“b30” foram utilizadas duas vezes, a) b10t00, b10t30 b) b20t00, b20t40 c) b30t20, b30t40.

Para o ângulo efetivo de 20° , as grades computacionais: a)“b10” e b)“b20” foram utilizadas duas vezes, a) b10t-10, b10t30 b) b20t00, b20 t40.

Para o ângulo efetivo de 30° , a grade computacional “b10” foi utilizada duas vezes, b10t-20, b10t40.

Utilizando as figuras de 4.10 até 4.15 pode-se analisar o desempenho do modelo numérico para os diferentes métodos. Percebe-se que, para todos os métodos de avaliação e em ambas as profundidades, a opção de modelação onde o ângulo de incidência na grade é menor, ou seja, está mais próximo da direção normal à grade computacional, apresenta o melhor desempenho em todos os casos. Portanto, na confecção da tabela Geral serão utilizados:

Para o ângulo efetivo de 10° que simula as direções de -10° e 10° , a opção de modelação b10t00 para a batimetria “b10”, a opção de modelação b20t00 para a batimetria “b20” e para a batimetria “b30” utiliza-se à opção de modelação b30t20.

Para o ângulo efetivo de 20° , que simula as direções de -20° e 20° , utiliza-se à opção de modelação b10t-10 e para a batimetria “b20” a opção de modelação b20t00.

Para o ângulo efetivo de 30° que simula as direções de -30° e 30° , utiliza-se à opção de modelação b10t-20 para a batimetria “b10”.

Com as opções de modelação definidas, a tabela geral que relaciona as formas de modelação utilizadas para cada ângulo efetivo em cada grade com as direções equivalentes do setor de chegada de ondas no plano inclinado, pode ser confeccionada.

		ângulos		Grades Computacionais									
		efetivos		b00	b10	b20	b30	b40	b50	b60	b70	b80	
Direções de chegada de onda no Plano Inclinado	89°	89°							t-39	t-29	t-19	t-09	
	80°	80°						t-40	t-30	t-20	t-10	t00	
	70°	70°					t-40	t-30	t-20	t-10	t00	t10	
	60°	60°			t-40	t-30	t-20	t-10	t00	t10	t20	t30	
	50°	50°		t-40	t-30	t-20	t-10	t00	t10	t20	t30	t40	
	40°	40°	t40	t-30	t-20	t-10	t00	t10	t20	t30	t40		
	30°	30°	t30	t-20	t-10	t00	t10	t20	t30	t40			
	20°	20°	t20	t-10	t00	t10	t20	t30	t40				
	10°	10°	t10	t00	t10	t20	t30	t40					
	00°	00°	t00	t10	t20	t30	t40						
	-10°	10°	t10	t00	t10	t20	t30	t40					
	-20°	20°	t20	t-10	t00	t10	t20	t30	t40				
	-30°	30°	t30	t-20	t-10	t00	t10	t20	t30	t40			
	-40°	40°	t40	t-30	t-20	t-10	t00	t10	t20	t30	t40		
	-50°	50°		t-40	t-30	t-20	t-10	t00	t10	t20	t30		
	-60°	60°			t-40	t-30	t-20	t-10	t00	t10	t20		
	-70°	70°				t-40	t-30	t-20	t-10	t00	t10		
	-80°	80°					t-40	t-30	t-20	t-10	t00		
	-89°	89°							t-39	t-29	t-19	t-09	

Tabela 5.1 Tabela que relaciona as direções de chegada de onda no plano inclinado com as diferentes opções de modelação dos ângulos efetivos.

Na tabela 5.1, os valores de cada célula do interior da tabela indicam as direções de incidência de onda utilizadas nas grades computacionais indicadas na parte superior da tabela, para os respectivos ângulos efetivos indicados na segunda coluna. Estes ângulos efetivos estão relacionados com os ângulos de chegada de onda no plano inclinado na primeira coluna.

Utilizando o mesmo padrão da tabela 5.1, montou-se uma tabela com os valores obtidos segundo os métodos de avaliação de desempenho do modelo numérico. Como exemplo, foi confeccionada a tabela 5.2, para os valores da diferença simples entre a solução numérica e a solução analítica na profundidade de 0.05 L0. Os valores de cada célula são os mesmos encontrados nas figuras 4.8 até a figura 4.27 e estão expressos em percentagem da altura de onda.

Dif. Simples	ângulos	Grades Computacionais										
		em % de H0	Efetivos	b00	b10	b20	b30	b40	b50	b60	b70	b80
Direções de chegada de onda no Plano Inclinado	89°	89°							24	14	3.0	146
	80°	80°						4.6	1.7	0.51	0.29	0.18
	70°	70°				3.7	1.5	0.69	0.3	0.34	0.44	
	60°	60°			3.2	1.3	0.66	0.46	0.49	0.61	0.78	
	50°	50°		2.8	1.1	0.55	0.39	0.54	0.55	0.77	-60	
	40°	40°	2.4	0.97	0.45	0.3	0.5	0.49	0.64	0.72	-81	
	30°	30°	0.91	0.42	0.31	0.41	0.51	0.56	0.66	80		
	20°	20°	0.38	0.27	0.27	0.48	0.62	0.98	1.4			
	10°	10°	0.28	0.3	0.32	0.39	0.51	0.73				
	00°	00°	0.28	0.28	0.35	0.35	0.53					
	-10°	10°	0.28	0.3	0.32	0.39	0.51	0.73				
	-20°	20°	0.38	0.27	0.27	0.48	0.62	0.98	1.4			
	-30°	30°	0.91	0.42	0.31	0.41	0.51	0.56	0.66	80		
	-40°	40°	2.4	0.97	0.45	0.3	0.5	0.49	0.64	0.72	-81	
	-50°	50°		2.8	1.1	0.55	0.39	0.54	0.55	0.77	-60	
	-60°	60°			3.2	1.3	0.66	0.46	0.49	0.61	0.78	
	-70°	70°				3.7	1.5	0.69	0.3	0.34	0.44	
	-80°	80°					4.6	1.7	0.51	0.29	0.18	
	-89°	89°							24	14	3.0	146

Tabela 5.2 Tabela Geral para a diferença simples de altura de onda na profundidade de 0.05L0.

Da mesma forma, foram também confeccionadas outras sete tabelas, uma para cada método de avaliação, porém a apresentação destas tabelas foi omitida neste trabalho, uma vez que os respectivos valores são os mesmos já apresentados nas figuras 4.8 até a figura 4.27.

Antes que se possam utilizar estas tabelas para a especificação das grades computacionais otimizadas, deve-se estabelecer o valor máximo aceitável de erro segundo cada critério de avaliação.

5.3 Tabela de Índices

Com um valor limite de erro escolhido, pode-se determinar uma nova tabela relacionada a este nível de acurácia. Esta tabela será chamada de tabela de índices e será confeccionada apenas com os índices 0 (não atende) e 1 (atende), onde o número 1 representa que erro é menor ou igual ao valor limite e está na faixa de acurácia estabelecida, enquanto que o 0 representa que o erro é superior ao valor limite e, conseqüentemente, esta opção deverá ser descartada.

Como exemplo, foi confeccionada a tabela de índices a seguir utilizando a tabela 5.2 e o valor limite de aceitação do erro igual a 1, (1% da altura inicial).

		ângulos	Grades Computacionais								
		Efetivos	b00	b10	b20	b30	b40	b50	b60	b70	b80
Direções de chegada de onda no Plano Inclinado	89°	89°						0	0	0	0
	80°	80°					0	0	1	1	1
	70°	70°				0	0	1	1	1	1
	60°	60°			0	0	1	1	1	1	1
	50°	50°		0	0	1	1	1	1	1	0
	40°	40°	0	1	1	1	1	1	1	1	0
	30°	30°	1	1	1	1	1	1	1	0	
	20°	20°	1	1	1	1	1	1	0		
	10°	10°	1	1	1	1	1	1			
	00°	00°	1	1	1	1	1				
	-10°	10°	1	1	1	1	1	1			
	-20°	20°	1	1	1	1	1	1	0		
	-30°	30°	1	1	1	1	1	1	1	0	
	-40°	40°	0	1	1	1	1	1	1	1	0
	-50°	50°		0	0	1	1	1	1	1	0
	-60°	60°			0	0	1	1	1	1	1
	-70°	70°				0	0	1	1	1	1
-80°	80°					0	0	1	1	1	
-89°	89°						0	0	0	0	

Tabela 5.3 Tabela de Índices para a diferença simples na profundidade de 0.05L0, para cálculo de altura de onda. Para o nível de aceitação e erro igual a 1%.

Da mesma forma, pode-se também estabelecer valores limites de aceitação, segundo os demais critérios de avaliação e assim, montar as outras sete tabelas de índices.

Através da multiplicação simples entre os respectivos componentes das oito tabelas de índices pode-se encontrar uma última tabela de índices, que foi batizada de tabela final de análise.

5.4 Tabela Final de Análise

Nesta tabela, os valores poderão ser interpretados da seguinte maneira: A opção de modelação que apresentar resultado igual a zero, significa que em pelo menos uma das oito tabelas havia algum valor que não estava na faixa de acurácia estabelecida. No entanto, se o resultado for igual a um, significa que em todas as tabelas os valores estão de acordo com a acurácia desejada, assim, esta opção de modelação será considerada

para a escolha das grades computacionais e as correspondentes seções de direções de incidência de onda.

Valores Limites de Acurácia

São necessários oito valores limites, um para cada tabela geral. Estes valores serão determinados tomando como base as figuras 4.8 até a figura 4.27 onde estão os resultados de todos os métodos de avaliação.

De uma maneira geral, pode-se perceber que tanto para os cálculos da altura como para a direção de ondas a acurácia do modelo diminuiu à medida que ângulos efetivos maiores foram modelados. Sendo que, os resultados mostraram uma maior acurácia no cálculo das direções do que no cálculo da altura.

Originalmente, pretendia-se escolher um único valor limite para todos os ângulos efetivos em cada uma das tabelas gerais, entretanto, a acurácia do modelo diminuiu para os ângulos efetivos maiores, principalmente para os ângulos de 80 e 89 graus, permanecendo aproximadamente num mesmo patamar para ângulos efetivos menores.

Pode-se verificar na tabela 5.3 que, utilizando o valor limite igual a 1, não há opção de modelação possível para o ângulo efetivo de 89 graus (na linha correspondente ao ângulo efetivo de 89° todos os índices são iguais a zero). Portanto, deve-se avaliar se há alguma opção de modelação possível, mesmo que um pouco menos acurada. Desta forma, na determinação das opções de modelação, os ângulos efetivos de 80 e 89 graus serão analisados separadamente e para os ângulos efetivos de 0 a 70 graus, será utilizada a tabela final de análise.

Os valores limites utilizados foram:

No cálculo da altura de onda:

Para as saídas pontuais: para a diferença simples na profundidade de $0.05L$, o valor limite escolhido foi de 5 por cento do valor da altura de onda inicial. Para a profundidade de $0.05L_0$, o valor limite escolhido foi de 1 por cento em relação à altura de onda inicial.

Para os perfis longitudinais, até a profundidade de 0.05L, o valor limite utilizado foi de 0.6, para o corte longitudinal até a profundidade de 0.05L0, o valor limite utilizado foi de 0.3.

No cálculo da direção de onda:

Para as saídas pontuais, para a diferença simples na profundidade de 0.05L, optou-se pelo valor limite de 1 grau. Para a profundidade de 0.05L0, optou-se pelo valor limite de 0.5 graus, ambas em relação à direção de onda da solução analítica.

Para os perfis longitudinais, até a profundidade de 0.05L, o valor limite utilizado foi de 0.2, para o corte longitudinal até a profundidade de 0.05L0, o valor limite utilizado foi de 0.1.

Com os respectivos valores limites definidos para os ângulos efetivos de 0 até 70 graus, pode-se agora utilizá-los como referência na avaliação das opções de modelação dos ângulos efetivos de 80 e 89 graus.

Para o ângulo efetivo de 80 graus, são cinco as opções de modelação, “b40t-40”, “b50t-30”, “b60t-20”, “b70t-10”, “b80t00”. Analisando as figuras 4.24 e 4.25 consideraram-se as opções “b60t-20” e “b70t-10” ainda como possíveis opções a serem utilizadas, isto porque para os valores pontuais tanto para altura de onda como direção, estas apresentaram valores inferiores aos valores limites definidos.

Para os perfis longitudinais, alguns valores estiveram um pouco maiores do que limites estabelecidos, mas ainda mantendo-se num patamar aceitável, para este trabalho. A opção de modelação “b80t00” foi desconsiderada apesar de ter sido uma das mais acuradas em termos de cálculo de altura, no entanto para o cálculo da direção apresentou os valores menos acurados.

Para o ângulo efetivo de 89 graus, são quatro as opções de modelação, “b50t-39”, “b60t-29”, “b70t-19”, “b80t-09” Analisando as figuras 4.26 e 4.27, a opção “b70t-19” é possível de ser utilizada, apesar de ter apresentado um valor um pouco mais elevado para o cálculo da altura de ondas, com este ângulo de modelação os valores de altura de onda da solução analítica são iguais a 0.15 m e 0.18 m, um erro um pouco maior em porcentagem para estes valores, não acarretará em falta de acurácia no contexto geral.

A tabela final de análise foi confeccionada utilizando os valores limites escolhidos e as opções de modelação mais indicadas estão referenciadas com o índice 1.

		ângulos	Grades Computacionais								
		Efetivos	b00	b10	b20	b30	b40	b50	b60	b70	b80
Direções de chegada de onda no Plano Inclinado	89°	89°						0	0	*1	0
	80°	80°					0	0	1	*1	0
	70°	70°				0	0	*1	1	*1	0
	60°	60°			0	0	1	*1	1	1	0
	50°	50°		0	0	1	1	*1	1	0	0
	40°	40°	0	0	*1	1	1	*1	1	0	0
	30°	30°	0	1	*1	1	1	0	0	0	
	20°	20°	1	1	*1	1	1	0	0		
	10°	10°	1	1	*1	1	0	0			
	00°	00°	1	1	*1	0	0				
	-10°	10°	1	1	*1	1	0	0			
	-20°	20°	1	1	*1	1	1	0	0		
	-30°	30°	0	1	*1	1	1	0	0	0	
	-40°	40°	0	0	*1	1	1	*1	0	0	0
	-50°	50°		0	0	1	1	*1	1	0	0
	-60°	60°			0	0	1	*1	1	0	0
	-70°	70°				0	0	*1	1	*1	0
	-80°	80°					0	0	1	*1	0
-89°	89°						0	0	*1	0	

Tabela 5.4 Tabela final de análise para a batimetria plano inclinado, com as possíveis opções de modelação.

A partir desta tabela, é possível escolher diversas formas de se modelar as direções de onda para uma praia tipo plano inclinado dentro dos limites de acurácia estabelecidos anteriormente.

Por exemplo, o ângulo de 70° que está associada ao ângulo efetivo de 70° apresenta índice igual a um para as seguintes opções de grades computacionais b50, b60 e b70. Desta forma, pode-se modelar este ângulo dentro dos níveis admitidos de três formas: para as grades computacionais rotacionadas de 50°, 60° e 70° em relação à direção normal aos contornos batimétricos.

Neste trabalho será utilizada esta tabela para determinar o número mínimo de grades computacionais que podem ser utilizadas para os níveis de acurácia escolhidos. As opções de modelação escolhidas estão destacadas com um “*” na tabela 5.4 e identificadas por letras na tabela a seguir.

5.5 Grades Computacionais

Ficaram definidas seis grades computacionais para modelar todas as direções de chegada de ondas num plano inclinado. Estas grades computacionais estão caracterizadas na tabela 5.5 juntamente com seus respectivos setores de incidência de ondas.

		ângulos		Grades Computacionais								
		Efetivos		b00	b10	b20	b30	b40	b50	b60	b70	b80
Direções de chegada de onda no Plano Inclinado	-89°	89°									*A*	
	-80°	80°									*A*	
	-70°	70°							*B*		*A*	
	-60°	60°							*B*			
	-50°	50°							*B*			
	-40°	40°				*C*			*B*			
	-30°	30°				*C*						
	-20°	20°				*C*						
	-10°	10°				*C*						
	00°	00°				*C*D*						
	10°	10°				*D*						
	20°	20°				*D*						
	30°	30°				*D*						
	40°	40°				*D*				*E*		
	50°	50°								*E*		
	60°	60°								*E*		
	70°	70°								*E*		*F*
	80°	80°										*F*
	89°	89°										*F*

Tabela 5.5 Tabela que indica as seis grades computacionais escolhidas e seus respectivos setores de incidência de onda.

Grade A:

Apresenta a batimetria rotacionada de 70° (no sentido horário) em relação à direção normal da grade computacional ou a direção do eixo-x da grade. O setor de incidência de ondas é de 29 graus, de 89° até 70°.

Grade B:

Apresenta a batimetria rotacionada de 50° (no sentido horário) em relação à direção normal da grade computacional ou a direção do eixo-x da grade. O setor de incidência de ondas é de 30 graus, de 70° até 40°.

Grade C:

Apresenta a batimetria rotacionada de 20° (no sentido horário) em relação à direção normal da grade computacional ou a direção do eixo-x da grade. O setor de incidência de ondas é de 40 graus, de 40° até 00° .

Grade D:

Apresenta a batimetria rotacionada de 20° (no sentido anti-horário) em relação à direção normal da grade computacional ou a direção do eixo-x da grade. O setor de incidência de ondas é de 40 graus, de 00° até -40° .

Grade E:

Apresenta a batimetria rotacionada de 50° (no sentido anti-horário) em relação à direção normal da grade computacional ou a direção do eixo-x da grade. O setor de incidência de ondas é de 30 graus, de -40° até -70° .

Grade F:

Apresenta a batimetria rotacionada de 70° (no sentido anti-horário) em relação à direção normal da grade computacional ou a direção do eixo-x da grade. O setor de incidência de ondas é de 29 graus, de -70° até 89° .

Neste capítulo, foram determinadas seis grades computacionais para serem utilizadas na modelação de todas as possíveis direções de chegada de onda em uma praia cujos contornos batimétricos formam um plano inclinado. A determinação destas grades computacionais está vinculada aos valores limites de acurácia escolhidos, por exemplo, se forem escolhidos valores limites menores aos utilizados, as possibilidades de modelação serão menores e conseqüentemente o número de grades computacionais deverá ser maior.

O mesmo procedimento poderá ser utilizado para a determinação de grades computacionais de batimetrias reais, para isto será necessário ter o conhecimento do setor de chegada de ondas da região e que os contornos batimétricos reais assemelhem-se a um plano inclinado de modo que se possa identificar uma direção aproximadamente normal a linhas batimétricas da região em questão.

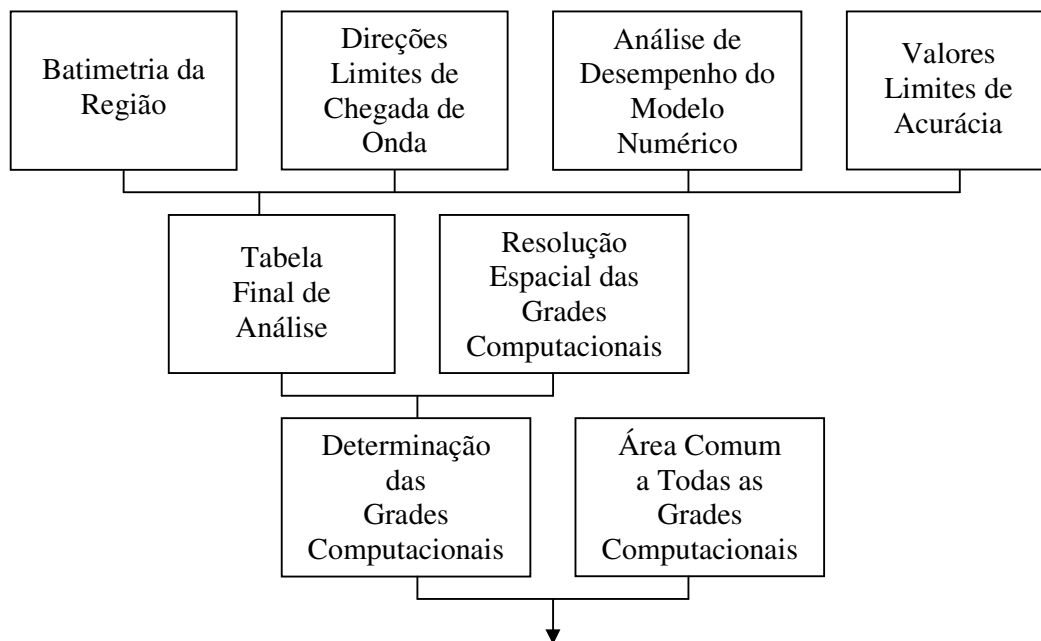
No próximo capítulo, o sistema computacional desenvolvido neste trabalho, será aplicado à região da ilha de Santa Catarina.

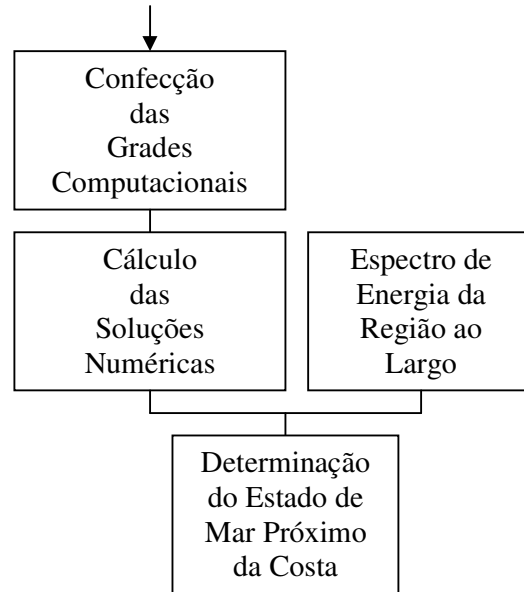
CAPÍTULO 6

APLICAÇÃO DO SISTEMA COMPUTACIONAL

O sistema computacional para previsão de ondas próximas à costa foi aplicado à ilha de Santa Catarina. Para a aplicação apresentada neste trabalho, optou-se por utilizar como condição de mar ao largo espectros direcionais calculados pelo modelo de geração Wave Watch 3, algumas das características deste modelo de geração de ondas e da batimetria da região serão apresentadas posteriormente. Inicialmente, apresenta-se um diagrama de fluxo referente à aplicação do método operacional, desenvolvido neste trabalho.

6.1 Diagrama de Fluxo





6.2 Região de Aplicação

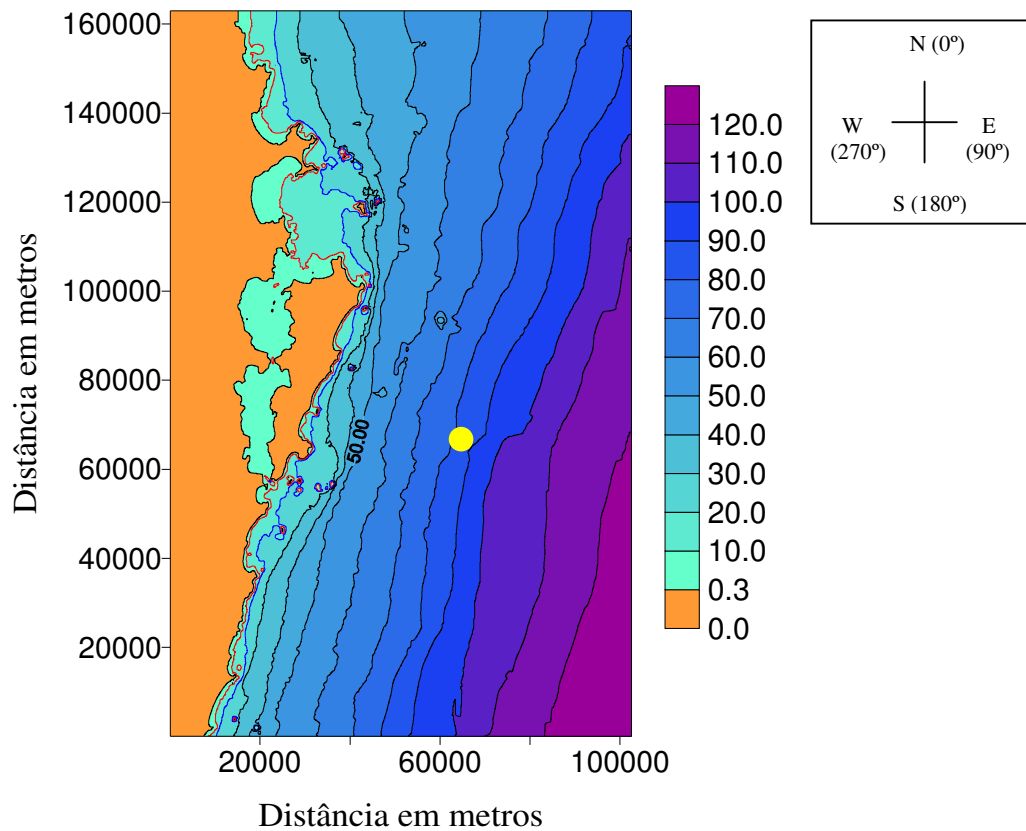


Figura 6.1 Ilha de Santa Catarina e a plataforma continental adjacente.

A área de interesse desta aplicação é a Ilha de Santa Catarina, localizada no litoral sul do Brasil na latitude $-27^{\circ} 36'$ (Sul) e longitude $-48^{\circ} 30'$ (Oeste). A ilha possui aproximadamente 55 km de extensão por 18 km de largura máxima.

Sua orientação geográfica e a batimetria adjacente estão mostradas na figura 6.1, as linhas batimétricas de cor vermelha e de cor azul representam respectivamente linhas de profundidade de 10 e 20 metros. Analisando a figura 6.1 é possível perceber que a linha de costa tem forma bastante irregular com vários pontões rochosos e praias em arco. Também se percebe a existência de diversas ilhas menores ao longo da costa, sendo que, na parte mais ao sul da ilha existe um conjunto de cinco ilhas agrupadas. Nota-se que a linha de costa da ilha e dos contornos batimétricos são aproximadamente paralelos.

A circunferência de cor amarela assinala a posição onde são obtidas as previsões de ondas ao largo para a região de Florianópolis, com o modelo Wave Watch 3 (WW3). Foi também nesta posição que o ondógrafo realizou as medições de onda no período de funcionamento do P.I.C.. O ponto está a cerca de 35 km da ilha de Santa Catarina em águas com profundidade de aproximadamente 80 metros.

6.3 Regime de Ondas da Região

O Regime de ondas ao largo da ilha de Santa Catarina começou a ser estudado no segundo ano de funcionamento do projeto P.I.C. Araújo et al (2003) descreve os diferentes estados de mar e suas variabilidades ao longo das estações do ano a partir de uma análise estatística feita com as medições do ondógrafo no período de dezembro de 2001 a janeiro de 2003. A presente seção resume os principais aspectos desse estudo.

Observou-se uma freqüente ocorrência de espectros bimodais envolvendo um mar local e uma ondulação. Numa análise anual, 31% dos espectros continham dois picos, sendo que 43% destes ocorreram no verão e 24 % no inverno mostrando uma significativa variação sazonal. Uma análise de histogramas bivariados mostrou que o regime de ondas da região apresenta, com freqüência, a presença de uma ondulação de S com período de pico (T_p) de 12s e vagas de ENE de $T_p = 8s$. Durante o outono e o inverno, as ondulações prevaleceram sobre as vagas, no verão existiu um equilíbrio entre estes e na primavera as vagas prevaleceram sobre as ondulações.

A técnica de agrupamento (“Cluster analysis”) aplicada aos dados revelou cinco sistemas de ondas bem definidos e relativamente estáveis ao longo do ano mostrados nas figuras 6.2 e 6.3: (A) ondulação de SE com período médio de 16.2s; (B) ondulação de S com período médio de 11.4s; (C) mar local de E com período médio de 8.5s; (D) mar local de NE com período médio de 6.7s; (E) mar local de S com período médio de 6.4s. Essa caracterização, juntamente com o acervo de dados obtidos pelo ondógrafo dos últimos anos [Melo et al (2003), Melo (2004)] permitiu delimitar um setor principal de direções de chegadas de ondas, as quais este trabalho objetiva modelar.

Os dados indicam que, ondas com direções menores que 30° em relação ao Norte geográfico são raras, e quando acontecem apresentam-se por poucas horas, com pequena amplitude e períodos baixos. Este aspecto do regime de ondas permitiu considerar o limite N de chegada de ondas como sendo a direção de 30° N.

Em relação ao limite S de chegada de ondas, os dados indicam a direção de 210° como suficiente. Esse setor mais amplo a Sul deve-se a orientação e a posição geográfica da costa Sul brasileira que possibilita a chegada de ondulações longínquas do Atlântico Sul.

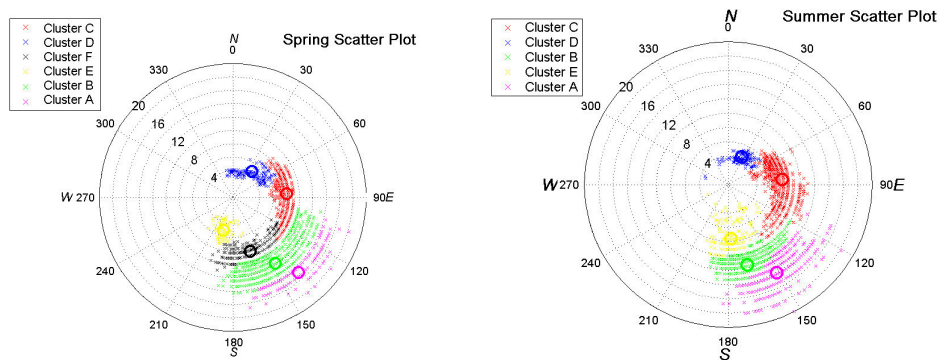


Figura 6.2 Distribuição sazonal, Primavera e Verão, de períodos de pico por direções dominantes, extraídos de Araújo et al (2003)

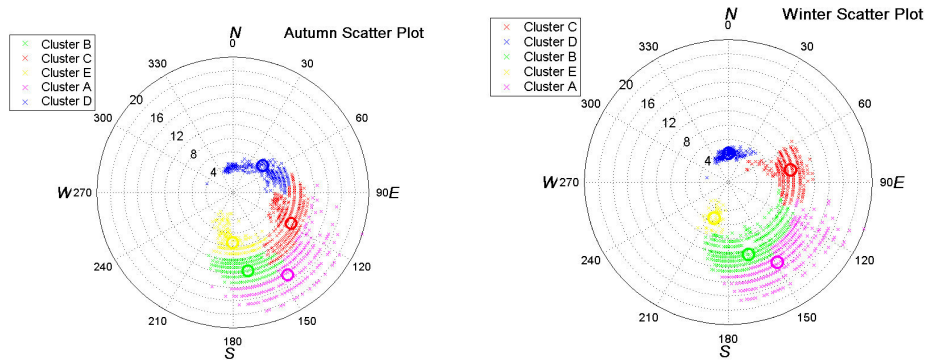


Figura 6.3 Distribuição sazonal, Outono e Inverno, de períodos de pico por direções dominantes, extraídos de Araújo et al (2003)

A definição do setor de direções importantes para o regime de ondas associada à orientação geral da costa indica ser necessário modelar ondas que se aproximam da costa com ângulos bastante variados, conforme mostrado na figura 6.4. Observa-se que, em alguns casos, a direção das ondas é bastante oblíqua em relação às linhas de contornos batimétricos.

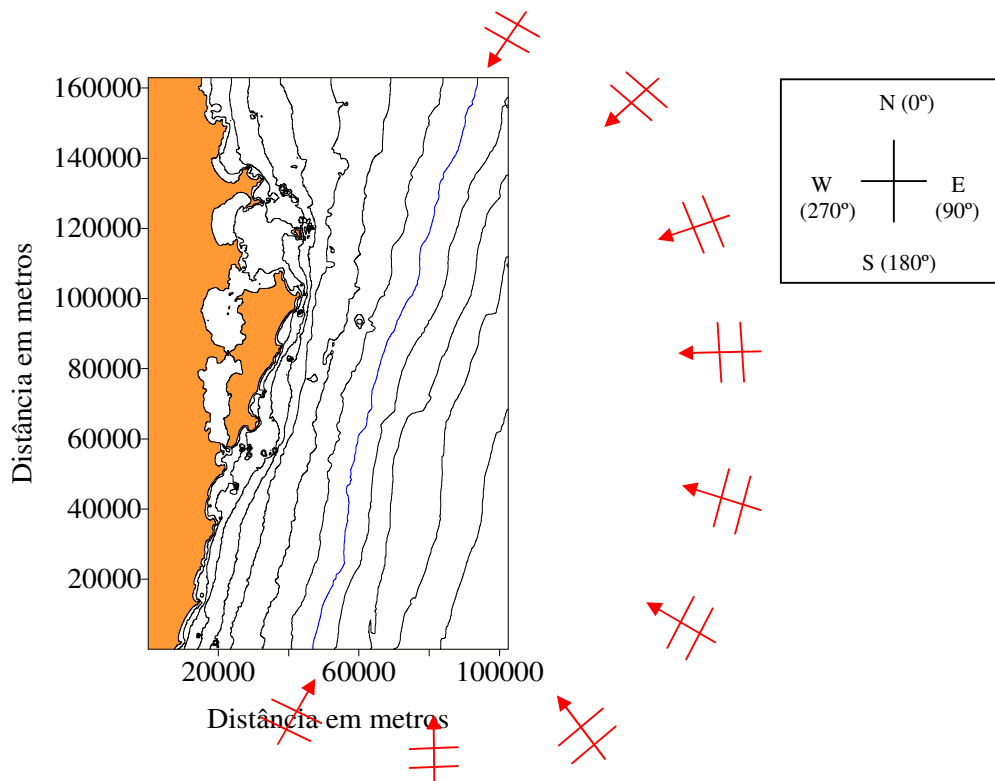


Figura 6.4 Contornos batimétricos e o setor de direções de chegada de ondas na região de interesse. A linha de cor azul representa a batimétrica de 80m.

6.4 Determinação das Grades Computacionais

A definição das grades computacionais e suas respectivas orientações foi feita relacionando os ângulos de chegada de ondas da região ao largo da Ilha de Santa Catarina com os ângulos efetivos num plano inclinado representativo da região. Para isto, a batimetria real foi referenciada a uma batimetria plano inclinado a fim de poder-se identificar uma direção preferencial para as linhas batimétricas da região.

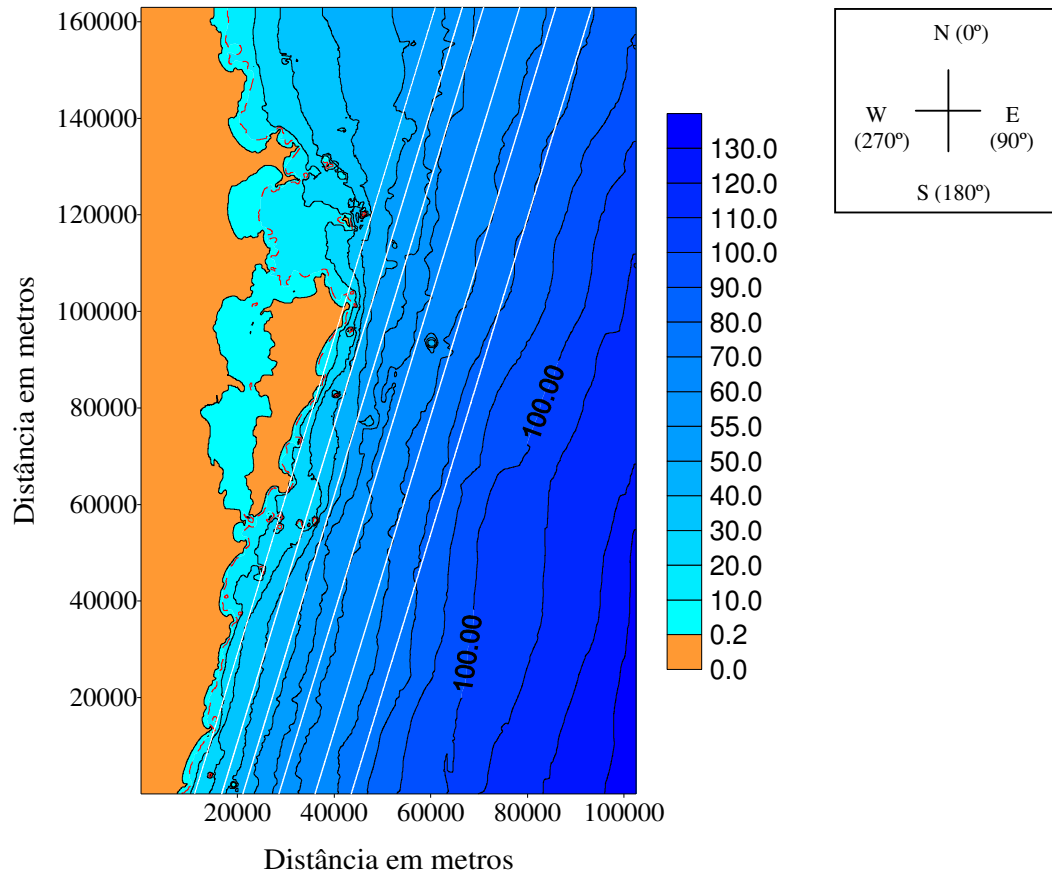


Figura 6.5 Batimetria da área de interesse e linhas batimétricas com inclinação 15° N.

Tomando como base a figura 6.5, adotou-se a inclinação de 15° N como a direção média característica das linhas batimétricas da região, conseqüentemente, a direção normal a estas linhas é a direção 105° N.

Portanto, a aproximação mais simples possível para a batimetria real da região seria a de um plano inclinado com contornos batimétricos rotacionados de 15°. O setor de chegada de onda da região com esse plano inclinado hipotético seria a situação mostrada na figura 6.6.

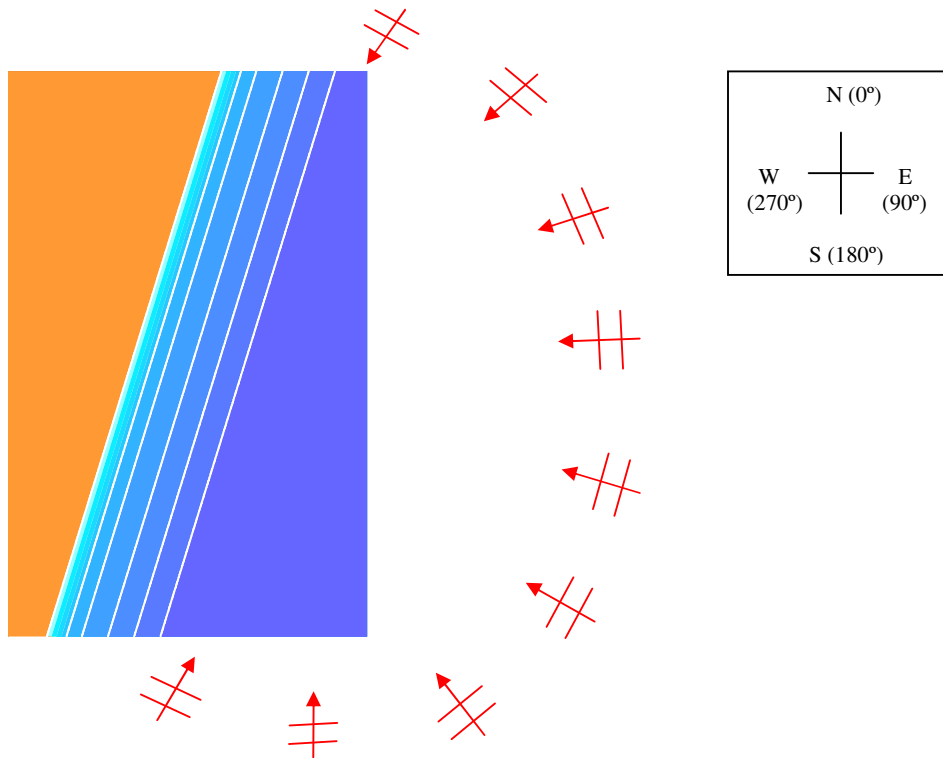


Figura 6.6 Plano inclinado hipotético e setor de chegada de ondas relativas a ilha de Santa Catarina.

Nota-se que o setor de chegada de ondas da região é de 180° , sendo suas direções extremas as direções 30° N e 210° N. Comparando-se este arco de direções com a orientação das linhas batimétricas é possível perceber que as direções limites tanto a N (30° N) quanto a Sul (210° N) fazem ângulos de 15° com as batimétricas. No limite S, entretanto, a direção de 210° N implica em ondas vindo da parte mais rasa para a parte mais profunda da batimetria.

Tomando-se como referência a direção normal às linhas batimétricas, (105° N), pode-se identificar os ângulos efetivos associados às direções do setor de chegada de ondas neste plano inclinado hipotético dividindo este setor em duas partes. A primeira parte englobaria desde a direção limite (30° N) até a direção normal as linhas batimétricas e a segunda a partir desta direção até a direção limite S (210° N), desta forma, pode-se identificar os ângulos efetivos para cada uma destas partes.

Logicamente, para a direção 105° Norte, o ângulo efetivo é de zero grau e utilizando um intervalo de 10° entre as direções de onda, tem-se:

1-Na primeira parte:	
Direção de Chegada de Onda	Ângulo Efetivo
30°N	75°
35°N	70°
45°N	60°
55°N	50°
65°N	40°
75°N	30°
85°N	20°
95°N	10°
2- Na segunda parte:	
Direção de Chegada de Onda	Ângulo Efetivo
115°N	10°
125°N	20°
135°N	30°
145°N	40°
155°N	50°
165°N	60°
175°N	70°
185°N	80°
194°N	89°
205°N	Não há análise
210°N	Não há análise

Tabela 6.1 Tabela que relaciona as direções do setor de chegada de ondas no plano inclinado hipotético com os ângulos efetivos correspondentes.

Com as direções de chegada do regime de onda relacionadas a seus ângulos efetivos equivalentes, pode-se agora utilizar o mesmo procedimento utilizado no caso geral apresentado no capítulo 5 para definir o número de grades computacionais e suas respectivas orientações.

Considerando-se os mesmos valores limites de aceitação, utilizados no capítulo 5, pode-se montar uma tabela final de análise adaptada às condições da ilha de Santa Catarina equivalente à tabela 5.4.

6.4.1 Tabela Final de Análise

De acordo com a analogia do plano inclinado hipotético, a tabela final de análise para a região da Ilha de Santa Catarina confeccionada com os mesmos valores de acurácia escolhidos para o caso geral é a tabela 6.2. Nesta tabela, as opções de modelação mais indicadas estão assinaladas com o índice 1.

		ângulos	Grades computacionais									
		Efetivos	b00	b10	b20	b30	b40	b50	b60	b70	b80	
Setor de direções de chegada de onda na Região	30° N											
	35° N	70°				0	0	*1	1	1	0	
	45° N	60°			0	0	1	*1	1	1	0	
	55° N	50°		0	0	1	1	*1	1	0	0	
	65° N	40°		0	0	*1	1	1	*1	1	0	0
	75° N	30°		0	1	*1	1	1	0	0	0	
	85° N	20°		1	1	*1	1	1	0	0		
	95° N	10°		1	1	*1	1	0	0			
	105° N	00°		1	1	*1	0	0				
	115° N	10°		1	1	*1	1	0	0			
	125° N	20°		1	1	*1	1	1	0	0		
	135° N	30°		0	1	*1	1	1	0	0	0	
	145° N	40°		0	0	*1	1	1	*1	0	0	0
	155° N	50°			0	0	1	1	*1	1	0	0
	165° N	60°				0	0	1	*1	1	0	0
	175° N	70°					0	0	*1	1	*1	0
	185° N	80°						0	0	1	*1	0
194° N	89°							0	0	*1	0	
205° N												
210° N												

Tabela 6.2 Tabela final de análise para a Região da Ilha de Santa Catarina, com as possíveis opções de modelação.

A partir desta tabela, é possível escolher diversas formas de se modelar as ondas da região de Santa Catarina dentro da acurácia determinada pelos valores limites escolhidos. Por exemplo, na linha 45° N, que está associada ao ângulo efetivo de 60°, encontra-se índice igual a 1 para as seguintes opções de grades computacionais b40, b50, b60, e b70. Desta forma, pode-se modelar o ângulo de 45° N dentro dos níveis admitidos de quatro formas: para as grades computacionais com contornos batimétricos rotacionados de 40°, 50°, 60° e 70° em relação à direção normal de 105° N.

Novamente, a tabela final de análise será utilizada para determinar o número mínimo de grades computacionais que podem ser utilizadas para os mesmos níveis de acurácia escolhidos. As opções de modelação escolhidas estão destacadas com um “*” na tabela 6.2 e identificadas por números na tabela 6.3 a seguir.

A metodologia apresentada indica cinco grades computacionais para modelar todas as direções de chegada de ondas na região da Ilha de Santa Catarina, conforme mostrado na tabela 6.3 juntamente com suas respectivas seções de direções.

		ângulos	Grades computacionais								
		Efetivos	b00	b10	b20	b30	b40	b50	b60	b70	b80
Setor de direções de chegada de onda na Região	30° N							*1*			
	35° N	70°						*1*			
	45° N	60°						*1*			
	55° N	50°						*1*			
	65° N	40°			*2*			*1*			
	75° N	30°			*2*						
	85° N	20°			*2*						
	95° N	10°			*2*						
	105° N	00°			*2*3*						
	115° N	10°			*3*						
	125° N	20°			*3*						
	135° N	30°			*3*						
	145° N	40°			*3*			*4*			
	155° N	50°						*4*			
	165° N	60°						*4*			
	175° N	70°						*4*		*5*	
185° N	80°								*5*		
194° N	89°								*5*		
205° N									*5*		
210° N									*5*		

Tabela 6.3 Tabela que indica as cinco grades computacionais escolhidas e seus respectivos setores de incidência de onda.

Grades	Ângulo de rotação	Setor de Incidência	Limites do Setor de Incidência
Grade 1	50° Sentido Horário	Arco de 35°	30°N até 65°N
Grade 2	20° Sentido Horário	Arco de 40°	65°N até 105°N
Grade 3	20° Sentido Anti-Horário	Arco de 40°	105°N até 145°N
Grade 4	50° Sentido Anti-Horário	Arco de 40°	145°N até 175°N
Grade 5	70° Sentido Anti-Horário	Arco de 45°	175°N até 210°N

Tabela 6.4 Tabela que relaciona as grades com seu ângulo de rotação, o setor de incidência de ondas e os respectivos limites de cada setor em relação ao Norte.

6.4.2 Grades Computacionais

Na etapa 1 de análise, ficaram definidos os espaçamentos de grade longitudinal e transversal a serem utilizados no cálculo das soluções numéricas. Estes espaçamentos são de tamanho 0.0625 L_0 . Tomando-se como referência o período de 10.14 s, característico do regime de ondas da região, o valor dos espaçamentos é de 10 m.

Algumas das grades computacionais determinadas representam áreas de grande extensão, para estas grades utilizar espaçamentos longitudinais e transversais de 10 m. ficou computacionalmente inviável. Desta forma, foi necessário escolher espaçamentos de grade um pouco maiores, assim, todas as grades computacionais foram confeccionadas com espaçamentos longitudinais e transversais de 50 m. Apesar disto, os cálculos das soluções numéricas puderam ser realizados em intervalos de 10 em 10 m., isto porque o modelo de refração-difração utilizado permite uma subdivisão interna da grade computacional para a realização dos cálculos.

Na confecção destas grades computacionais, considerou-se a hipótese de que ao largo o espectro direcional de ondas é espacialmente uniforme em distâncias da ordem de dezenas de km ao longo da costa. Para assegurar que as condições de ondas obtidas para a profundidade de 80m fossem propagadas pelo modelo exatamente a partir desta profundidade, as profundidades maiores de 80 metros foram substituídas por um plano horizontal com profundidade constante de 80m. Assim, as grades computacionais da região assemelham-se as grades utilizadas na avaliação do modelo, onde a profundidade máxima também era de 80 metros.

Para definir o domínio computacional, de modo que as ondas incidentes na fronteira externa possam alcançar a costa leste da ilha de Santa Catarina, traçou-se um conjunto de raios conforme mostrados nas figuras a seguir. Este procedimento foi realizado para garantir que as ondas que chegam a costa da Ilha de Santa Catarina entraram no domínio de cálculo pela fronteira externa e não pelas fronteiras laterais, que, muitas vezes, acarreta problemas e falta de acurácia.

Os raios foram calculados com um modelo cedido por W. O'Reilly. Para cada uma das grades foram propagadas a direção limite superior e inferior, para os períodos de 4 s e 18 segundos. Nas figuras de 6.7 até 6.12, os raios de cor vermelha foram traçados para períodos de 18 segundos e os raios de cor branca para períodos de 4 segundos.

Com a definição de todos os parâmetros das grades computacionais, (orientação da grade, direção superior de modelação, direção inferior de modelação e domínio computacional), as correspondentes grades a serem usadas para a modelação das ondas da região da Ilha de Santa Catarina puderam ser confeccionadas. Para todas as grades computacionais, a fronteira externa é a face lateral direita onde se encontra a escala de cores das profundidades.

Grade 1

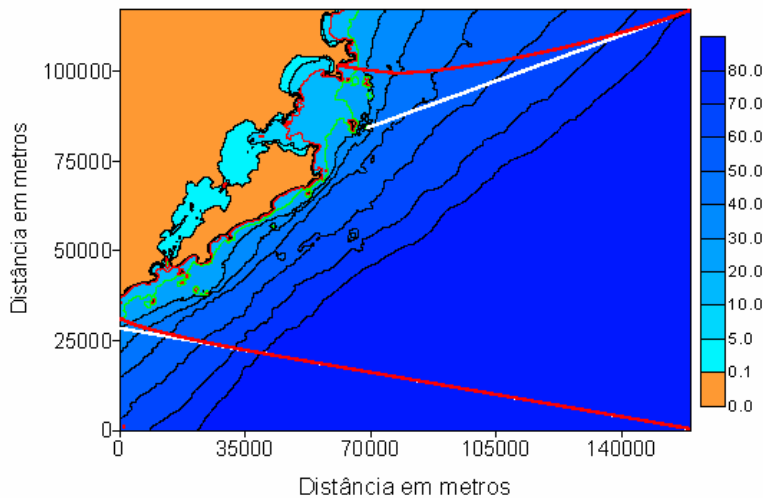


Figura 6.7 Grade 1 e os respectivos raios das direções limites.

A grade 1 foi utilizada para modelar as ondas da direção de 30° N até 65° N. O eixo-x desta grade possui a orientação de 055° N.

Posição geográfica da origem da Grade 1			
Latitude	28° 15' 2.5200"	Y utm	6872261 m
Longitude	28° 15' 2.5200"	X utm	754142 m

Tabela 6.5 Posição geográfica da origem da grade 1 nos referenciais utilizados.

Grade 2

A grade 2 foi utilizada para modelar as ondas da direção de 65° N até 105° N (inclusive). O eixo-x desta grade possui a orientação de 085° N.

Posição geográfica da origem da Grade 2			
Latitude	28° 13' 59.1600	Y utm	6874532 m
Longitude	48° 34' 0.1200	X utm	738781 m

Tabela 6.6 Posição geográfica da origem da grade 2 nos referenciais utilizados.

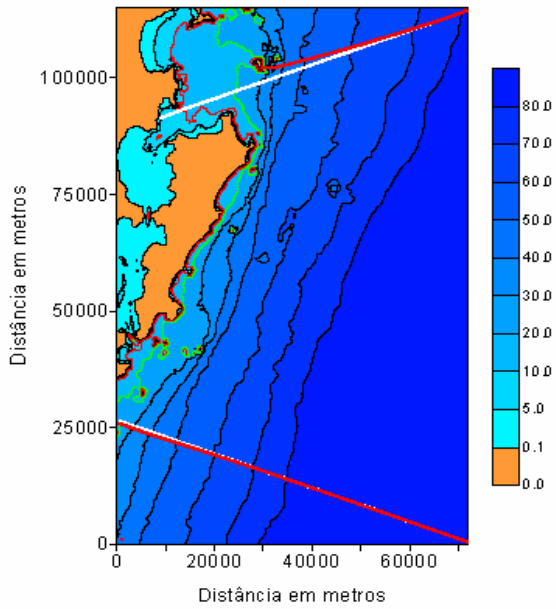


Figura 6.8 Grade 2 e os respectivos raios das direções limites.

Grade 3

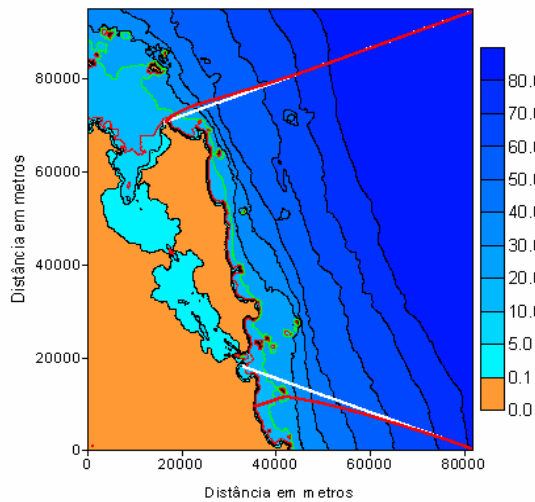


Figura 6.9 Grade 3 e os respectivos raios das direções limites.

A grade 3 foi utilizada para modelar as ondas da direção de 105° N (exclusive) até 145° N. O eixo-x desta grade possui a orientação de 125° N.

Posição geográfica da origem da Grade 3			
Latitude	27° 49' 6.6000"	Y utm	6921192 m
Longitude	48° 57' 41.0400	X utm	700808 m

Tabela 6.7 Posição geográfica da origem da grade 3 nos referenciais utilizados.

Grade 4

A grade 4 foi utilizada para modelar as ondas da direção de 145° N até 175° N. O eixo-x desta grade possui a orientação de 155° N.

Posição Geográfica da origem da Grade 4			
Latitude	27° 30' 39.2400	Y utm	6955570 m
Longitude	49° 08' 59.6400	X utm	682747 m

Tabela 6.8 Posição geográfica da origem da grade 4 nos referenciais utilizados.

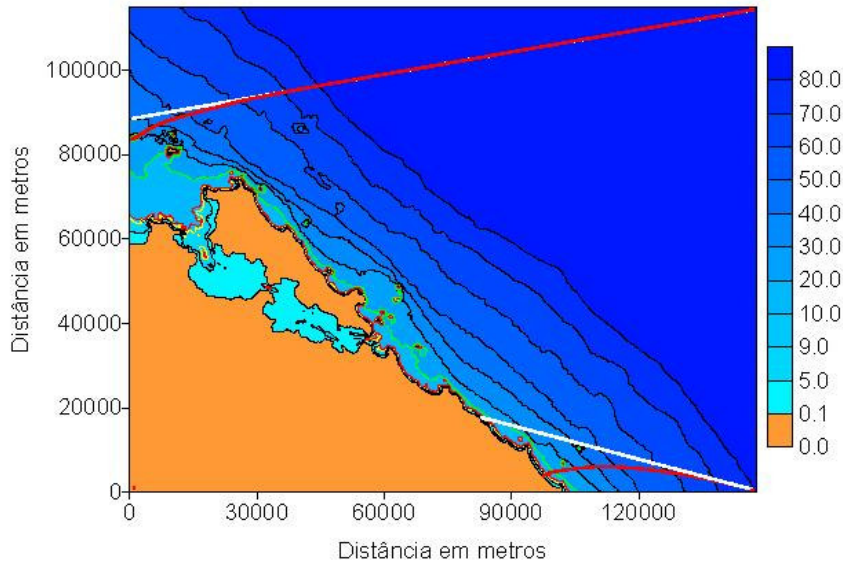


Figura 6.10 Grade 4 e os respectivos raios das direções limites.

Grade 5

A grade 5 foi utilizada para modelar as ondas de direção de 175° N até 210° N. O eixo-x desta grade possui a orientação de 175° N.

Posição geográfica da origem da Grade 5			
Latitude	27° 19' 53.4000	Y utm	6975391 m
Longitude	49° 06' 41.0400	X utm	686853 m

Tabela 6.9 Posição geográfica da origem da grade 5 nos referenciais utilizados.

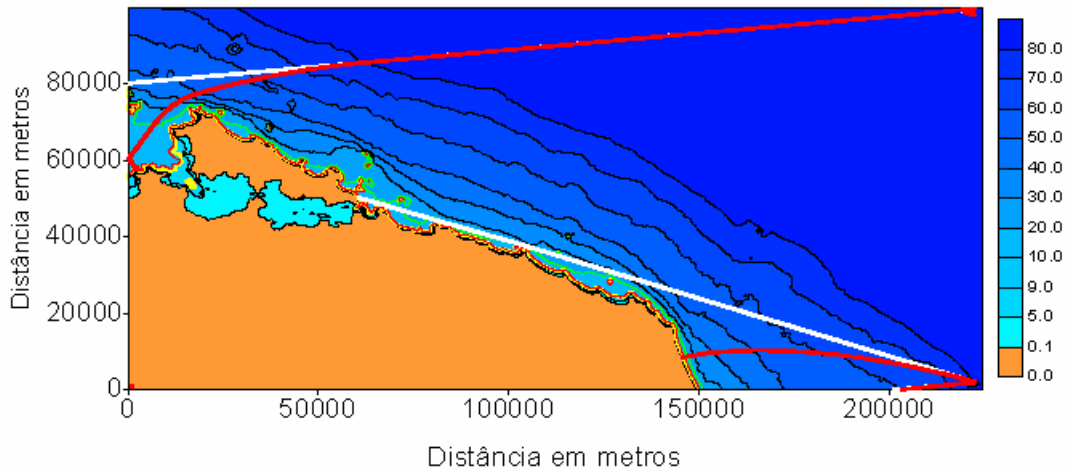


Figura 6.11 Grade 5 e os respectivos raios das direções limites.

6.5 Sobreposição das Soluções Numéricas

Para viabilizar a sobreposição das soluções numéricas que serão obtidas em cinco grades computacionais diferentes, foi demarcada uma área comum a todas as grades, a qual está mostrada na figura 6.12.

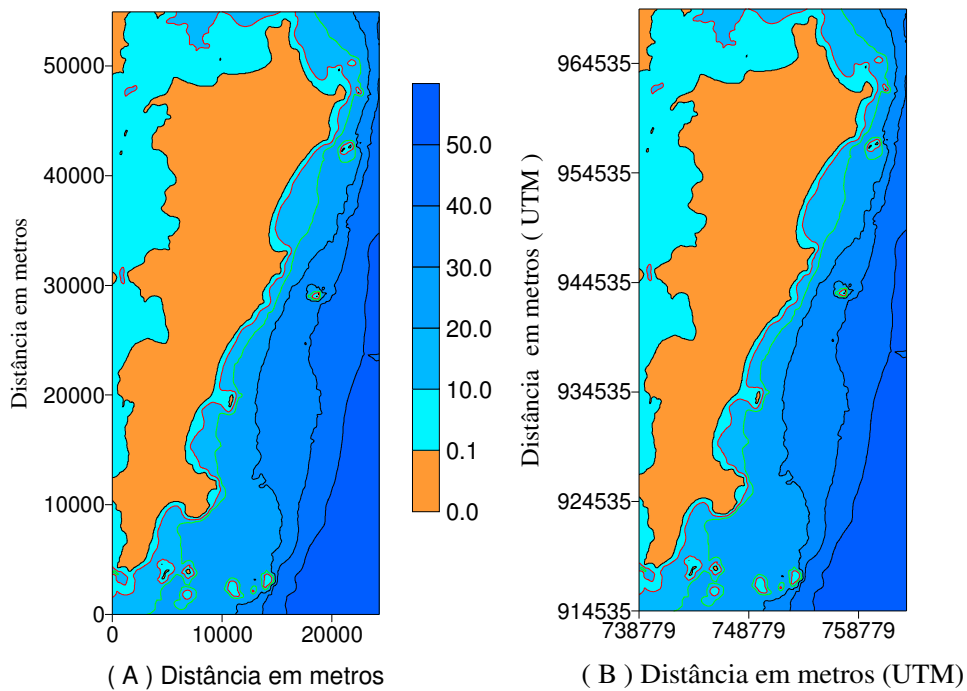


Figura 6.12 Área de interesse, comum a todas as grades computacionais.

A grade computacional da figura 6.12 (A), possui orientação Norte-Sul, ou seja, não há rotação em relação à direção Leste, assim, seus respectivos eixos horizontal e vertical também puderam ser expressos em metros, utilizando o referencial geográfico UTM, (Transverse Mercator Projection -22), figura 6.12 (B).

Posição geográfica da origem da área comum a todas as grades			
Latitude	27° 52' 20.2800	Y utm	6914535 m
Longitude	48° 34' 26.4000	X utm	737779 m

Tabela 6.10 Posição geográfica da origem da área comum nos referenciais utilizados.

Posição geográfica dos vértices da área comum de interesse em metros, utilizando o referencial geográfico UTM.

(738779, 6914535) “Origem”,

(738779, 6969522) “x origem, y máximo ”,

(763162, 6914535) “x máximo, y origem ”,

(763162, 6969522) “x máximo, y máximo ”

Esta área de interesse pode ser vinculada às cinco grades computacionais utilizadas para o cálculo das soluções numéricas a partir do valor de suas respectivas origens em UTM. Assim, as soluções numéricas puderam ser arquivadas neste referencial nos pontos pertencentes à área comum. Os espaçamentos longitudinais e transversais com os quais as soluções foram armazenadas foi de 10 metros.

Para cada uma das soluções arquivadas, foi gerada um nova grade de altura de onda com espaçamentos longitudinais e transversais pré-definidos de 50 metros, utilizando o método do vizinho mais próximo.

Desta forma, as soluções numéricas calculadas em diferentes grades computacionais puderam ter o campo de alturas de onda determinado nesta área de interesse comum em pontos coincidentes podendo assim ser sobrepostas.

A seguir, apresentam-se as grades computacionais definidas anteriormente com a área de interesse e a fronteira externa em destaque.

Grade 1:

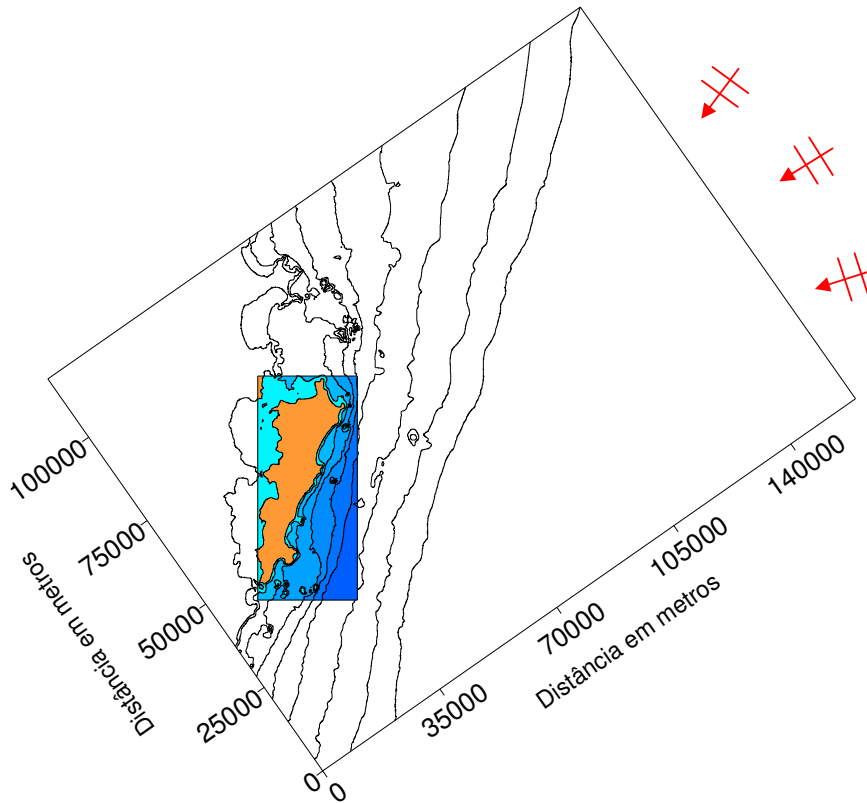


Figura 6.13 Grade 1 e a área de interesse comum a todas grades computacionais.

Grade 2:

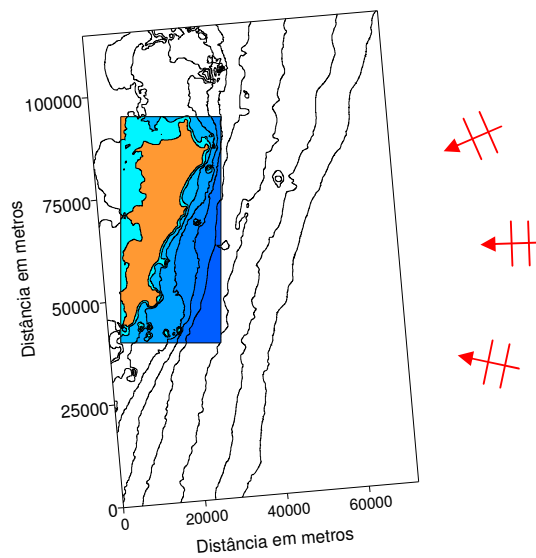


Figura 6.14 Grade 2 e a área de interesse comum a todas grades computacionais.

Grade 3:

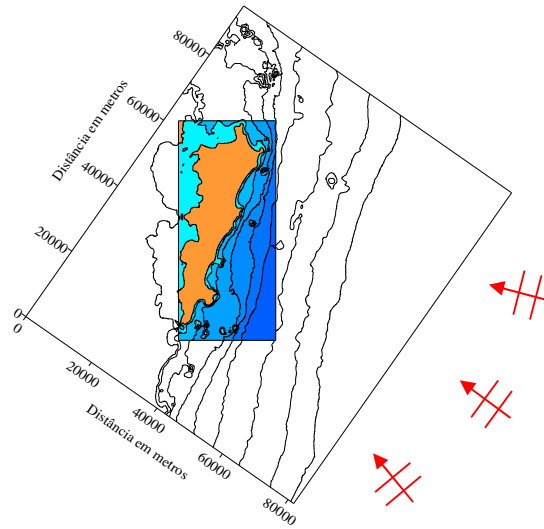


Figura 6.15 Grade 3 e a área de interesse comum a todas grades computacionais.

Grade 4:

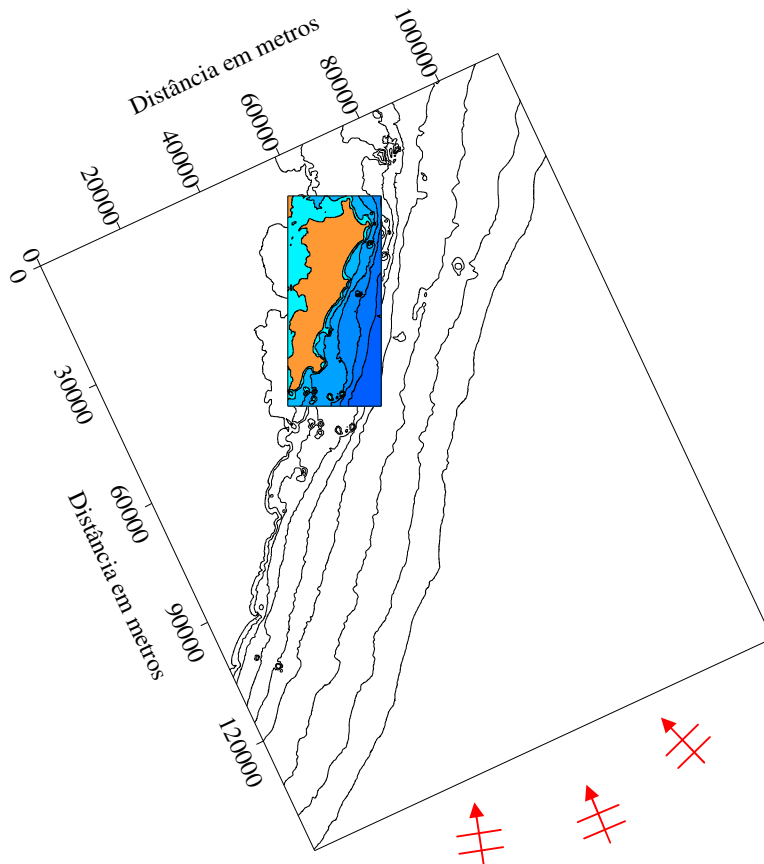


Figura 6.16 Grade 4 e a área de interesse comum a todas grades computacionais.

Grade 5:

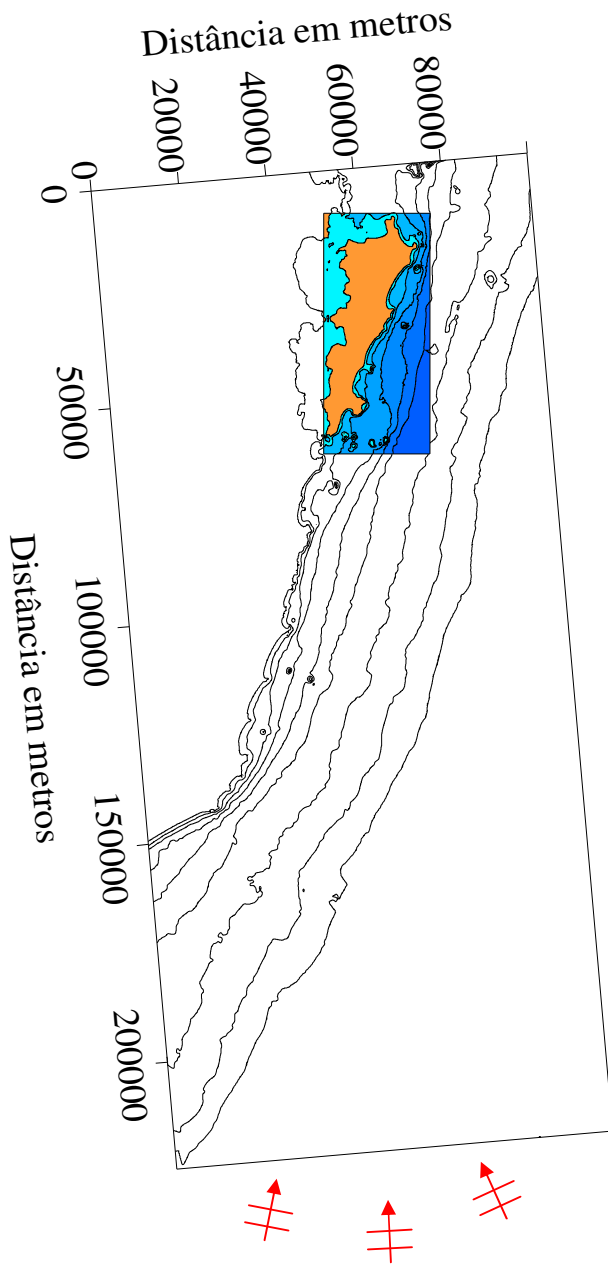


Figura 6.17 Grade 5 e a área de interesse comum a todas grades computacionais.

Com o esquema de sobreposição das soluções numéricas definido, as soluções numéricas foram calculadas para todas as possíveis componentes do espectro direcional da região ao largo e arquivadas apenas na área de interesse, comum a todas as grades.

6.6 Características do Modelo de Geração WW3

Simplificadamente, o modelo WW3 inclui os seguintes mecanismos físicos:

(a) Entrada de energia proveniente da atmosfera. (b) Redistribuição da energia entre componentes do espectro por efeitos não-lineares. (c) Dissipação de energia por arrebentação em águas profundas (“white-capping”). (d) Transporte de energia pela propagação das ondas pela superfície do oceano.

Os campos de vento utilizados pelo modelo são obtidos diretamente do banco de dados de domínio público da NOAA via Internet e executado em duas grades numéricas aninhadas: Grade “global” que usa o campo de ventos global para fazer previsões de onda igualmente globais e a grade “local” focalizando o Oceano Atlântico Sul. A grade global cobre toda a superfície marítima terrestre e utiliza análises e previsões de ventos na superfície com resolução de $1^\circ \times 1.25^\circ$. O modelo global fornece as condições de contorno para o modelo local e garante que ondas geradas fora da região coberta pela grade local possam ser incluídas na previsão. A grade local, cuja cobertura inclui toda costa brasileira tem uma resolução de $0,25 \times 0,25$ grau.

A discretização do modelo WW3 é feita com 25 frequências e 24 direções.

Frequência (Hz)	0.0418	0.0459	0.0505	0.0556	0.0612	0.0673	0.0740	
Períodos (s.)	23.923	21.786	19.802	17.986	16.340	14.859	13.514	
0.0814	0.0895	0.0985	0.1080	0.1190	0.1310	0.1440	0.1590	0.1740
12.285	11.173	10.152	9.259	8.403	7.634	6.944	6.289	5.747
0.1920	0.2110	0.2320	0.2550	0.2810	0.3090	0.3400	0.3740	0.4110
5.208	4.739	4.310	3.922	3.559	3.236	2.941	2.674	2.433

Tabela 6.11 Frequências e os períodos equivalentes utilizados pelo modelo WW3.

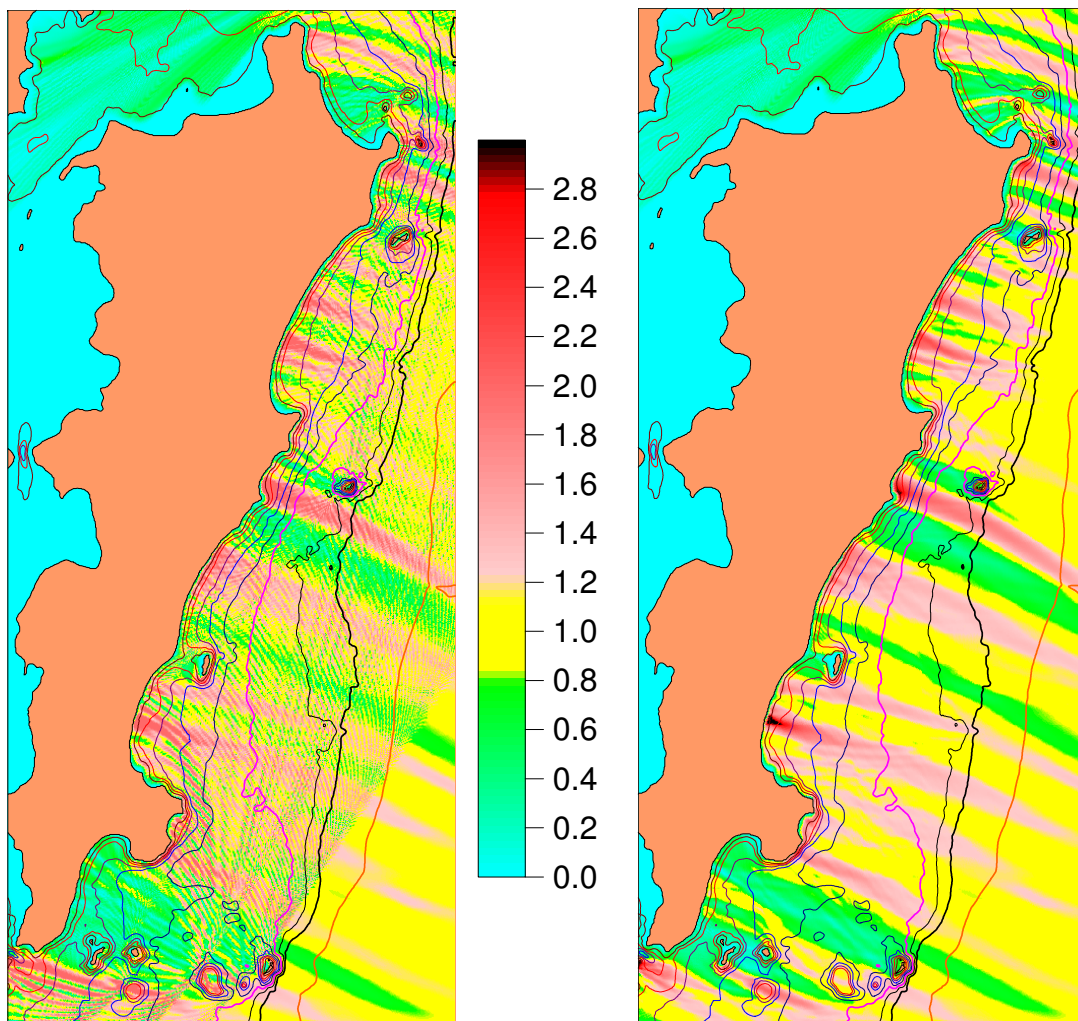
Direções (° N)	269.86	254.96	240.06	225.17	210.27	194.8	179.9
165.01	150.11	135.21	119.74	104.85	89.95	75.05	60.16
44.97	30.02	15.01	344.91	330.02	315.12	300.22	284.75

Tabela 6.12 Direções do espectro direcional do WW3 em relação ao Norte geográfico.

O cálculo das soluções numéricas das componentes cobriu todos os períodos indicados na tabela 6.5. Quanto às direções, foram utilizadas as definidas pelo setor de incidência de ondas da região, destacadas em negrito na tabela 6.6.

6.7 Áreas de Dissipação de Energia

Para exemplificar o efeito da utilização de áreas de dissipação de energia para modelar ilhas, são apresentados dois campos de alturas calculados um com o método da ilha película e outro com dissipação localizada de energia. No primeiro exemplo, o campo de altura de onda foi determinado na grade 3 com orientação de 125° N, para uma componente de direção 120° N com período 23.92 s. (o maior período do WW3).

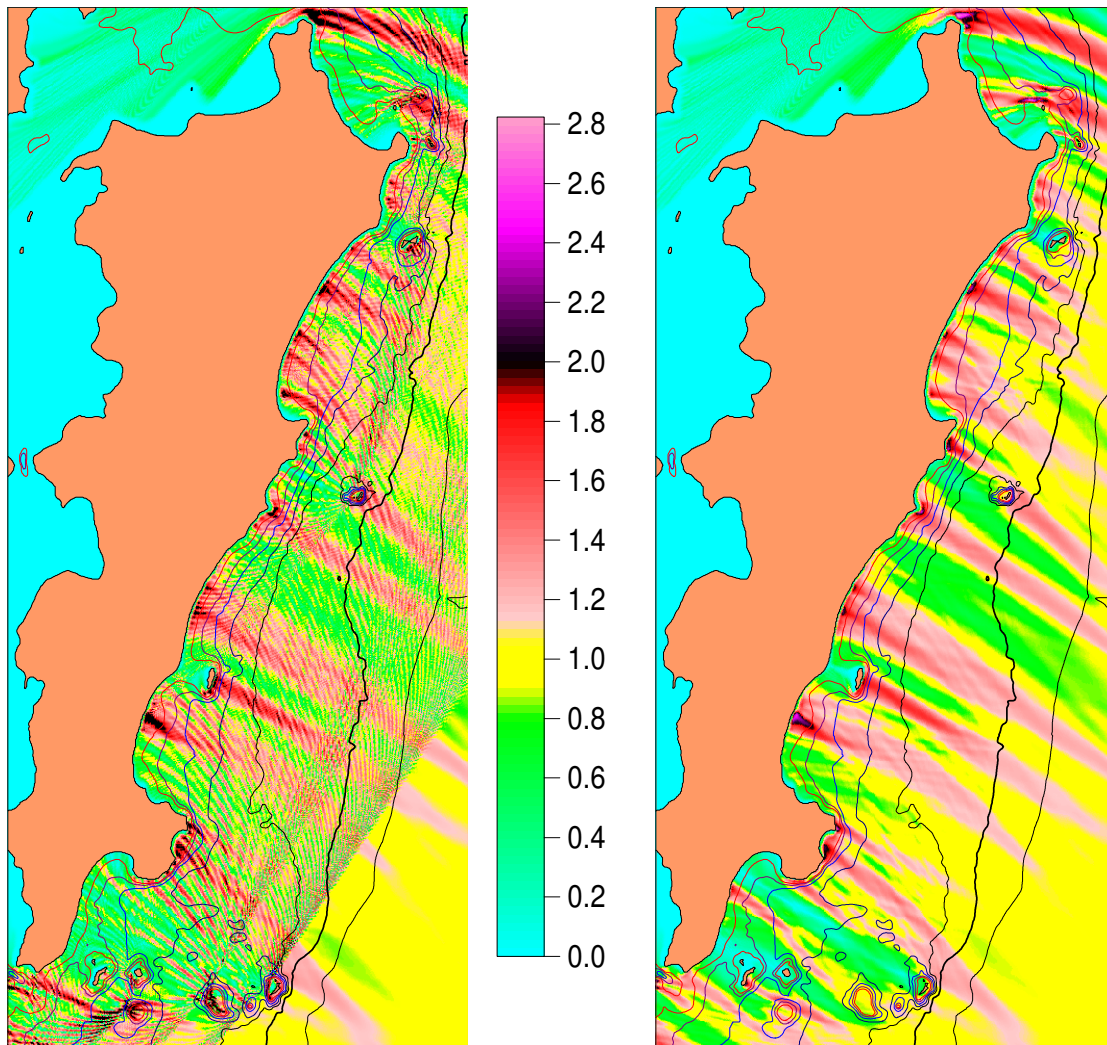


A) Ilha Película

B) Áreas de Dissipação de Energia

Figura 6.18 Exemplo 1 de utilização de áreas de dissipação de energia

No segundo exemplo o campo de altura de onda foi determinado na grade 3 com orientação de 125° N e direção 135° N com período 23.92 s.



A) Ilha Película

B) Áreas de Dissipação de Energia

Figura 6.19 Exemplo 2 de utilização de áreas de dissipação de energia

Nestes dois exemplos é possível perceber que a técnica utilizada apresentou bons resultados, grande parte do ruído numérico original foi eliminado. Os contornos de altura de onda, que na primeira figura aparecem encobertos pelo ruído, podem ser vistos claramente na segunda figura onde se usou áreas localizadas de dissipação de energia. Esta técnica foi utilizada para os campos de altura de onda calculados para todas as possíveis componentes espectrais. Desta forma, a presença de ruído numérico pode ser minimizada na determinação do campo de alturas das componentes individuais.

6.8 Aplicações

A idéia original deste trabalho era a de utilizar medições simultâneas de ondas, em águas profundas e em águas rasas, de modo a poder-se averiguar a capacidade da metodologia desenvolvida neste trabalho em prever o estado de mar. Entretanto, o ondógrafo direcional Datawell Mark II, que realizou as medições do P.I.C., apresentou problemas de funcionamento e teve de ser retirado da água. Além disto, os recursos destinados à aquisição de um ondógrafo de pressão que realizaria as medições de onda próximas da costa tiveram de ser redirecionados de modo que as medições que seriam utilizadas neste trabalho não puderam ser realizadas. Ao invés disso, restou a possibilidade de uma análise qualitativa através de observações visuais realizadas em diversas praias da região para dois casos escolhidos.

6.8.1 Aplicação 1

Na primeira aplicação, o sistema computacional foi utilizado na determinação do estado de mar para o dia 23 março 2006 para o horário das 9 horas. O espectro utilizado foi previsto com antecedência de 24 horas pelo modelo WW3. Apesar das condições do mar para este dia não serem de forte agitação marítima, este caso foi escolhido porque o espectro direcional apresenta a característica de um grande espalhamento angular. A metodologia deste trabalho foi desenvolvida visando uma maior acurácia nos resultados para casos como este.

Condição ao Largo

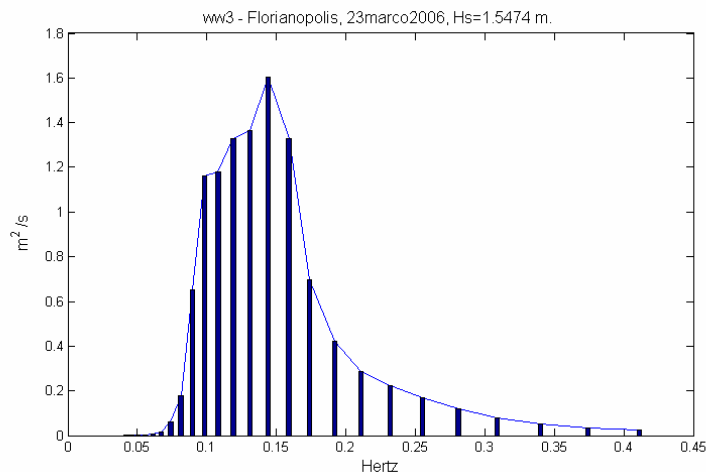


Figura 6.20 Espectro de frequência para o dia 23 de março de 2006, 9:00 horas.

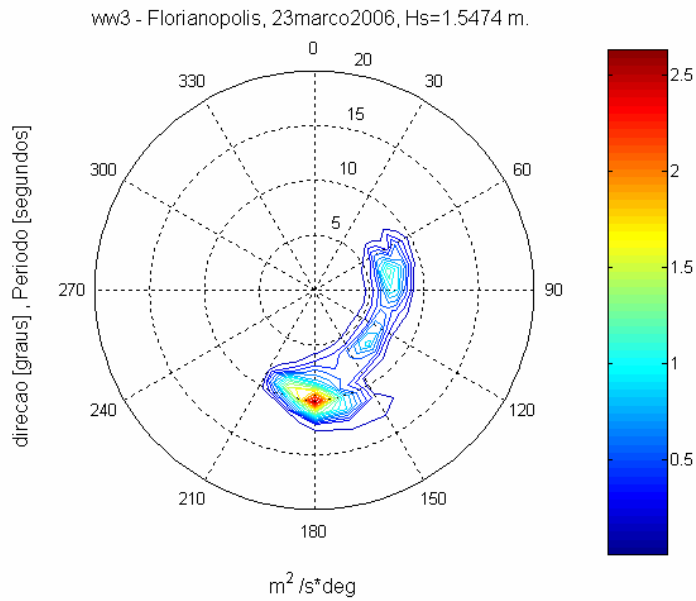


Figura 6.21 Espectro direcional para o dia 23 de março de 2006, 9:00 horas.

Condições Observadas

As informações de onda mostradas aqui, estão apresentadas de forma idêntica ao relatado nos “sites” de observação de onda para prática de surf de Florianópolis.

As observações visuais de altura de onda na arrebentação foram realizadas para as seguintes praias:

1-Praia do Moçambique (MB): Altura significativa estimada de 1.0 metro e ondas com boa formação.

2-Praia do Camping da Barra da Lagoa (CB): Altura significativa estimada de 0.5 metro, fechando um pouco.



Figura 6.22 Praia do Moçambique e praia do Camping da Barra, dia 23 de março de 2006.

3-Praia da Barra da Lagoa (BL): Altura significativa estimada menos de 0.5 metro. Ondas muito pequenas.



Figura 6.23 Praia da Barra da Lagoa dia 23 de março de 2006.

4-Praia Mole (PM): Altura significativa estimada de 1.0 metro. A formação é regular, ondas ao longo de toda praia, quebrando para os dois lados.

5- Praia da Joaquina (PJ): Altura significativa estimada de 1.0 metro. A formação é regular, ondas por toda praia.

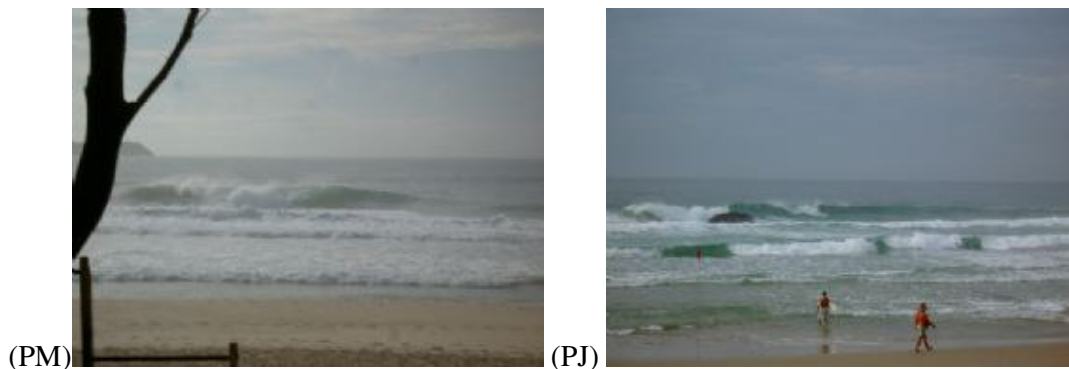


Figura 6.24 Praia Mole e praia da Joaquina no dia 23 de março de 2006.

6- Praia do Campeche (PC): Altura significativa estimada de menos de 0.5 metro. Mar praticamente sem ondas. Não há foto.

A seguir, estão mais algumas abreviaturas de praias da Ilha de Santa Catarina:

PB – Praia Brava

PI – Praia dos Ingleses

PS – Praia do Santinho

LL – Lagoinha do Leste

PS – Pântano do Sul.

Campo de Alturas Significativas

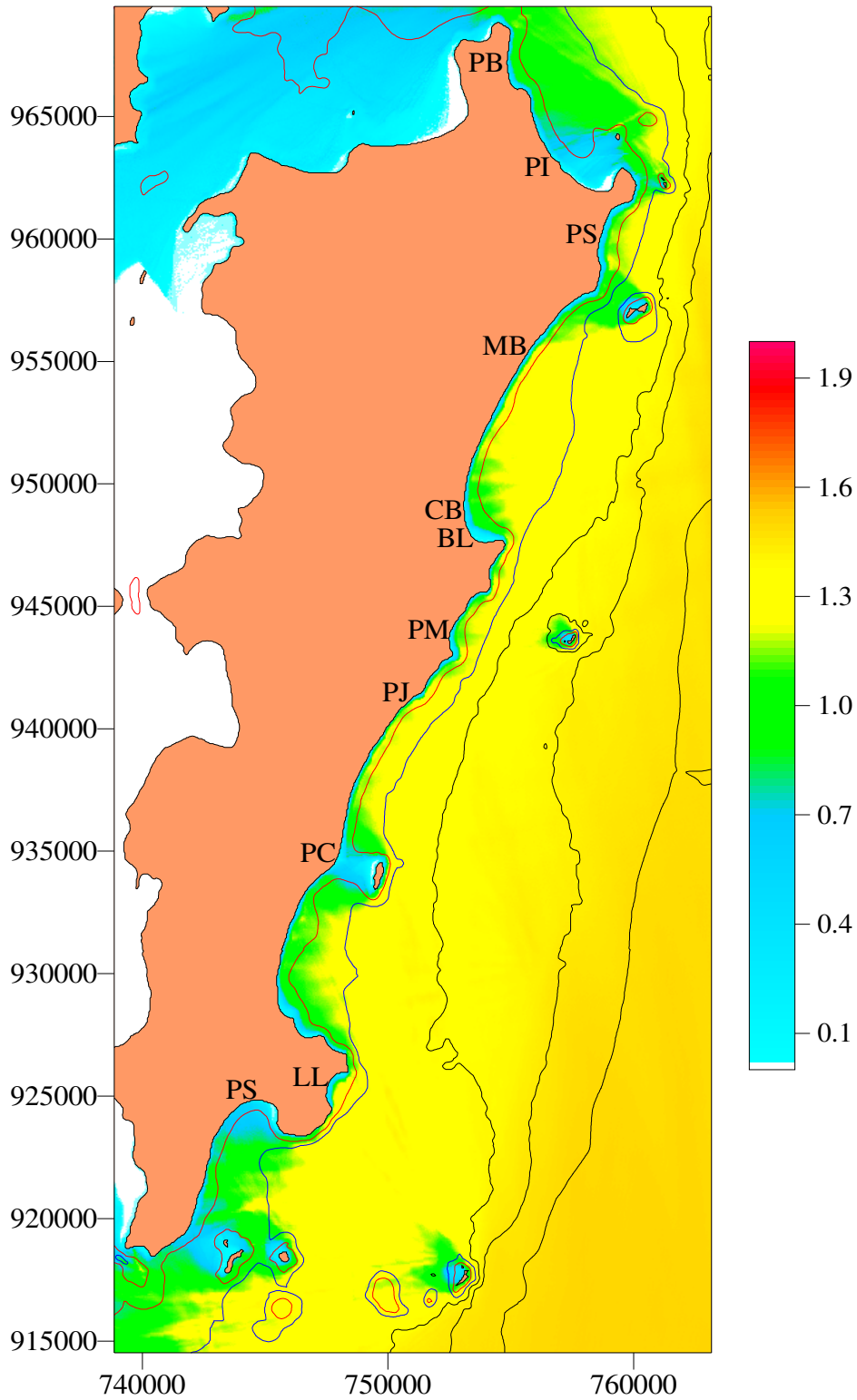


Figura 6.25 Campo de alturas significativas (em metros), determinado pelo sistema computacional para o dia 23 de março de 2006 às 9:00 horas.

Perfis de Altura de Onda

A seguir apresentam-se dois perfis de altura significativa de onda obtidos do campo de alturas significativas da figura 6.25. As variações espaciais de H_s foram coletadas ao longo das linhas batimétricas de 10 m. (figura 6.26) e 20 m. (figura 6.27).

PB PI PS MB BL PM PJ PC LL PS

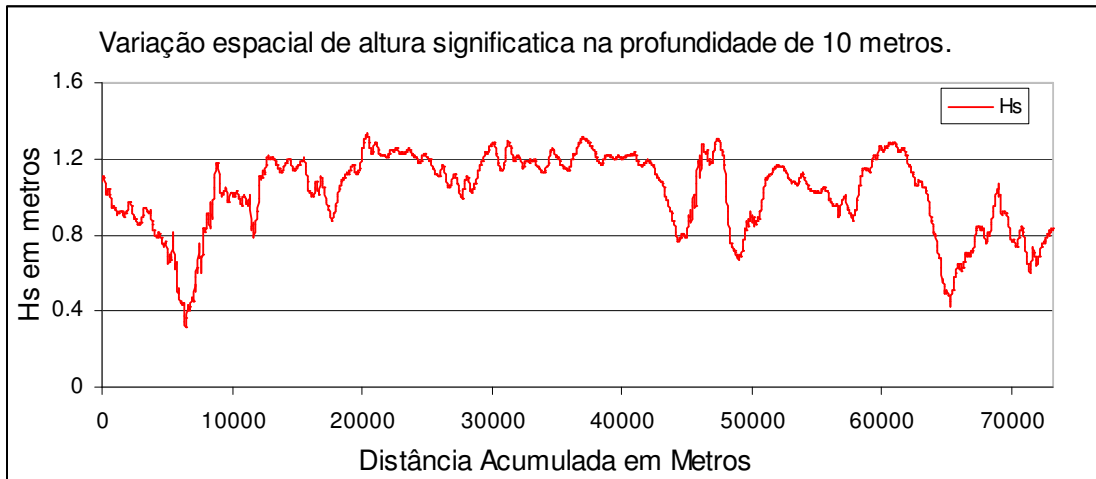


Figura 6.26 Variação espacial de H_s ao longo da batimétrica de 10 metros.

PB PI PS MB BL PM PJ PC LL

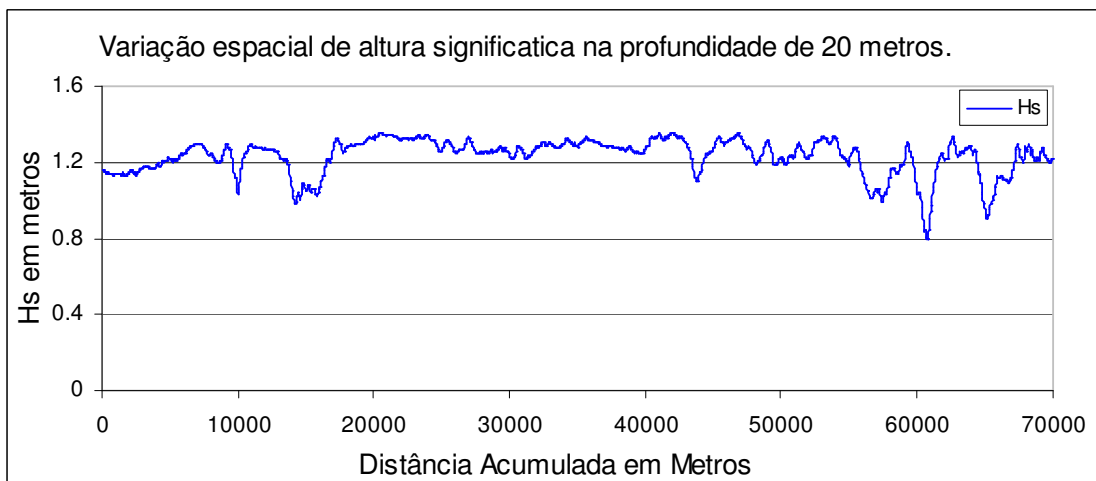


Figura 6.27 Variação espacial de H_s ao longo da batimétrica de 20 metros.

6.8.2 Aplicação 2

Na segunda aplicação, o sistema computacional foi utilizado na determinação do estado de mar para o dia 24 de abril de 2006, para o horário das 9 horas. O espectro utilizado foi calculado com as condições de vento do respectivo horário.

Este caso foi escolhido porque neste dia o mar apresentava forte agitação marítima com uma ondulação bem definida do quadrante S. Este é um mar característico da região da Ilha de Santa Catarina.

Condição ao Largo

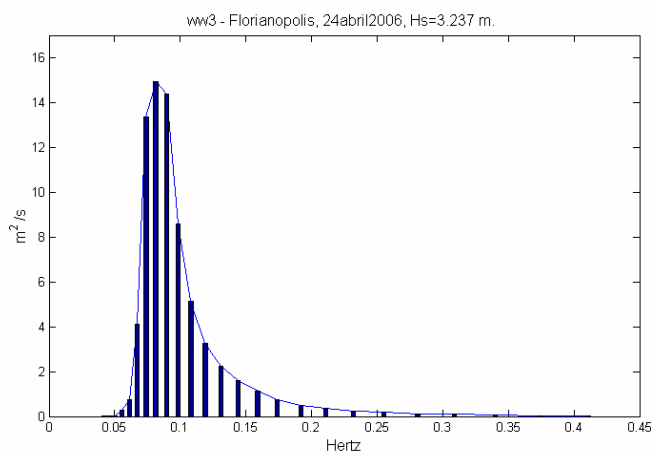


Figura 6.28 Espectro de frequência para o dia 24 de abril de 2006, 9:00 horas.

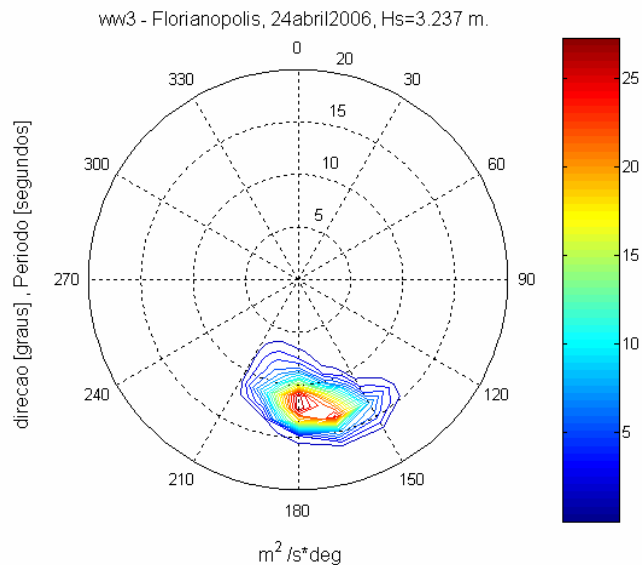


Figura 6.29 Espectro direcional para o dia 24 de abril de 2006, 9:00 horas.

Condições Observadas

As informações de onda mostradas aqui, estão apresentadas de forma idêntica ao relatado nos “sites” de observação de onda para prática de surf de Florianópolis.

1-Praia do Moçambique (MB):

Altura significativa estimada de 2.0 a 2.5 metros. Mar de ressaca e fechando por toda praia



(MB)

Figura 6.30 Praia do Moçambique no dia 24 de abril de 2006.

2-Praia do Camping da Barra da Lagoa (CB):

Altura significativa estimada de 1.0 a 1.5 metros, ondas fechando.

3-Praia da Barra da Lagoa (BL):

Altura significativa estimada menos de 0.5 metros, as ondas entram muito alinhadas, praticamente todas ondas fecham.



(CB)



(BL)

Figura 6.31 Praia do Camping da Barra e praia da Barra da Lagoa dia 24 de abril de 2006.

4- Praia Mole (PM):

Altura significativa estimada de 2.0 a 2.5 metros. No meio da praia as estão ondas muito grandes e fechando, já no canto direito da praia a condição está muito boa com ondas de 2 metros.



Figura 6.32 Praia Mole no dia 24 de abril de 2006.

5- Praia da Joaquina (PJ):

Altura significativa estimada de 2.0 a 2.5 metros. Ondas muito grandes em toda a praia, o mar acordou de ressaca.

6- Praia do Campeche (PC):

Altura significativa estimada 1.0 a 1.5 metros. Direitas ao longo da praia.



Figura 6.33 Praia da Joaquina e praia do Campeche no dia 24 de abril de 2006.

Campo de Alturas Significativas

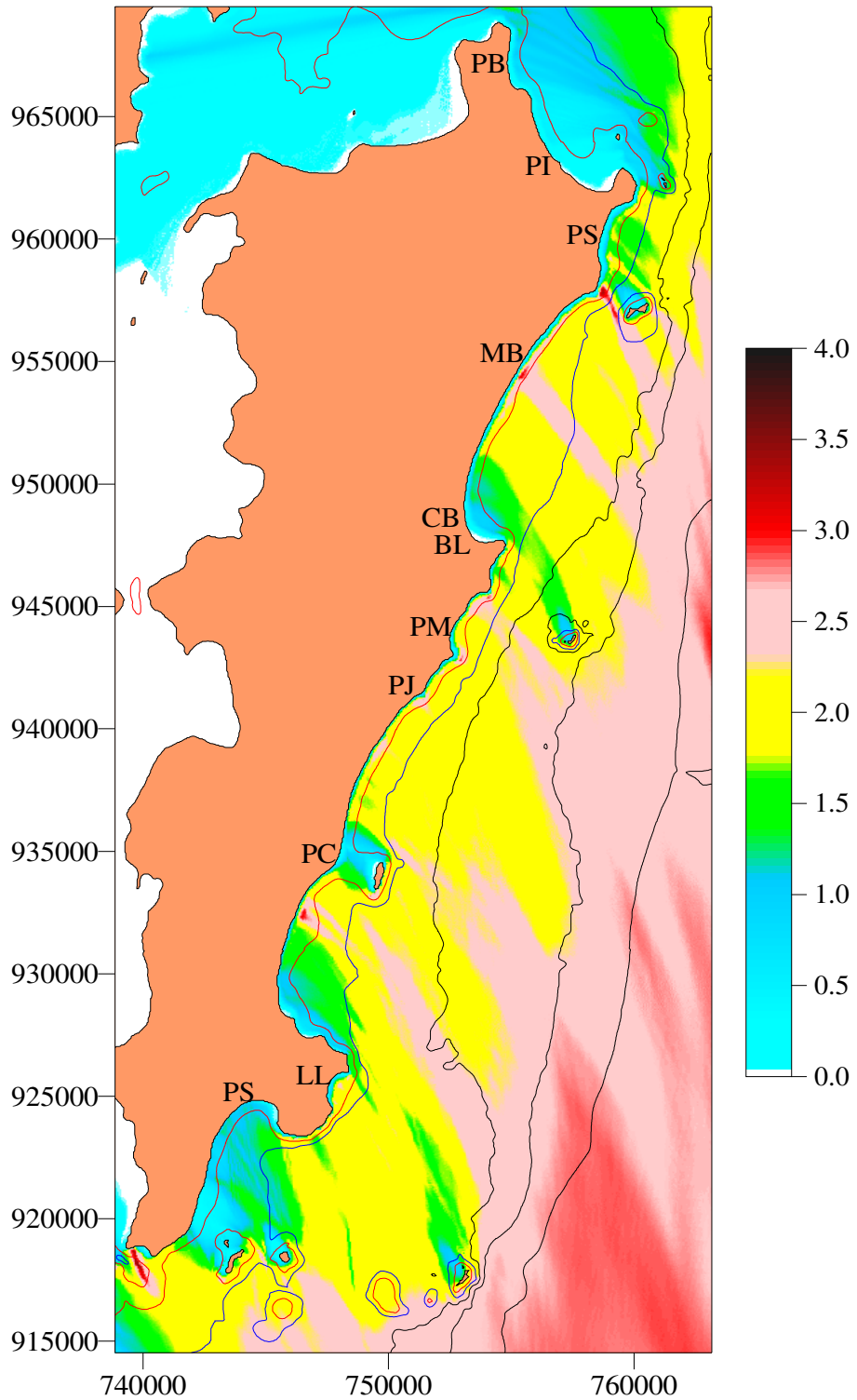


Figura 6.34 Campo de alturas significativas (em metros), determinado pelo sistema computacional para o dia 24 de abril de 2006 às 9:00 horas.

Perfil de Altura de Onda

A seguir apresentam-se dois perfis de altura significativa de onda obtidos do campo de alturas significativas da figura 6.34. As variações espaciais de Hs foram coletadas ao longo das linhas batimétricas de 10 m. (figura 6.35) e 20 m. (figura 6.36).

PB PI PS MB BL PM PJ PC LL PS

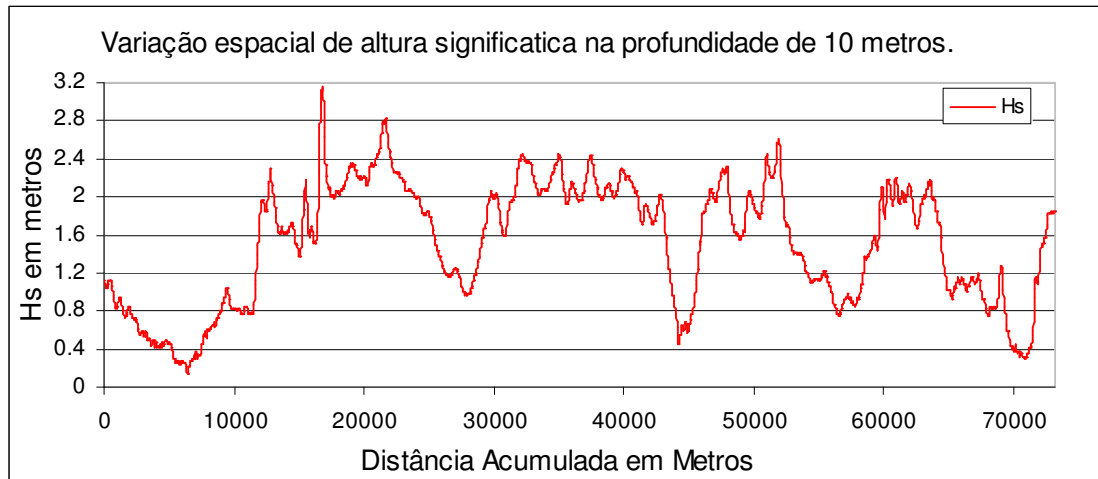


Figura 6.35 Variação espacial de Hs ao longo da batimétrica de 10 metros.

PB PI PS MB BL PM PJ PC LL

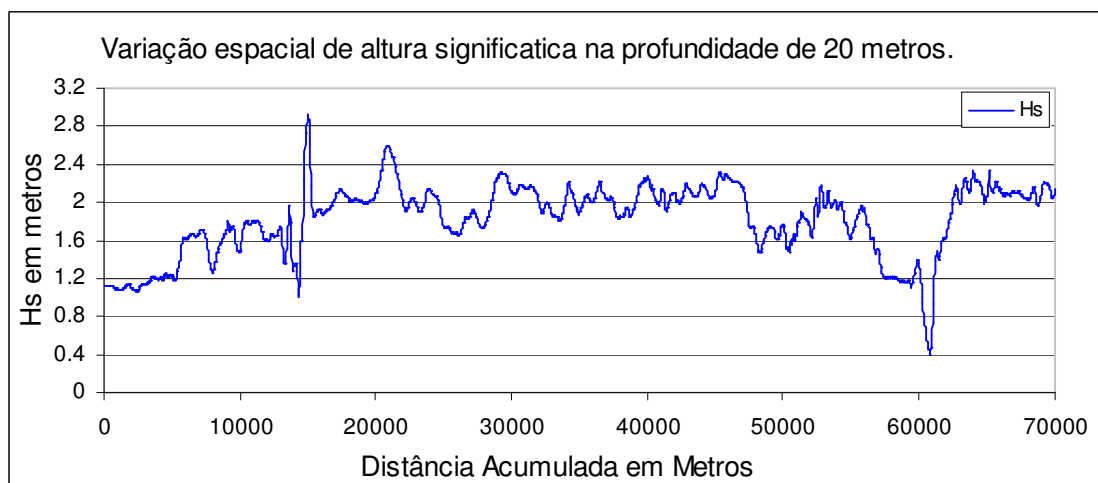


Figura 6.36 Variação espacial de Hs ao longo da batimétrica de 20 metros.

Resumo dos Resultados das Aplicações

Foi possível observar que para os dois campos de alturas significativas as condições determinadas pelo sistema computacional mostraram-se bastante coerentes com as observações visuais feitas em algumas praias. Este fato é pelo menos um indício de que a metodologia aplicada para o cálculo dos campos de alturas significativas pode prever o estado de mar em águas rasas de maneira satisfatória, entretanto sem medições a acurácia dos cálculos não poderá ser comprovada.

É importante ressaltar que no primeiro caso o espectro direcional utilizado foi um espectro previsto com 24 horas de antecedência, já podendo indicar que quanto melhor for a previsão mais próxima da situação real estará o campo de alturas significativas determinado pelo sistema computacional.

O caráter operacional nos cálculos foi alcançado com sucesso, visto que o tempo de execução para a determinação do campo de alturas significativas a partir do espectro direcional ao largo foi de 30 minutos. O computador utilizado apresentava a seguinte configuração: processador AMD 64 3200+ e 2 GB DDR 400 de memória RAM.

Em relação aos perfis de altura significativa, nota-se que para a profundidade de 20 metros as alturas são mais homogêneas não tão afetadas pela batimetria, entretanto na linha de profundidade 10 metros que é bem mais acidentada e em alguns trechos está bem próxima da costa o perfil das alturas significativas mostrou-se bem irregular ao longo da costa.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi estabelecer um sistema computacional que permitisse determinar de forma rápida e eficiente às condições do mar próximo à costa a partir de um espectro de ondas ao largo. A rapidez do método tem como base a hipótese da linearidade que permitiu que as soluções numéricas das componentes do espectro pudessem ser calculadas antecipadamente e o resultado final ser obtido através de uma simples sobreposição. A eficiência do método tem como base a utilização de diferentes grades computacionais com diferentes orientações de modo que a acurácia do cálculo da refração das ondas pudesse ser otimizada.

O primeiro passo deste trabalho foi à definição de uma metodologia para o cálculo do estado de mar próximo da costa, esta metodologia teve como base as características de utilização do modelo de refração-difração parabólico Melo(1990) com aperfeiçoamentos [Melo (2007)] e nas diversas opções de modelação possíveis de serem utilizadas.

Para a definição das opções de modelação que seriam utilizadas, o desempenho do modelo numérico foi analisado em relação à solução analítica de refração de ondas para um plano inclinado utilizando grades computacionais com diferentes orientações. Esta análise foi realizada em duas etapas diferentes. Na primeira etapa, ficou constatado que a orientação da grade computacional influencia a acurácia dos modelos de Refração-Difração parabólicos. Na segunda etapa, o modelo foi analisado para ângulos de 0° até 89° de diferença entre a incidência de onda na grade computacional e a direção normal aos contornos batimétricos, com os resultados encontrados para cada um destes ângulos efetivos foi possível identificar a melhor opção de modelação para o cálculo da refração de ondas.

Em relação aos espaçamentos longitudinais e transversais das grades computacionais utilizadas pelo modelo de Refração-Difração parabólico, foram nas grades com espaçamentos de $0.0625 L_0$ que ocorreram os melhores desempenhos. Com estes espaçamentos de grade garantiu-se a relação de 16 espaçamentos de grade por comprimento de onda no início da propagação e 5 espaçamentos de grade na profundidade de $0.05L$. Pode-se ainda esperar um melhor desempenho do modelo para espaçamentos ainda menores, entretanto, espaçamentos de grade excessivamente pequenos, facilitam o aparecimento e a propagação do ruído numérico no seu interior Romeu (2000). Assim, para grades computacionais dos modelos de Refração-Difração parabólicos pode-se recomendar a utilização de espaçamentos que garantam a relação mínima de 5 espaçamentos de grade por comprimento de onda, para os pontos onde se deseja calcular a altura das ondas.

Constatou-se que a forma de modelação mais utilizada pra contornos batimétricos rotacionados, opção (2) de modelação (que utiliza incidência normal de ondas nas grades computacionais e que passou despercebida na literatura), não apresentou os melhores resultados, ao invés disto, observou-se que, de maneira geral a opção (3) de modelação apresentou melhores resultados. Nesta opção de modelação a onda propaga-se por direções que divergem menos da direção principal da grade computacional, ou seja propaga-se desde ao largo até a costa em ângulos mais próximos aos da direção do eixo-x da grade computacional. Esta conclusão é válida tanto para o cálculo da altura como para o cálculo da direção de onda.

Devido à falta de medições, tanto em águas rasas como em águas profundas a acurácia dos cálculos realizados para determinação do estado de mar próximo da costa não pode ser averiguada, entretanto, foi possível constatar qualitativamente que as condições determinadas mostraram-se coerentes com as observações visuais. O que pode ser um indício de que a acurácia dos cálculos possa ser comprovada através de comparações com dados medidos. Esta averiguação fica como uma das recomendações deste trabalho.

Na aplicação do método operacional neste trabalho, foi utilizado o critério de discretização do modelo de geração de ondas WW3. Poderia-se a partir deste espectro redefinir um novo critério de discretização com um número maior de frequências e direções. A alternativa é dividir e redistribuir a densidade de energia prevista para as componentes do espectro em sub componentes dentro do próprio intervalo de densidade

de energia. Esta subdivisão poderia ser em direção e/ou frequência, este procedimento modificaria o fato de que toda a energia de uma componente espectral ser propagada exclusivamente na direção central e na frequência central da componente espectral, por exemplo, para a componente espectral de direção Leste, poder-se-ia subdividir em 3 partes no que diz respeito à direção. Ao invés de propagar toda energia na direção central (Leste= 90° N), poder-se-ia propagar parte da energia na direção 85° N, parte na direção 90° N e , parte na direção 95° N. Esta questão poderá ser estudada e testada futuramente, a justificativa para esta investigação deve-se ao fato de que o modelo de geração de ondas concentra toda a energia calculada para uma determinada componente espectral na sua frequência central e na sua direção central.

Com o sistema computacional confeccionado, as aplicações do método mostraram que o caráter operacional nos cálculos foi alcançado com sucesso, visto que o tempo de execução para a determinação do campo de alturas significativas a partir do espectro direcional ao largo foi de 30 minutos. Desta forma pode-se, por exemplo, utilizar este método para fazer a previsão das condições do mar com vários dias de antecedência, a partir de espectros direcionais previstos pelo modelo de geração WW3. sabendo-se que quanto melhor for à previsão mais confiável será o campo de alturas significativas determinado pelo sistema computacional.

Apesar das condições determinadas pelo sistema computacional mostrarem-se coerentes com as observações visuais e o tempo de execução dos cálculos para determinação do campo de altura de ondas ser de apenas 30 minutos, a confecção e utilização deste sistema computacional é indicada somente para casos onde a determinação do estado de mar será realizada de forma operacional. Confeccionar o sistema computacional e aplicá-lo a um único caso não é recomendável, visto que o tempo de preparação do sistema computacional, desde a escolha do critério de discretização, determinação do número de grades computacionais, confecção destas grades, cálculo das soluções numéricas monocromáticas para todas as possíveis componentes do espectro ao largo, entre outros, pode durar mais do que alguns meses.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, C. E. S.; FRANCO, D.; MELO, E.; PIMENTA, F. M. Wave Regime Characteristics of the Southern Brazilian Coast: In: COPEDEC VI, 2003, Colombo, **Proceedings & Book of Abstracts**, Colombo, Sri Lanka, 2003, CD press.

BARLETTA, R. C. **Teste e Aplicação de Modelos Parabólicos de Refração-Difração com Ênfase na Propagação de Ondas Sobre Parcéis**. 2006. 137 p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

BERKHOFF, J. C. W. Computations of Combined Refraction-Diffraction: In: CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING ASCE, 13th, 1972, Vancouver; **Proceedings 13th Conference on Coastal Engineering**, Vancouver, 1972, p. 471-490.

BOOIJ, N. **Gravity Waves on Water with Non-Uniform Depth and Current**. 1981. 131p. Tese de Doutorado, Delft University, Delft, 1981.

DALRYMPLE, R. A; KIRBY, J. T.; HWANG P. A. Wave Diffraction Due To Areas of Energy Dissipation. **J. of waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.**, v. 110, n. 1, p. 67-79. 1984.

DALRYMPLE, R. A; KIRBY, J. Models for Very Wide-Angle Water Waves and Wave Diffraction. **J. Fluid Mech.**, v. 192, p. 33-55. 1988.

GUZA, R. T.; THORNTON, E. B. Local and Shoaled comparisons of sea surface elevations, pressures and velocities., **J. Geophys. Res.**, v. 85, C3, p. 1524-1530, 1980.

KIRBY, J. T. Higher-Order Approximation in the Parabolic Equation Method for Water Waves. **Journal of Geophysical Research**, v. 91(C1), p. 933-952. 1986a.

KIRBY, J. T. Rational Approximations in the Parabolic Equation Method for Water Waves. **Coastal Engineering**. n. 10, p. 355-378. 1986b.

KIRBY, J. T. Open Boundary Condition in Parabolic Equation Method. ASCE, **J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.**, v. 112, n. 3, p. 460-465. 1986c.

KIRBY, J. T.; DALRYMPLE, R. A. Modeling Waves in Surf Zones and Around Islands. **J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.**, v. 112, n. 1, p. 78-93. 1986.

KIRBY, J. T.; OZKAN, H. T. **Combined Refraction/Diffraction Model for Spectral Wave Conditions**. Documentation and User's Manual. Department of Civil Engineering University of Delaware: CACR Report, 1994. 128 p. n. 94-04.

KIRBY, J. T. Non linear, Dispersive Long Waves in Water of Variable Depth In: Hunt J. N. **Gravity Waves in Water of Finite Depth**. RG6 6AF, UK: Department of Mathematics, University of Reading Whiteknights, 1997. p. 55-125.

LIU, P. L.-F; YOON, S. B; DALRYMPLE, R. A. Wave Reflection from Energy Dissipation Region. **J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.**, v. 112, n. 6, p. 632-644. 1986.

LIU, P. L.-F. Wave Transformation. In: **Ocean Engineering Science - The Sea**. New York: Wiley-Interscience, 1991. v. 9 – Part A, p. 27-63.

MELO, E. **Wave Propagation in a Jettied Entrance Channel**. 1990. 82 p. Tese de Doutorado, University of California, San Diego, 1990.

MELO, E.; PIMENTA, F. M.; MENDES, D. A. R.; HAMMES, G. R.; ARAÚJO, C. E. S.; FRANCO, D.; ALVES, J. H. G. M.; BARLETTA, R. C.; SOUTO, A. M.; CASTELÃO, G.; PEREIRA, N.C. & BRANCO, F. B. A Real Time, On-line Coastal Information Program in Brazil. In: COPEDEC VI, 2003, Colombo, **Proceedings & Book of Abstracts**. Colombo, Sri Lanka. 2003, CD press.

MELO, E. Programa de Informação Costeira on Line: Um Balanço dos Primeiros dois Anos de Funcionamento. In: SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA, 2004. Rio Grande. **Anais do Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica**. Rio Grande. 2004. Publicado em CD, sem paginação, 23 p.

MELO, E. **Revisão da Teoria de Modelos Lineares de Propagação de Onda.** Florianópolis, em preparação 2007.

O'REILLY, W. C; GUZA, R. T. Comparison of Spectral Refraction and Refraction - Diffraction Waves Models. **J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.**, v. 117, n. 3, p. 199-215. 1991.

O'REILLY, W. C; GUZA, R. T. A Comparison of Two Spectral Wave Models in Southern California Bight. **Coastal Engineering.** v. 3, n. 19, p. 263-289. 1993.

PEREGRINE, D. H. **Interaction of water waves and currents.** Advances in Applied Mechanics. 17. 1976. 117 p.

RADDER, A. C. On the Parabolic Equation Method for Water Wave Propagation. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 95, p. 159-176. 1979.

REGO, V. **Refração-difração de Ondas Irregulares: Aplicação à Praia de Ipanema-Leblon.** 1992. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Prog. Eng^a. Oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1992.

ROMEU, M.A.R. **Refração-Difração de Ondas: Inclusão de Ilhas Por Meio de Áreas de Dissipação de Energia.** 2000. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

ROMEU, M.A.R.; ELOI, M.; DAVIDE, F.; BARLETTA, R. C. Testes Iniciais com Áreas de Dissipação de Energia Visando a Diminuição do Ruído Numérico para Modelos RefDif. In: SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA, 2006, Rio Grande. **Anais do Semengo'06 II Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica.** Rio Grande. 2006. Publicado em CD, sem paginação, 16 p.

VICENT, C. L; BRIGGS, M. J. Refraction-Diffraction of Irregular Waves Over a Mound. **J. of waterway, Port, Coastal and ocean.** v. 115, n. 2, p. 269-284. 1989.

APÊNDICE A

SOLUÇÃO ANALÍTICA DE REFRAÇÃO

Utilizando a teoria da refração de ondas é possível determinar uma solução analítica para a altura e direção de ondas propagando-se sobre contornos batimétricos idealizados, nos quais as variações na profundidade ocorrem exclusivamente na direção perpendicular à costa $h=h(x)$. Existe uma única restrição a esta Solução Analítica é a de que a declividade do fundo seja suave (não necessariamente constante). Primeiramente, utilizou-se a equação da irrotacionalidade do número de onda:

$$\nabla \times \vec{k} = 0 \quad (\text{A.1})$$

Substituindo-se os componentes do vetor número de onda \vec{k} produz:

$$\frac{\partial(k \sin \theta)}{\partial x} - \frac{\partial(k \cos \theta)}{\partial y} = 0 \quad (\text{A.2})$$

Como a profundidade não varia na direção y (paralela à costa), a derivada parcial em relação à y na equação anterior é nula, logo:

$$k \sin \theta = \text{constante} \quad (\text{A.3})$$

Portanto a projeção do número de onda ao longo da costa é uma constante, utilizando a relação $C = \sigma/k$, onde σ é constante, tem-se que:

$$\frac{\sin \theta}{C} = \text{constante} \quad (\text{A.4})$$

Este valor constante pode ser rapidamente encontrado para águas profundas produzindo assim a lei de Snell:

$$\frac{\sin \theta_x}{C_x} = \frac{\sin \theta_0}{C_0} \quad (\text{A.5})$$

Onde o sub-índice 0 (zero) indica as condições iniciais da onda ao largo

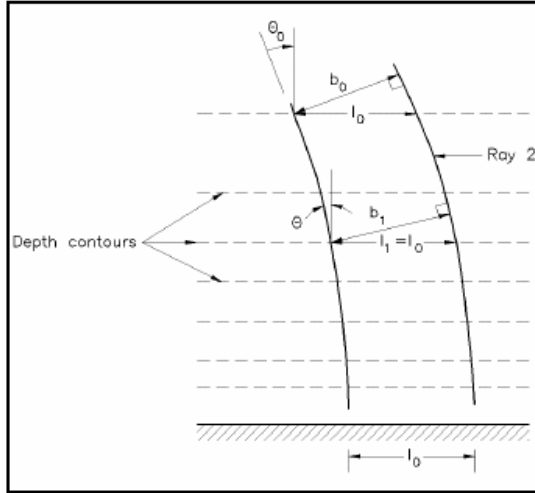


Figura A.1 Características dos raios de onda refratando sobre uma batimetria idealizada.

A velocidade da onda num determinado ponto (x,y) , de profundidade conhecida pode ser encontrada através da relação de dispersão: $\sigma^2 = gk \tanh kd$, equação (2.3).

Assim utilizando-se a lei de Snell o valor da direção da onda pode ser calculado:

$$\theta_x = \arcsin \left[\frac{C_x}{C_o} \sin \theta_o \right] \quad (\text{A.6})$$

Encontra-se $Cg(x,y)$ pela equação (2.2):

$$C_g = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = \frac{C}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$$

Encontra-se a amplitude da onda em (x,y) , pela equação:

$$(a^2 Cg)_{(x)} b_{(x)} = (a^2 Cg)_o b_o \quad (\text{A.7})$$

Como os contornos batimétricos são retos e paralelos tem-se que:

$$b_o = l_o \cos \theta_o \quad (\text{A.8})$$

$$b_{(x)} = l_o \cos \theta_{(x)} \quad (\text{A.9})$$

Assim, a amplitude da onda pode ser calculada para o ponto (x,y) por:

$$a_{(x)} = a_o \sqrt{\frac{Cg_o}{Cg_{(x)}}} \sqrt{\frac{\cos \theta_o}{\cos \theta_{(x)}}} \quad (\text{A.10})$$

APÊNDICE B

INCLUSÃO DE ÁREAS DE DISSIPAÇÃO DE ENERGIA

Para incluírem-se áreas de dissipação de energia no modelo de refração-difração, deve-se retornar à forma final da Equação do declive Suave, equação (2.1), que inclui efeitos de refração e difração combinados:

$$\nabla_H \cdot (CC_g \nabla_H \phi) + k^2 CC_g \phi = 0$$

e incluir um termo extra, responsável pela dissipação de energia, Booij (1981).

A equação do declive suave com a inclusão do termo sugerido por Booij, para a dissipação de energia tem a forma:

$$\nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \phi) + (k^2 CC_g + i\sigma W)\phi = 0 \quad (\text{B.1})$$

Onde:

$$W = \frac{\nabla_h \cdot (EC_g)}{E} \quad (\text{B.2})$$

Onde W representa uma taxa de dissipação de energia por unidade de área e por unidade de energia E .

Observa-se que a inclusão da dissipação de energia feita acima admite implicitamente que a estrutura vertical do potencial de onda e a relação de dispersão não sejam afetadas pela dissipação.

Os procedimentos para encontrar-se a forma final da aproximação parabólica para a equação do declive suave com a inclusão de dissipação de energia são os mesmos utilizados para a versão sem dissipação de energia, bastando para tanto substituir k_c na equação (2.10) por K_D , dado por:

$$K_D^2 = k^2 \sqrt{1 + \frac{iW}{kC_g}} \quad (\text{B.3})$$

Dependendo da natureza da dissipação, o valor de W assume diferentes valores. No trabalho de Dalrymple, Kirby e Hwang (1984), avaliam-se diferentes formas de W para diferentes mecanismos de dissipação de energia, tais como atrito com o fundo, presença de bancos de algas, e arrebentação de ondas.

Se a dissipação for um processo localizado, como é o caso neste trabalho, W se torna uma função das coordenadas espaciais, $W = W(x, y)$. Em regiões onde não existe dissipação $W = 0$, e $K_D = k_c$, como anteriormente.

Neste trabalho não há necessidade de associar o valor de W a um determinado tipo específico de dissipação. Assim, define-se uma nova variável, chamada de fator de dissipação e representada pôr f_d .

$$f_d = \frac{W}{kC_g} \quad (\text{B.4})$$

de maneira que o valor de K_D fique definido em função de f_d :

$$K_D^2 = k^2 \sqrt{1 + if_d} \quad (\text{B.5})$$

A forma final da aproximação parabólica utilizando a aproximação de Padé com um termo extra, incluindo dissipação de energia, continua sendo a equação (2.10), com k_c substituído por K_D :

$$\frac{\partial A}{\partial x} + \left[i(k_o - k_D) + \frac{1}{2k_D} \frac{\partial k_D}{\partial x} \right] A + \frac{1}{4k_D^2} \frac{\partial^3 A}{\partial x \partial y^2} + \left[i \left(\frac{k_o}{4k_D^2} - \frac{3}{4k_D} \right) - \frac{3}{8k_D^3} \frac{\partial k_D}{\partial x} \right] \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{B.6})$$