

Análise comparativa da aplicação dos modelos REFDIF e REFDIF_S à zona Torres-Mostardas

Artur Palha¹, Conceição Fortes², Paulo R. F. Teixeira³

¹Eng. Físico Tecnológico, LNEC, Lisboa, aclerigo@lnec.pt

²Eng.ª Civil, LNEC, Lisboa, jfortes@lnec.pt

³Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, FURG, Brasil
teixeira@dmc.furg.br

RESUMO: Nesta comunicação, descreve-se a aplicação dos modelos REFDIF e REFDIF_S à zona marítima entre Torres e Mostardas no Rio Grande do Sul, Brasil. REFDIF e REFDIF_S são modelos de diferenças finitas que simulam a propagação e a deformação da agitação regular e irregular, respectivamente, em zonas de profundidade variável. Este modelos consideram os fenómenos de refacção, difracção (apenas na direcção perpendicular à propagação) e rebentação na propagação das ondas (entre outros). Na aplicação dos modelos à zona marítima entre Torres e Mostardas, dada a grande extensão da zona em estudo, o domínio de cálculo tem de ser discretizado por várias malhas de diferenças finitas de cálculo de modo a ter em conta a propagação das ondas desde o largo até junto à costa. No caso do modelo REFDIF, este procedimento de propagação de ondas ao longo de várias malhas de cálculo está implementado, o mesmo não acontecendo com o modelo REFDIF_S. Assim, para resolver este problema, foi desenvolvida uma nova metodologia designada por pyREFDIF_S, que permite a propagação de ondas irregulares em zonas discretizadas por várias malhas de diferenças finitas. Os modelos são aplicados para condições de agitação incidente de período igual a 7 s, altura de 1.75 m e direcções de onda de NE e SE, que correspondem às situações mais frequentes do regime de agitação marítima estabelecido na ref. [4]. Para essas condições, os resultados dos modelos, em termos de altura de onda e direcção de onda, são apresentados e analisados. Com base nesses resultados, avaliam-se as principais diferenças que surgem nas características da agitação marítima na região em estudo, com a aplicação de um modelo de propagação de ondas regulares versus um modelo de ondas irregulares.

PALAVRAS-CHAVE: Ondas regulares e irregulares, REFDIF, REFDIF_S, Equação de declive suave, Método das diferenças finitas, Método de sobreposição linear, Espectro direccional, Torres-Mostardas.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de modelos numéricos na análise de problemas relacionados à engenharia costeira é uma importante ferramenta na caracterização dos processos oceânicos. Muitos problemas costeiros são provocados pela acção das ondas. A erosão costeira, o assoreamento de canais, a definição de alinhamento e posicionamento de quebra-mares, o estudo da morfodinâmica costeira na presença de obras, o projecto de portos, são situações nas quais os conhecimentos dos padrões de propagação das ondas podem auxiliar na optimização da aplicação de recursos dos órgãos envolvidos.

Devido à carência de informações sobre o clima de ondas ao longo da costa do Rio Grande do Sul, e mais especificamente na região entre Torres e Mostardas, surge a necessidade do uso da modelação numérica para caracterizar os principais processos de propagação de ondas

nesta região. O conhecimento da agitação marítima nesta região permitirá avaliar 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.

Neste sentido, efectuaram-se aplicações dos modelos de ondas regulares REFDIF [3] e ondas irregulares REFDIF_S [6] à costa do Rio Grande do Sul na região entre Torres e Mostardas, para diferentes condições de agitação incidente. REFDIF e REFDIF_S são modelos de diferenças finitas baseados na equação de declive suave [1]. Estes modelos efectuam a propagação de ondas em zonas costeiras tendo em conta os fenómenos de refacção, difracção (apenas na direcção perpendicular à propagação) e rebentação, entre outros. Note-se que no modelo de ondas regulares REFDIF o estado do mar é modelado por uma onda monocromática (período, direcção e amplitude) representativa desse estado de agitação, enquanto que no modelo REFDIF_S as ondas são caracterizadas por um espectro em frequência e direcção. Esta descrição é mais próxima da realidade.

Na aplicação dos modelos REFDIF e REFDIF_S a qualquer domínio de estudo, é necessária a sua discretização por uma malha de diferenças finitas. No caso presente, devido à extensão e complexidade da zona em estudo, torna-se necessário a divisão do domínio em diversas malhas de diferenças finitas. Se no caso do modelo REFDIF tal não constitui qualquer problema, já no modelo REFDIF_S, o mesmo não é possível. Com efeito, REFDIF_S apenas considera a propagação de ondas num domínio de cálculo discretizado por apenas uma malha.

Para contornar esta dificuldade, foi desenvolvida uma rotina, denominada por pyREFDIF_S, que executa, em cada malha, o modelo REFDIF para cada componente espectral em que é dividido o espectro direccionado incidente. Os resultados do modelo em todos os pontos de cada malha e correspondentes a cada componente espectral são combinados. Além disso, guarda-se num ficheiro adicional os resultados da última linha de cada malha. Estes resultados da última linha constituirão as condições de agitação incidente da malha seguinte.

Descreve-se, nesta comunicação, a aplicação dos modelos REFDIF e REFDIF_S (ou pyREFDIF_S) ao estudo da agitação marítima na costa do Rio Grande do Sul na região entre Torres e Mostardas. Os resultados das simulações com REFDIF_S são comparados com os obtidos com o modelo de ondas regulares REFDIF, permitindo deste modo avaliar as principais diferenças obtidas na agitação marítima na zona em estudo, por se considerar a propagação de ondas irregulares ao invés de ondas regulares.

2. MODELOS MATEMÁTICOS REFDIF E REFDIF_S

2.1 Modelo REFDIF

O modelo REFDIF [3], simula a propagação e deformação de ondas monocromáticas lineares em zonas de fundos de inclinação suave. É baseado na aproximação parabólica de ângulo largo da equação de Berkhoff [1], estendida por Kirby [5], o que permite o estudo da propagação de ondas cujo ângulo de incidência não exceda $\pm 45^\circ$. Este modelo tem em conta os efeitos de refacção, difracção (apenas da direcção transversal à de propagação da onda), presença de correntes e de dissipação de energia devido à rebentação e ao atrito com o fundo, não tendo em conta, no entanto, os fenómenos de reflexão. Desta forma, trata-se de um modelo mais rápido e eficiente com pequenos requerimentos em termos de memória computacional, comparativamente a outros, como por exemplo, os baseados na aproximação elíptica. Este factor possibilita a sua aplicação a grandes áreas costeiras. Devido ao facto de

não ter em conta os fenómenos de reflexão, não pode ser aplicado em zonas onde esta tem um papel importante.

As equações do modelo são resolvidas através do Método das Diferenças Finitas (MDF). A discretização espacial do domínio é feita com uma malha regular rectangular.

Os dados a fornecer ao modelo REFDIF são: a) as características da agitação incidente (Período, direcção e amplitude de onda; b) as características da malha de diferenças finitas (Comprimento da malha em x e em y e espaçamento entre nós da malha); c) a batimetria no domínio de cálculo. O modelo calcula a altura de onda, H , a direcção de propagação da onda, θ , a amplitude complexa, A , e a elevação da superfície, η , em cada ponto da malha de diferenças finitas.

Para a aplicação do modelo, deve-se garantir que:

- o fundo é de inclinação suave (até um valor do declive de 1:3);
- o ângulo entre a direcção de propagação da onda e a direcção de propagação principal, não deve ultrapassar os 45° , devido à utilização da aproximação parabólica de ângulo largo;
- na construção da malha de diferenças finitas, há que ter em conta que é necessário um mínimo de 5 pontos por comprimento de onda;
- a escolha da relação de dispersão a utilizar no modelo, de entre as três disponíveis, é feita pelo utilizador e depende dos valores esperados para o parâmetro de Ursell no problema em estudo.

Como limitações do REFDIF, saliente-se o facto de tratar de um modelo de ondas regulares. O modelo apenas tem em conta a difracção de ondas na direcção transversal à direcção de propagação de ondas pelo que não deve ser utilizado em zonas abrigadas por obstáculos. Além disso, este modelo, por ser parabólico, não deve ser aplicado a zonas onde os efeitos da reflexão sejam importantes, pois a componente de onda reflectida é desprezada.

2.2. Modelo REFDIF_S

O modelo REFDIF_S [6] permite o estudo da propagação e deformação de ondas irregulares (quer em direcção, quer em frequência) em zonas de profundidade variável, e é baseado no método da sobreposição linear. Admitindo um determinado espectro direccionado ao largo incidente, o modelo: a) calcula as componentes espectrais em que se divide esse espectro pelo método equienergético [6]; b) efectua a propagação de cada componente (onda monocromática) utilizando o modelo REFDIF de ondas regulares; c) efectua a sobreposição linear dos resultados de REFDIF correspondentes às várias componentes, obtendo-se a propagação de uma onda irregular. Com mais detalhe, este modelo é constituído pelos seguintes módulos:

- SPECGEN - Calcula as componentes espectrais (frequência e direcção) em que se divide o espectro incidente e que correspondem às ondas monocromáticas a propagar, para as características definidas *a priori* da função de distribuição em direcção e do espectro em frequência.
- REFDIF_S - Efectua a propagação de cada componente espectral definida anteriormente no domínio em estudo e combina os resultados correspondentes às várias componentes.

Os dados a fornecer ao modelo REFDIF_S são as: a) características do espectro (período de pico, direcção média, frequência máxima, altura de onda significativa à entrada do domínio de cálculo, nível de maré, profundidade de água na fronteira de entrada do domínio e os parâmetros γ e σ_m) e o número desejado de componentes em frequência e direcção (N_f e N_θ) em que se pretende dividir o espectro; b) as características da malha de diferenças finitas; c) a

batimetria no domínio de cálculo. O modelo calcula a altura de onda significativa, H , e θ , a amplitude complexa, A , e a elevação da superfície, η , em cada ponto da malha de diferenças finitas.

As limitações do modelo REFDIF_S são semelhantes às do modelo REFDIF, devido ao facto de este ser o modelo utilizado para a propagação de cada componente espectral. Além das limitações referidas para REFDIF, e uma vez que se trata de um modelo baseado no método da sobreposição linear, é de referir que não permite transferências de energia entre componentes espectrais, nem a geração de componentes de baixa frequência.

Outra limitação importante reside no facto de a versão disponível do modelo REFDIF_S só poder ser aplicada a domínios discretizados por apenas uma malha de diferenças finitas. Este facto condiciona a sua utilização em zonas de grande extensão, de que é exemplo o caso em estudo. De forma a eliminar esta limitação foi desenvolvida uma metodologia descrita de seguida e designada de pyREFDIF_S.

2.2.1.pyREFDIF_S

A metodologia pyREFDIF_S permite a aplicação do modelo REFDIF_S a domínios de cálculo discretizados por uma ou mais malhas de diferenças finitas. A metodologia seguida consiste em:

1. Determinar as componentes espectrais (i, j) da onda incidente na primeira malha, sendo i a componente em frequência e j a componente em direcção. Para tal, é utilizado o módulo SPECGEN, já referido acima.
2. Para a primeira malha de pontos (dimensão $m_r \times n_r$), executar o modelo REFDIF para cada uma das componentes espectrais e:
 - 2.1. Para cada componente espectral, (i, j) , armazenar num vector, $(owave_n)_{i,j}$, os valores da amplitude de onda complexa, $(A_{m_r,n})_{i,j}$, correspondentes a cada ponto (m,n) da última linha da malha, em que $m = m_r$ e n varia entre 1 e n_r .
 - 2.2. Combinar os resultados de todas as componentes espectrais.
 - Para a primeira componente espectral, efectua-se:
 - Cálculo do quadrado do módulo da amplitude de onda complexa em cada ponto da malha (m,n) , isto é, $\left| (A_{m,n})_{1,1} \right|^2$;
 - Armazena-se o valor de $\left| (A_{m,n})_{1,1} \right|^2$ numa matriz $sumwave_{m,n}$;
 - Para as restantes componentes espectrais:
 - Cálculo do quadrado do módulo da amplitude de onda complexa em cada ponto da malha (m,n) , $\left| (A_{m,n})_{i,j} \right|^2$;
 - Adiciona-se o valor de $\left| (A_{m,n})_{i,j} \right|^2$ ao valor da matriz $sumwave_{m,n}$.

Assim, no final, o resultado deste módulo será:

$$sumwave_{m,n} = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_\theta} \left| (A_{m,n})_{i,j} \right|^2 \quad (1)$$

- 2.3. Depois de combinados os resultados de todas as componentes espectrais (N_f componentes de frequência e N_θ componentes de direcção), determinar a altura

de onda significativa para a primeira malha. Para tal, é utilizado o módulo SQUAREDROOT. Este módulo calcula a altura de onda significativa, H_{m0} , da seguinte forma:

$$H_{m0_{m,n}} = \sqrt{8 \times \text{sumwave}_{m,n}} = \sqrt{8 \times \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_\theta} |(A_{m,n})_{i,j}|^2} \quad (2)$$

3. Executar o modelo REFDIF para a segunda malha.
 - 3.1. Para cada componente espectral introduzir, como dados de entrada para a primeira linha da malha $(\text{inwave}_n)_{i,j}$, os resultados armazenados em $(\text{owave}_n)_{i,j}$, ver 2.1.
 - 3.2. Para cada componente espectral, armazenar a última linha de resultados da amplitude de onda complexa conforme descrito em 2.1.
 - 3.3. Combinar os resultados de todas as componentes espectrais segundo a Eq. (1).
 - 3.4. Depois de combinados os resultados de todas as componentes espectrais (N_f componentes de frequência e N_θ componentes de direcção), determinar a altura de onda significativa para a 2ª malha de cálculo, segundo a Eq. (2).

Para as restantes malhas procede-se de igual forma, com excepção da última malha, para a qual não é necessário armazenar os resultados referentes à última linha da amplitude de onda complexa. O fluxograma da metodologia utilizada é apresentado na Figura 1.

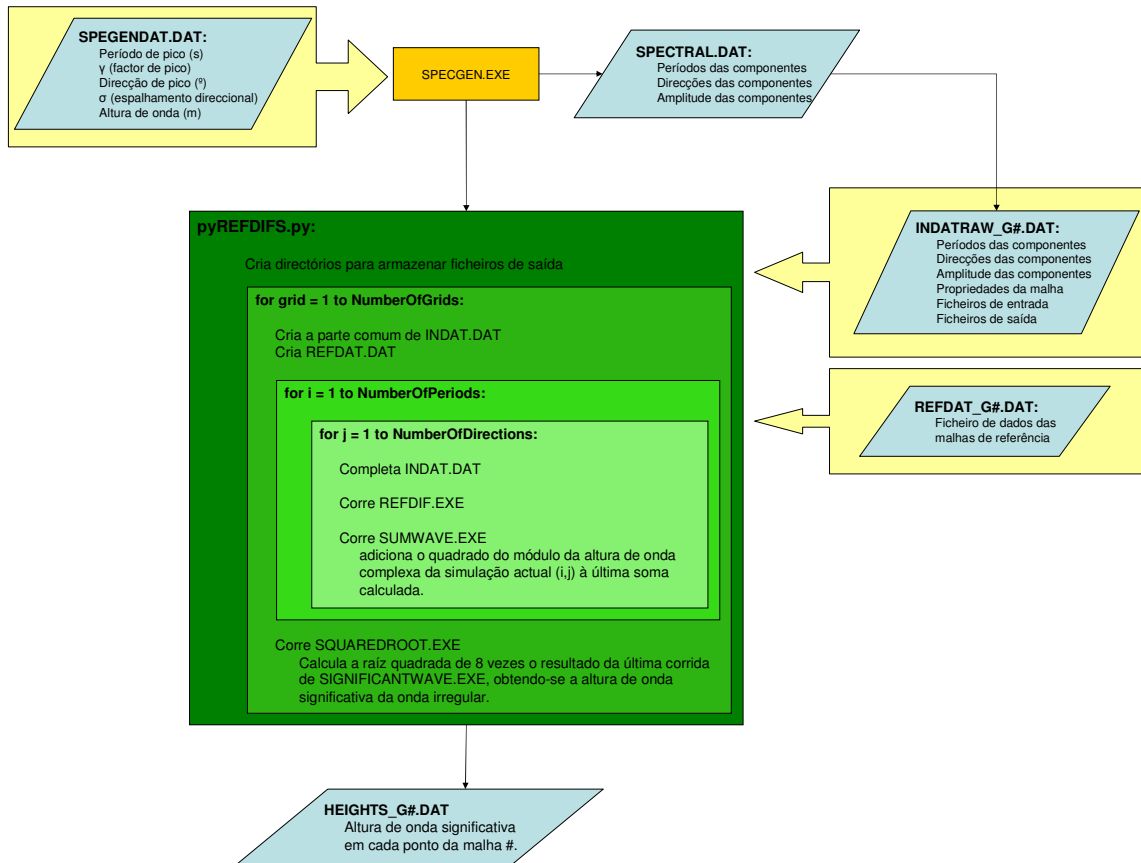


Figura 1- Fluxograma do modelo pyREFDIF_S.

3. CONDIÇÕES GERAIS DE APLICAÇÃO DOS MODELOS

Os modelos REFDIF e REFDIF_S foram aplicados ao estudo da propagação de ondas ao longo da costa do Rio Grande do Sul, mais especificamente na região entre Torres e Mostardas, Figura 2, por forma a verificar a influência, nos resultados obtidos, de se considerarem ondas regulares ou ondas irregulares.

As condições de agitação incidente foram escolhidas com base no trabalho da ref. [4] e correspondem às situações que ocorreram com maior frequência na zona em estudo. Com base nesse trabalho, foram assim seleccionadas as seguintes condições de agitação incidente:

1. Onda incidente com período $T=7$ s, altura $H=1.75$ m e direcção NE
2. Onda incidente com período $T=7$ s, altura $H=1.75$ m e direcção SE

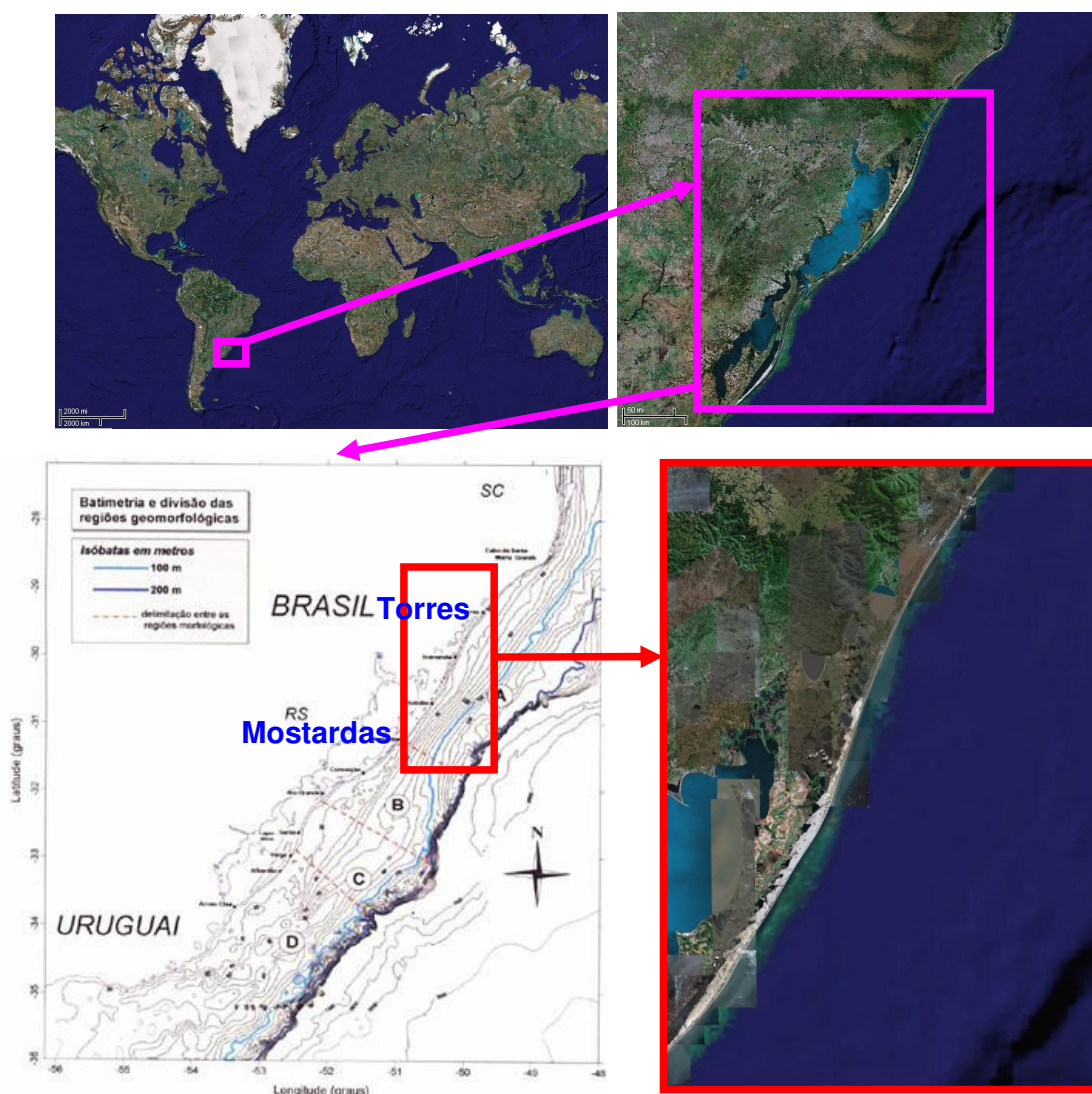


Figura 2 – Torres-Mostardas. Vista geral da região de estudo.

O levantamento hidrográfico, assim como o contorno das malhas utilizadas, para cada uma das condições de agitação e as direcções das ondas incidentes são apresentadas na [Figura 3](#).

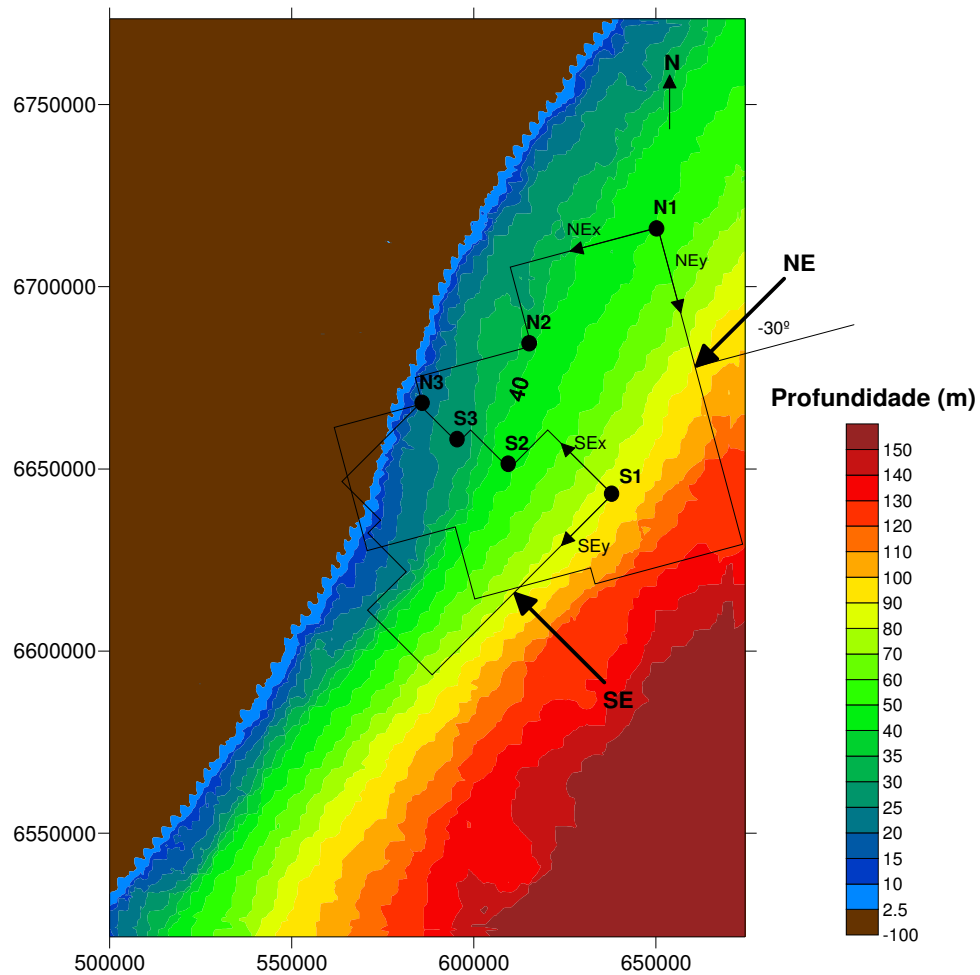


Figura 3 – Batimetria e malhas para os dois casos de estudo: ondas de NE e ondas de SE.

Para cada direcção de onda incidente, e dada a extensão da região em estudo, foram definidas três malhas. Na definição das dimensões e resolução dessas malhas, foram tidos em conta os seguintes factores:

- o espaçamento de cada malha tem de ser tal que garanta um número mínimo de 5 pontos por comprimento de onda para as condições de agitação escolhidas (período da onda de 7 s). No entanto também tem de se ter em atenção as capacidades computacionais disponíveis;
- a orientação de cada malha deve garantir que a direcção das ondas propagadas no seu interior não exceda $\pm 45^\circ$ da direcção principal de propagação (Direcções NEx e SEy, Figura 3);
- a última malha, para ambos os casos, tem de envolver a zona de interesse, isto é, a zona entre Torres e Mostardas;
- as dimensões das várias malhas em x e y são estabelecidas de modo a não ocorrer perda de informação entre as mesmas.

No quadro seguinte, são apresentadas as características principais das malhas de diferenças finitas utilizadas.

Quadro 1 - Características principais das malhas de diferenças finitas utilizadas.

Direcção NE		Direcção SE	
Malha 1		Malha 1	
N1 _x	650 522 m	S1 _x	638 000 m
N1 _y	6 716 264 m	S1 _y	6 643 000 m
Lx	41 856 m	Lx	25 008 m
Ly	89 856 m	Ly	69 984 m
Δx	48 m	Δx	48 m
Δy	48 m	Δy	48 m
N _x	873	N _x	522
N _y	1 873	N _y	1 459
Malha 2		Malha 2	
N2 _x	615 894 m	S2 _x	609 727 m
N2 _y	6 683 779 m	S2 _y	6 650 094 m
Lx	33 024 m	Lx	14 976 m
Ly	62 976 m	Ly	40 008 m
Δx	48 m	Δx	24
Δy	48 m	Δy	24
N _x	689	N _x	625
N _y	1 313	N _y	1 668
Malha 3		Malha 3	
N3 _x	585 983 m	S3 _x	595 608 m
N3 _y	6 667 813 m	S3 _y	6 657 153 m
Lx	24 960 m	Lx	15 000 m
Ly	34 992 m	Ly	30 000 m
Δx	24 m	Δx	24 m
Δy	24 m	Δy	24 m
N _x	1 041	N _x	626
N _y	1 459	N _y	1 251

Note-se que x é a direcção principal de propagação das ondas (NE x ou SE x , vide Figura 3) e y a direcção transversal (NE y ou SE y , vide Figura 3). Os pontos N1, N2, N3, S1, S2 e S3 são os pontos das malhas assinalados na Figura 3. L_x e L_y são os comprimentos das malhas na direcção x e y , respectivamente. Δx e Δy são o espaçamento das malhas na direcção x e y , respectivamente. N_x e N_y são o número de elementos das malhas na direcção x e y , respectivamente.

Para a aplicação dos modelos REFDIF e REFDIF_S foram realizados dois conjuntos de simulações distintos:

1. Onda incidente com período $T_p=7s$, altura significativa de $H_s=1.75m$ e direcção de onda ao largo de NE.
 - a. Onda regular, com período $T=7s$, altura de $H=1.75m$ e direcção de onda de NE.
 - b. Onda irregular. Neste caso, admitiu-se um espectro de frequência de TMA caracterizado por um período de pico de $T_p=7s$, uma frequência máxima de 5 Hz, e uma altura de onda inicial de 1.75 m. O parâmetro de dispersão em frequência foi de $\gamma=20$. Os valores da função de distribuição direccional de Borgman [2], foram os de uma direcção média igual a NE e o parâmetro de dispersão em direcção foi de $\sigma=5$.
2. Onda incidente com período $T_p=7s$, altura significativa de $H_s=1.75m$ e direcção de onda ao largo de SE.
 - a. Onda regular, com período $T=7s$, altura de $H=1.75m$ e direcção de onda de SE.

- b. Onda irregular. Neste caso, admitiu-se um espectro de frequência de TMA caracterizado por um período de pico de $T_p=7s$, uma frequência máxima de 5 Hz, e uma altura de onda inicial de 1.75 m. O parâmetro de dispersão em frequência foi de $\gamma=20$. Os valores da função de distribuição direccional de Borgman [2], foram os de uma direcção média igual a SE e o parâmetro de dispersão em direcção foi de $\sigma=10$.

É de notar que os parâmetros recomendados para a definição do espectro direccional ao largo são: $\gamma=20$ e $\sigma=10$ [7]. No entanto, o valor do parâmetro σ pode estar condicionado à limitação inerente ao modelo REFDIF, e consequentemente ao modelo REFDIF_S, de só permitir o estudo de ondas cujo ângulo de incidência não exceda $\pm 45^\circ$ da direcção principal de propagação. Este condicionamento verificou-se no caso da direcção de onda incidente de NE, para a qual o parâmetro de dispersão em direcção foi reduzido para 5, de modo a que nenhuma componente espectral ultrapassasse os -45° . Tal não sucede para o segundo caso, uma vez que o ângulo de incidência é de 0° .

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para as condições de cálculo estabelecidas no capítulo 3, apresentam-se nas próximas secções os resultados obtidos com os modelos REFDIF e REFDIF_S (utilizando a rotina pyREFDIF_S). Estes resultados constam dos valores de altura de onda e direcção da onda (só para REFDIF) no domínio de cálculo total e numa zona pormenorizada junto à costa entre Torres e Mostardas. Apresentam-se também as comparações entre resultados obtidos com o modelo REFDIF e REFDIF_S ao longo das batimétricas de 25 m, 20 m, 15 m e 10 m.

O tempo médio de CPU gasto por REFDIF_S nos cálculos de propagação das ondas irregulares, para 200 componentes espectrais ($N = N_f \times N_\theta$), foi de 83h 20 min, que corresponde a um tempo médio de cálculo de cada componente espectral (onda regular), de 25 min. Os cálculos foram efectuados num computador pessoal, cujas características são: AMD Athlon™ XP3000+ 2.17GHz 1.00GB de RAM.

4.1. Onda incidente de direcção NE

Nesta secção são apresentados e comparados os resultados obtidos com os modelos REFDIF e REFDIF_S, para uma onda incidente de período igual a 7 s, altura de 1.75 m e direcção de NE. As condições de agitação incidente utilizadas para os dois modelos são apresentadas no quadro seguinte:

Quadro 2 – Direcção de NE. Condições de agitação incidente, nos modelos REFDIF e REFDIF_S.

Condições de entrada							
REFDIF			REFDIF_S				
T (s)	θ (°)	$N_f \times N_\theta$	T_p (s)	θ_p (°)	$N_f \times N_\theta$	γ	σ
7	NE (30)	1 x 1	7	NE (30)	10 x 20	20	5

O valor da altura de onda incidente em ambos os casos é 1.75 m, correspondente ao valor mais frequente para esta região. Entre parêntesis são indicados os valores da direcção da onda incidente (em graus) relativamente à malha 1 utilizada. Conforme atrás referido, no caso da direcção de onda incidente de NE, o parâmetro de dispersão em direcção é igual 5, de modo a que nenhuma componente espectral ultrapasse os 45° em relação à direcção de propagação principal.

Na Figura 4 e Figura 5 são apresentados os valores das alturas de onda, no domínio em estudo, com os modelos REFDIF e REFDIF_S, respectivamente. Nas Figura 6 e Figura 7 são representados os resultados obtidos para as direcções de onda, no domínio em estudo, para o modelo REFDIF.

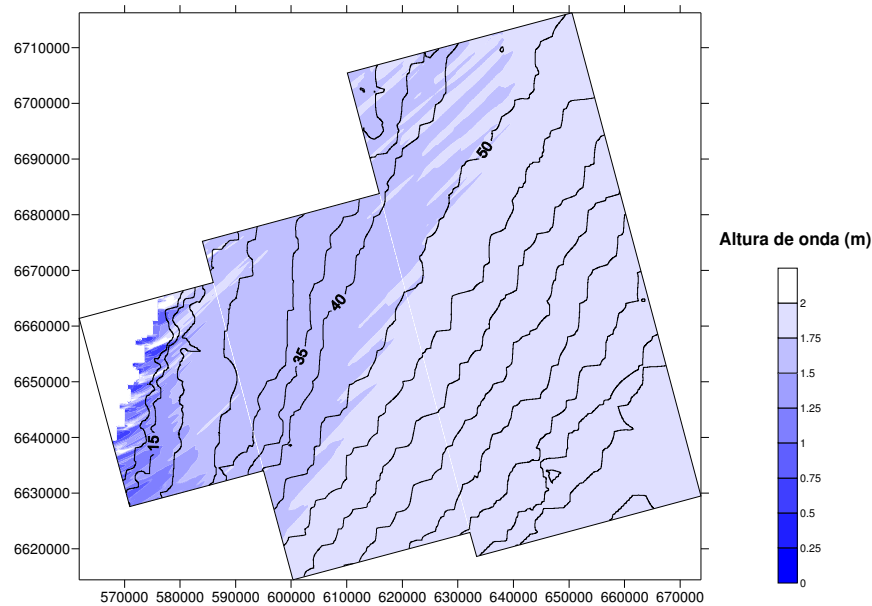


Figura 4 - Modelo REFDIF. Valores da altura de onda obtidos para uma onda incidente regular de direcção de NE, $T=7$ s, $H=1.75$ m. Representação das linhas batimétricas.

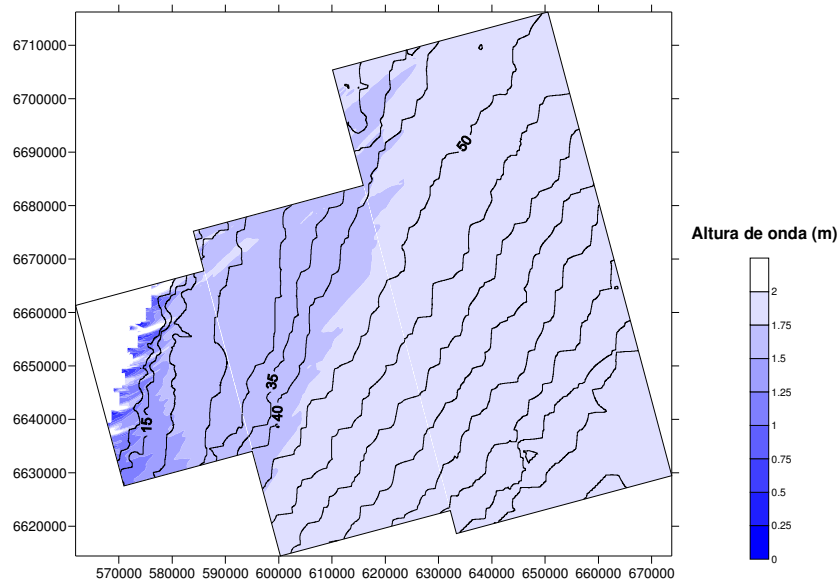


Figura 5 – Modelo REFDIF_S. Valores da altura de onda obtidos para uma onda incidente irregular de direcção de NE, $T=7$ s, $H=1.75$ m. Representação das linhas batimétricas.

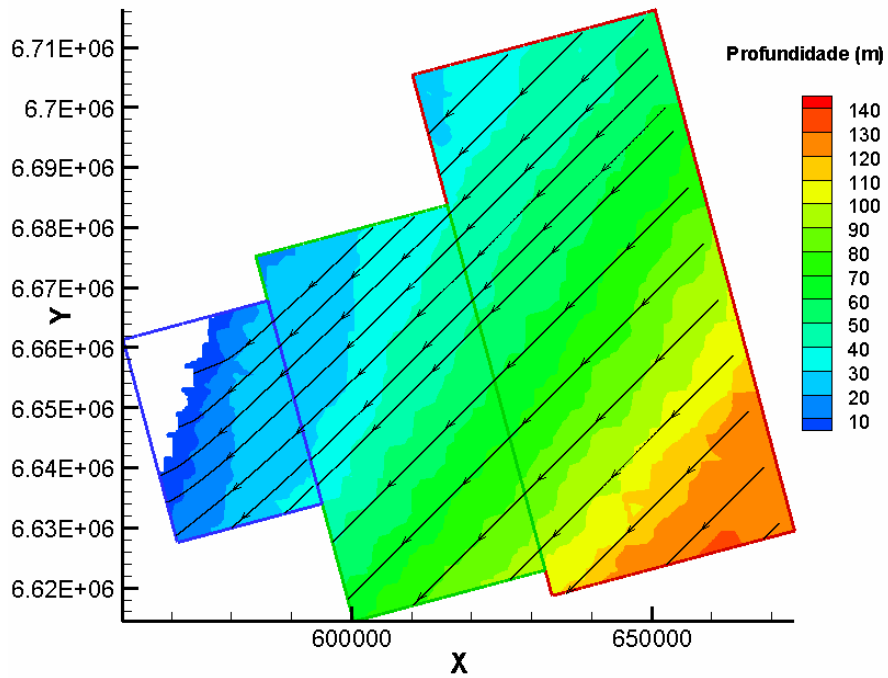


Figura 6 – Modelo REFDIF. Representação dos vectores de direcção de onda obtidos para uma onda incidente regular de direcção de NE, $T=7$ s, $H=1.75$ m. Representação da batimetria.

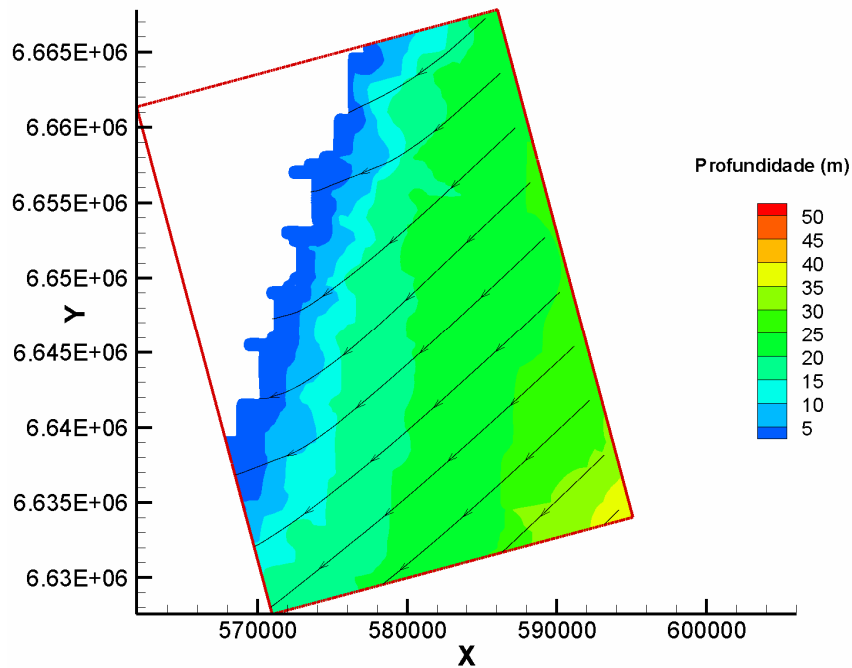


Figura 7 – Modelo REFDIF. Representação das direcções de onda obtidos para uma onda incidente regular de direcção de NE, $T=7$ s, $H=1.75$ m, na malha 3. Representação da batimetria.

Da Figura 8 à Figura 9 são apresentados os resultados dos valores das alturas de onda malha 3 do domínio em estudo, com os modelos REFDIF e REFDIF_S, respectivamente.

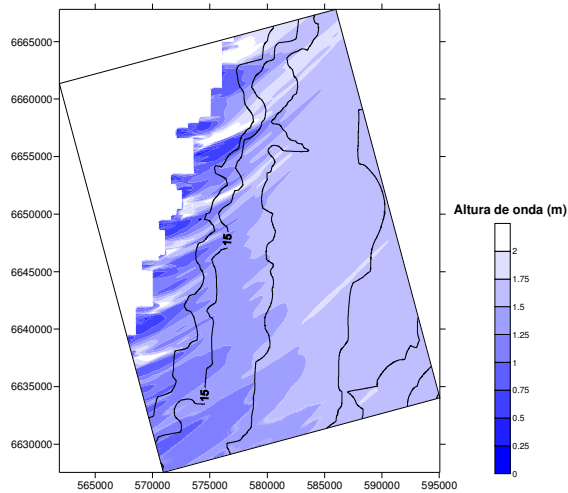


Figura 8 – Modelo REFDIF. Malha 3. Valores da altura de onda obtidos para uma onda incidente regular de direcção de NE, $T=7\text{ s}$, $H=1.75\text{ m}$. Representação das linhas batimétricas.

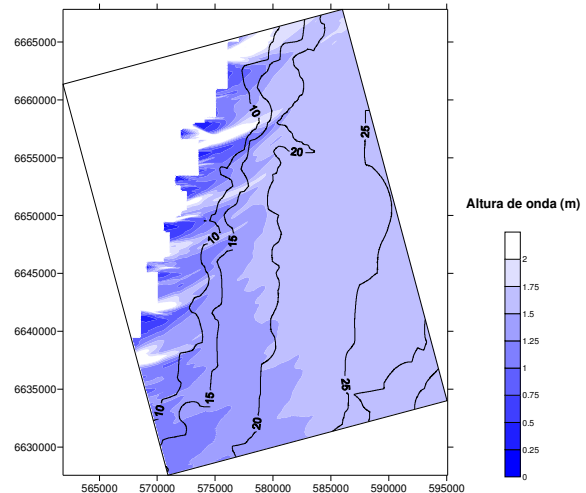


Figura 9 – Modelo REFDIF_S. Malha 3. Valores da altura de onda obtidos para uma onda incidente irregular de direcção de NE, $T=7\text{ s}$, $H=1.75\text{ m}$. Representação das linhas batimétricas.

Na Figura 10 e Figura 11 são indicados, a título exemplificativo, as linhas batimétricas 10 m e 25 m, assim como o eixo s , ao longo do qual são apresentados os valores de altura de onda apresentados da Figura 12 à Figura 15.

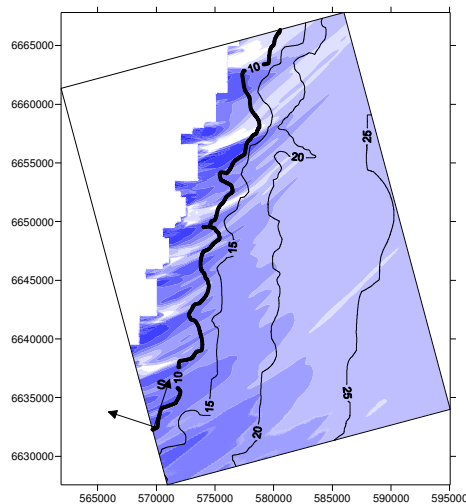


Figura 10 – Direcção de NE. Indicação da batimétrica 10 m e variável s .

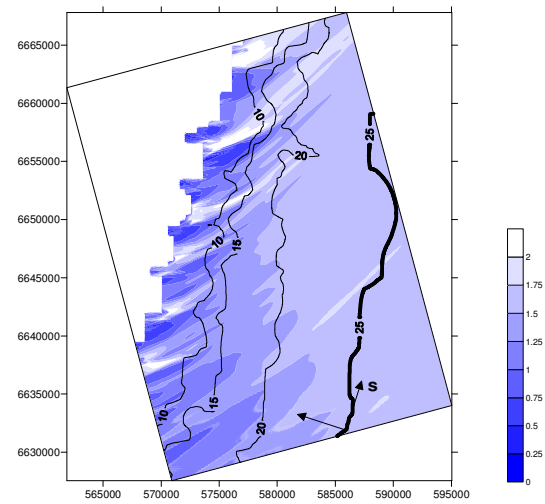


Figura 11 – Direcção de NE. Indicação da batimétrica 25 m e da variável s .

Da Figura 12 à Figura 15, apresentam-se os gráficos dos valores de altura de onda obtidos com os modelos REFDIF e REFDIF_S ao longo das linhas batimétricas de 25 m, 20 m, 15 m e 10 m.

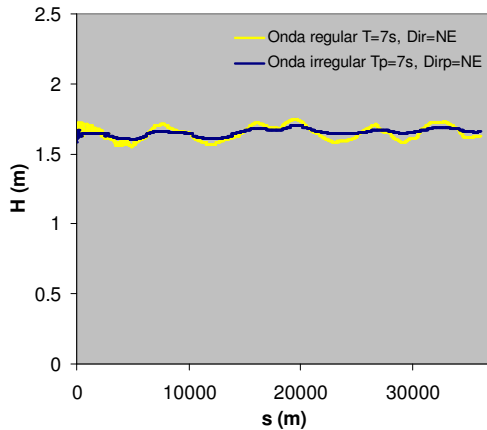


Figura 12 – Direcção de NE. Valores de alturas de onda ao longo da batimétrica 25 m, calculados com os modelos REFDIF e REFDIF_S.

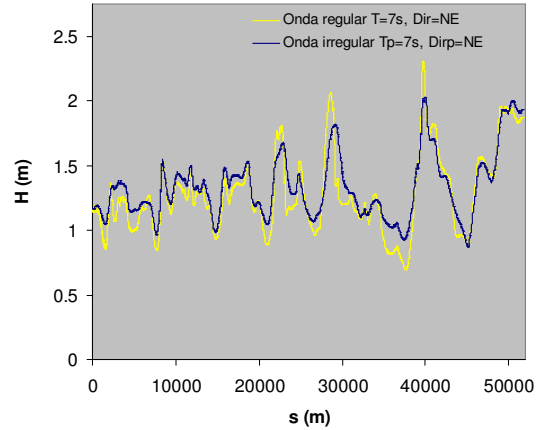


Figura 13 - Direcção de NE. Valores de alturas de onda ao longo da batimétrica 20 m, calculados com os modelos REFDIF e REFDIF_S.

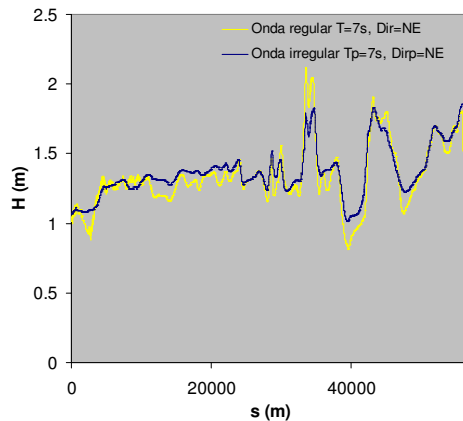


Figura 14 - Direcção de NE. Valores de alturas de onda ao longo da batimétrica 15 m, calculados com os modelos REFDIF e REFDIF_S.

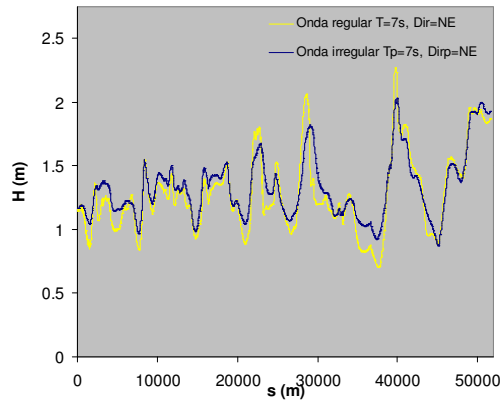


Figura 15 - Direcção de NE. Valores de alturas de onda ao longo da batimétrica 10 m, calculados com os modelos REFDIF e REFDIF_S.

Da análise da Figura 4 à Figura 9, verifica-se que a agitação incidente de 7 s proveniente de NE mantêm-se praticamente inalterada até profundidades da ordem dos 40-45 m (2ª malha), a partir da qual sofre progressivamente uma rotação no sentido de se dispor perpendicularmente à batimetria. Durante este processo, verifica-se um decréscimo da altura de onda. Ao chegar a profundidades inferiores a 10 m, verifica-se progressivamente o empolamento e a rebentação da onda, junto à costa. Este comportamento é verificado quer nos resultados obtidos com ondas regulares quer com ondas irregulares.

A comparação entre resultados dos modelos numéricos REFDIF e REFDIF_S, Figura 12 à Figura 15 mostra que o andamento das isolinhas de altura de onda nos diagramas e nas secções apresentadas é bastante semelhante e é da mesma ordem de grandeza. No entanto existem algumas diferenças entre os resultados dos dois modelos numéricos. Com efeito, verificou-se que, em geral, os resultados do modelo REFDIF_S são mais alisados do que os do modelo REFDIF, ao longo das diversas profundidades analisadas. Tal é devido ao facto de, nas ondas irregulares, estarem presentes várias frequências e várias direcções, que tendem a suavizar os resultados [7].

É de salientar que os resultados da aplicação dos modelos REFDIF e REFDIF_S para esta onda incidente devem ser analisados com cuidado, uma vez que a orientação da malha 1 face à direcção de onda incidente apresenta um ângulo de 30°. Este ângulo, embora dentro do limite estabelecido pelas limitações do modelo REFDIF_S (ver 2.2.1), é significativo, o que pode induzir certos erros nos cálculos numéricos.

4.2. Onda incidente de direcção SE

Nesta secção são apresentados e comparados os resultados obtidos com os modelos REFDIF e REFDIF_S, para uma onda incidente de período igual a 7 s, altura de 1.75 m e direcção de SE. As condições de agitação incidente utilizadas para os dois modelos são apresentadas no quadro seguinte.

Quadro 3 – Direcção de NE. Condições de agitação incidente, nos modelos REFDIF e REFDIF_S.

Condições de entrada							
REFDIF			REFDIF_S				
T (s)	θ (°)	$N_f \times N_\theta$	T_p (s)	θ_p (°)	$N_f \times N_\theta$	γ	σ
7	SE (0)	1 x 1	7	SE (0)	10 x 20	20	10

O valor da altura de onda incidente em ambos os casos é 1.75 m, correspondente ao valor mais frequente para esta região. Entre parêntesis são indicados os valores da direcção da onda incidente (em graus) relativamente à malha 1 utilizada.

Na Figura 16 e Figura 17 são apresentados os resultados obtidos para as alturas de onda, no domínio em estudo, para os modelos REFDIF e REFDIF_S.

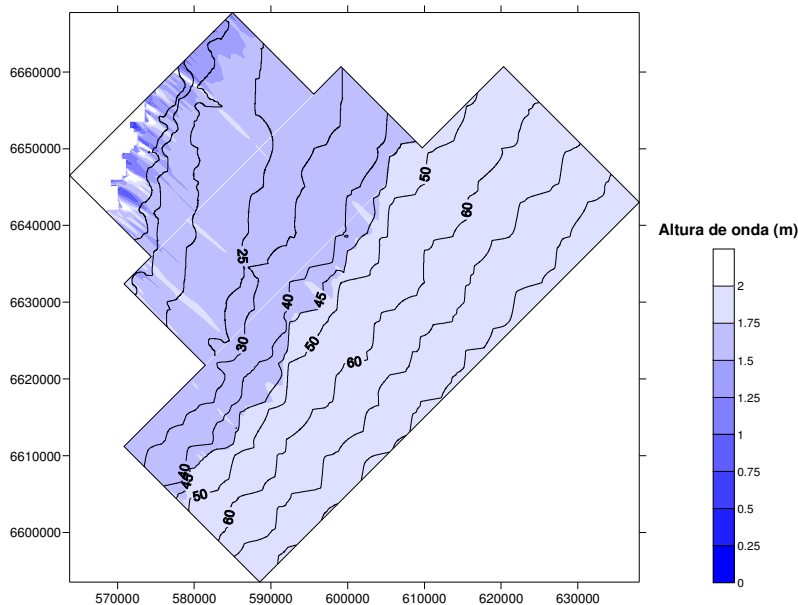


Figura 16 - Modelo REFDIF. Valores da altura de onda obtidos para uma onda incidente regular de direcção de SE, T= 7s, H= 1.75 m. Representação das linhas batimétricas

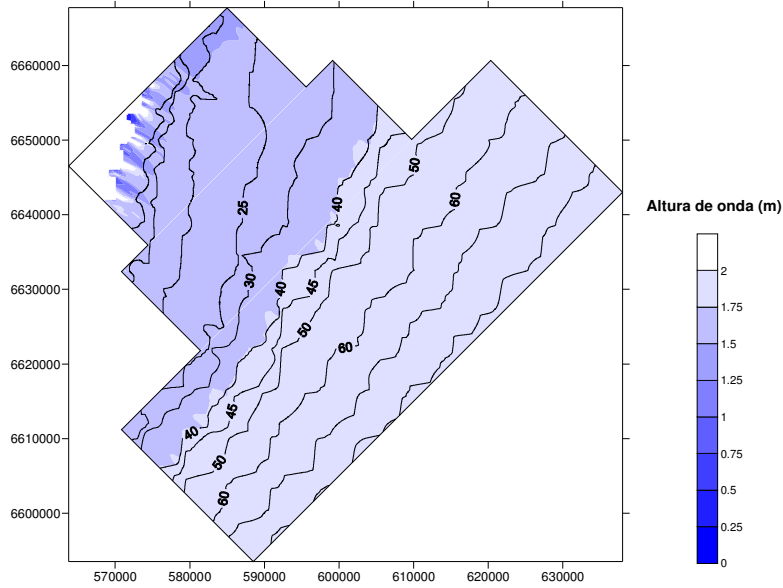


Figura 17 - Modelo REFDIF_S. Valores da altura de onda obtidos para uma onda incidente regular de direção de SE, $T=7s$, $H=1.75\text{ m}$. Representação das linhas batimétricas.

Na Figura 18 e Figura 19 são representados os resultados obtidos para as direções de onda, no domínio em estudo, para o modelo REFDIF. Na Figura 20 e Figura 21 são apresentados os resultados dos valores das alturas de onda na malha 3 do domínio em estudo, com os modelos REFDIF e REFDIF_S, respectivamente.

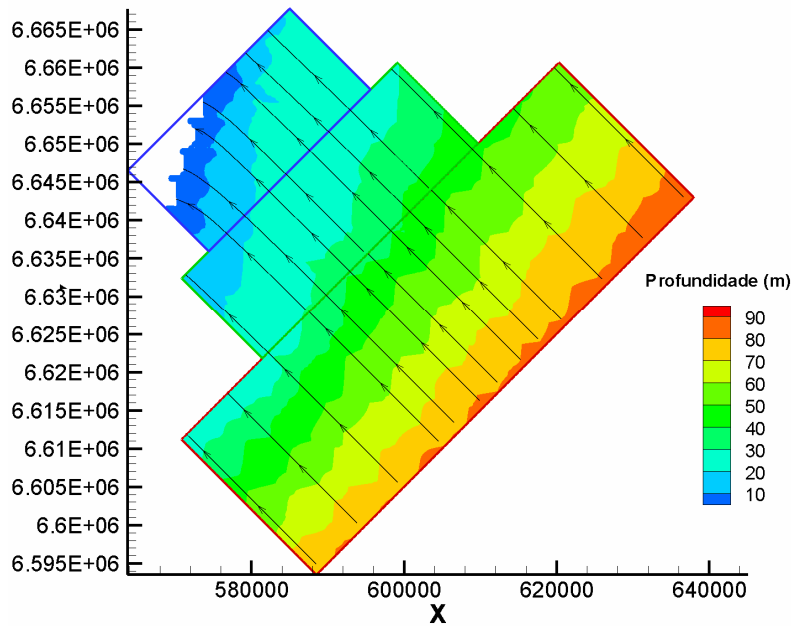


Figura 18 – Modelo REFDIF. Representação dos vectores de direção de onda obtidos para uma onda incidente regular de direção de SE, $T=7s$, $H=1.75\text{ m}$. Representação da batimetria.

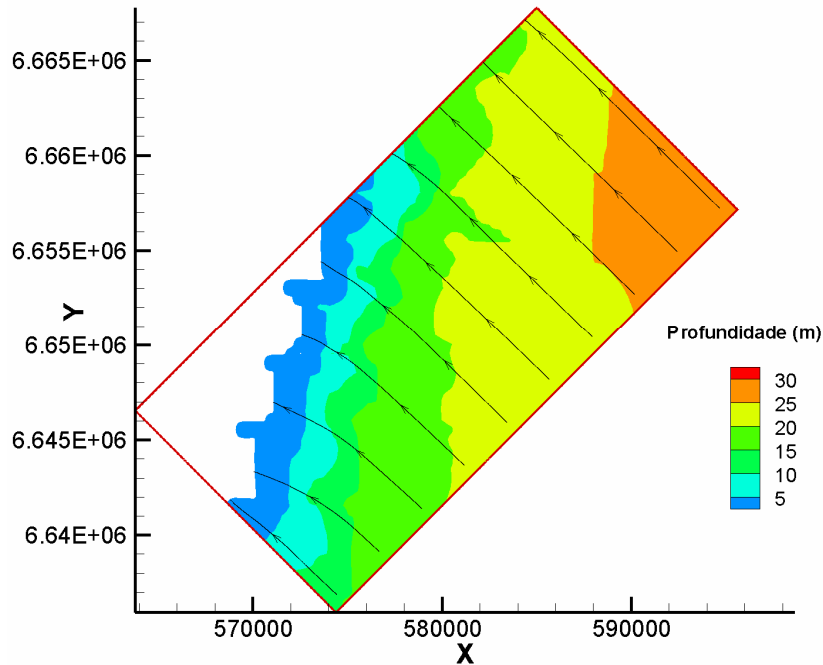


Figura 19 – Modelo REFDIF. Representação das direcções de onda obtidos para uma onda incidente regular de direcção de SE, $T = 7$ s, $H = 1.75$ m, para a malha 3. Representação da batimetria.

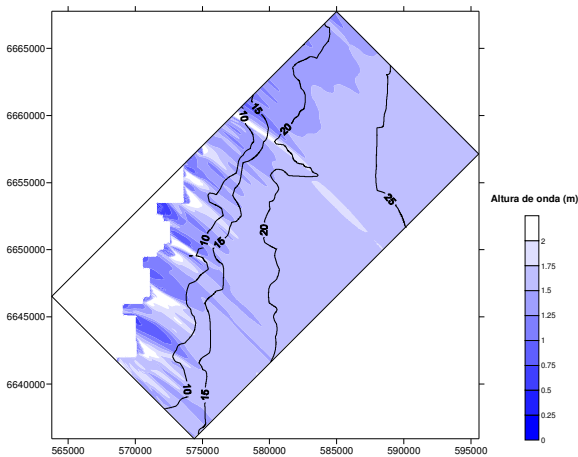


Figura 20 - - Modelo REFDIF. Malha3. Valores da altura de onda obtidos para uma onda incidente regular de direcção de SE, $T = 7$ s, $H = 1.75$ m. Representação das linhas batimétricas.

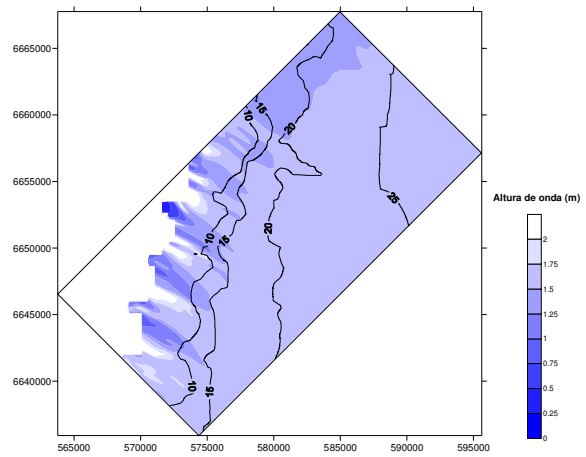


Figura 21 - Modelo REFDIF_S. Malha 3. Valores da altura de onda obtidos para uma onda incidente regular de direcção de SE, $T = 7$ s, $H = 1.75$ m. Representação das linhas batimétricas.

Na Figura 22 e Figura 23 são indicados, a título de exemplificativo, as linhas batimétricas 10m e 25m, assim como o eixo s, ao longo do qual são apresentados os valores de altura de onda apresentados nas Figura 24 à Figura 27.

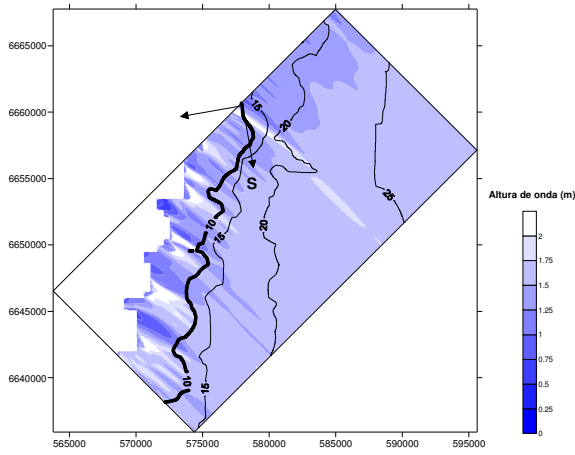


Figura 22 - Direcção de SE. Indicação da batimétrica 10 m e variável s.

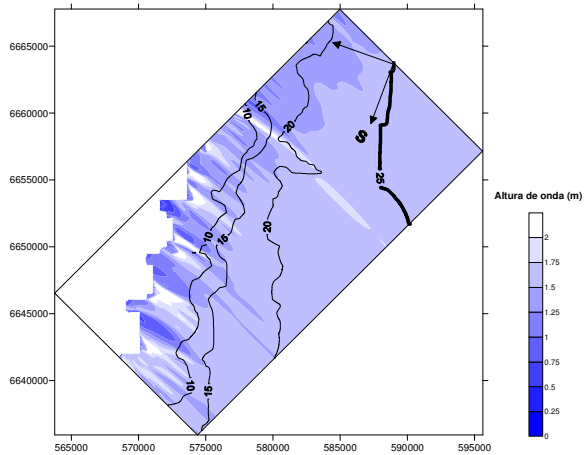


Figura 23 - Direcção de SE. Indicação da batimétrica 25 m e variável s.

Da [Figura 24](#) à [Figura 27](#), apresentam-se os gráficos da altura de onda obtidos com os modelos REFDF e REFDF_S ao longo das linhas batimétricas de 25 m, 20 m, 15 m e 10 m.

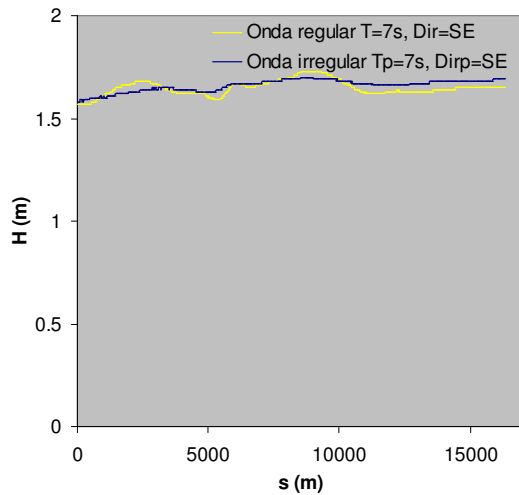


Figura 24 – Direcção de SE. Valores de alturas de onda ao longo da batimétrica 25 m, calculados com os modelos REFDF e REFDF_S.

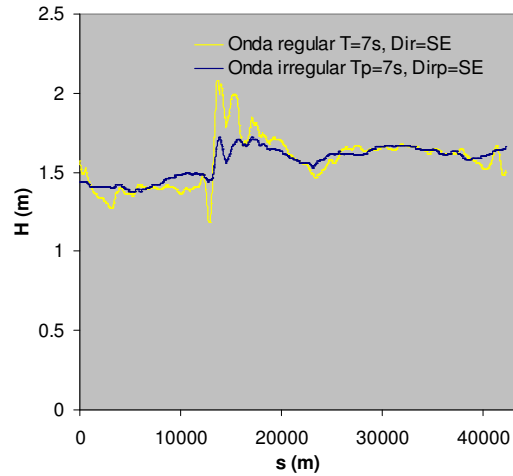


Figura 25 - Direcção de SE. Valores de alturas de onda ao longo da batimétrica 20 m, calculados com os modelos REFDF e REFDF_S.

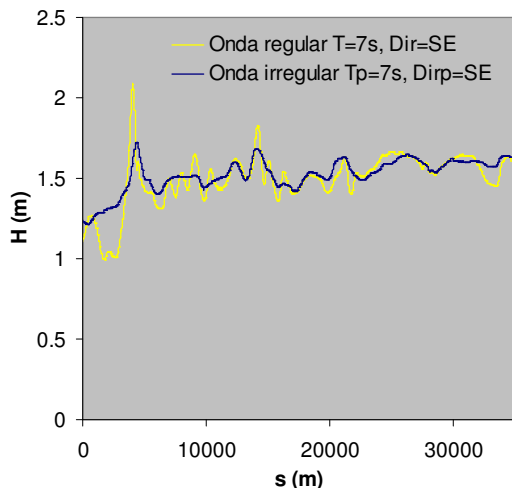


Figura 26 - Direcção de SE. Valores de alturas de onda ao longo da batimétrica 15 m, calculados com os modelos REFDIF e REFDIF_S.

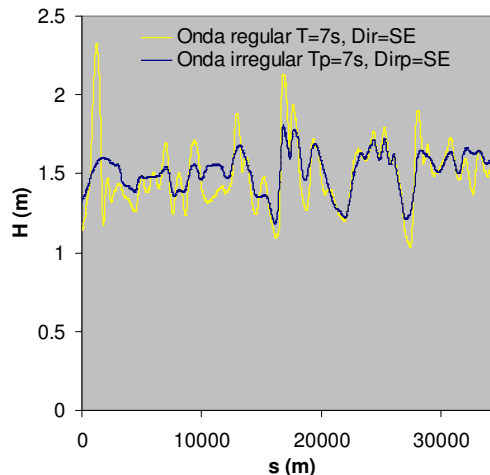


Figura 27 - Direcção de SE. Valores de alturas de onda ao longo da batimétrica 10 m, calculados com os modelos REFDIF e REFDIF_S.

Da análise das figuras, Figura 16 à Figura 21, verifica-se que a agitação incidente de 7 s proveniente de SE também se mantém praticamente inalterada até profundidades da ordem dos 45 m (2ª malha), a partir da qual sofre uma diminuição de altura de onda por refração do fundo. Ao chegar a profundidades inferiores a 10 m, verifica-se progressivamente o empoamento e a rebentação da onda, em certas zonas junto à costa. Este comportamento é verificado quer nos resultados obtidos com ondas regulares quer com ondas irregulares.

A comparação entre resultados dos modelos numéricos REFDIF e REFDIF_S, à semelhança do que aconteceu para a direcção de NE, mostra que o andamento das isolinhas de altura de onda nos diagramas e nas secções apresentadas é bastante semelhante e é da mesma ordem de grandeza. No entanto, existem algumas diferenças entre os resultados dos dois modelos numéricos. Com efeito, verificou-se que, em geral, os resultados do modelo REFDIF_S são mais alisados do que os do modelo REFDIF, ao longo das diversas profundidades analisadas. Em geral, o modelo de ondas regulares apresenta uma gama de valores de altura de onda mais larga do que a do modelo de ondas irregulares. Como referido, tal é devido ao facto de, nas ondas irregulares, estarem presentes várias frequências e várias direcções, que tendem a suavizar os resultados [7].

Em relação ao caso de NE, verifica-se que para a direcção de SE existe uma maior suavização dos resultados numéricos obtidos com o modelo REFDIF_S. Além disso, os valores da altura de onda ao longo das batimétricas da costa até aos 10 m são, em média, praticamente constantes no caso das ondas irregulares, uma vez que a batimetria está orientada perpendicularmente à direcção de propagação da onda. O mesmo não se verifica para o caso de NE, em que se constata uma variação mais significativa dos valores da altura de onda ao longo de cada batimétrica.

5. CONCLUSÕES

Nesta comunicação, apresentou-se a aplicação dos modelos REFDIF e REFDIF_S à zona marítima entre Torres e Mostardas, Rio Grande do Sul, Brasil, para diferentes condições de agitação incidente. REFDIF e REFDIF_S são modelos baseados na equação de declive suave, Berkhoff [1] que efectua a propagação de ondas em zonas costeiras e consideram os

fenómenos de refração, difracção (apenas na direcção perpendicular à propagação) e rebentação na propagação das ondas, entre outros.

Dada a extensão da zona em estudo foi necessário discretizar o domínio de cálculo com três malhas de resolução diferente. A propagação das ondas regulares nas diferentes malhas não oferece dificuldade para o modelo REFDIF. No entanto, tal não pode ser realizado pelo modelo REFDIF_S. Sendo assim, para colmatar esta limitação deste modelo desenvolveu-se um novo modelo, pyREFDIF_S que permite a propagação de ondas irregulares em domínios de grande extensão.

A aplicação dos modelos mostrou que a agitação incidente de 7 s proveniente de SE também se mantém praticamente inalterada até profundidades da ordem dos 45 m (2ª malha), a partir da qual sofre uma diminuição de altura de onda por refração do fundo, quer no caso de NE quer no caso de SE. Ao chegar a profundidades inferiores a 10 m, verifica-se progressivamente o empolamento e a rebentação da onda, em certas zonas junto à costa. Este comportamento é verificado quer nos resultados obtidos com ondas regulares quer com ondas irregulares.

A comparação de resultados entre os dois modelos numéricos mostrou que, em geral, o andamento das isolinhas de altura de onda, assim como a ordem de grandeza, é bastante semelhante. Verificou-se que a utilização de ondas irregulares ao invés de ondas regulares conduz, no geral, a uma suavização dos resultados. Essa suavização foi mais acentuada no caso de SE do que no caso de NE. Em consequência deste facto, a gama de valores de alturas de onda correspondentes ao modelo REFDIF é maior do que no caso do modelo REFDIF_S.

A caracterização da agitação marítima na zona de Torres a Mostardas para outras condições de agitação marítima incidente constitui trabalho futuro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à técnica Branca Branco pela colaboração prestada na preparação e revisão do texto. Agradecem também o financiamento da FCT através dos projectos POCTI/CTA/48065/2002 e POCTI/EME/47576/2002. Este trabalho insere-se no âmbito do convénio entre o LNEC e a FURG.

REFERÊNCIAS

1. BERKHOFF, J.C.W. *Computation of combined refraction-diffraction*. In Proc. 13th Int. Conference Coastal Engineering, ASCE, Vancouver (Canadá), 1972.
2. BORGMAN, L.E. – *Directional spectrum estimation for the Sxy gauges*. Technical Report, Coast. Engrg. Res. Center, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, p.1-104, 1985.
3. DALRYMPLE, R. A.; KIRBY, J. T. *REFDIF 1 Version 2.3 Documentation Manual. Combined Refraction/Diffraction Model*. CACR Report n.º 91-2, University of Delaware, January, 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. Tese (doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas.
5. KIRBY, J. T. *Rational approximations in the parabolic equation method for water waves*. Coastal Eng., v.10, p. 355-378, 1986.

6. KIRBY, J. T.; OZKAN, H. T. *REFDIF_S Version 1.1 Documentation and Users Manual*. CACR Report n.º 94-04, University of Delaware, February, 1994.
7. ZÓZIMO, A.C.; FORTES, C.J.E.M.; NEVES, M.G. *Modelo de propagação e deformação de ondas irregulares em zonas portuárias*. Relatório 284/01 - NPP-DH, LNEC, Lisboa, 2001.