

Propagação de onda sobre parcéis

Rodrigo do Carmo Barletta¹, Davide Franco² e Elói Melo Filho³

Laboratório de Hidráulica Marítima – UFSC. Cx. Po. 5039, Florianópolis, SC. 88040-970

rcb@ens.ufsc.br, franco@ens.ufsc.br, emf@ens.ufsc.br

RESUMO: A antepaia do litoral central do Rio Grande do Sul (RS) apresenta batimetria composta por parcéis. Com o objetivo de averiguar o comportamento de ondas que se propagam sobre parcéis, uma série de experimentos numéricos de propagação de ondas sobre “calotas” idealizadas foram realizados com os modelos REF-DIF 1 e REF-DIF S. Foram geradas batimetrias hipotéticas na forma de parcéis esféricos e elípticos sobre fundos planos e inclinados, além de combinações de duas “calotas”. Os testes mostraram que o espalhamento direcional do espectro de ondas, a forma, profundidade e a distância que a onda refrata sobre os parcéis determinam as características da focalização e distribuição de alturas de onda atrás dos mesmos. Parcéis em águas intermediárias e rasas focalizam energia causando padrões complicados no campo de ondas em águas mais rasas, o que facilita a formação de correntes e provavelmente trocas de sedimentos em regiões próximas.

PALAVRAS-CHAVE: Parcéis, experimento numérico, focalização de energia.

ABSTRACT: The Rio Grande do Sul state central coast backshore has a bottom composed of shoals. To investigate the behavior of wave propagation over shoals a series of numerical experiments were realized with REF DIF 1 and REF DIF S models. Hypothetical spherical and elliptical bathymetries over flat and sloped bottoms were generated, and combinations of 2 shoals were created. The tests determined the wave spectra directional spreading, shoal forms, bottom depth and that the distance the wave refracts over shoals rules the characteristics of focalization and wave heights distribution behind these features. Intermediate and shallow water shoals focus energy causing complex patterns in shallower water wave fields, yielding current formation and potential sediment change in the vicinity of these areas.

KEYWORDS: Shoals, numerical experiments, wave energy focus.

1. INTRODUÇÃO

A antepaia e plataforma interna do litoral central do Rio Grande do Sul (RS) apresentam batimetria composta por bancos arenosos e parcéis. Trabalhos de modelagem de ondas realizados, como o mostrado por Calliari *et al.* [4], para esta região concluem que tais parcéis causam zonas de focalização de energia de ondas em águas rasas. Com o objetivo de averiguar com maior detalhe o comportamento de ondas que se propagam sobre parcéis, este trabalho mostra uma série de experimentos numéricos de propagação de ondas sobre “calotas” idealizadas. Tentou-se averiguar como a forma, quantidade e profundidade destes parcéis influenciam os processos e transformações sofridas pelas ondas. A modelagem foi realizada com modelos parabólicos REF-DIF 1 e REF-DIF S fracamente não lineares com teoria mista de Stokes com teoria empírica de Hedges [7], usando uma aproximação parabólica de Padé. Detalhes sobre o embasamento teórico e aplicações destes modelos podem ser achados em Kirby [9], Kirby [10], Kirby e Özkan [11] e também em Barletta [1]. Aferições e testes estatísticos de acurácia destes modelos monocromáticos e espectrais foram realizados numericamente por Barletta [1], que para este fim, comparou as saídas dos modelos com

dados de experimentos com parcéis construídos em tanques hidráulicos, realizados por Berkhoff *et al.* [2] e Chawla [5].

As batimetrias idealizadas dos parcéis, chamadas aqui de “Parcéis Hipotéticos”, foram computacionalmente confeccionadas para a modelagem da propagação de ondas com os modelos monocromático e espectral que obtiveram melhor desempenho nos testes mencionados acima, realizados por Barletta [6]. O objetivo principal deste trabalho é verificar a influência da forma de parcel no campo de ondas e também comparar resultados de ondas monocromáticas e espectrais.

2. METODOLOGIA E RESULTADOS

2.1 Parcéis Hipotéticos sobre fundo plano

A primeira categoria de batimetrias hipotéticas consistiu em parcéis esféricos e elípticos simplificados sobre fundos planos, em uma profundidade de 45 cm. Batimetrias combinando dois parcéis com formas iguais e diferentes também foram estudadas. A geometria inicial dos parcéis, as dimensões, a profundidade e o espaçamento de grade numérica foram feitos de forma semelhante ao parcel de Chawla [5] (mesma ordem de grandeza), porém a fórmula usada para a confecção foi à de um parcel elíptico. No sistema de coordenadas cartesianas, o limite externo do perímetro é definido por:

$$(x/ax)^2 + (y/by)^2 = 1 \quad (1)$$

onde ax e by são os valores máximos dos eixos x e y do parcel (da elipse), respectivamente. A batimetria no parcel é dada por:

$$z = d\sqrt{1 - ((x/ax)^2 + (y/by)^2)} \quad (2)$$

onde d é a altura máxima no topo do parcel, fixada em 37 cm para todos os casos. As dimensões de grade e parâmetros da fórmula geral que descrevem os diferentes parcéis são mostradas na Tabela 1. A forma é ilustrada na Figura 1.

Tabela 1 – Características dos Parcéis Hipotéticos em fundos planos.

Batimetrias	ax (m)		by (m)		Centro em x (m)		Centro em y (m)		Dimensões de grade (x,y) (m)	dx, dy (cm)	Ptos de grade (x,y)
<i>Barletta A</i>	2.57		2.57		5		8.98		18.04 x 18.04	0.11 x 0.11	164 x 164
<i>Barletta B</i>	1		2.57		5		8.98		18.04 x 18.04	0.11 x 0.11	164 x 164
Batimetrias Duplas	ax P1	ax P2	by P1	by P2	P1	P2	P1	P2	Dimensões de grade (x,y) (m)	dx, dy (cm)	Ptos de grade (x,y)
<i>Barletta dupla AA</i>	2.57	2.57	2.57	2.57	5	5	8.98	17.96	27.5 x 27.5	0.11 x 0.11	250 x 250
<i>Barletta dupla BB</i>	1	2.57	1	2.57	5	5	8.98	17.96	27.5 x 27.5	0.11 x 0.11	250 x 250
<i>Barletta dupla AB</i>	2.57	2.57	1	2.57	5	5	8.98	17.96	27.5 x 27.5	0.11 x 0.11	250 x 250
<i>Barletta dupla AA2</i>	2.57	2.57	2.57	2.57	5	5	9.98	16.96	27.5 x 27.5	0.11 x 0.11	250 x 250

Os valores de x e y na Tabela 1 correspondem a posição do centro do parcel ou dos parcéis em relação ao eixo x e y do domínio. Para batimetrias com 2 parcéis (duplas), P1 e P2 designam respectivamente o primeiro e o segundo parcel na mesma batimetria.

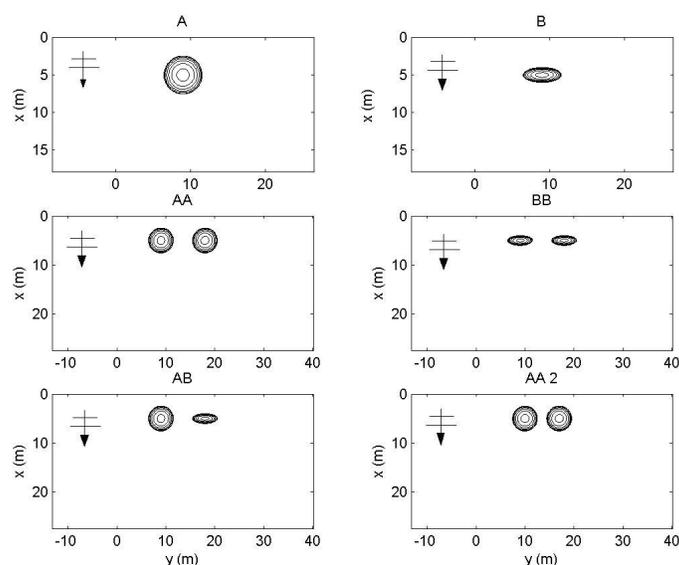


Figura 1 – Batimetrias Hipotéticas usadas para os testes # 1 de forma do parcel.

Para a geração de espectros de onda, decidiu-se usar espectros semelhantes ao do experimento de Chawla [5], onde o espalhamento em frequência é fixo e o espalhamento direcional variado. A geração e discretização dos espectros foram feitas através do programa Specgen.for {kirby e Özkan [11]}. Foram discretizados dois espectros TMA {Hughes [8]} com espalhamento direcional estreito ($\pm 11^\circ$) e largo ($\pm 45^\circ$). A discretização foi de 30 intervalos de frequências por 30 intervalos direcionais, dando um total de 900 ondas computadas por ponto de grade por espectro simulado. Também foram propagados casos com ondas monocromáticas com período igual ao período de pico dos casos espectrais e mesma H_s inicial. As características de ondas são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características das ondas geradas para a bateria 1 de testes com Parcéis Hipotéticos.

Ondas	H_0 (H_s inicial - cm)	T_p (s)	λ_m	σ_m	θ_m	Discretização em Frequência (bins)	Discretização em Direção (bins)
Monocromáticas	4	0.75	-	-	-	-	-
Espectro estreito	4	0.75	10	5	0	30	30
Espectro amplo	4	0.75	10	20	0	30	30

H_0 - Altura significativa na fronteira externa da grade numérica. T_p - Período de Pico. λ_m - Espalhamento espectral em frequência. σ_m - Espalhamento espectral em direção. θ_m - Direção média de propagação espectral na fronteira externa da grade numérica.

Após a propagação, características do campo de ondas atrás dos parcéis foram visualmente comparados através de cortes perpendiculares à direção x e y da grade numérica. As fronteiras laterais foram configuradas abertas na modelagem, e não houve quebra de onda para as condições de onda modeladas.

2.2 Resultados da modelagem para Parcéis Hipotéticos sobre fundo plano

O primeiro parcel analisado foi o *Barletta A*, esférico com dimensões bem semelhantes ao parcel de Chawla *et al.* [6], porém com profundidade maior no topo do mesmo (Figura 2). A posição dos cortes de altura de onda (H_s) é mostrada na Figura 2 e os cortes na Figura 3. Para o espalhamento direcional estreito, observaram-se alturas de onda mais de 100% maiores na zona de foco, em relação às condições iniciais, o que não ocorreu para um espalhamento largo. Já para o modelo monocromático, as alturas foram maiores na frente do parcel, com um padrão não-uniforme de alturas descontínuas, possíveis de serem observadas no campo de ondas do domínio posterior ao parcel (corte 3). Em contrapartida, os modelos espectrais calcularam alturas bem mais suavizadas ao longo deste corte. Cortes mais distantes que este não foram realizados porque se notou uma maior influência das fronteiras laterais na forma de padrões de reflexão de onda.

Para os cortes 1 e 2, a diferença é nítida entre o espectro espalhado, com alturas menores e mais suavizadas em relação ao espectro com espalhamento estreito. Este gera distribuições de ondas com comportamento mais parecido com uma onda monocromática. Para estes dois últimos exemplos, a H_s na região de foco passou de 100% do valor inicial, enquanto que o espectro bem espalhado teve aumento máximo de 50%. O modelo monocromático mantém a altura da onda focalizada por mais tempo, após propagar-se sob o parcel na direção x . Foi bem evidente a formação de áreas de menor altura de ondas nas áreas laterais ao foco central para todas as condições modeladas.

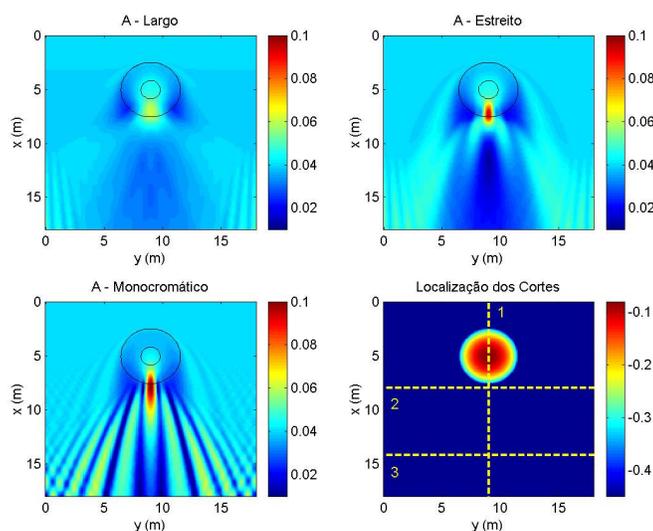


Figura 2 – Parcel *Barletta A* - Campos de altura de onda e localização dos cortes.

No parcel *Barletta B*, com forma mais elíptica e íngreme, observou-se menores alturas focalizadas em relação ao parcel esférico *A* (Figuras 4 e 5). Neste caso, o modelo monocromático e o modelo espectral com espalhamento estreito calcularam alturas semelhantes, embora o modelo espectral tenha gerado alturas maiores que o monocromático. A focalização de energia gerou alturas com valores próximos a 90% acima dos valores iniciais para o modelo com espalhamento estreito. Para o modelo monocromático o aumento teve valores por volta de 50% e para o modelo pouco espalhado direcionalmente os valores das alturas focalizadas foram em torno dos 25% a mais. Para o corte 3, se viu o padrão descontínuo de distribuição de alturas calculado pelo monocromático.

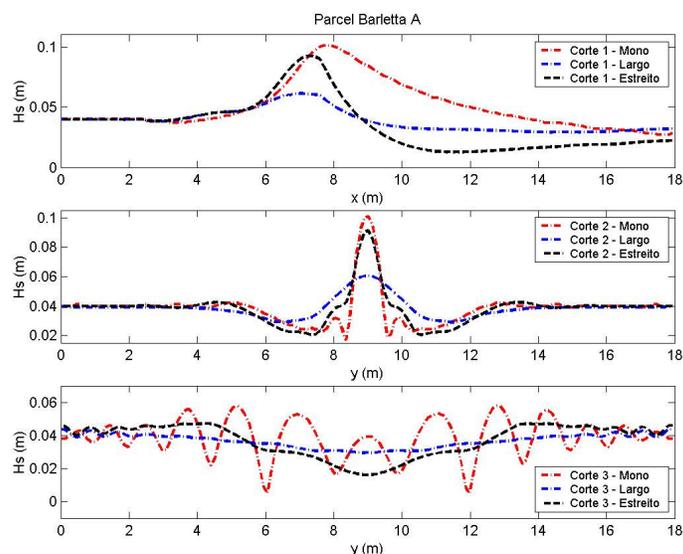


Figura 3 – Parcel Barletta A – Cortes de altura de onda 1, 2 e 3.

Trata-se do aparecimento de “franjas”, resultado de ondas que se cruzam. Estes dois testes iniciais já foram o bastante para elucidar a influência da forma do parcel no campo de alturas de onda e focalização de energia. Para a calota esférica a focalização foi mais intensa, gerando maiores alturas, enquanto que para calota elíptica o efeito da focalização se deu de forma mais suave, com resultados mais próximos entre o modelo espectral pouco espalhado e o modelo monocromático.

Em seguida foram modelados espectros sobre duas “calotas” esféricas juntas, no Parcel Barletta AA (Figura 6). Formou-se um foco extra, entre os dois focos simétricos principais do campo de altura de ondas, como pode ser visto na Figura 7. O modelo monocromático voltou a gerar maiores alturas, padrão descontínuo de distribuição e também uma maior zona de focalização em x , conforme ocorrido para o parcel simples com mesma forma. Nesta zona também foram observadas “franjas” no modelo monocromático, resultado da interação entre ondas vindas de direções antagônicas devido à forte refração experimentada nos parciais. Os resultados do espectro com espalhamento estreito mostraram proximidade com os monocromáticos, porém foram mais suavizados na região distante do parcel.

O intuito de se testar dois parciais atuando em um campo de ondas ao mesmo tempo é simular situações hipotéticas que tentam aproximar características da natureza, onde a existência de dois ou mais parciais em uma aérea costeira não é incomum. Para a batimetria Barletta BB, com dois parciais elípticos, foram observadas características de onda semelhantes ao parcel B, onde as alturas de onda para os 3 casos modelados foram bem menores e tinham distribuição mais suavizada, em relação ao parcel duplo Barletta AA. Isto é mostrado nas Figuras 8 e 9, onde o modelo monocromático novamente produziu alturas menores que o espectral com espalhamento direcional estreito. A focalização extra (corte 2) entre os dois focos principais continuou a ocorrer para todos os casos modelados e a distribuição irregular no campo de ondas distante do parcel no domínio (corte 3) para o modelo monocromático também. Porém isto ocorreu de maneira bem mais suavizada para o modelo com o espectro com espalhamento estreito, que gerou distribuições de alturas semelhantes.

Já para a batimetria com forma mista, um esférico e um elíptico chamado de Barletta AB (Figura 10), ocorreu um padrão misturado no campo de ondas, com características da propagação sobre o parcel Barletta A e também do Barletta B. Para o foco gerado pela calota esférica (corte 1a, Figura 11), o modelo monocromático calculou as maiores ondas, o que não

ocorreu no foco da calota elíptica ao lado, onde o espectro direcionalmente estreito focalizou maiores alturas que o monocromático (corte 1b, Figura 11). O espectro largo em direção manteve sempre um padrão suave de distribuição de alturas. A focalização intermediária ocorreu como esperado e o parcel esférico focalizou maiores alturas para todas as características de ondas analisadas. Interessante notar que para parciais como o *A*, *B* e *AA*, a região do corte 3 apresenta menores alturas justamente onde antes (corte 2) ocorreram as focalizações principais. O foco para esses parciais se posiciona em frente ao foco intermediário.

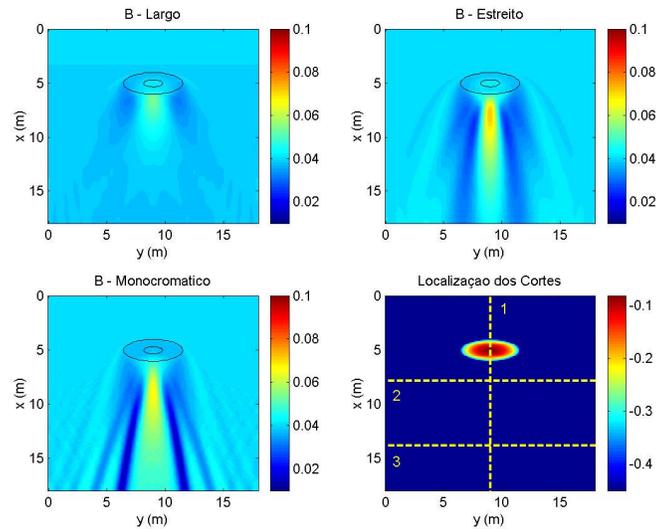


Figura 4 – Parcel *Barletta B* - Campos de altura de onda e localização dos cortes.

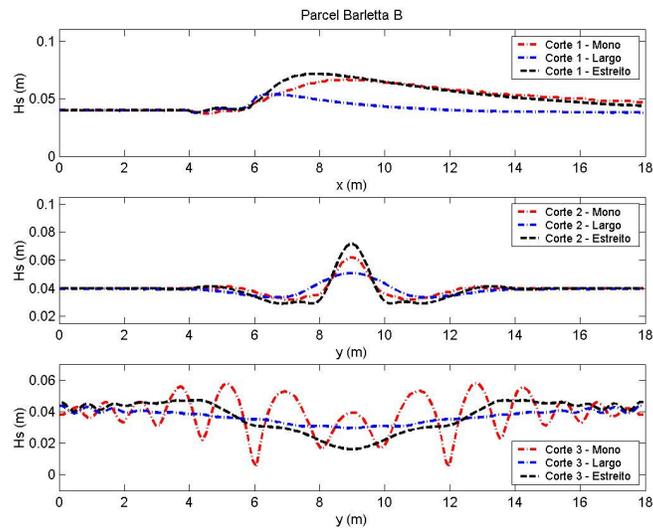


Figura 5 – Parcel *Barletta B* – Cortes de altura de onda 1, 2 e 3.

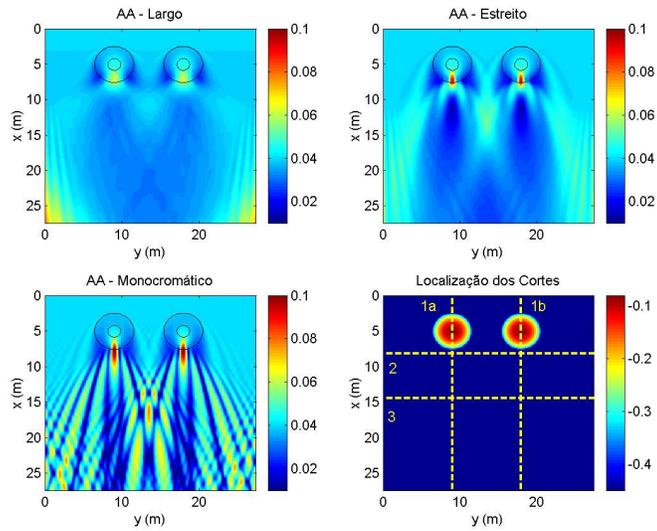


Figura 6 – Parcel *Barletta AA* - Campos de altura de onda e localização dos cortes.

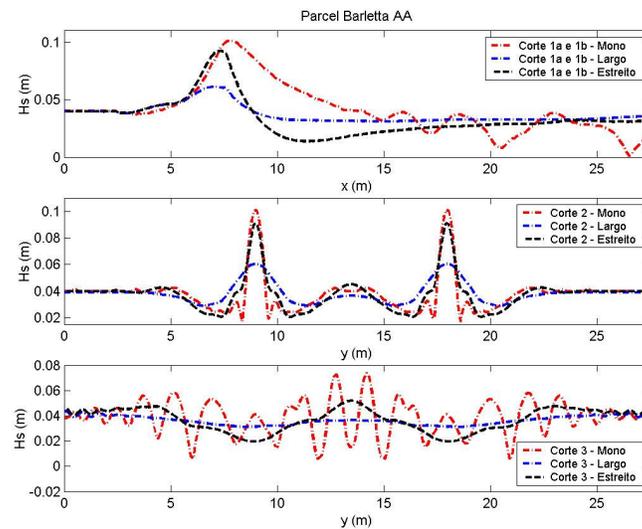


Figura 7 – Parcel *Barletta AA* – Cortes de altura de onda 1a, 1b, 2 e 3.

Para outros casos, como da “calota” *BB*, o padrão de distribuição de alturas seguiram o do corte 2, próximo ao parcel. Para *Barletta AB*, ocorreram as duas situações, focalização no corte 3 em frente á calota elíptica e menores alturas em frente à esférica (Figura 12). Este fato contribuiu para uma maior semelhança do modelo espectral pouco espalhado com o monocromático no corte 3, onde a distribuição das alturas ocorreu de forma não uniforme para ambos, porém sempre de uma forma mais suave para o modelo espectral. O campo de ondas causado pela batimetria *AB* demonstra bem a influência da forma do parcel no mesmo, mostrada na Figura 12. Para batimetrias duplas, foram observadas franjas geradas pelo modelo monocromático nos cortes 1a e 1b (Figura 11), mostrando interferência de ondas vindas de diferentes direções.

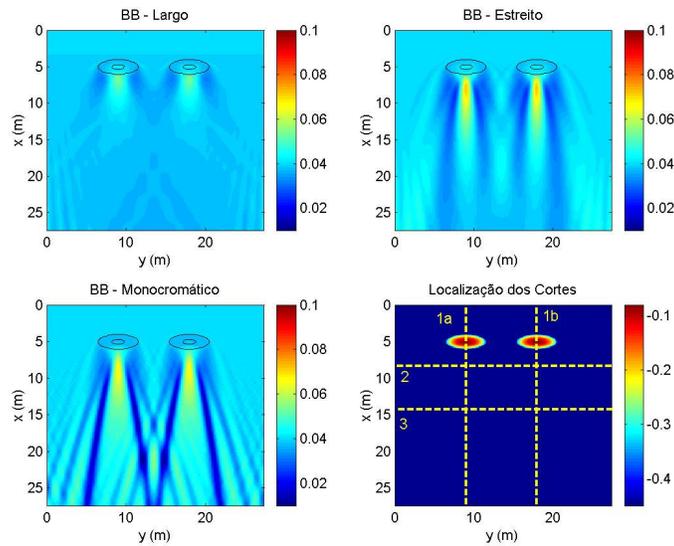


Figura 8 – Parcel *Barletta BB* - Campos de altura de onda e localização dos cortes.

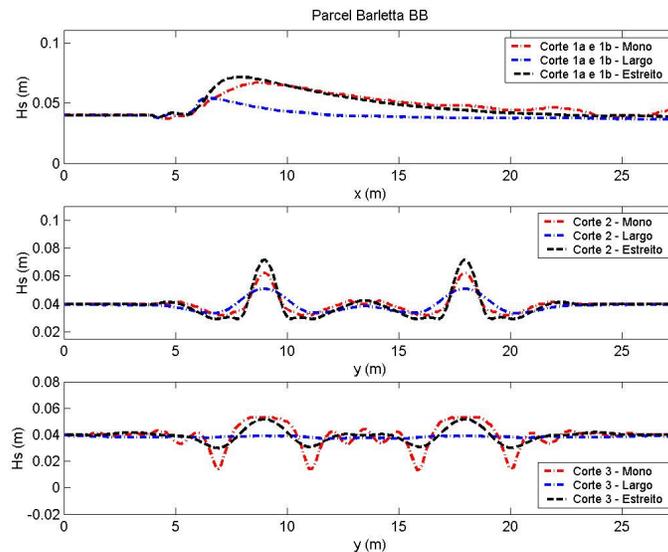


Figura 9 – Parcel *Barletta BB* – Cortes de altura de onda 1a, 1b, 2 e 3.

Para o parcel *Barletta AA2*, mostrado na Figura 13, os dois parçéis esféricos foram aproximados na tentativa de descobrir se a distância entre os parçéis poderia de alguma maneira afetar a focalização. O que se viu foi um comportamento bem próximo ao obtido no parcel *Barletta AA*, exceto por uma menor amplificação entre os focos principais no corte 2 e também no corte 3, fato que mostra que a distância entre dois parçéis afeta os padrões de interferência das ondas que passaram sobre as calotas, não apenas no nível das amplificações como também na posição das franjas (Figura 14). Talvez neste caso, a distância modificada em relação à primeira não tenha sido muito significativa, por isso as diferenças serem poucas, ficando este tema em aberto para futuras investigações mais detalhadas.

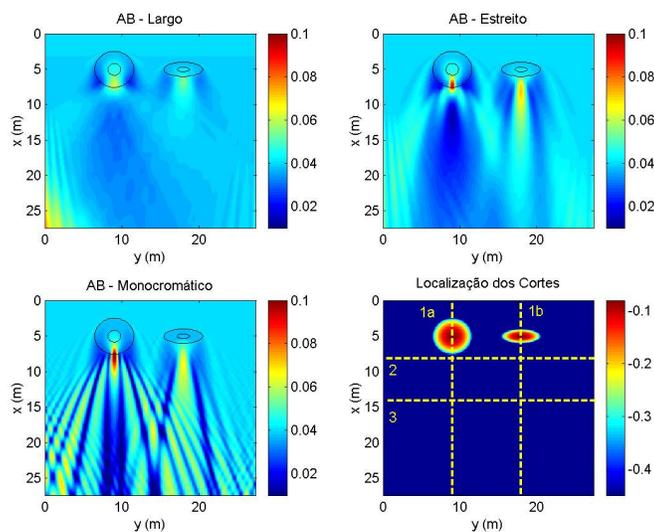


Figura 10 – Parcel *Barletta AB* - Campos de altura de onda e localização dos cortes.

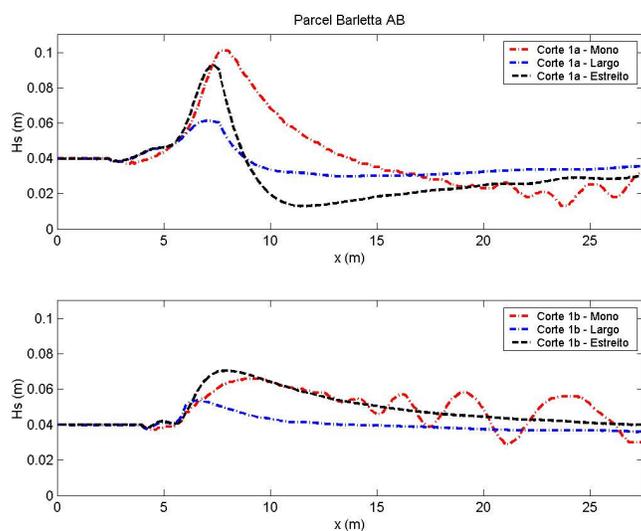


Figura 11 – Parcel *Barletta AB* – Cortes de altura de onda 1 a e 1 b.

2.3 Discussão dos resultados para Parcéis Hipotéticos sobre fundo plano

Os testes com estas “calotas” hipotéticas de formatos simples demonstraram a grande combinação possível que existe na natureza para a definição de características de campos de ondas atrás de parcéis ou feições naturais que induzam na focalização de energia de onda. Um dos elementos de maior importância é o espalhamento angular espectral. Diferenças de espalhamento determinam grandes diferenças nos campos de altura de onda na intensidade de concentração de energia. Outro fator que se mostrou importante é a forma dos parcéis. Os mais íngremes e elípticos mostraram nos testes hipotéticos que, tem um maior poder de diminuição de energia de ondas. Isto se deve à sua característica fisiográfica, de maior pendente.

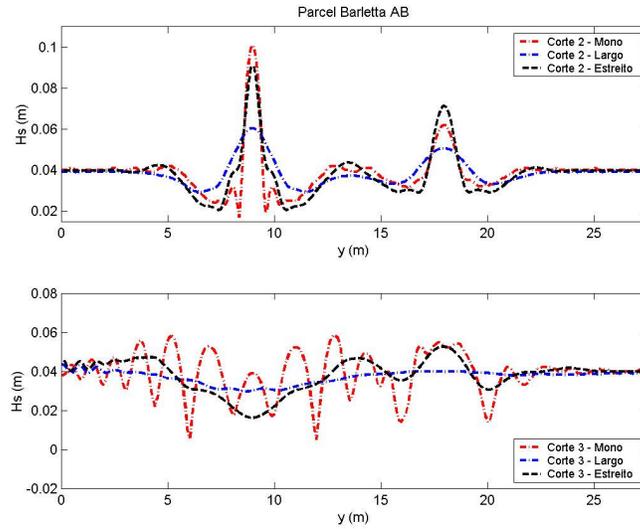


Figura 12 – Parcel *Barletta AB* – Cortes de altura de onda 2 e 3.

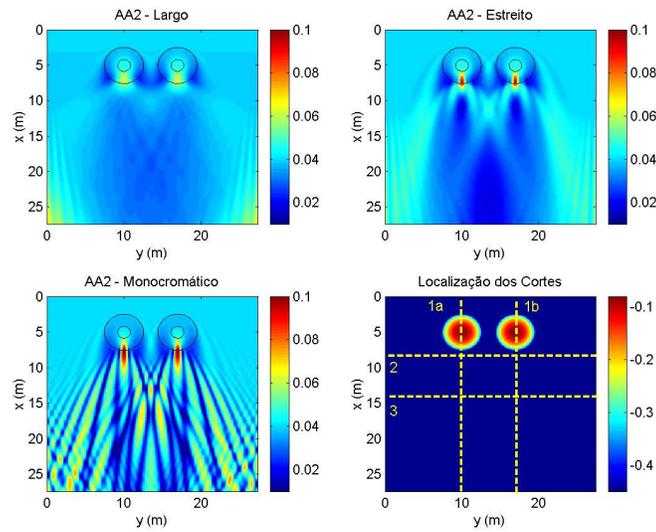


Figura 13 – Parcel *Barletta AA2* - Campos de altura de onda e localização dos cortes.

Provavelmente a focalização foi mais fraca neste caso, porque as ondas dispunham de uma menor distância em relação a um comprimento de onda L para refratar sobre o parcel. Para o parcel esférico as ondas foram mais focalizadas, pois dispunham de uma maior distância em relação a L para refratar. Para o caso espectral com espalhamento estreito, que previu alturas maiores que o modelo monocromático, possivelmente algumas componentes incidem obliquamente sobre a calota elíptica e, talvez, a focalização seja fortificada em comparação com ondas monocromáticas por este efeito.

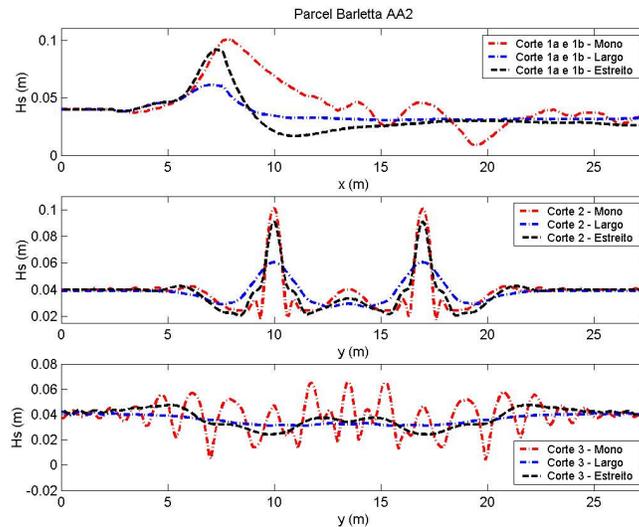


Figura 14 – Parcel Barletta AA2 – Cortes de altura de onda 1a, 1b, 2 e 3.

Ficou claro nesta seção a influência do formato dos parciais nas alturas de onda e também dos possíveis erros cometidos pelo uso de modelos estritamente monocromáticos para aplicações reais. Estes modelos geraram distribuições de alturas superestimadas com padrões descontínuos, picosos e com presença de “franjas” superimpostas que certamente incluiriam erros em um projeto de aplicação.

2.4 Parcéis Hipotéticos sobre fundo inclinado

Uma segunda configuração de parciais hipotéticos foi feita para simular de maneira simplificada uma condição mais próxima à realidade. Tomou-se como referência o Parcel do Carpinteiro, situado a alguns km a leste da desembocadura da Laguna dos Patos (Figura 15), em 32° 15’ S e 51° 45’ W, na plataforma costeira central do Rio Grande do Sul.

As profundidades em volta do parcel podem ser visualizadas na Figura 16, que mostra o relevo 3D fora de escala (exagero vertical). Essa batimetria foi feita com dados coletados de 100 em 100 metros pela Marinha do Brasil em 2004 e interpolados computacionalmente de 10 em 10 metros. Na tentativa de simular de forma aproximada características gerais do Carpinteiro, foram gerados dois parciais elípticos sobre rampas que tem ordem de grandeza próxima à deste parcel natural. O primeiro tem a forma mais suave e elíptica, tendendo a um parcel esférico (semelhante ao parcel *Barletta A*), chamado de Parcel *Barletta Z1*. O segundo tem uma forma mais elíptica achatada, com flancos íngremes (mais abrupto que o parcel *Barletta B*), chamado de Parcel *Barletta Z2*. A rampa tem profundidade máxima de 80 metros de profundidade, adequada para se modelar a propagação de espectros com período de pico de 10 segundos. A profundidade e a declividade da rampa são dadas por:

$$rampa = z - 0.0061(-1 * xd + x) \quad (3)$$

onde z é a profundidade máxima (80 m) e xd é a distância do centro do parcel (em x) até a batimétrica de 80 metros, fixada em 9,239 km para ambos os parciais (*Z1* e *Z2*).

A batimetria dos parcéis é definida pela fórmula geral:

$$z = 41 - (50\sqrt{1 - ((x/ax)^2 + (y/by)^2)}) \quad (4)$$

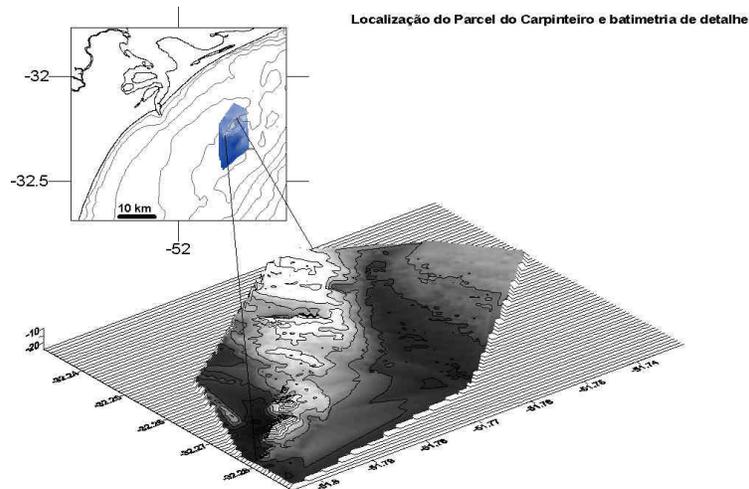


Figura 15 – Localização do Parcel do Carpinteiro, Rio Grande do Sul {Fonte: Buchmann *et al.* [3]}.

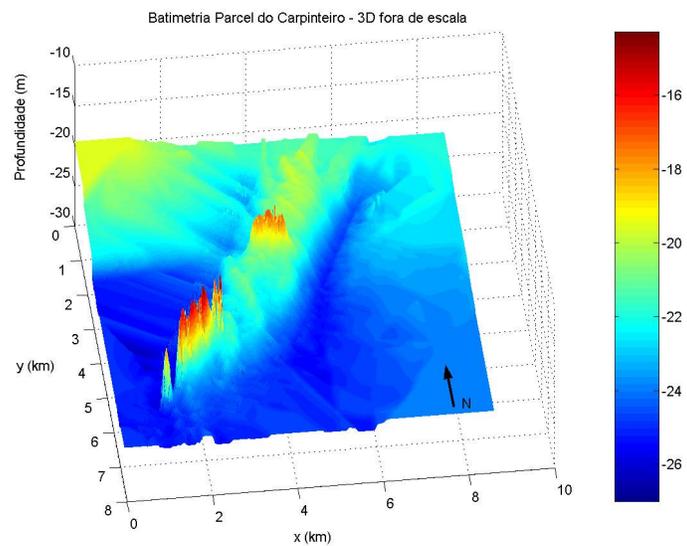


Figura 16 – Profundidades do Parcel do Carpinteiro. Fora de escala (exagero vertical).

As dimensões de grade e parâmetros da fórmula geral que descrevem os dois parciais são mostradas na Tabela 3 e a forma dos parciais é bem ilustrada na Figura 17.

Tabela 3 – Características dos Parciais Hipotéticos em fundos inclinados.

Batimetrias	a_x (m)	b_y (m)	Centro em x (km)	Centro em y (km)	Dimensões de grade (x,y) (km)	dx, dy (m)	Ptos de grade (x,y)	Declividade da rampa
<i>Barletta Z1</i>	600	700	9.5 (4.5)	7.5	14 x 15	10 x 10	1401 x 1501	1:164
<i>Barletta Z2</i>	200	1100	9.5 (4.5)	7.5	14 x 15	10 x 10	1401 x 1501	1:164

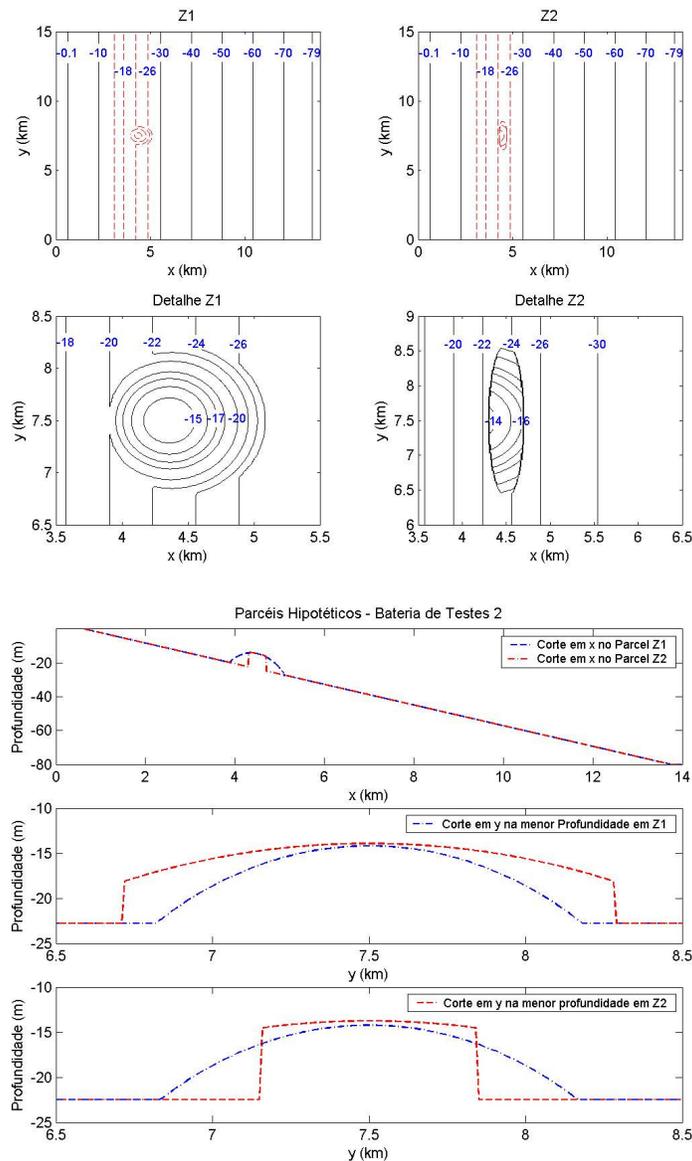


Figura 17 – Batimetrias Hipotéticas usadas para os testes 2 de forma de Parcel.

Para esta segunda bateria de testes, foram utilizados dois espectros hipotéticos TMA com espalhamento direcional estreito ($\pm 11^\circ$) e largo ($\pm 45^\circ$), com direção principal normal a costa. A discretização foi de 15 intervalos de frequências por 20 intervalos direcionais, dando um total de 300 ondas computadas por ponto de grade para simular o espectro. Tentou-se usar espectros com características próximas aos encontrados na natureza. Também foram estudados casos com ondas monocromáticas de período igual ao período de pico dos casos espectrais e mesma H_s inicial. As características de ondas são mostradas na Tabela 4. A Figura 18 mostra as formas dos espectros usados.

Tabela 4 – Características das ondas geradas para a bateria 1 de testes com Parcéis Hipotéticos.

Ondas	H_0 (H_s inicial - m)	T_p (s)	λ_m	σ_m	θ_m	Discretização em Frequência (bins)	Discretização em Direção (bins)
Monocromáticas	1	10	-	-	-	-	-
Espectro estreito	1	10	10	5	0	15	20
Espectro amplo	1	10	10	20	0	15	20

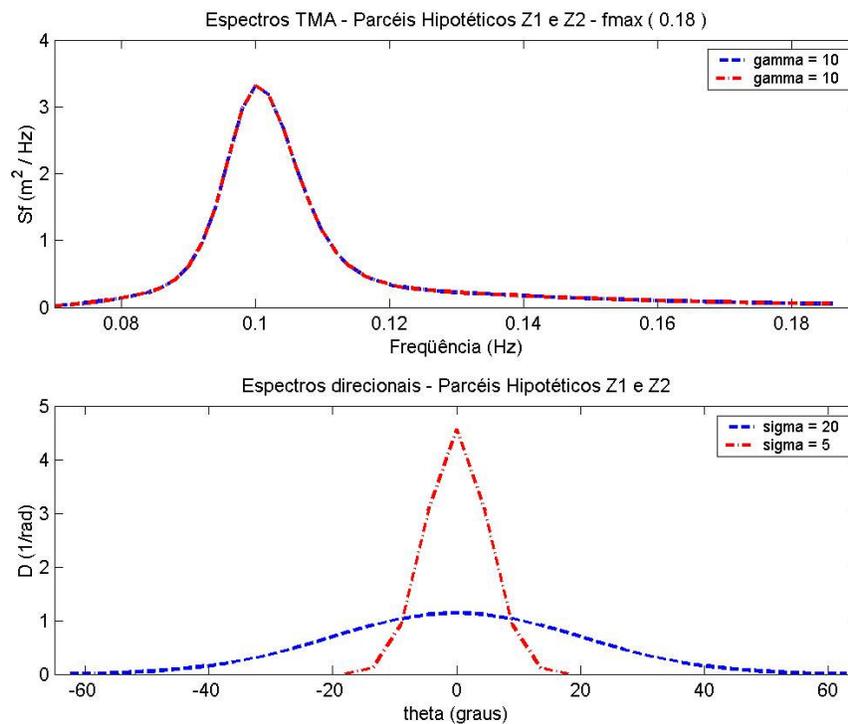


Figura 18 – Espectros TMA produzidos para bateria de testes hipotéticos 2.

2.5 Resultados da modelagem para Parcéis Hipotéticos sobre fundo inclinado

Os resultados obtidos para os parçéis sobre uma rampa não apresentaram grandes diferenças em relação aos testes com Parcéis Hipotéticos em fundos planos, no que se refere aos padrões de focalização de energia. A Figura 19 mostra os dois casos espectrais e também o monocromático, confirmando a maior focalização ocorrida com o uso de modelos monocromáticos. Para o caso de um espectro estreito em direção, a focalização acontece de maneira mais suavizada que no caso monocromático, porém com mais intensidade se comparada a um espectro com espalhamento direcional largo. A Figura 19 mostra também a posição dos cortes de altura significativa das 3 condições de ondas modeladas para este parçel, plotadas na Figura 20. Para o corte 1, que passa exatamente no centro do parçel em y , nota-se a maior elevação causada pelo parçel junto com o empinamento natural da onda subindo a rampa em direção a águas mais rasas. Notou-se a grande diferença de altura em relação ao espectro estreito em espalhamento direcional.

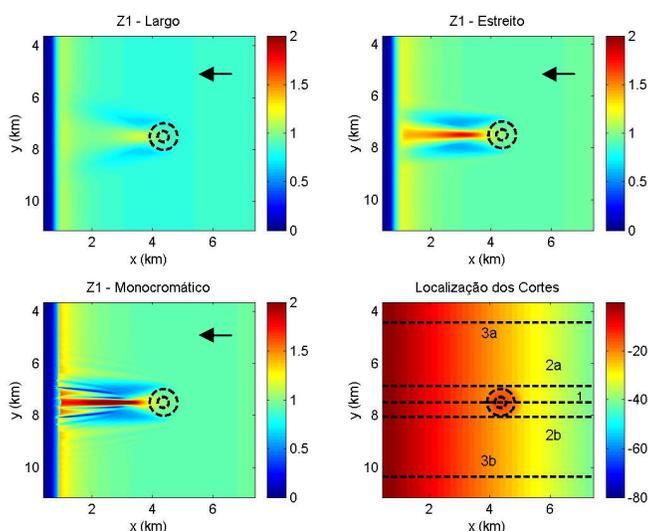


Figura 19 – Distribuição de alturas de onda para bateria de testes hipotéticos com parçéis Z1.

Para o espectro com espalhamento direcional largo, a focalização se deu de maneira mais amena, porém foi perfeitamente perceptível. Para o corte 2a e 2b (simétricos) tentou-se mostrar a diminuição das alturas que ocorrem nas laterais da zona de foco. Neste caso o padrão se seguiu, com as alturas mais baixas sendo computadas pelo modelo monocromático, seguido do modelo com espectro estreito e mais suavizada pelo modelo com espectro espalhado. Para o corte 3a e 3b (simétricos) tentou-se mostrar uma seção mais distante da zona de focalização, onde, aparentemente tem-se apenas a situação de uma onda se propagando sobre uma rampa.

A Figura 21 mostra os cortes em y posicionados no centro do parçel e nas profundidades de 15, 10 e 5 metros. A intenção aqui é mostrar a influência que um parçel situado a certa distância da costa acarreta no campo de ondas em águas mais rasas. Nota-se que para este caso, o campo de onda não focaliza bem em cima do parçel, e sim na zona adjacente atrás do mesmo, em direção à praia.

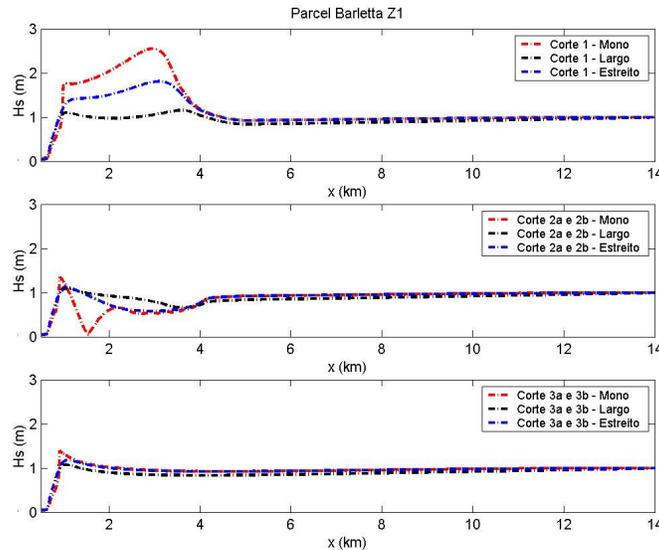


Figura 20 – Cortes de H_s em y para os casos de onda propagados no parcel *Barletta Z1*.

Este é um caso onde a profundidade não é muito rasa no local do parcel e, portanto é possível fazer uma analogia com o experimento de Berkhoff et al. [2]. Viu-se que a maior focalização ocorreu em 15 metros de profundidade e foi decaindo em direção à costa. Mesmo assim, na profundidade de 5 metros, a zona de foco ainda se apresenta com intensidade, principalmente para ondas monocromáticas. Para o caso do espectro espalhado em direção, o foco em 5 metros existe, porém bem mais suavizado, conforme já visto anteriormente para outros casos. Já para um espectro direcionalmente estreito, o gradiente transversal de alturas na zona do foco e vizinhança é bem maior, aproximando-se mais ao caso monocromático.

A Figura 22 mostra os mesmos casos de onda para o parcel hipotético *Barletta Z2*. Como neste caso as alturas de onda focalizadas pelo parcel são menores do que as calculadas para o *Z1* foi usada uma paleta de cores diferente para a ilustração, com o objetivo de realçar a região do foco. Novamente o parcel mais estreito, elíptico e íngreme causou menor focalização para todos os casos modelados, semelhante ao que já tinha sido mostrado nos parciais hipotéticos 1. Isto pode ser visualizado na Figura 23. No corte 1, que passa sobre o centro do parcel em y , nota-se o mesmo padrão do foco causado pelo parcel *Z1*, com o modelo monocromático apresentando maiores alturas, seguido bem de perto pelo modelo espectral com espalhamento estreito e com menores alturas o modelo com espectro espalhado. A focalização neste corte ocorre até a praia, fundindo-se com o empinamento da onda até a zona de quebra. Nesta batimetria, as alturas são bem menores que para *Z1*.

No corte 2 é possível de se visualizar os locais com diminuição da altura de ondas, lateralmente à zona de foco, também bem suavizados em relação ao teste anterior (*Z1*). O corte 3 representa áreas longe do foco, que teoricamente não estão sobre influência do mesmo, contando somente os processos de empinamento. A Figura 24 mostra os cortes em x para as mesmas profundidades mostradas anteriormente na Figura 21. Para este caso notou-se que o foco cresceu progressivamente do parcel até a praia, diferentemente do caso do parcel *Z1*, porém o gradiente transversal de alturas foi muito mais suavizado.

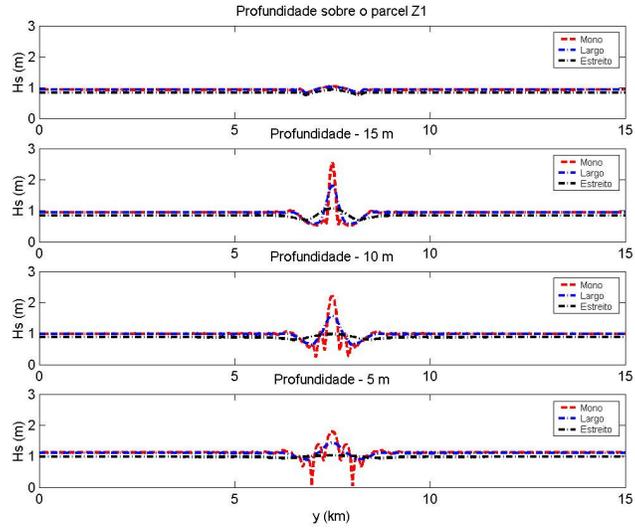


Figura 21 – Cortes de H_s em x para os casos de onda propagados no parcel *Barletta Z1*.

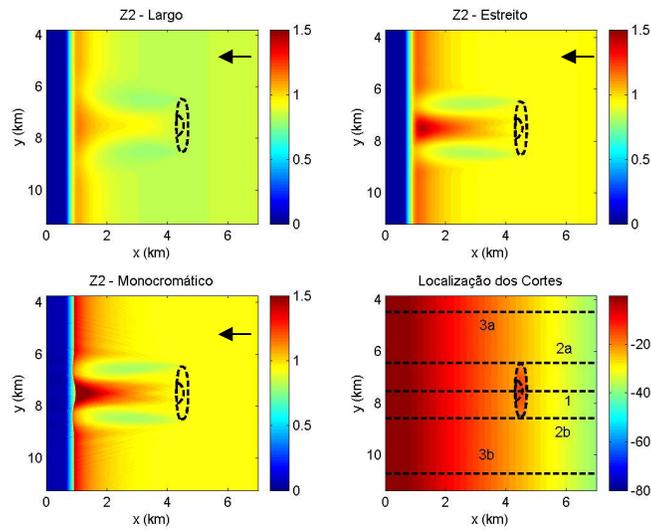


Figura 22 – Distribuição de alturas de onda para bateria de testes hipotéticos com parcéis *Z2*.

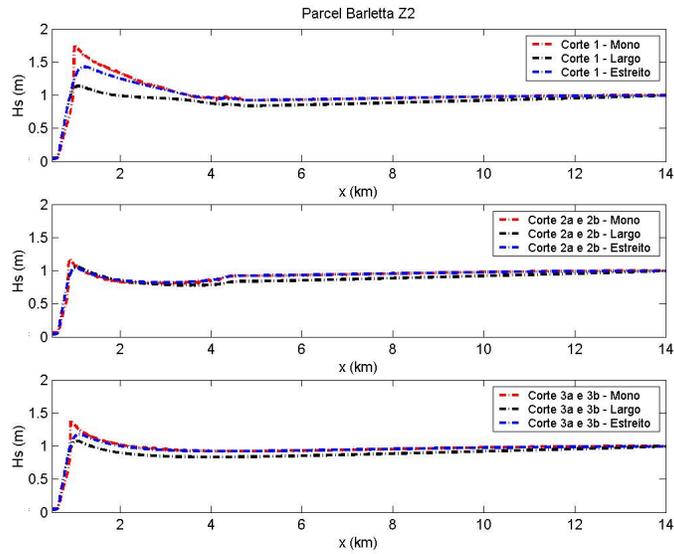


Figura 23 – Cortes de H_s em y para os casos de onda propagados no parcel *Barletta Z2*.

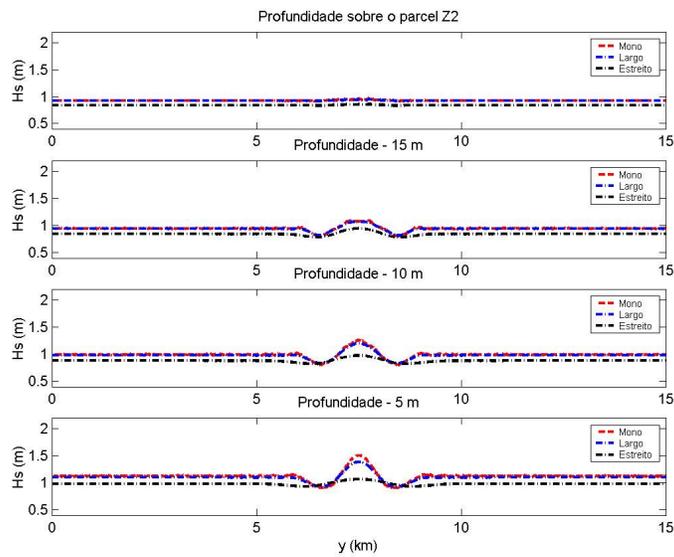


Figura 24 – Cortes de H_s em x para os casos de onda propagados no parcel *Barletta Z2*.

2.6 Discussão dos resultados para Parcéis Hipotéticos sobre fundo inclinado

Os testes com os parciais *Z1* e *Z2*, juntamente com os testes anteriores com Parciais Hipotéticos (*A*, *B*, *AA*, *BB*, *AB* e *AA2*) mostraram possíveis erros que se assumem quando da aplicação de modelos de propagação de ondas em batimetrias reais.

Para estudos de linhas de costa e águas com batimetrias complicadas que contenham muitos parciais e feições geomorfológicas que induzam a focalização de energia de ondas, a aproximação de estados de mar por ondas monocromáticas incluiria muitos erros na estimação de alturas de ondas na costa. Estados de mar reais com espectros com espalhamento estreito concentram sua energia em uma gama menor de direções, o que faz com que uma parte menor desta se espalhe se comparado a espectros com espalhamento direcional mais largo. Isto não é novidade, porém cabe deixar claro a necessidade de se ter informações sobre as características espectrais, além dos parâmetros classicamente usados (*H*, *T* e direção média de propagação espectral) do clima de ondas da região onde será feita a aplicação destas ferramentas numéricas.

Os exemplos estudados inspirados no parcel do Carpinteiro mostram que parciais em águas intermediárias atuam na focalização de energia de ondas em situações de ondulações intensas. Este parcel localiza-se relativamente distante da costa, classificado por Buchmann *et al.* [3] como parcel intermediário por se situar em profundidades intermediárias. Os parciais *Z1* e *Z2* foram construídos tendo o Carpinteiro como referência, embora tenham menor distância da costa. Estes exemplos mostraram que parciais em águas intermediárias já contribuem com focalizações de energia e padrões complicados do campo de ondas em águas mais rasas. Para uma costa com parciais em águas mais rasas, situação bem comum na realidade, esta influência seria maior ainda, onde padrões descontínuos e gradientes transversais de altura de onda próximos à praia induziriam a formação de áreas com mais energia de ondas e outras com menos, que por sua vez facilitariam a formação de correntes e transporte de sedimentos das áreas de maior energia para áreas de menores ondas. Isto são suposições baseadas nos resultados obtidos, porém trabalhos com maior interação entre os modelos hidrodinâmicos e modelos de transporte de sedimentos seriam necessários para a validação destas afirmações.

3. CONCLUSÕES

Para testes espectrais nos Parciais Hipotéticos, conclui-se que o espalhamento direcional do espectro tem influência direta na determinação de alturas de ondas e na focalização de energia causada por estes parciais. Ondas monocromáticas geram focalização muito intensa e gradientes laterais abruptos de distribuição de alturas de ondas, com aparecimento de franjas de alturas de ondas atrás dos parciais devido ao cruzamento de ondas provenientes de diferentes direções. Espectros com espalhamento direcional largo geram focalização e padrões suaves de distribuição de alturas de onda atrás dos parciais. Espectros com espalhamento direcional estreito geram focalização e gradientes laterais de distribuição de alturas de ondas atrás dos parciais mais abruptos que para espectros largos. A forma dos parciais é um fator muito importante na determinação da focalização. Para ondas incidindo ortogonalmente ao eixo elíptico principal do parcel, formas mais elípticas focalizam menos energia do que formas mais esféricas. A focalização é dependente da distância em que a onda se propaga sobre o parcel. Combinações de mais de um parcel contribuem para a configuração de campos de alturas de ondas atrás dos mesmos pouco homogêneos, com maiores diferenças e gradientes laterais de altura. Mesmo não tendo mostrado outras configurações de parciais, foi possível inferir que os fatores que regulam a focalização de energia no campo de onda atrás de um parcel em uma rampa são: a profundidade e a forma do parcel, o espalhamento

direcional do espectro, o ângulo em que a onda incide sobre parcel e a distância em que a onda se propaga sobre o parcel e a distância deste até a costa.

REFERÊNCIAS

1. Barletta, R. C. Teste e aplicação de modelos parabólicos de refração-difração com ênfase na propagação de ondas sobre parcéis, 2006. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Engenharia Ambiental, Florianópolis. 137 p.
2. Berkhoff, J. C. W., Booij, N. and Radder, A. C., 1982. Verification of numeric wave propagation models for simple harmonic linear water waves. *Coastal Engineering*, 6; 255-279.
3. Buchmann, F. S. C. E., Seeliger, M., Zanella, L. R., Madureira, L. S. P., Tomazelli, L. J. e Calliari, L. J., 2001. Análise batimétrica e sedimentológica no estudo do Parcel do Carpinteiro, uma paleolinha de praia pleistocênica na antepraia do Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Pesquisas*, Porto Alegre, v. 28, n. 2, pp 109-115.
4. Calliari, L. J.; Speransky, N. & Boukareva, I., 1998b. Stable focus of wave rays as a reason of local erosion at the Southern Brazilian Coast. *Journal of Coastal Research*, SI (26), 19-23.
5. Chawla, A., 1995. Wave transformation over a submerged shoal, Master's Thesis, University of Delaware, USA. 240 p.
6. Chawla, A. C., Özkan, H. T. And Kirby, J. T., 1998. Spectral models for wave transformation and breaking over irregular bathymetry, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, pp 189-198.
7. Hedges, T. S., 1976. An empirical modification to linear wave theory. *Proc. Inst. Civ. Engrg.*, Part 2, 612, pp 575-579.
8. Hughes, S. A., 1984. The TMA shallow-water spectrum description and applications. *Tech.Rept. CERC-84-7*, Coast. Engrg. Res Center, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss. 42 p.
9. Kirby, J. T., 1986a. Higher-order approximation in the parabolic equation method for water waves. *Journal of Geophysical Research*, 91N. C1, pp 933-952.
10. Kirby, J. T., 1986b. Rational approximations in the parabolic equation method for water waves, *Coastal Engineering*, 10, pp 355-378.
11. Kirby, J. T. And Özkan, H. T., 1994. Combined Refraction/Diffraction model for spectral wave conditions, *Documentation and User's Manual*, Dept. of Civil Engrg., University of Delaware, report n°. CACR-92-06. 128 p.