

Análise numérica da propagação de ondas na costa do Rio Grande do Sul entre Torres e Mostardas

Jair Vignolle da Silva¹, Paulo R. F. Teixeira² & Lauro J. Calliari³

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, FURG. jairvig@ig.com.br

²Depto de Materiais e Construção, FURG. teixeira@dmc.furg.br

³Depto de Geociências, FURG. tsclauro@furg.br

RESUMO: O objetivo deste trabalho é o analisar numericamente a variação de energia de ondas nesta região, investigando a influência das variações da largura da plataforma interna e da largura de antepraia, e da fricção com o fundo nos processos morfodinâmicos costeiros, usa-se como ferramenta de processamento o programa REF/DIF1 (Kirby e Darlymple, 1994). Os resultados considerando um coeficiente de atrito $f_w = 0,01$, usado no código do REF/DIF1, foram comparados com os obtidos sem a presença do atrito, observando-se pouca influência do atrito com o fundo sobre a transformação das ondas. Adotando-se um coeficiente de atrito de $f_w = 0,2$, constatou-se, de forma geral, que a influência do aumento da largura da antepraia do sul de Pinhal para o norte no atrito com o fundo é compensada pela influência da diminuição da largura da plataforma continental interna.

PALAVRAS-CHAVE: propagação de ondas, refração, difração, simulação numérica, REF/DIF1.

ABSTRACT: The objective of this work is to analyze the variation of the wave energy in this area numerically, by investigating the influence of the width variations of the foreshore and the backshore, besides the bottom friction in the morphodynamic coastal processes. The software REF/DIF1 (Kirby and Darlymple, 1994) is used to carry out this task. The results considering the bottom friction and a friction coefficient $f_w=0,01$, in which is used by REF/DIF1's code, are compared with those obtained without friction. In this case, a little influence of the friction over the wave transformation was observed. In general, adopting a friction coefficient $f_w=0,2$, it shows that the influence of the increase of the backshore width from the south to the north of Pinhal in the bottom friction is compensated by the influence of the reduction of the foreshore width.

KEYWORDS: propagation of waves, refraction, diffraction, numerical simulation, REF/DIF1

1. INTRODUÇÃO

A informação das medições das ondas em regiões de interesse é essencial no estudo de problemas de engenharia costeira e oceânica. Usualmente a altura e direção de propagação das ondas em uma região da costa são determinadas a partir do conhecimento das características das ondas em águas profundas. A crescente demanda de investigação de forma precisa das condições das ondas de projeto, do transporte de sedimentos e da circulação na zona de rebentação têm resultado em avanços significativos nos modelos de transformação de ondas durante as últimas décadas (Liu e Losada, 2002).

À medida que as ondas se aproximam da costa, a variação da profundidade, a presença de estruturas artificiais e as modificações das características geológicas, provocam mudanças na direção de propagação e velocidade das ondas, além de causar redistribuição de energia.

Também, dentro da zona de rebentação, as ondas experimentam diversas transformações importantes e complexas (Liu, 1990).

1.2 A costa do Rio Grande do Sul entre Torres e Mostardas

A região da costa do Rio Grande do Sul, compreendida entre Torres e Mostardas (ver Fig. 1) foi classificada por Calliari et al. (2006) sob aspectos geomorfológicos, constituída de praias que variam de intermediárias a dissipativas, totalmente expostas e com dunas frontais bem desenvolvidas. Entre Torres e Mostardas, a configuração batimétrica mostra-se bastante peculiar (ver Fig. 2). A linha da antepraia (batimétrica de 20m) está mais afastada da costa no trecho compreendido entre Mostardas e Pinhal (em média 9km) e apresenta-se mais estreita na região que vai de Pinhal a Torres (em torno de 5,9km). Além disso, o limite da plataforma continental interna (batimétrica de 50m) apresenta padrão contrário ao da antepraia, ou seja, é mais estreito entre Mostardas e Pinhal (aproximadamente 24km) e se afasta da costa entre Pinhal e Torres (em média 44km). Pode-se dizer que Pinhal é um ponto de inflexão da costa do RS, separando uma protuberância de uma enseada. Este região se caracteriza por apresentar relevo de fundo bem homogêneo e suave, marcado por linhas isobatimétricas bem paralelas entre si.

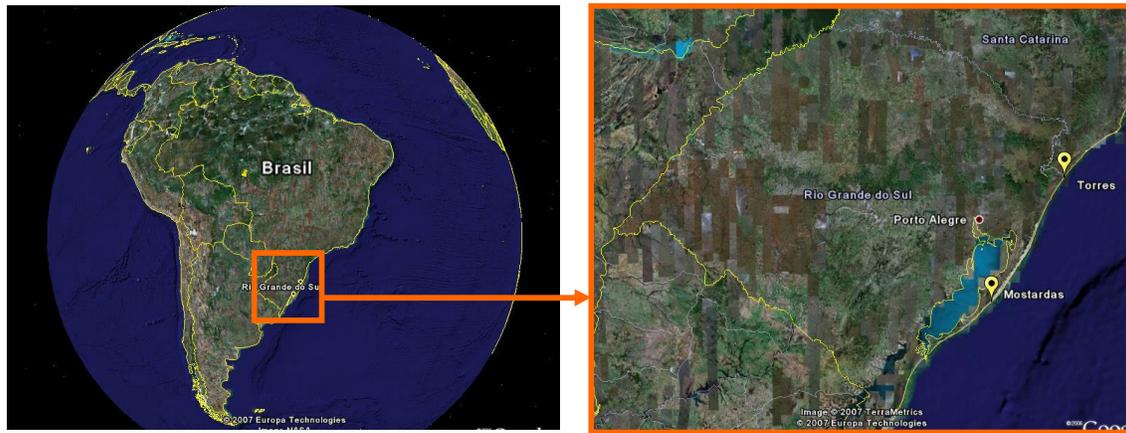


Fig. 1 – Localização da Região em Estudo (www.google.earth)

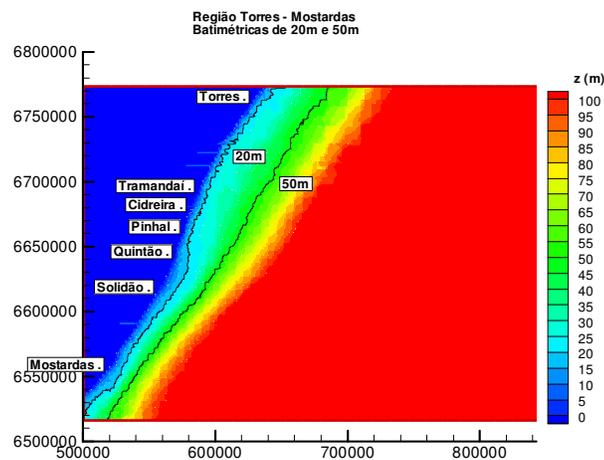


Figura 2 – Comparação entre a antepraia e plataforma continental interna do RS na região Torres-Mostardas

2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

O objetivo geral deste trabalho é o de analisar, variando ângulo de incidência, período e altura significativa, auxiliado pelo modelo numérico REF/DIF1 (Kirby, 1994), a variação de energia de ondas ao longo do litoral norte e médio do Rio Grande do Sul (RS), entre Torres e Mostardas. Em função das variações batimétricas e sedimentológicas da antepraia e plataforma continental interna, é investigada a importância da fricção com o fundo na propagação das ondas.

As principais justificativas para a realização deste trabalho são:

Necessidade do uso da modelagem numérica para caracterizar os principais processos de propagação de ondas, devido à carência de informações sobre o clima de ondas ao longo da Costa do RS.

A escassez de resultados no RS de transformação de ondas de águas profundas para águas rasas que englobem a fricção com o fundo e a difração como fatores adicionais, os quais se mostram como parâmetros importantes na análise feita por outros estudiosos. Falta no RS uma análise regional (média escala de centenas de km) incluindo estes fenômenos. Pelo fato de não haver o espectro real de ondas incidentes na região e pela necessidade de se modelar um domínio de grande largura (emprego de multi-grades com larguras de centenas de quilômetros), optou-se pelo uso do REF/DIF1, que é um modelo monocromático, ao invés da sua versão espectral (REFDIFS). No entanto, sabidamente, os resultados obtidos com o REF/DIF1 são superestimados em relação aos do REFDIFS (Barletta, 2006; Palha et al., 2006).

O modelo usado nesta simulação numérica engloba praticamente todas as transformações possíveis, Kr (coeficiente de refração), Ks (coeficiente de *shoaling*), Kd (coeficiente de difração) e Kf (coeficiente de fricção). Nos estudos anteriores (Pimenta, 1999), (Speranski e Calliari, 2006) os modelos usados não incorporavam os termos de difração e perda de energia por fricção. Além disso, tem-se agora, uma malha batimétrica mais detalhada, com menor espaçamento. A aplicação desta modelagem mais completa pode indicar novas descobertas.

O conhecimento da propagação de ondas da Região de estudo permitirá entender a influência da variação da largura da plataforma continental e da fricção do fundo nos processos morfodinâmicos costeiros com prováveis implicações na forma e evolução da barreira arenosa.

3. METODOLOGIA

3.1 Etapas da simulação numérica

A modelagem numérica da propagação das ondas na região entre Torres e Mostardas, na costa do RS, passa pelas três fases existentes em qualquer simulação numérica, a de pré-processamento, a de processamento e a de pós-processamento. A fase de pré-processamento tem início pelo processo de digitalização de cartas náuticas, obtendo-se, então, um arquivo contendo a batimetria da região em pontos referenciados no sistema de coordenadas geográficas (ver diagrama da Fig. 3). Para o presente trabalho, usa-se o arquivo digitalizado por Pimenta (1999). No software SPRING (2002), gera-se uma grade retangular xy baseada no sistema de projeção UTM (do inglês Universal Transverse Mercator), a partir do arquivo resultante da digitalização. É necessário, para tal fim, informações das longitudes e latitudes limites da região em estudo, da escala da carta e do elipsóide de referência adotado. Deve-se, também, escolher o método de interpolação mais adequado e o espaçamento (dx, dy) da grade gerada, permitindo, assim, a reprodução da topografia de fundo, de forma mais fiel possível com a realidade. Observa-se que o tamanho desse espaçamento é inversamente proporcional

ao tempo de processamento e intimamente relacionado à capacidade do hardware utilizado para tal fim. Torna-se imprescindível o equilíbrio entre esses fatores, sob pena de dificultar, ou até mesmo impossibilitar a solução numérica do domínio em estudo. O programa SPRING-REFDIF (Szewczyk, 2004), gera uma nova grade retangular a ser utilizada pelo REF/DIF1 a partir da grade obtida do SPRING.

A fase de processamento é executada através do programa REF/DIF1 (Kirby e Dalrymple 1994) e, já na fase de pós-processamento, o programa REFDIF_TEC tem a tarefa de adequar os arquivos de saída do REF/DIF1 para um arquivo que contenha os resultados da simulação. A visualização da distribuição da altura de onda, raios de onda, linha de rebentação e grades do SPRING e do REF/DIF1 são realizadas através do aplicativo TECPLOT (1998), completando a fase de pós-processamento.

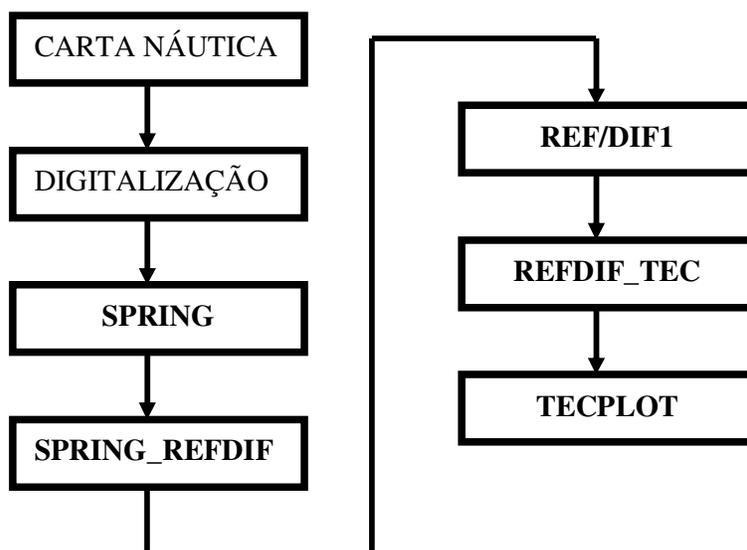


Figura 3 - Etapas da simulação numérica utilizadas neste trabalho

3.2 O programa REF/DIF1

O REF/DIF1 (Kirby e Dalrymple, 1994) é um modelo de propagação e deformação da agitação marítima em zonas de profundidade variável, desenvolvido na Universidade de Delaware, no Estado de Newark (Estados Unidos), baseado na aproximação parabólica da equação do declive suave, usando o método Minimax de Kirby (1986b), e permitindo bons resultados para faixas de desvios de direção de onda de $\pm 45^\circ$ em relação à direção predominante de propagação da onda. O programa é usado em propagação de uma onda monocromática (período, direção e amplitude) representativa do estado de agitação do mar. Efetua a propagação da onda em zonas costeiras, considerando os efeitos da refração, difração (apenas da direção transversal à de propagação da onda), presença de correntes, empolamento, dissipação de energia devido à rebentação e ao atrito com o fundo, não contemplando, no entanto, os fenômenos de reflexão. Assim, por se tratar de um modelo parabólico, permite contornos laterais abertos ou fechados (reflexão total). Dessa forma, trata-se de um modelo mais rápido e eficiente que requer uma menor solicitação de memória computacional comparado a outros, como por exemplo, os baseados na aproximação elíptica.

No REF/DIF1, a equação da dispersão usada considera os efeitos de não linearidade através da aproximação de Kirby e Dalrymple (1986). Fornece as alturas e as direções de propagação da onda em qualquer zona, incluindo a de rebentação. O modelo prevê a interação onda-corrente, baseada na equação de Kirby (1986b). As dissipações de energia também são consideradas. Inclui o modelo de Phillips (1966) para os efeitos de amortecimento da onda devido à camada limite na superfície livre e o modelo apresentado por Dean e Dalrymple (1991) para as camadas limites laminar e turbulenta. O REF/DIF1 inclui o amortecimento devido ao escoamento de Darcy em fundo poroso (Liu e Dalrymple, 1984). A dissipação por rebentação é considerada no modelo quando $H > 0,78h$ (Kirby e Dalrymple, 1994). A codificação do programa é feita na linguagem FORTRAN 77, empregando o método implícito de discretização de diferenças finitas de Crank-Nicolson. O modelo calcula a altura da onda, H , a direção de propagação da onda, θ , a amplitude complexa, a , e a elevação da superfície, η , em cada ponto da malha de diferenças finitas. Faz-se necessário garantir para a aplicação do modelo que:

- O fundo seja de inclinação suave, até um valor do declive de 1:3.
- Na construção da malha de diferenças finitas: a) seja contemplado um mínimo de 5 pontos por comprimento de onda; b) a primeira linha deve ser toda contida na água e a última linha deve ter pelo menos um nó na água; c) a costa deve ser contínua, pois domínios que apresentem terra-água-terra podem ocasionar problemas; d) o ângulo entre a direção de propagação da onda e a direção predominante de propagação, não deve ultrapassar os 45°; e) a malha deve ter uma dimensão tal que a influência das fronteiras não se faça sentir na zona de interesse de estudo; f) Por se tratar de um modelo parabólico, que considera somente a onda incidente na solução, os resultados da última linha da grade anterior servem como dados de entrada para a primeira linha da próxima grade. Com isso, evita-se a construção de uma única grade com um espaçamento pequeno, acarretando um esforço computacional maior.

Destacam-se como limitações do REF/DIF1: a) trata-se de um modelo de ondas monocromáticas; b) o modelo apenas leva em conta a difração de ondas na direção transversal à direção de propagação de ondas, razão pela qual não deva ser aplicado a zonas onde os efeitos da reflexão sejam importantes (Fortes, 2002).

3.3 Implementação da metodologia para a região Torres-Mostardas

O modelo REF/DIF1 foi aplicado ao estudo de propagação de ondas, com e sem atrito com o fundo, ao longo da costa do Rio Grande do Sul, na região compreendida entre Torres e Mostardas.

O início da análise da questão de propagação de ondas tem por base o processo de digitalização de cartas náuticas contendo dados batimétricos da região em estudo. Neste caso, usam-se os arquivos digitalizados por Pimenta (1999), fazendo-se uma combinação das Cartas 2000 – Torres a Mostardas (Diretoria de Hidrografia e Navegação - DHN), e 90 – Ilha de Santa Catarina a Maldonado (DHN).

A grade gerada pelo SPRING a partir dessas cartas, está compreendida entre as coordenadas O 55°00 e O 47°10 de longitude e S 35°40 e S 27°10 de latitude, contento um espaçamento de 500m x 500m, o que reproduz satisfatoriamente o relevo de fundo da região em estudo. Na interpolação da batimetria dos pontos amostrados (resultado da digitalização das Cartas Náuticas) para os pontos da grade do SPRING, foi utilizado o método da média ponderada por cota e quadrante, que, além de preservar a linha de costa, permite um relevo suave.

Para o estudo da influência do atrito e da variação da plataforma continental versus antepraia, é adotada uma metodologia semelhante à proposta por Wright et al. (1987), que

efetuaram simulações numéricas na costa do estado da Virgínia, EUA, com vistas ao estudo da variação da energia de ondas ao longo da linha da costa e do transporte de sedimentos em função da dissipação da energia de onda por atrito com o fundo e sua relação com trechos de erosão e acreção costeira. Os referidos autores propuseram, após uma análise do clima de ondas da região em estudo, três tipos de ondas: onda modal (período e altura de maior incidência), onda de tempestade e onda de projeto.

Os estudos da influência do atrito, inicialmente com fator de atrito $f_w=0,01$ usado originalmente no REF/DIF1, e da variação da largura e declividade da plataforma continental interna versus antepraia foram realizados com a seleção das seguintes simulações:

- a) onda modal, com período $T = 7s$, altura significativa $H_s = 1,75m$, nas direções de 45° e 180° , baseando-se nas informações do clima de ondas apresentado por Fontoura (2004);
- b) onda de tempestade, com período $T=12s$ e altura significativa $H_s = 4m$, nas direções de incidência de 90° , 135° e 180° , conforme os estudos de Mota (1963);
- c) onda de projeto, com período $T = 16s$, altura significativa $H_s = 4,8m$, nas direções de incidência de 90° e 135° , e
- d) onda de $T = 9s$, altura significativa $H_s = 2m$, nas mesmas direções de incidência de 45° , 70° , 90° , 110° , 135° , 160° , e 180° .

Considerando-se o fator de atrito $f_w = 0,2$, foram também simuladas as seguintes situações:

- a) onda modal, com período $T = 7s$, altura significativa $H_s = 1,75m$, direção de incidência 180° ;
- b) onda de tempestade, com período $T = 12s$, altura significativa $H_s = 4m$, direção incidente de 135° ;
- c) onda de projeto, com $T = 16s$, altura significativa $H_s = 4,8m$ e direção de incidência 135° , e
- d) onda de período $T = 9s$, altura significativa $H_s = 2m$, direções de incidência 90° e 135° .

Estas simulações numéricas foram realizadas em um computador pessoal (Intel Celeron, CPU 2.13 GHz, 1GB de RAM) com tempo médio de processamento de 2h30min para cada grade.

Para a análise dos resultados em cada simulação, elaboraram-se gráficos que mostram as grades utilizadas, alturas de ondas, com e sem atrito com o fundo, diferenças de alturas de ondas com e sem atrito, raios de ondas e perfis de altura de onda nas localidades de Tramandaí (antepraia mais estreita), Pinhal (ponto de inflexão da antepraia) e Quintão (onde a antepraia apresenta-se mais larga).

4.DISCUSSÃO E RESULTADOS

4.1 A influência do atrito e da variação da largura da plataforma continental interna versus antepraia na propagação da onda.

Com o objetivo de investigar o efeito da perda de energia das ondas por atrito com o fundo e a influência da plataforma continental interna versus antepraia, aplicou-se o modelo REF/DIF1 adotando os coeficientes de atrito $f_w = 0,01$ (valor original) e $f_w = 0,2$. Selecionaram-se algumas situações para serem apresentadas neste artigo, são elas: a) onda de tempestade ($T = 12s$, $H_s = 4m$) na direção de 135° ; e b) onda de projeto ($T = 16s$, $H_s = 4,8m$) na direção de 135° . Para avaliar-se o comportamento da altura da onda, propagando-se em direção perpendicular à costa, à semelhança de Wright et al. (1987), construíram-se três perfis de batimetria, o de Tramandaí, de Pinhal e de Quintão, para todas as simulações realizadas (Fig. 3) Tal escolha deve-se ao fato de que na região de Tramandaí a isóbata de 20m, está

mais próxima da costa do que na região de Quintão, onde se apresenta um alargamento, e em Pinhal é a região onde ocorre a mudança dessa variação.

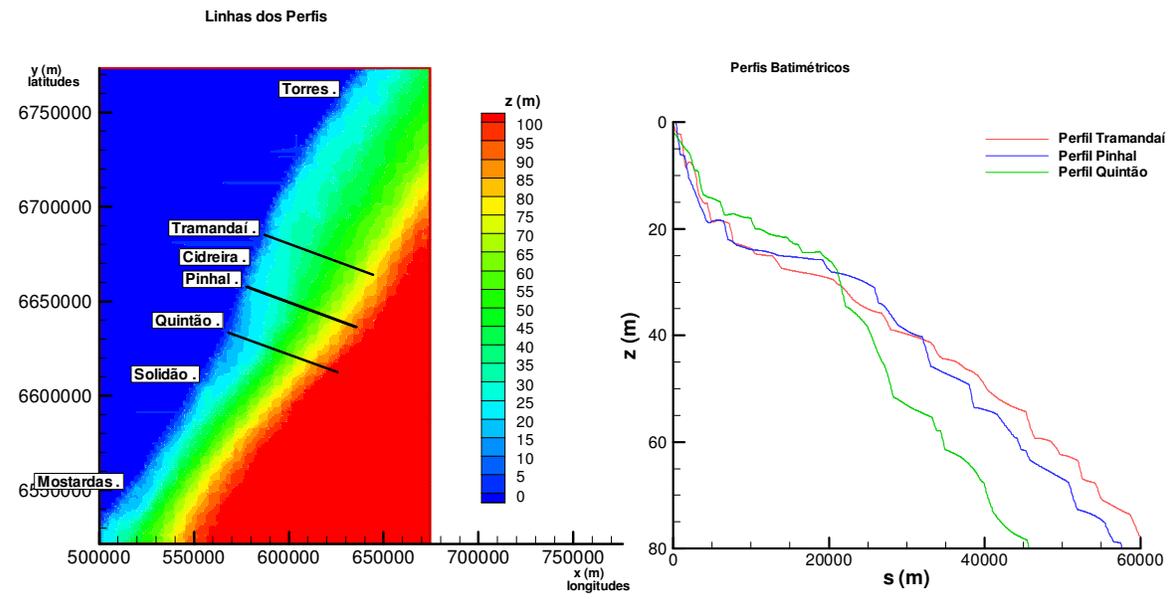


Figura 4 - Perfis de Tramandaí, Pinhal e Quintão e respectivas comparações.

Comparando-se os três perfis entre si (Fig.4) pode-se concluir que no intervalo com batimetrias de 0 a 20m (limites da antepraia) o perfil de quintão (1:549) é mais suave do que os perfis de Tramandaí (1:367) e Pinhal (1:335). Já para uma profundidade que varia de 20 a 50m (limites da plataforma continental interna), o perfil de Quintão (1:332), a partir de isóbata de 30m passa a ser o mais abrupto dos três e Tramandaí (1:348) é mais suave do que Pinhal (1:334). No intervalo batimétrico de 50m a 80m, o perfil de Quintão (1:572) continua a ser o mais acentuado, seguido dos perfis de Pinhal (1:670) e Tramandaí (1:742)

4.2 Onda de tempestade de período $T = 12s$, altura significativa $H_s = 4,0m$, direção de incidência $\theta = 135^\circ$, $f_w = 0,01$.

Para a modelagem numérica dessa agitação marítima, empregando o modelo REF/DIF1, construiu-se um conjunto de duas grades (Fig.5) rotacionado em relação ao sistema de referência adotado pelo SPRING de 220° . Assim, o ângulo de incidência da onda referenciado à grade do REF/DIF1 tem valor $\theta_0 = -15^\circ$. Nas Tab. 1 e 2 estão arrolados, respectivamente, as características e parâmetros utilizados para esta simulação numérica.

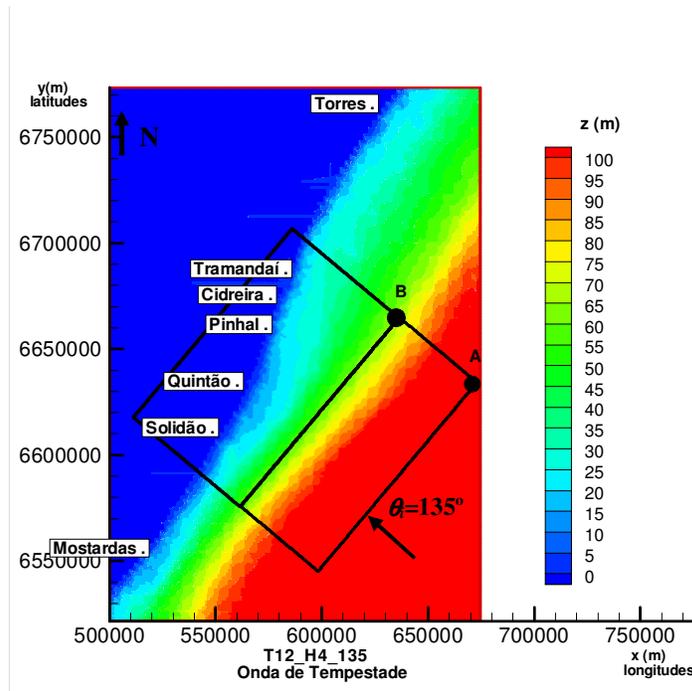


Figura 5 – Batimetria e Grades do SPRING e REF/DIF1 para onda de $T = 12s$, $H_s = 4,0m$, $\theta_i = 135^\circ$.

Tabela 1 - Características das grades para onda de $T=12s$, $H_s=4,0m$, $\theta_i=135^\circ$.

Grade 1	Grade 2
$A_x = 673029m$	$B_x = 636186m$
$A_y = 6634250m$	$B_y = 6664643m$
$L_x = 47760m$	$L_x = 65640m$
$L_y = 116320m$	$L_y = 116280m$
$mr = 1195$	$mr = 3283$
$nr = 2909$	$nr = 5815$
$d_{xr} = 40m$	$d_{xr} = 20m$
$d_{yr} = 40m$	$d_{yr} = 20m$
$ND = 4$	$ND = 5$
$ix = 4$	$ix = 5$

Nesta tabela A_x , A_y , B_x e B_y são as coordenadas cartesianas UTM dos pontos iniciais A, B e C respectivamente (ver Fig. 10), L_x é o comprimento da malha na direção x, L_y é o comprimento da malha na direção y, mr é o número de colunas (direção x) e nr é o número de linhas (direção y), d_{xr} e d_{yr} são os espaçamentos nas direções x e y, respectivamente, ND é o número máximo de subdivisões em cada célula da malha na direção y e ix é o número máximo de subdivisões na direção x.

Para um período $T = 12s$, o comprimento de onda em águas profundas é $L_o = 224,71m$, calculado pela Eq. 3. Para verificar a partir de qual profundidade consideram-se águas profundas, usa-se a relação $z/L_o = 1/2$. Desta forma, encontra-se a profundidade $z = 112,35m$, o que significa que a primeira linha da primeira malha deverá estar contida, no mínimo, nesta batimétrica.

Os espaçamentos dx e dy de cada grade são calculados em função do comprimento de onda mínimo esperado, o qual depende do valor da menor profundidade de cada grade (profundidade $z_{\text{mínima}}$). De acordo com Kirby e Dalrymple (1994), o espaçamento máximo deve ser aquele que proporcione no mínimo 5 pontos por comprimento de onda.

$$L_o = \frac{gT^2}{2\pi}, \quad (3)$$

onde g é a aceleração da gravidade e T o período da onda.

$$\sigma^2 = gk \tanh kh, \quad (4)$$

em que σ é a frequência angular da onda, k o número de onda e h a profundidade local.

A Tabela 2 mostra, para cada grade adotada, a profundidade mínima, $z_{\text{mínima}}$, o comprimento de onda mínimo esperado L , calculado pela Eq. 4 e a quantidade de pontos por comprimento de onda $L/d_{\text{yr}}/ND$.

Tabela 2 - Parâmetros das grades para onda de $T=12s$, $H_s=4,0m$, $\theta=135^\circ$.

Grades	$z_{\text{mínima}}$ (m)	L (m)	$L/d_{\text{yr}}/ND$
1	57	214,05	21,4
2	10	67,51	16,87

Nas Fig. 6 e 7, estão apresentados, nessa ordem, os resultados da distribuição de alturas de onda sem e com atrito. Tanto na distribuição de alturas de onda sem atrito como com atrito, levando em conta o fator $f_w = 0,01$, observa-se variação nas alturas de onda ao longo da costa. Além disso, existe uma suave atenuação na energia das mesmas devido à influência do atrito com o fundo, com maior ênfase na região de Quintão.

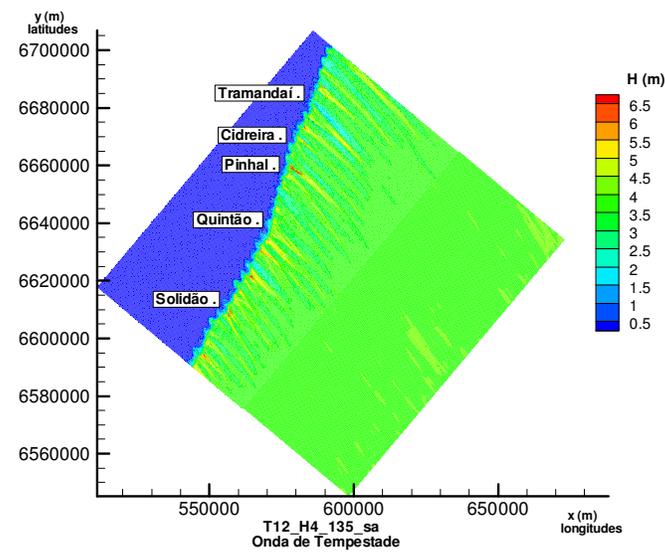


Figura 6 - Distribuição de alturas de onda para $T = 12s$, $H_s = 4,0m$, $\theta = 135^\circ$, sem atrito.

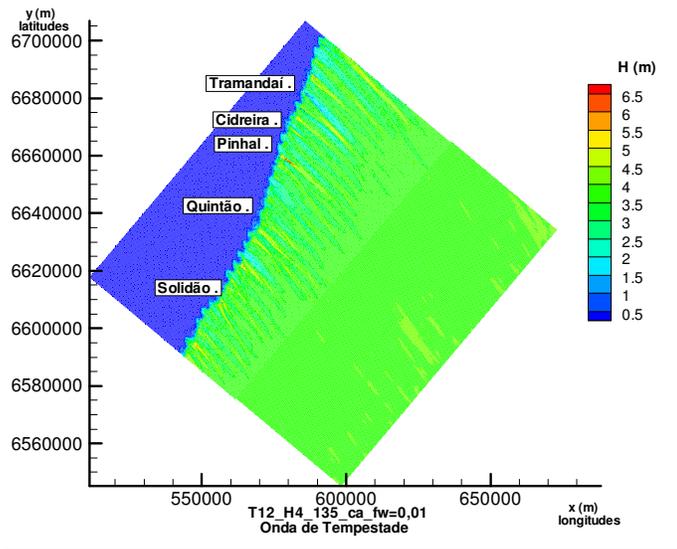


Figura 7 - Distribuição de alturas de onda para $T = 12s$, $H_s = 4,0m$, $\theta_i = 135^\circ$, $f_w = 0,01$.

A visualização dos raios de onda está mostrada na Fig. 8. Nota-se que, ao se aproximarem da batimétrica de 50m, as ondas começam a encurvarem-se, com tendência a disporem-se perpendiculares à costa. Verifica-se um padrão variável, com divergências e convergências entre Solidão e Quintão, acentuada divergência entre as localidades de Quintão e Pinhal e entre Pinhal e Cidreira. Observa-se também forte convergência na região de Pinhal e Solidão.

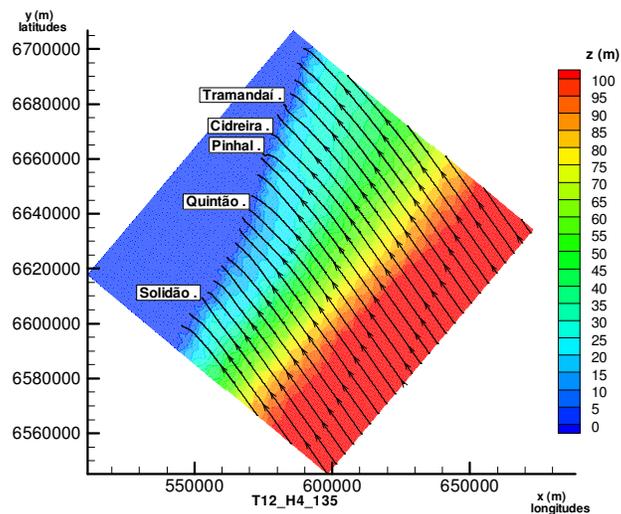


Figura 8 - Raios de onda para $T = 12s$, $H_s = 4,0m$, $\theta_i = 135^\circ$.

As alturas de onda e as diferenças entre alturas de onda sem e com atrito, ao longo da batimétrica de 10m são mostradas na Fig. 9. Os gráficos referentes à Fig. 10 evidenciam as

alturas de onda e as diferenças entre alturas de onda sem e com atrito, respectivamente, ao longo da profundidade de 20m.

Observa-se que na isóbata de 10m a diferença média entre a altura da onda sem atrito e com atrito é $dH = 0,48m$, enquanto que para a profundidade de 20m, tem-se a diferença média em $dH = 0,23m$. Conclui-se, portanto, que a influência do atrito para essa agitação marítima (com período de onda de $T = 12s$) é mais significativa em relação a períodos menores, embora a média da diferença de altura de onda sem e com atrito posicione-se na casa dos centímetros.

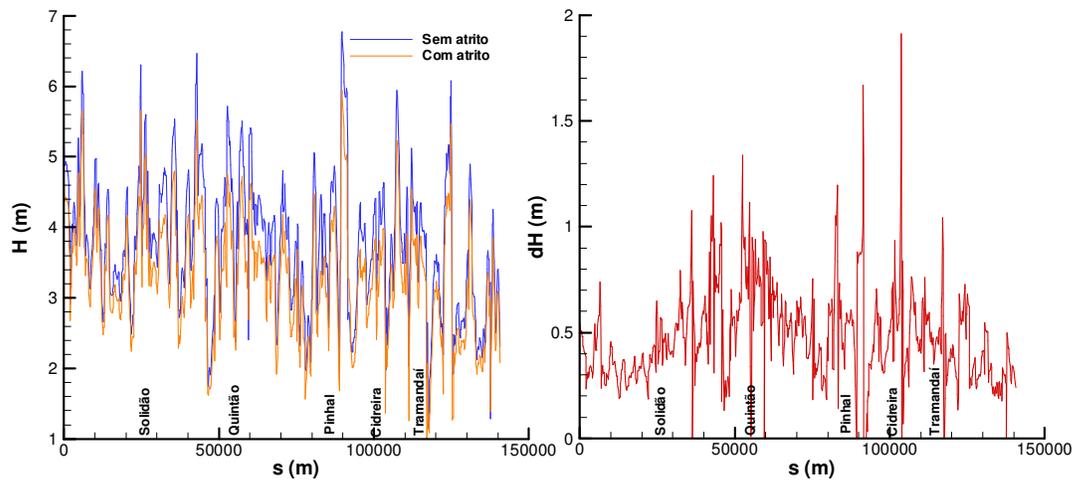


Figura 9- Alturas de onda e diferenças entre alturas de onda ao longo da batimétrica de 10m para $T = 12s$, $H_s = 4,0m$, $\theta = 135^\circ$ ($f_w = 0,01$).

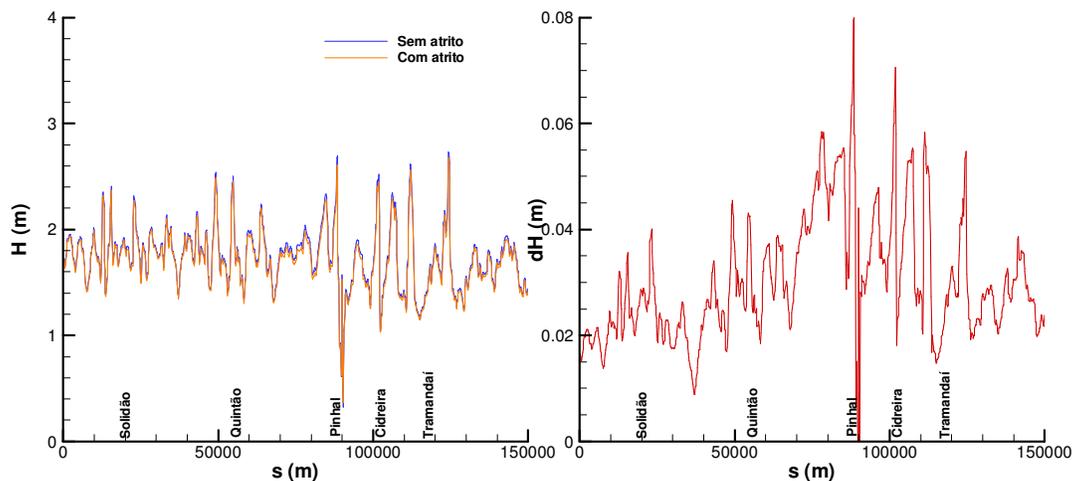


Figura 10 - Alturas de onda e diferenças entre alturas de onda ao longo da batimétrica de 20m para $T = 12s$, $H_s = 4,0m$, $\theta = 135^\circ$ ($f_w = 0,01$).

A Fig. 11 mostra o comportamento da altura da onda ao longo dos perfis de Tramandaí, Pinhal e Quintão. Observa-se que a onda sofre variações em sua altura, tornando-se mais

significativas a partir da profundidade de 60m para os perfis de Tramandaí e Pinhal e 50m para Quintão. A influência do atrito inicia-se a partir da batimétrica de 51m para o perfil de Tramandaí, de 53m para Pinhal e de 48m para o perfil de Quintão.

Nota-se, também, que usando-se o coeficiente de atrito assumido pelo REF/DIF1, ou seja, $f_w = 0,01$, as diferenças entre alturas de ondas sem e com atrito (dH), se fazem mais significativas para esta agitação martítima, com período de onda $T = 12s$ e altura significativa $H_s = 4,0m$, do que para as outras simulações numéricas, efetuadas para os casos com períodos e alturas significativas menores ($T = 7s$, $H_s = 1,75m$ e $T = 9s$, $H_s = 2,0m$). Por exemplo, nos perfis de Tramandaí e Pinhal a partir de profundidade de 25m a diferença entre altura de onda sem e com atrito torna-se mais visível. Para o perfil de Quintão, isto ocorre a partir da batimétrica de 15m.

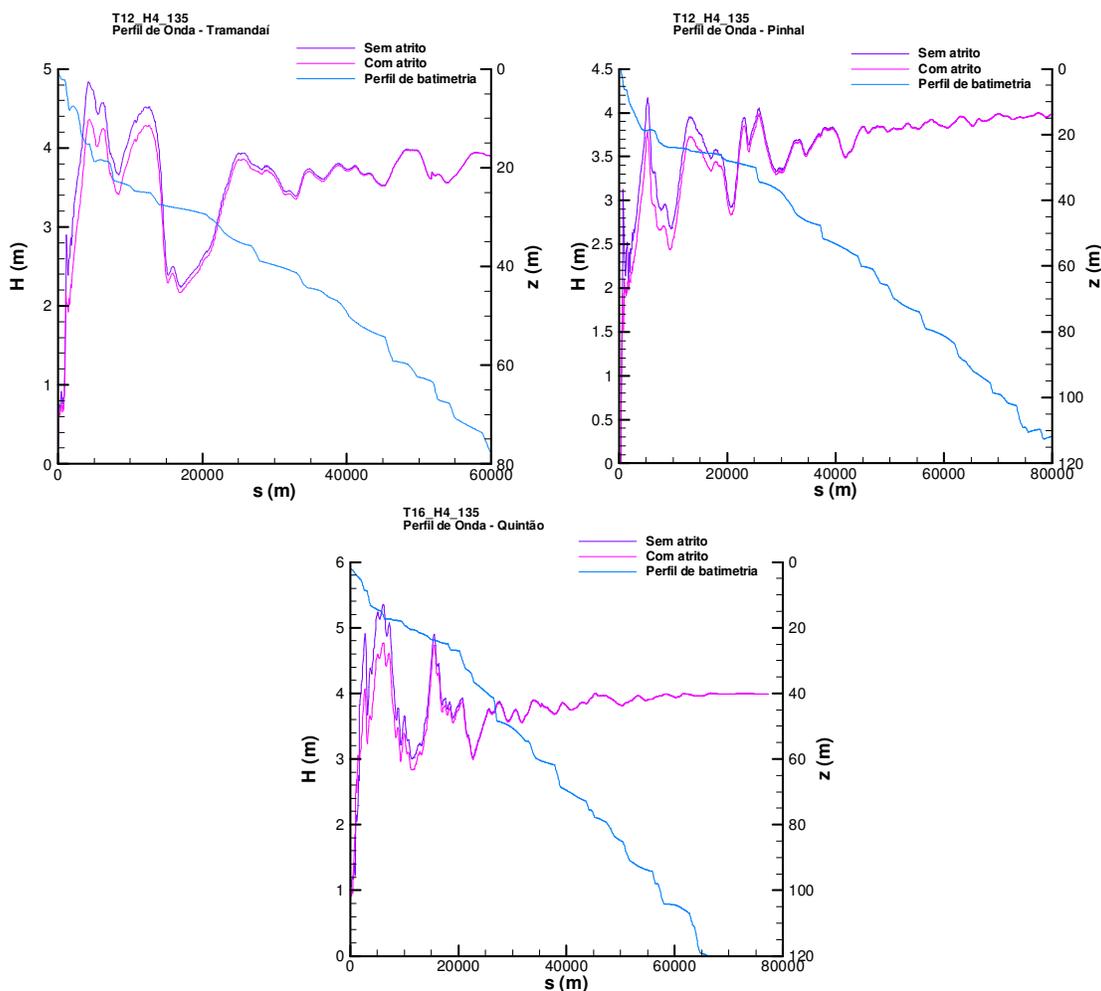


Figura 11 - Alturas da onda nos perfis de Tramandaí, Pinhal e Quintão para $T = 12s$, $H_s = 4,0m$, $\theta = 135^\circ$ ($f_w = 0,01$).

4.3 Discussão da influência do atrito e plataforma continental interna versus antepaia na propagação da onda usando $f_w = 0,01$.

Analisando-se a influência do atrito, com $f_w = 0,01$, na altura da onda próximo à linha de rebentação para todas as combinações de direção, período e altura de ondas presentes neste

trabalho, conclui-se que, com exceção das ondas de projeto ($T = 16s$), esse fator de atrito não reduz, de forma significativa, as alturas de onda.

Para a onda de projeto, com $T = 16s$ e $H_s = 4,8m$, nota-se que há uma variação considerável de altura de onda comparando os casos sem e com atrito, em torno de 1m em média na batimétrica de 10m.

Em função da pouca influência do atrito com o fundo apresentada usando um fator de atrito $f_w = 0,01$, realizaram-se algumas simulações adotando um $f_w = 0,2$. Os resultados destas simulações, apresentadas nas seções seguintes, mostram com mais clareza a importância do atrito com o fundo em relação à variação da largura de antepraia e plataforma interna na região.

4.4 Onda de Tempestade de período $T = 12s$, altura significativa $H_s = 4,0m$, ângulo de incidência $\theta_i = 135^\circ$, $f_w = 0,2$.

A Fig.12 apresenta os resultados obtidos pelo REF/DIF1 para a distribuição de alturas de ondas, onde se pode observar a forte dissipação da onda ao se deslocar em direção à costa.

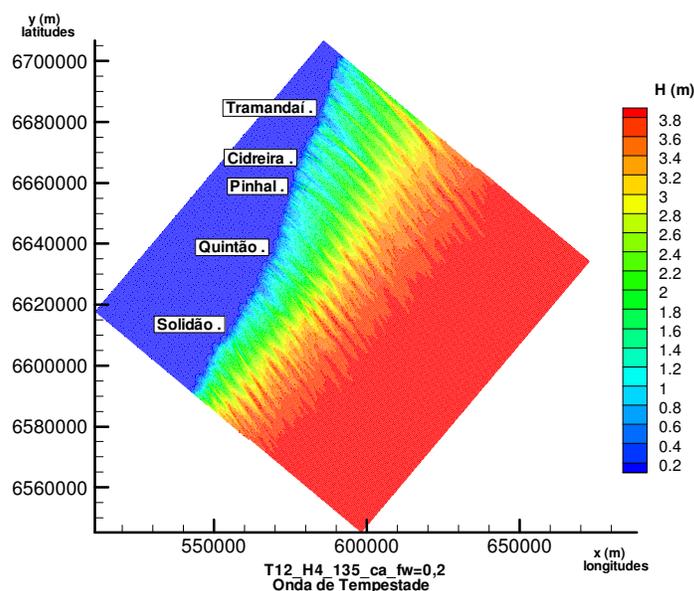


Figura 12 - Distribuição de alturas de onda para $T = 12s$, $H_s = 4,0m$, $\theta_i = 135^\circ$, com atrito $f_w = 0,2$.

As alturas de onda ao longo da batimétrica de 10m e suas diferenças de alturas de onda com e sem atrito estão apresentadas na Fig. 13. Essas características são mostradas para a batimétrica de 20m na Fig. 14. Na isóbata de 10m a diferença média entre a altura da onda sem atrito e com atrito é $dH = 2,8m$ ao sul de Pinhal e $dH = 2,5m$ ao norte de Pinhal, enquanto que para a profundidade de 20m encontra-se a diferença média de $dH = 1,8m$ para o sul de Pinhal e $dH = 2,3m$ para o norte de Pinhal. É possível, portanto, concluir que, ao se aplicar o coeficiente de atrito $f_w = 0,2$ para esse período e direção de altura de onda, ocorre uma atenuação bastante significativa na energia da onda que chega à costa, com diferenças entre alturas de onda na casa dos metros e, em média, acima de 2,5m. Comprova-se, também, que a atenuação é maior para ondas de período e altura maiores. A onda ao passar pela isolinha de 10m (Fig. 13) não apresenta gradientes laterais significativos, com uma suave divergência

para o norte de Pinhal, indicando uma compensação de dissipação de energia pela plataforma continental interna e anteaia.

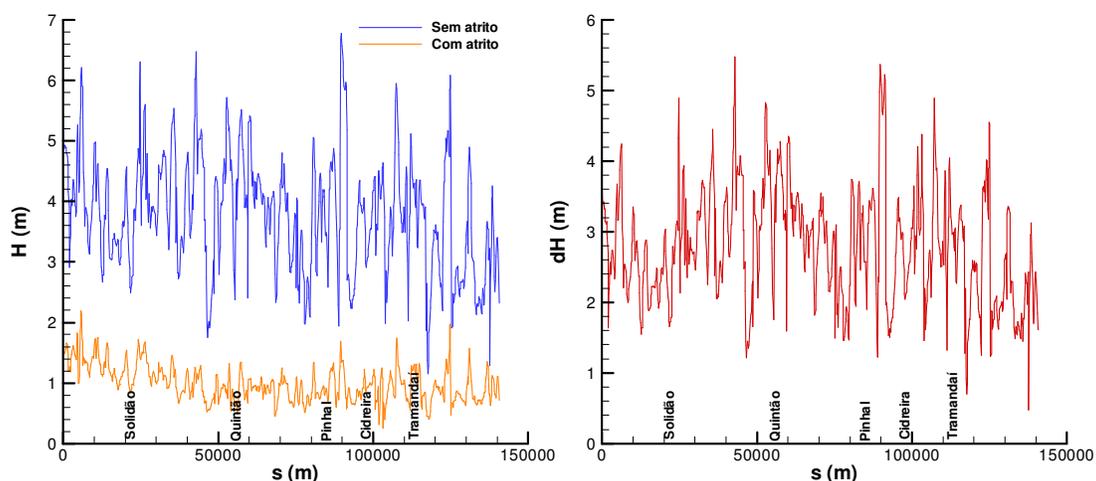


Figura 13 - Alturas de onda e diferenças entre alturas de onda ao longo da batimétrica de 10m para $T = 12s$, $H_s = 4,0m$, $\theta_i = 135^\circ$ ($f_w = 0,2$).

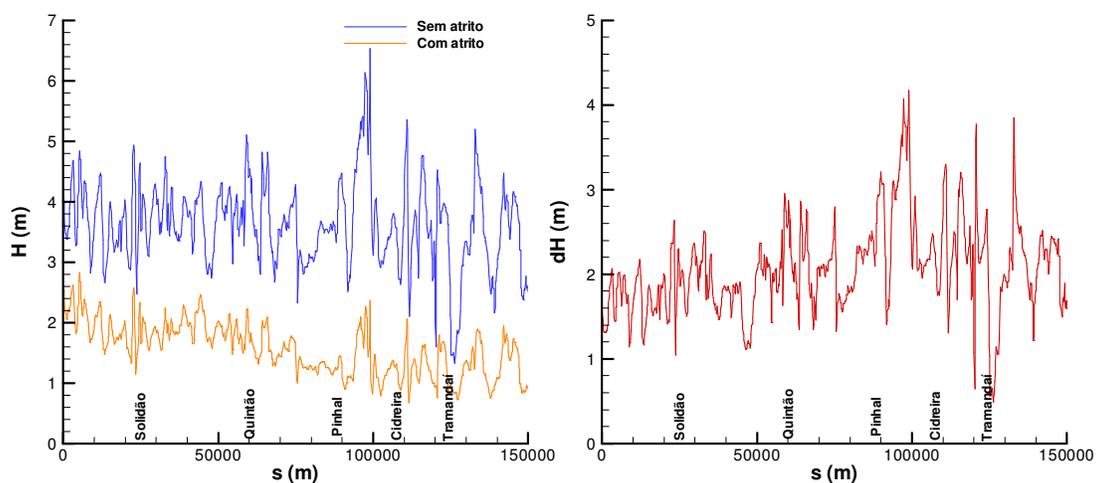


Figura 14 - Alturas de onda e diferenças entre alturas de onda ao longo da batimétrica de 20m para $T = 12s$, $H_s = 4,0m$, $\theta_i = 135^\circ$ ($f_w = 0,2$).

Os perfis de altura de onda para Tramandaí, Pinhal e Quintão constam, respectivamente, na Fig. 15. Ao se propagarem em direção à costa, as ondas sofrem variações em sua altura, tornando-se mais significativas a partir da profundidade de 68m, 60m e 57m para os perfis de Tramandaí, Pinhal e Quintão, respectivamente. A influência do atrito inicia-se a partir da batimétrica de 72m para os perfis de Tramandaí e Pinhal e de 68m para o perfil de Quintão, sendo que a partir da profundidade de 20m até a costa, a diferença de altura de onda, sem e com atrito, passa a ser significativa.

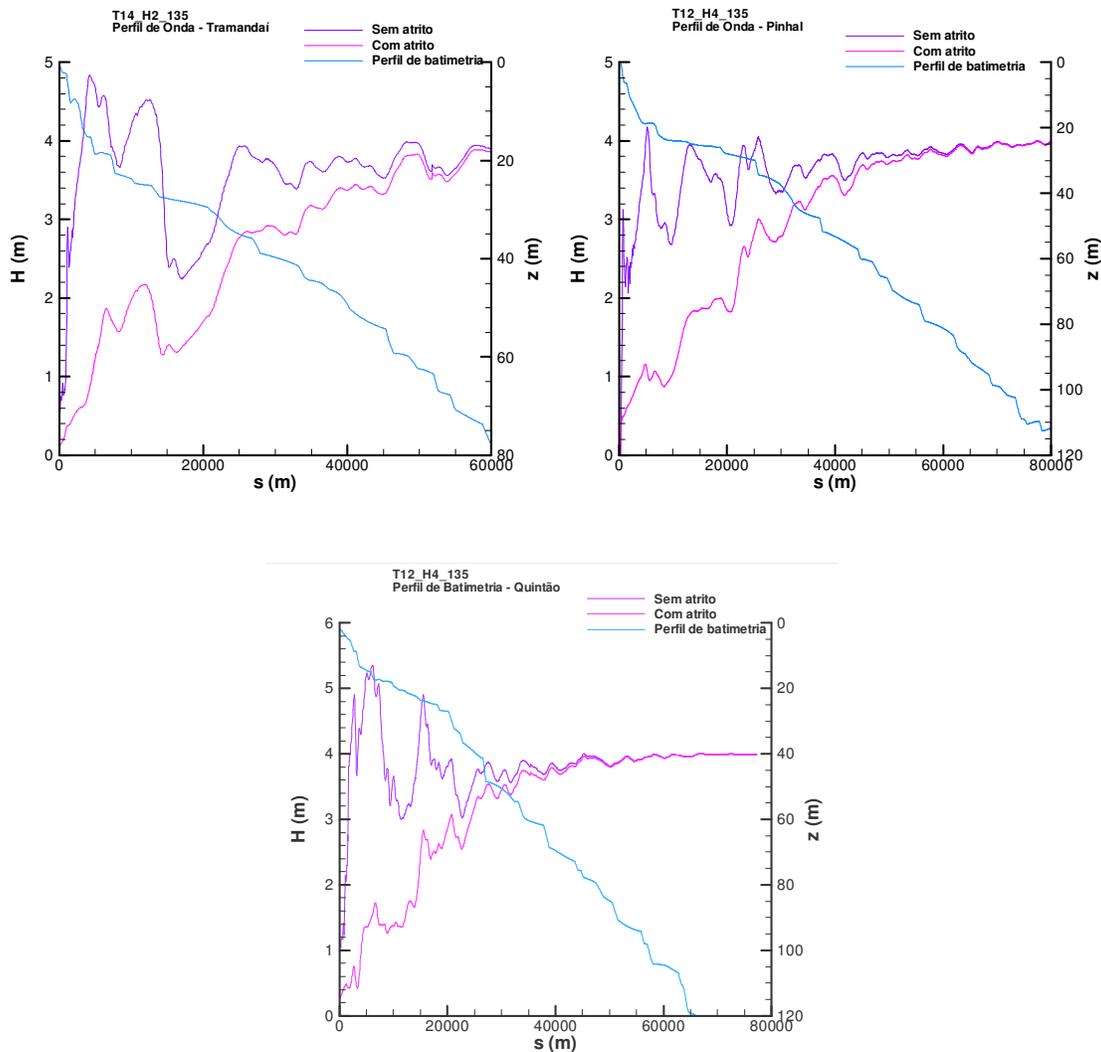


Figura 15 - Altura de onda nos perfis de Tramandaí, Pinhal e Quintão para $T = 12s$, $H_s = 4,0m$, $\theta = 135^\circ$ ($f_w = 0,2$).

4.5 Onda de projeto de período $T = 16s$, altura significativa $H_s = 4,8m$, ângulo de incidência $\theta = 135^\circ$, $f_w = 0,2$.

Na Fig. 16 encontram-se os resultados da distribuição de alturas de onda mostrando a atenuação acentuada da onda ao se aproximar da costa.

As alturas de ondas ao longo da batimétrica de 10m e suas diferenças de alturas de onda com e sem atrito estão apresentadas na Fig. 17. Essas características são mostradas para a batimétrica de 20m nas Fig. 18. A diferença média entre a altura da onda sem atrito e com atrito na profundidade de 10m é $dH = 4,3m$ ao sul de Pinhal e $dH = 4,6m$ ao norte de Pinhal, enquanto que para a profundidade de 20m, tem-se a diferença média em $dH = 3,1m$ ao sul de Pinhal e $dH = 2,9m$ ao norte de pinhal. Conclui-se que, para essa agitação marítima, a influência do atrito se faz bastante presente, reduzindo em muito as alturas de onda, com diferença média acima de 4m. Também se comprova que a atenuação é maior para ondas com período e alturas maiores, pois o cálculo do coeficiente de atrito, f_w , é diretamente proporcional à altura da onda. Nota-se que as alturas da onda ao chegar na isobatimétrica de

10m (Fig. 16), apresentam variações laterais suaves, ocasionadas pela compensação do efeito da plataforma continental interna e da antepraia, juntamente com os coeficientes de refração, difração, shoaling e de dissipação de energia.

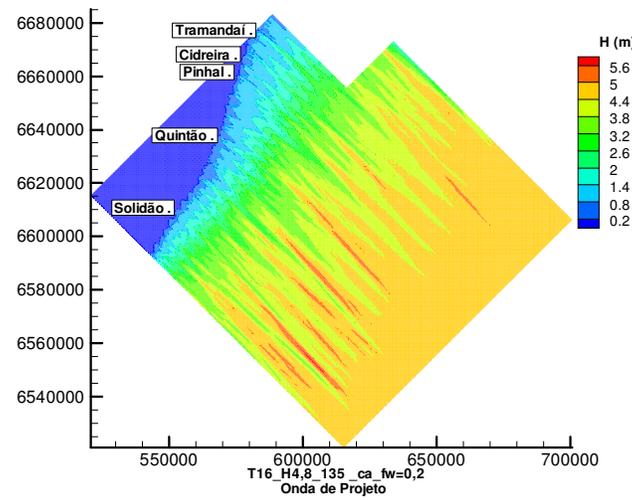


Figura 16 - Distribuição de alturas de onda para $T = 16s$, $H_s = 4,8m$, $\theta_i = 135^\circ$, com atrito $f_w = 0,2$.

Os perfis de altura de onda para Tramandaí, Pinhal e Quintão constam, da Fig. 19. Ao se propagar em direção à costa a onda sofre variações em sua altura, tornando-se mais significativas a partir da profundidade de 112m para o perfil de Tramandaí, 117m para Pinhal e 116m para Quintão. A influência do atrito inicia-se a partir da batimétrica de 142m para os perfis de Tramandaí, e Pinhal e 150m para o perfil de Quintão e torna-se mais efetiva a partir da profundidade de 70m para o perfil de Tramandaí e de 50m para os perfis de Pinhal e Quintão.

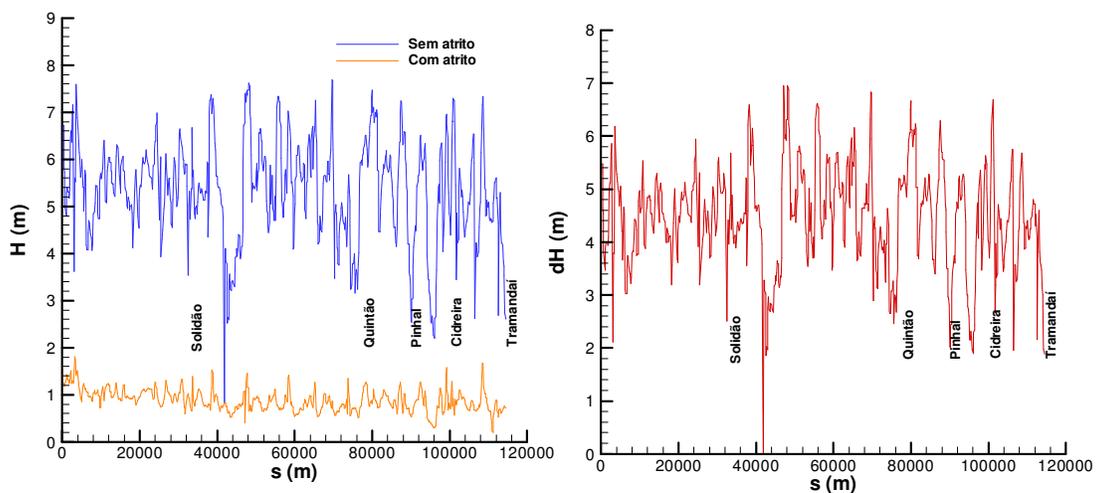


Figura 17 - Alturas de onda e diferenças entre alturas de onda ao longo da batimétrica de 10m para $T = 16s$, $H_s = 4,8m$, $\theta_i = 135^\circ$ ($f_w = 0,2$).

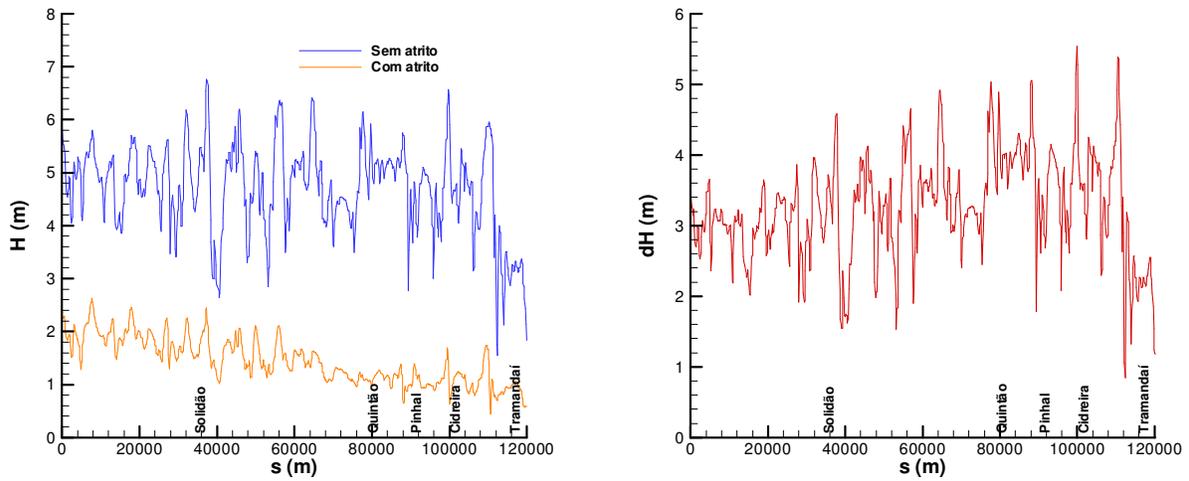


Figura 18 – Alturas de ondas e diferenças entre alturas de onda na batimétrica de 20m para $T = 16s$, $H_s = 4,8m$, $\theta_i = 135^\circ$ ($f_w = 0,2$).

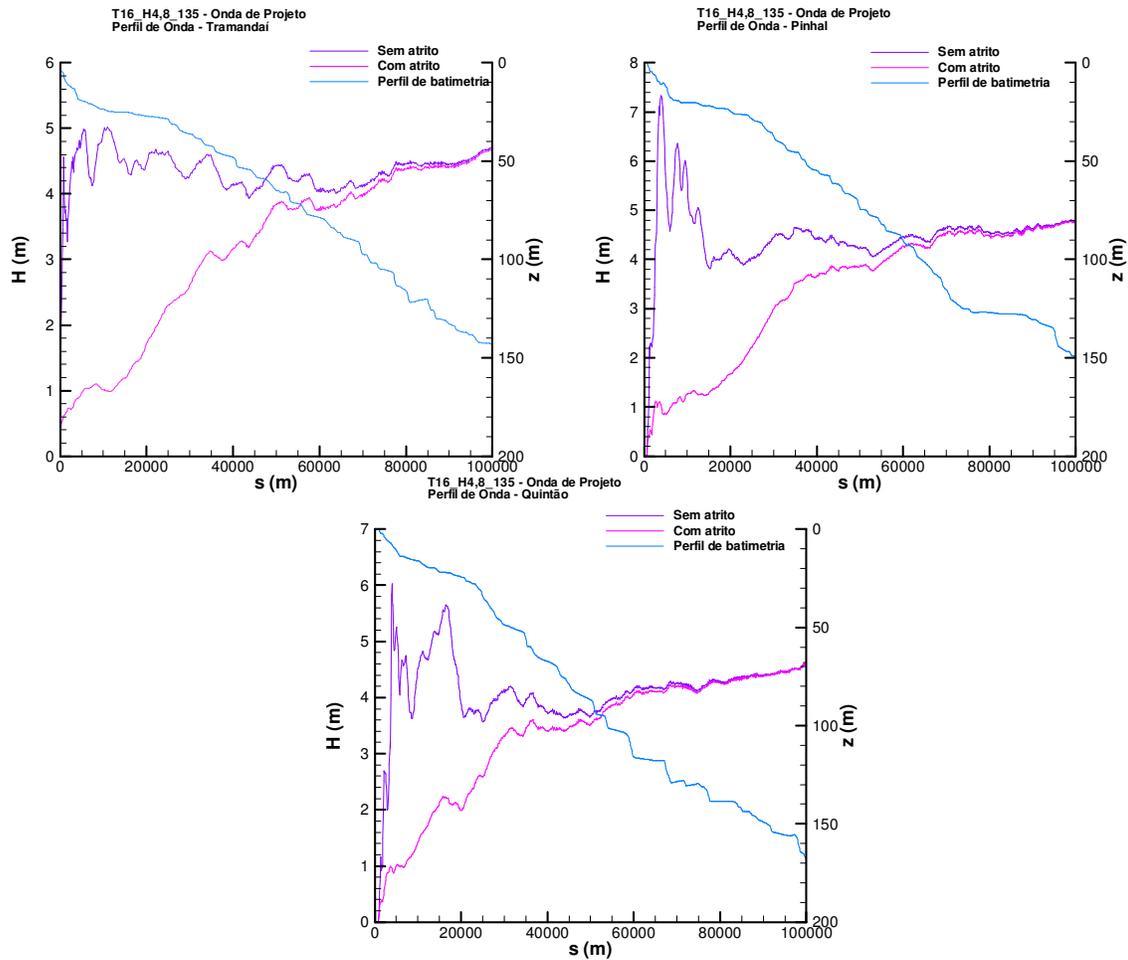


Figura 19 - Altura da onda nos perfis de Tramandaí, Pinhal e Quintão para $T = 16s$, $H_s = 4,8m$, $\theta_i = 135^\circ$ ($f_w = 0,2$).

4.6 Discussão sobre a influência do atrito e plataforma continental interna versus antepraia na propagação da onda.

A análise da influência do atrito na propagação de ondas com fator de atrito de $f_w = 0,2$, em comparação com as simulações sem a presença do atrito, revela que ocorre, em todos os casos, uma acentuada atenuação nas alturas de onda, influenciando fortemente a propagação dessas ondas.

Wright et al. (1987), em sua investigação da dinâmica de praia da região costeira no Estado da Virgínia (EUA), no trecho compreendido entre *Cape Henry* e *False Cape*, afirma que há mais dissipação da energia da onda por atrito com o fundo em regiões que apresentam profundidades mais rasas e gradientes mais suaves do que nas regiões mais profundas e com gradientes mais acentuados. Concluem que as alturas de ondas vindas de águas profundas chegam à costa com alturas maiores onde a antepraia é mais estreita, e com alturas menores onde a antepraia é mais larga. Como a largura da plataforma interna não varia ao longo de região, então, esta plataforma não exerce influência na energia da onda que chega à costa, sendo que a variação lateral de energia é função da antepraia. Esses autores atribuem a erosão no trecho estudado à maior energia de onda em função da menor dissipação de energia, reforçando ou evidenciando o papel da antepraia como elemento importante na dissipação de energia.

Esperava-se que as alturas de ondas que chegam na região estudada da costa do RS, onde a antepraia é mais estreita (Pinhal até Torres), fossem maiores do que no trecho compreendido em que a antepraia se alarga (Mostardas a Pinhal). Tal expectativa se apóia no fato de que de Pinhal a Torres as ondas se propagam sobre pista menor, de maior declividade, dissipando menos energia por atrito com o fundo, ao passo que, de Mostardas a Pinhal, por haver mais espaço para a propagação, devido ao perfil mais suave, a atenuação da energia por atrito com o fundo é maior e, conseqüentemente, as alturas se tornariam menores, considerando-se também que a antepraia é mais importante na dissipação por atrito.

Ao se aplicar o modelo REF/DIF1, constatou-se que as alturas de onda nas batimétricas de 5m e 10m não apresentam diferenças significativas entre a região de antepraia mais estreita e a região onde a antepraia se apresenta mais larga. Uma explicação plausível para esse fenômeno, está calcada justamente na morfologia do fundo desse trecho da costa do RS, ou seja, a plataforma continental interna (50m) compensa a antepraia (20m) em termos de propagação e dissipação de energia de ondas por atrito com o fundo. O total de energia de onda que chega à costa do RS está diretamente relacionado às variações batimétricas da antepraia e da plataforma continental interna. Uma constatação desse fenômeno pode ser nitidamente visualizada na Fig. 17 e 18. Observa-se que na batimétrica de 20m, em que a onda já passou pela isóbata de 50m, as alturas são menores no trecho que vai de Pinhal a Tramandaí (cuja distância média entre as isolinhas de 50m e 20m é de 38,47km) e são mais altas no trecho que vai de Solidão a Pinhal (onde a distância média entre as isóbatas de 50m e 20m é igual a 14,86km). Quando a onda chega à profundidade de 10m, as alturas de onda praticamente se equiparam, mostrando que houve uma compensação nesse trecho.

A Tab. 4 mostra para cada período e direção incidente de onda, com $f_w = 0,2$, as respectivas diferenças médias entre alturas de onda sem e com atrito. Conclui-se, da análise desta tabela, que no geral, há uma compensação de energia da onda ao chegar na antepraia.

Tabela 4 – Diferenças médias entre alturas de onda sem e com atrito (SP = Sul de Pinhal e NP = Norte de Pinhal)

$T - \theta_i$	dH (m)				Observações
	z = 20m		z = 5m ou 10m		
	SP	NP	SP	NP	
9s – 90°	0,4	0,5	1,2	1,4	Compensação de energia. Suave convergência ao sul de Solidão
9s – 135°	0,4	0,5	1,1	1,2	Compensação de energia. Quase sem refração com suave divergência ao norte de Pinhal.
7s – 180°	0,15	0,2	0,5	0,3	Influência da antepraia suavemente maior. Leve divergência para o norte de Pinhal.
12s – 135°	1,8	2,3	2,8	2,5	Influência da antepraia suavemente maior. Pouca divergência ao norte de Pinhal, quase sem refração.
16s – 135°	3,0	3,2	4,3	4,5	Influência da plataforma continental suavemente maior. Atrito mais atuante, divergência ao norte de Pinhal.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentou-se uma caracterização dos principais processos de propagação de ondas, via simulação numérica, para o litoral médio e norte do Rio Grande do Sul, especificamente na região compreendida entre Torres e Mostardas. Para tal procedimento, empregou-se um sistema de informações georeferenciadas SPRING (2002), o qual, a partir de uma carta náutica digitalizada, faz a transformação das coordenadas geográficas para cartesianas, obtendo-se uma grade retangular contendo as batimetrias da região em estudo. Na fase de processamento, utilizou-se o REF/DIF1 (Kirby e Darlymple, 1994), que é um modelo de propagação e deformação da agitação marítima em profundidades variáveis, baseado na aproximação parabólica da equação do declive suave. Este software considera os efeitos da refração, difração (na direção perpendicular à propagação), empolamento, dissipação de energia da onda por atrito com o fundo e rebentação. A visualização dos resultados foi realizada através da ferramenta Tecplot (1998).

Investigou-se a influência do atrito e variação da largura da plataforma continental interna versus antepraia na propagação das ondas. Para isso, foram simuladas as ondas modais ($T = 7s$, $H_s = 1,75m$, direções de 45° e 180°), as ondas de tempestade ($T = 12s$, $H_s = 4m$ e direções de 90°, 135° e 180°), as ondas de projeto ($T = 16s$, $H_s = 4,8m$ e direções de 90° e 135°) e as ondas de $T = 9s$, $H_s = 2m$ para as direções de 45°, 70°, 90°, 110°, 135°, 160° e 180°. Foram modeladas situações sem e com atrito com o fundo para analisar a influência deste atrito na propagação da onda. Após estudos sobre o fator de atrito a ser usado, verificou-se que o fator de atrito $f_w = 0,01$, empregado originalmente pelo REF/DIF1, é um valor muito baixo para a região. Concluiu-se que o fator de atrito $f_w = 0,2$ é um valor aceitável. Assim, após serem realizadas simulações sem e com a presença do atrito com o fundo ($f_w = 0,01$ e $0,2$), as principais conclusões encontradas foram:

a) Verificou-se que em todas as simulações efetuadas o fator de atrito $f_w = 0,01$ não reduz a energia das ondas de forma significativa, cujas diferenças entre alturas sem e com atrito situam-se nas casas dos centímetros e decímetros. Exceção para a onda de projeto, ($T = 16s$, $H_s = 4,8m$) em que essas diferenças ficam em torno de 1m.

b)O trecho entre a plataforma continental interna (isobatimétrica de 50m) e a antepraia (isobatimétrica de 20m) não atua como fator dissipador de energia das ondas, no caso de $f_w = 0,01$.

c)Não se observam gradientes laterais expressivos com $f_w = 0,01$.

d)Com $f_w = 0,2$, observou-se que há maior redução de energia de ondas, cujas diferenças entre alturas de onda sem e com atrito, variam em média de decímetros até 4,6m, mostrando que a antepraia tem papel importante na dissipação de energia das ondas por atrito com o fundo.

e)A atenuação de energia das ondas cresce para ondas com período e alturas significativas maiores, no caso de $f_w = 0,2$.

f)Para $f_w = 0,2$, há gradientes laterais pouco significativos, ou seja, as alturas de ondas ao longo das batimétricas de 5m e 10m apresentam pouca diferença de altura em relação à variação da largura da antepraia.

g)A plataforma continental interna atua como compensadora da antepraia em termos de propagação e dissipação da energia das ondas, com $f_w = 0,2$, devido ao atrito com o fundo.

Pôde-se analisar a transformação de ondas nesta região pelo uso de um programa que contempla os efeitos de refração, difração, empolamento, rebentação e atrito com o fundo, o qual se baseia na aproximação parabólica da equação de declive suave. A análise da influência das variações da largura da plataforma continental interna e antepraia existente em conjunto com a presença da dissipação por atrito no fundo esclareceu a importância de cada fenômeno na região de estudo.

A influência do valor do coeficiente de atrito f_w na dissipação de energia devido à fricção com o fundo mostrada neste trabalho, mostra a importância de calcular um coeficiente de atrito mais próximo à realidade, a partir das informações de um mapa sedimentológico da região estudada. Assim, pode-se, inclusive, considerar o coeficiente de atrito variável no espaço.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.BARLETTA, R.C. Teste e Aplicação de Modelos Parabólicos de Refração-difração com Ênfase na Propagação de Ondas sobre Parcéis, Florianópolis, 2006, 155 p. Tese de Doutorado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).
- 2.CALLIARI, L. J., TOLDO Jr., E. E., NICOLODI, J. L. Classificação Geomorfológica. In: Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro, RS. Programa de Geologia e Geofísica Marinha, Dieter Muehe (organizador), Brasília, DF, MMA, p. 438-445, 2006.
- 3.DEAN, R.G.; DARLYMPLE, R.A. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, 2nd ed., World Scientific, Singapore, 1991.
- 4.FONTOURA, J.A.S. Hidrodinâmica costeira e quantificação do transporte longitudinal de sedimentos não coesivos na zona de surfe das praias adjacentes aos molhes da Barra do Rio Grande, RS, Brasil. Porto Alegre, 2004, 281p. Tese de doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
- 5.FORTES, C. J. E. M. Modelos Matemáticos. Modelos de propagação de ondas curtas. LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 12p., 2002.
- 6.KIRBY, J. T. e DARLYMPLE, R. A. Combined refraction/Diffraction Model, REF/DIF 1. Version 2.5. Documentation and User's Manual . Center for Applied Coastal Research. Department of Civil Engineering. University of Delaware, Newark 19716, 1994.
- 7.KIRBY, J. T. Rational approximations in the parabolic equation method for water waves. **Coastal Eng.**, v.10, p. 355-378, 1986b.

8. KIRBY, J. T.; DALRYMPLE, R. A. An approximate model for nonlinear dispersion in monochromatic wave propagation models. **Coastal Engineering**, v. 9, p. 545-561, 1986.
9. KIRBY, J. T.; OZKAN, H. T., Combined refraction/Diffraction Model for Spectral Wave Conditions. Documentation and User's Manual. Center for Applied Coastal Research. Department of Civil Engineering. University of Delaware, report nº CACR-92-06, 128p, 1994.
10. LIU, P. L. F. Wave Transformation. In: B. Le Mchaut e D.M. Hanes (Ed) The Sea Ocean Engineering Science. V. 9A. New York: **J. Willey and Sons**. 1990. p. 27-63.
11. LIU, P. L. F.; LOSADA, I. J. Wave propagation modeling in coastal engineering. **Journal of Hydraulic Research**. v.40, n.3, p.229-240, 2002.
12. LIU, P.L.-F.; DARLYMPLE, R.A., The Damping of Gravity Water Waves Due to Percolation. **Coastal Engineering** , v.8, p.33-49, 1984.
13. MOTTA, V. F. Análise e previsão das alturas de ondas em Tramandaí, Porto Alegre. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 30p, 1963.
14. PALHA, A.; FORTES, C.; TEIXEIRA, P. R. F. Análise comparativa da aplicação dos modelos REFDF e REFDF_S à zona Torres – Mostardas. Anais do II Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, Fundação Universidade do Rio Grande, Rio Grande, RS, 2006.
15. PHILLIPS, O.M. The dynamics of the upper ocean. Cambridge University Press. 261p., 1966.
16. PIMENTA, F.M. Caracterização dos regimes de refração de onda ao longo da zona costeira do Rio Grande do Sul. Rio Grande, 1999, 66p. Monografia de graduação, Curso de Oceanologia, Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG).
17. SPERANSKY, N. S.; CALLIARI, L. J. Padrões de Refração de Ondas para a Costa do Rio Grande do Sul e sua Relação com a Erosão Costeira. In: Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro, RS. Programa de Geologia e Geofísica Marinha, Dieter Muehe (organizador), Brasília, DF, MMA, 2006.
18. SPRING -Manual do usuário. São José dos Campos, SP. INPE/DPI, 2002.
19. SZEWCZYK, S.B.O. Ferramentas de pré e pós-processamento para um modelo de propagação de ondas em zonas costeiras usando um SIG. Rio Grande, RS, 2004. 86p. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da FURG – Fundação Universidade do Rio Grande.
20. TECPLOT. Reference Manual. Version 7.5 . Amtec Engineering, Inc. Bellevue. Washington. 1998.
21. WRIGHT, L. D. et al. Shoreface and Beach Dynamics of the Coastal Region From Cape Henry to False Cape, Virginia. Virginia Institute of Marine Science School of Marine Science College of William and Mary Gloucester Point. 115p.;1987