



4<sup>a</sup>s Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária  
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

## CARACTERIZAÇÃO DA AGITAÇÃO TRANSMITIDA POR UM QUEBRA-MAR SUBMARINO

Luís Gil, Eric Didier

UNIDEMI - Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, Faculdade de Ciências e  
Tecnologia da UNL. 2829-516 Monte de Caparica  
lmg@fct.unl.pt, deric@fct.unl.pt

### RESUMO

Nesta comunicação, ilustra-se a utilização de um modelo numérico totalmente não linear no estudo da propagação de ondas sobre um quebra-mar submarino. O programa computacional utilizado denomina-se Canal e resolve as equações fundamentais para fluido ideal através de um método de elementos de fronteira recorrendo a distribuições mistas de singularidades (fontes e dipólos normais). As potencialidades deste código são ilustradas com animações da deformada de superfície livre e campo de velocidades relativos ao escoamento sobre três tipos de quebra-mar. As animações permitem correlacionar a forma do quebra-mar com as características da agitação transmitida.

### 1. INTRODUÇÃO

Na propagação de ondas sobre um quebra-mar submarino, uma parte da energia associada à agitação incidente é reflectida e outra é transmitida. No caso de ondas monocromáticas, forma-se um clapotis parcial a montante do quebra-mar e um sistema de múltiplas cristas a jusante.

As características da agitação a jusante são consequência dos intensos efeitos não lineares que as ondas sofrem ao propagar-se sobre o quebra-mar e na sua zona próxima. A geração harmónica e a emissão de ondas livres são responsáveis pelo aparecimento de novas componentes espectrais.

A eficiência de um quebra-mar é classicamente caracterizada através dos coeficientes de reflexão e de transmissão que representam respectivamente a relação entre as amplitudes significativas das ondas reflectidas e transmitidas com a amplitude significativa da onda incidente. No entanto, estes coeficientes não permitem caracterizar a influência do quebra-mar na evolução das características espectrais da agitação. Estas características espectrais estão intimamente relacionadas aos campos de velocidade e de pressão na vizinhança do quebra-mar e consequentemente à sua forma.

A utilização da generalidade dos modelos numéricos não-lineares possibilita a caracterização espectral da propagação de ondas sobre um quebra-mar submarino. No entanto, apenas os modelos derivados das equações fundamentais, Navier-Stokes para fluido viscoso ou Euler para fluido ideal, permitem ainda correlacionar os campos de velocidade e de pressão com as alterações espectrais produzidas. Os modelos baseados nas equações de Navier-Stokes quando aplicados a escoamentos com superfície livre utilizam uma técnica V.O.F. (*volume of fluid*) na determinação da posição instantânea da superfície livre. Este tipo de códigos numéricos permite actualmente obter bons resultados em domínios com dimensões reduzidas ainda que de geometria complexa. No entanto, a difusão numérica ligada à discretização, tipicamente associada a este tipo de códigos, impossibilita a sua utilização nas situações em

que seja importante descrever com rigor a propagação da ondas ao longo de um domínio extenso (como é o caso de um porto ou de uma pequena zona de costa).

Neste trabalho, utiliza-se um código totalmente não linear, Canal, que se apoia nas hipóteses de fluido incompressível e invíscido. Este programa resolve a equação de Euler utilizando uma técnica de singularidades sendo o problema tratado no quadro da teoria dos escoamentos potenciais bidimensionais. Desta forma é possível obter os campos de velocidade e de pressão e assim correlacioná-los com as características da agitação.

A principal limitação deste modelo relativamente aos códigos V.O.F. e Boussinesq é não poder prever o fenómeno da rebentação, não obstante permite simular com grande rigor a propagação das ondas e, ao contrário modelos do tipo Boussinesq, calcula os campos de velocidade e de pressão.

Neste trabalho, demonstra-se a capacidade do modelo numérico na simulação fina do escoamento resultante da propagação da onda sobre três tipos de quebra-mar recorrendo a técnicas de animação que permitem correlacionar o desenvolvimento espectral da onda com os campos de velocidade.

## 2. O MODELO NUMÉRICO

O código numérico Canal foi inicialmente escrito por Clément (1991). Na sua versão original o domínio de cálculo corresponde a um canal bidimensional de fundo horizontal, equipado com um batedor plano vertical do tipo pistão em cada extremidade, figura 1. Estes batedores podem funcionar como geradores ou absorvedores dinâmicos de onda. Na zona próxima das extremidades do canal existe uma praia de absorção numérica que, em conjunto com a absorção dinâmica, permite evitar as reflexões e assim simular uma zona finita de um canal infinito, Clément (1996). A versão base deste programa foi alterada, Didier et al. (2003), por forma a simular escoamentos sobre fundos inclinados. A geração de ondas pode agora também ser efectuada utilizando singularidades do tipo dipolo rotativo colocados no interior do domínio de cálculo, Gil et al. (2002).

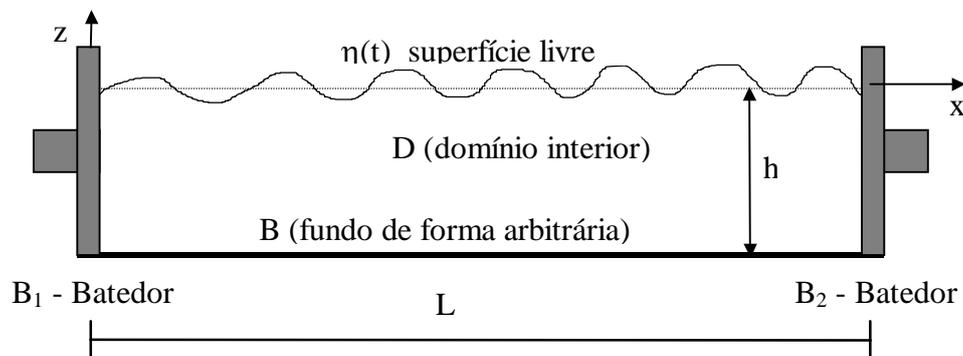


Figura 1. Domínio de cálculo.

Na concepção do modelo numérico, o fluido supõe-se incompressível e invíscido. Ignoram-se os efeitos da tensão superficial, admite-se o escoamento como irrotacional e plano. O problema é assim tratado no quadro da teoria dos escoamentos potenciais bidimensionais. A pressão sobre a superfície livre é suposta constante e nula, estando o fluido em repouso no instante inicial.

As variáveis espaciais,  $(x,z)$ , e temporal,  $(t)$ , são adimensionalizadas utilizando respectivamente a profundidade,  $h$ , e  $(h/g)^{1/2}$ . As equações que descrevem este problema inicial de valores fronteira escrevem-se, utilizando notação complexa e letras maiúsculas para identificar as variáveis adimensionais:



$$\nabla^2 \Phi(Z, T) = 0, \text{ para } Z \in D \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \bar{n}}(Z, T) = \frac{\partial X_b}{\partial T} \cdot \bar{n}, \text{ para } Z \in B_1 \cup B_2 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \bar{n}}(Z, T) = 0, \text{ para } Z \in B \quad (3)$$

$$\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \Phi}{\partial X} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial Z} \right)^2 \right] + Z - \frac{\partial \Phi}{\partial T} = 0, \text{ para } Z \in \eta \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{DX}{DT} &= \frac{\partial \Phi}{\partial X} \\ \frac{DZ}{DT} &= \frac{\partial \Phi}{\partial Z} \end{aligned}, \text{ para } Z \in \eta \cup D \quad (5)$$

O símbolo  $\Phi$  representa a função potencial,  $X_b$  denota a lei do movimento dos batedores e  $\bar{n}$  a normal exterior.

O anterior sistema de equações é resolvido por um método misto de Euler-Lagrange. Em cada passo de tempo, a actualização da geometria do domínio fluido é assegurada pela integração das condições de superfície livre (equações (4) e (5)), utilizando-se um método de Runge-Kutta de quarta ordem. A velocidade tangencial, necessária à resolução das condições de superfície livre, é calculada por um método de interpolação ponderado em arctang.

Desta forma, em cada passo de tempo resolve-se no “novo” domínio fluido um problema de valores fronteira misto, com uma condição de Dirichlet na superfície livre e uma condição de Neumann sobre os batedores. O problema atrás descrito é resolvido por um método do tipo B.E.M., (*Boundary Element Method*), empregando fontes e dipolos normais linearmente distribuídos sobre a fronteira, previamente discretizada em segmentos.

O código Canal resolve assim numericamente o sistema de equações adimensionais acima apresentado sem efectuar outras aproximações para além das que decorrem da necessária discretização do domínio de cálculo.

As simulações são obrigatoriamente iniciadas a partir do estado de repouso. No final de uma simulação ficam assim acessíveis, em cada passo de tempo, as variáveis adimensionais:

- Posição (X,Y) dos nós de toda a fronteira;
- Densidade de singularidades em todos os segmentos da fronteira.

A utilização de rotinas numéricas simples, do tipo “sonda numérica” permite obter a deformada de superfície livre num dado ponto do canal a partir das posições da superfície livre calculadas em cada passo de tempo. As densidades de singularidades permitem calcular as componentes da velocidade e a pressão em qualquer ponto do domínio fluido.

### 3. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

O domínio de cálculo utilizado nas simulações numéricas corresponde a um canal de 23 m de comprimento equipado com um gerador de ondas do tipo pistão na sua extremidade esquerda. Na zona final do canal foi imposta uma zona de dissipação numérica que em conjunto com um sistema dinâmico de absorção garante que a agitação não é reflectida para o interior do canal.

A figura 2 corresponde a um quebra mar com declives dos taludes de montante e jusante de respectivamente: 1:20 e 1:10. A profundidade máxima é de 0.4 m e a mínima de 0.1 m. Em todos os casos estudados o topo do quebra-mar tem 2 m de comprimento.

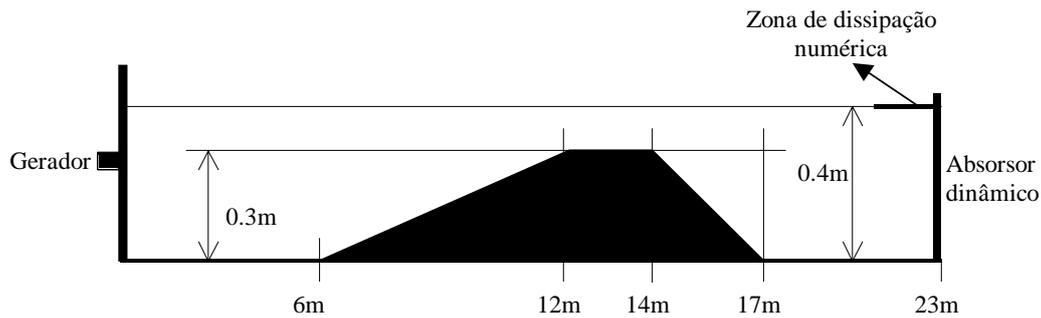


Figura 2. Configuração geométrica do canal (configuração 1).

No quadro 1 resumem-se as características geométricas dos quebra-mar estudados.

	Declive do talude montante	Declive do talude jusante	Comprimento do topo
Configuração 1	1:20	1:10	2 m
Configuração 2	1:20	1:1	2 m
Configuração 3	1:20	vertical	2 m

Quadro 1 – Características dos quebra mar estudados

Neste estudo, optou-se por gerar uma onda monocromática com período de 2.02 s. O comprimento de onda e a amplitude, relativos à zona de maior profundidade, são respectivamente de 3.73 m e 0.01 m.

Para cada configuração estudada realizaram-se animações da :

- superfície livre;
- norma da velocidade das partículas a jusante do quebra-mar;
- vector velocidade a jusante do quebra mar.

Relativamente às animações da deformada de superfície livre é de salientar que se procedeu a uma distorção das escalas vertical e horizontal.

O passo de tempo utilizado foi de 0.04 s tendo a fronteira sido discretizada em 700 segmentos. O tempo de cálculo foi da ordem de 8 horas num computador tipo PC 3.3GHz e 2GB de memória.

### 3.1 Configuração 1

Na figura 3 representa-se a animação da deformada da superfície livre.

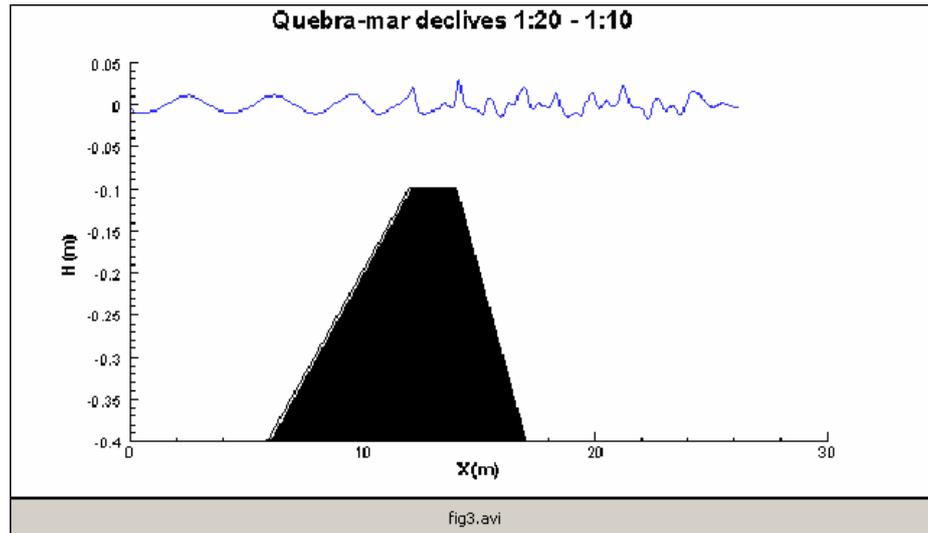


Figura 3. Animação da superfície livre quebra-mar declives 1:20 – 1:10.

A transição entre o estado inicial de repouso e o movimento sinusoidal puro do bateror é efectuada utilizando uma rampa exponencial. Por este motivo na fase inicial da animação é possível identificar perturbações relativamente à forma de uma sinusóide pura. Estas perturbações estão ligadas a componentes espectrais diferentes da frequência fundamental do movimento introduzidas pela rampa exponencial. As componentes de menor frequência propagam-se mais rapidamente que o trem de ondas gerado enquanto que as de maior frequência sobrepõem-se ao mesmo sendo rapidamente dissipadas (por efeito da dissipação numérica ligada à discretização pois o fluido é por hipótese ideal).

Na zona inicial, de profundidade constante, o trem de ondas propaga-se mantendo características quase sinusoidais. No talude de montante a profundidade é decrescente, as harmónicas vão progressivamente adquirindo maior energia tornando-se as cristas mais estreitas e as cavas mais achatadas.

Uma observação cuidada da superfície livre permite constatar que a reflexão no fundo não é significativa, Didier et al. (2003). Na região menos profunda, parte plana do quebra mar, a onda adquire características cnoidais típicas de água pouco profunda, formam-se ondas solitárias que se propagam com uma celeridade que é função da sua amplitude.

Na zona de profundidade crescente, talude de jusante, a onda redistribui a sua energia pelas componentes harmónicas, a agitação assume assim características irregulares.

Na figura 4 apresentam-se os periodogramas obtidos através da transformada de Fourier das deformadas de superfície livre obtidas em sondas colocadas nas posições:  $x= 5.7, 13.5, 15.7$  e  $21$  m, (figura 2).

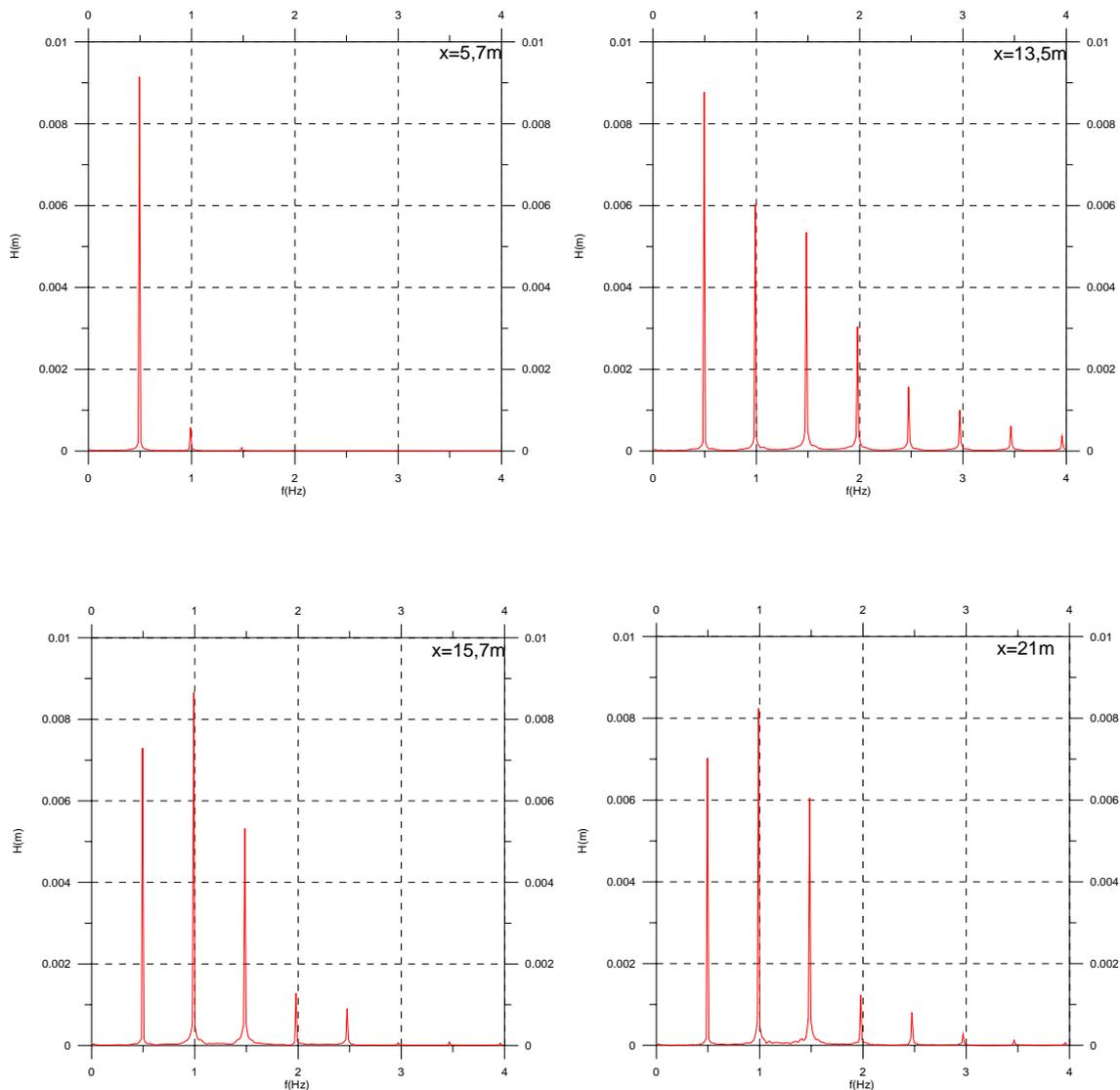


Figura 4. Periodogramas relativos às posições:  $x= 5.7, 13.5, 15.7$  e  $21$  m

Os resultados desta simulação numérica foram comparados com resultados experimentais obtidos por Dingemans (1993) tendo-se constatado uma concordância fina Gil et al. (2005).

Na figura 5 apresenta-se uma animação do campo do módulo do vector velocidade no início do talude de jusante, zona onde têm lugar fortes efeitos não lineares como se verá nas próximas secções.

Na figura 6 apresenta-se a animação do vector velocidade numa grelha de  $100 \times 100$  elementos. Em cada instante é perceptível a forma das linhas de corrente permitindo identificar a inexistência de recirculações a jusante do quebra-mar.

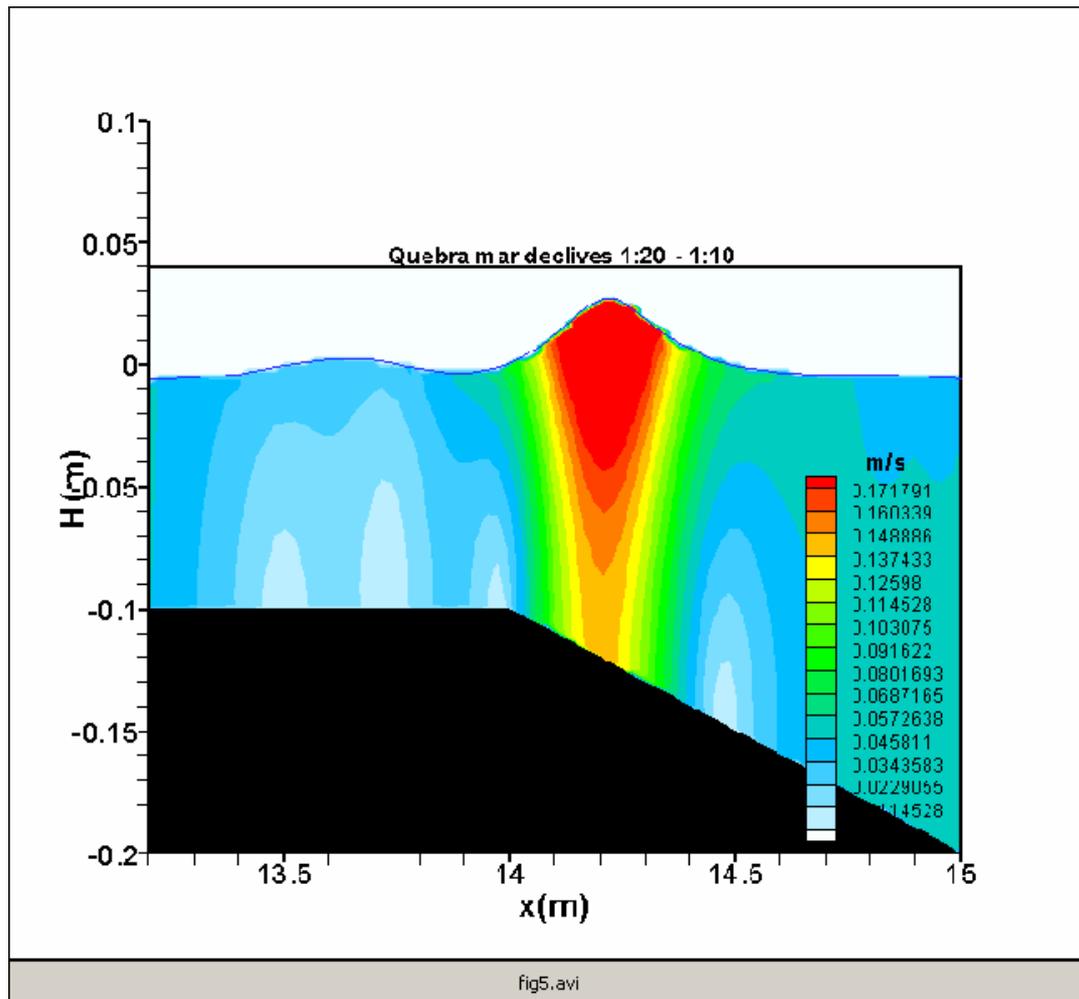


Figura 5. Animação do módulo da velocidade, quebra-mar declives 1:20 – 1:10.

Como se pode verificar na animação a velocidade é aproximadamente constante na zona de menor profundidade o que corresponde ao perfil de velocidades típico de uma onda solitária.

A transição para profundidade intermédia é suave, o campo de velocidades vai assim adaptando-se lentamente às condições de profundidade intermédia sem alterar profundamente os seus gradientes locais.

Em Gil et al. (2005) efectuou-se uma simulação idêntica utilizando um código do tipo Boussinesq, Funwave Kirby et al. (1998). Constatou-se uma concordância total entre os resultados obtidos com os códigos Funwave e Canal.

No anterior estudo, Gil et al. (2005), os resultados obtidos com os dois códigos numéricos apresentavam diferenças substanciais que se supõe terem origem na simplificação assumida no código Funwave de imposição de um perfil parabólico para a velocidade horizontal.

Nas seguintes simulações são analisadas as consequências do aumento do declive do talude de jusante no perfil de velocidade horizontal.

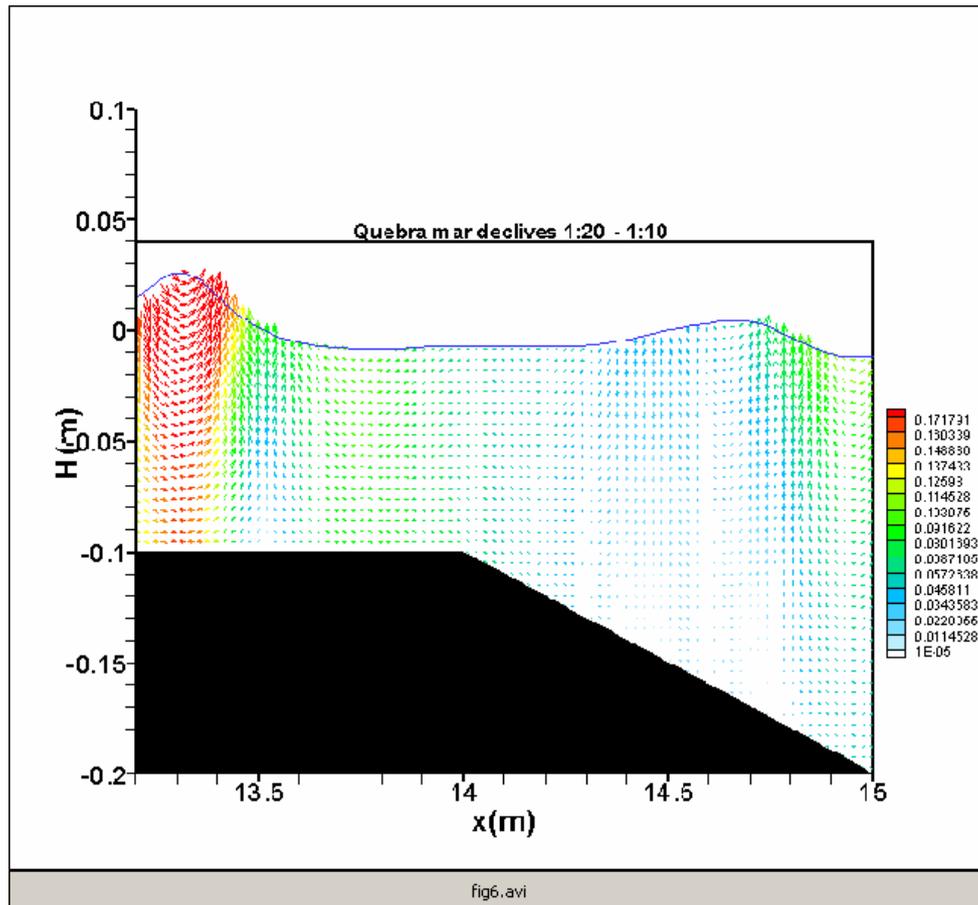


Figura 6. Animação do vector velocidade, quebra-mar declives 1:20 – 1:10.

### 3.2 Configuração 2

Na figura 7 representa-se a respectiva animação da deformada da superfície livre.

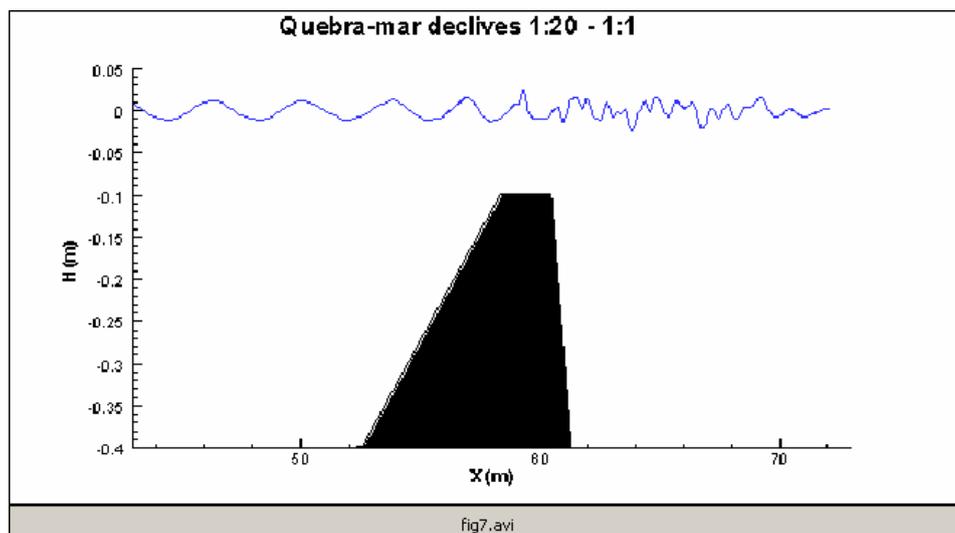


Figura 7. Animação da superfície livre quebra-mar declives 1:20 – 1:1.

O aspecto mais relevante desta animação relativamente à configuração 1 consiste no aparecimento de ondas que se propagam no sentido contrário ao das ondas geradas.

Para interpretar convenientemente os resultados numéricos importa compreender a natureza dos fenómenos físicos que têm lugar neste tipo de ensaios. No caso anterior, da propagação da onda sobre um quebra-mar com declives moderadamente inclinados, observou-se a existência de efeitos não lineares que se traduzem na geração de harmónicas. Eventualmente alguma dessas componentes harmónicas deu lugar à emissão de uma onda livre que se propaga com celeridade própria no mesmo sentido da onda inicial sendo assim de difícil identificação

No caso do quebra-mar com inclinação de 45° ocorrem transformações não lineares idênticas, mas mais intensas. A geração de ondas livres ficou aqui perfeitamente identificada pois estas propagam-se também no sentido contrário ao da onda original. A oscilação nas ondas a montante do quebra mar, visível na fase final da animação, deve-se assim à sobreposição das ondas geradas com as ondas livres que se propagam em sentido contrário.

A animação do campo de velocidade na zona de início do talude de jusante permite identificar perturbações que são responsáveis pela emissão das ondas livres.

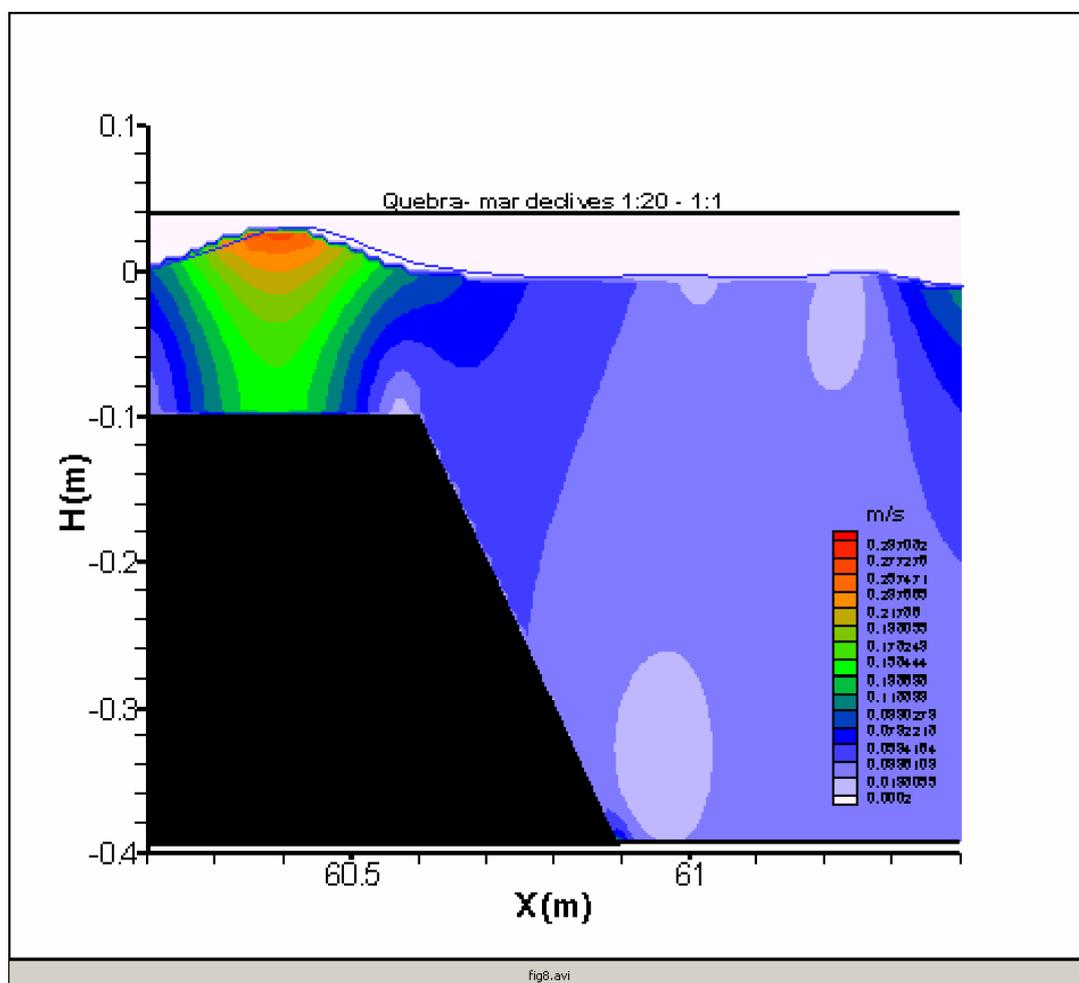


Figura 8. Animação do módulo da velocidade, quebra-mar declives 1:20 – 1:1.

Na animação do vector velocidade a jusante do quebra mar verifica-se que a velocidade, numa mesma secção vertical, não tem em alguns instantes o mesmo sentido. Estas perturbações no campo de velocidades provocam variações no campo de pressão que parecem ser responsáveis pela emissão de ondas livres.

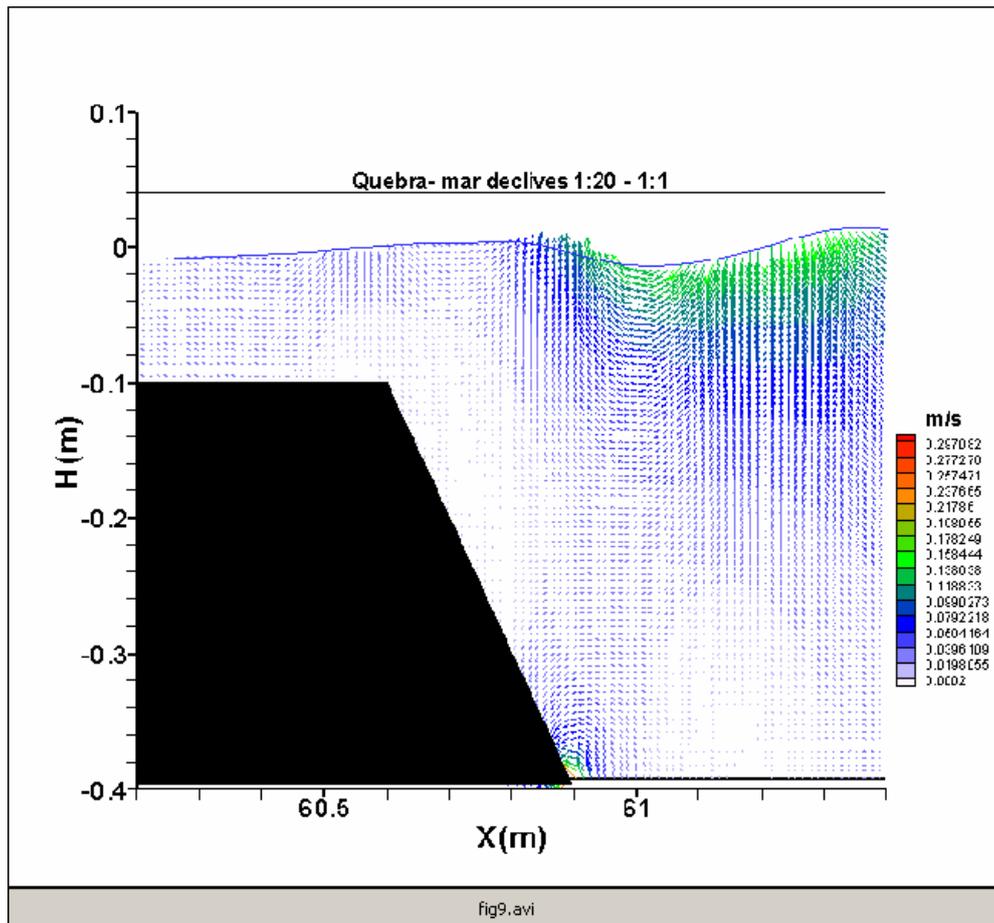


Figura 9. Animação do vector velocidade, quebra-mar declives 1:20 – 1:1..

### 3.3 Configuração 3

A escolha de uma superfície vertical para o talude de jusante foi efectuada com o objectivo de maximizar os efeitos não lineares já identificados nas configurações anteriores. Na figura 10 representa-se a animação da deformada da superfície livre.

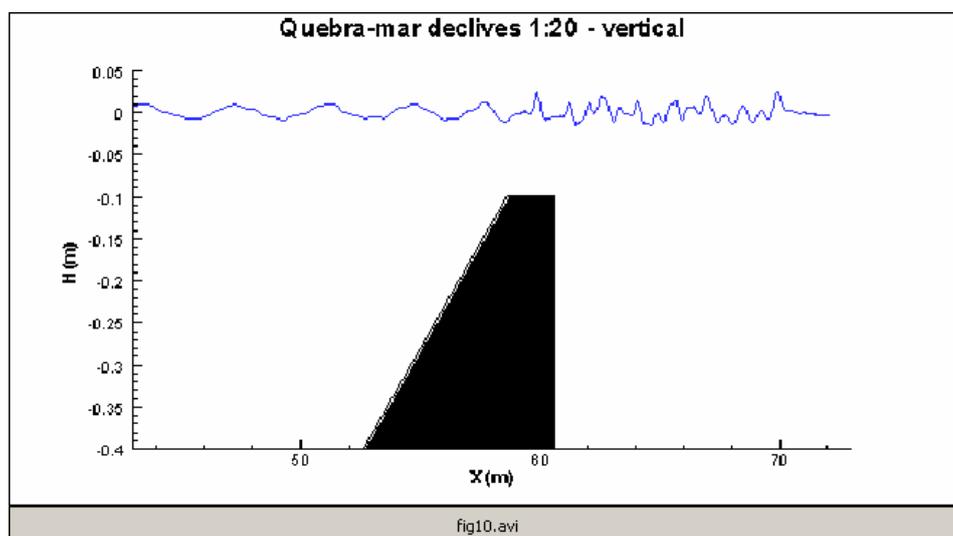


Figura 10. Animação da superfície livre quebra-mar declives 1:20 – vertical.

Nesta animação identifica-se facilmente a emissão de ondas livres na zona imediatamente a jusante do quebra-mar, estas ondas propagam-se em sentido contrário à agitação gerada.

A figura 11 representa a deformada de superfície livre obtida por uma sonda a 4 m do início do talude de montante. Nesta zona sobrepõem-se a onda gerada pelo batedor e a onda livre emitida.

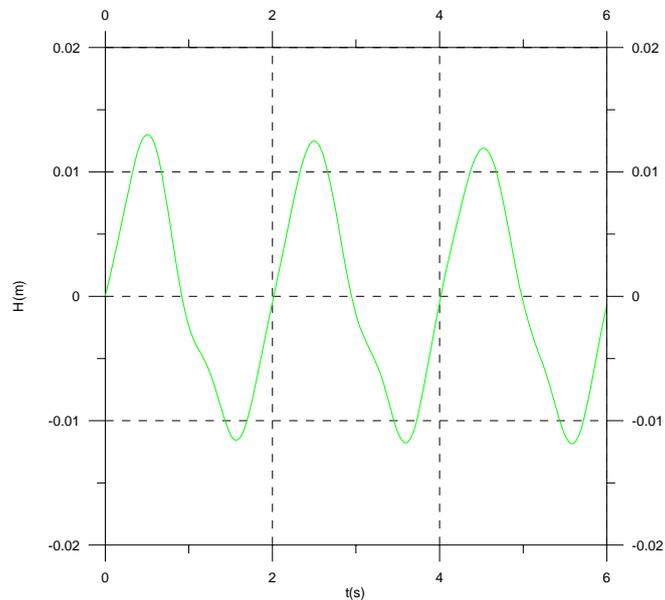


Figura 11. Deformada da superfície livre, 4 m a jusante do quebra mar.

O cálculo do respectivo periodograma, figura 12 permite concluir que as componentes espectrais das ondas livres coincidem com as frequências da primeira e segunda harmónicas da onda gerada. Note-se que esta conclusão baseia-se no facto de que na inexistência de ondas livres a onda gerada ser muito próxima de uma sinusóide pura.

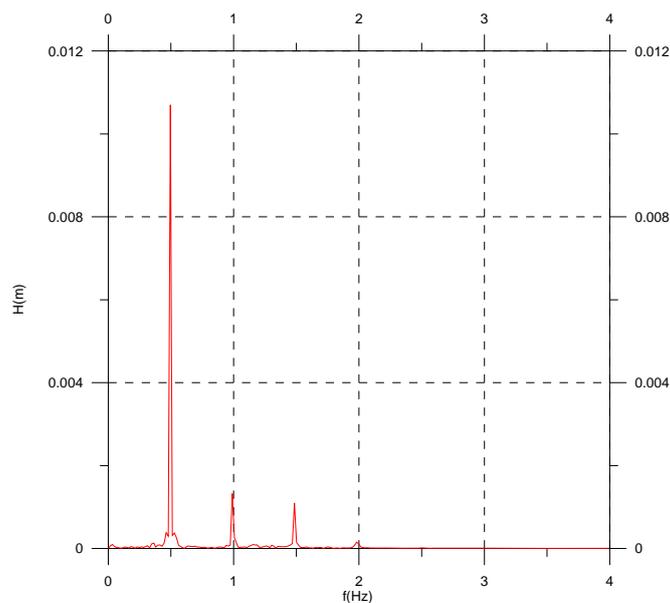


Figura 12. Periodograma, 4 m a jusante do quebra mar.

O campo de velocidades a jusante do quebra-mar está representado na figura 13.

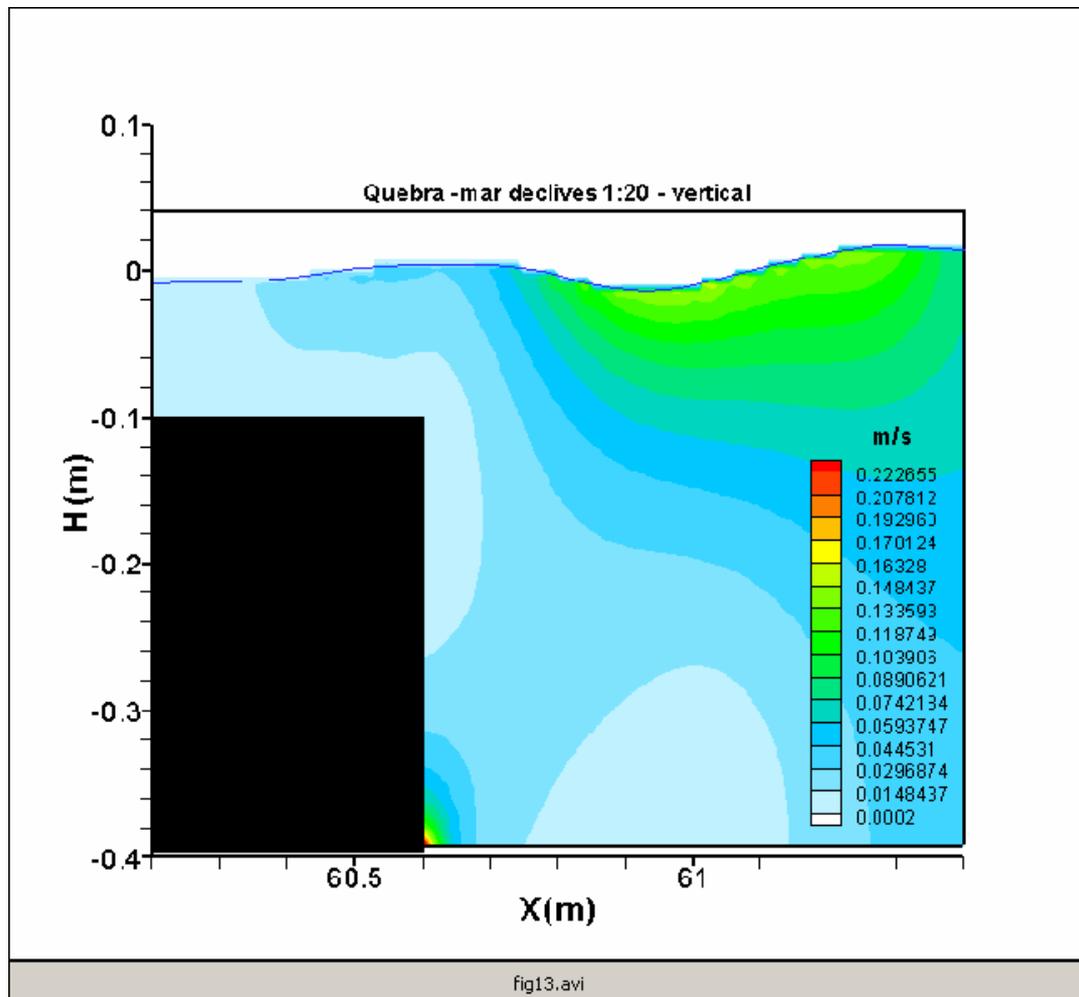


Figura 13. Animação do módulo da velocidade, quebra-mar declives 1:20 – vertical.

A observação da figura permite verificar que na região de jusante na vizinhança do quebra mar formam-se perfis de velocidades complexos em nada semelhantes aos previstos pela teoria de Stokes para ondas estáveis. Estas perturbações no campo de velocidades têm consequências imediatas no campo de pressões provocando alterações na superfície livre que se propagam como ondas livres.

As perturbações no campo de velocidades são identificadas mais pormenorizadamente na animação do vector velocidade. Verifica-se que a velocidade tem inversões de sentido numa mesma secção vertical.

O perfil de velocidade horizontal não é assim descrito com precisão pela imposição de uma lei parabólica pelo que a utilização de códigos construídos sobre esta hipótese fica comprometida em regiões com fortes variações de declive, Gil et al. (2005).

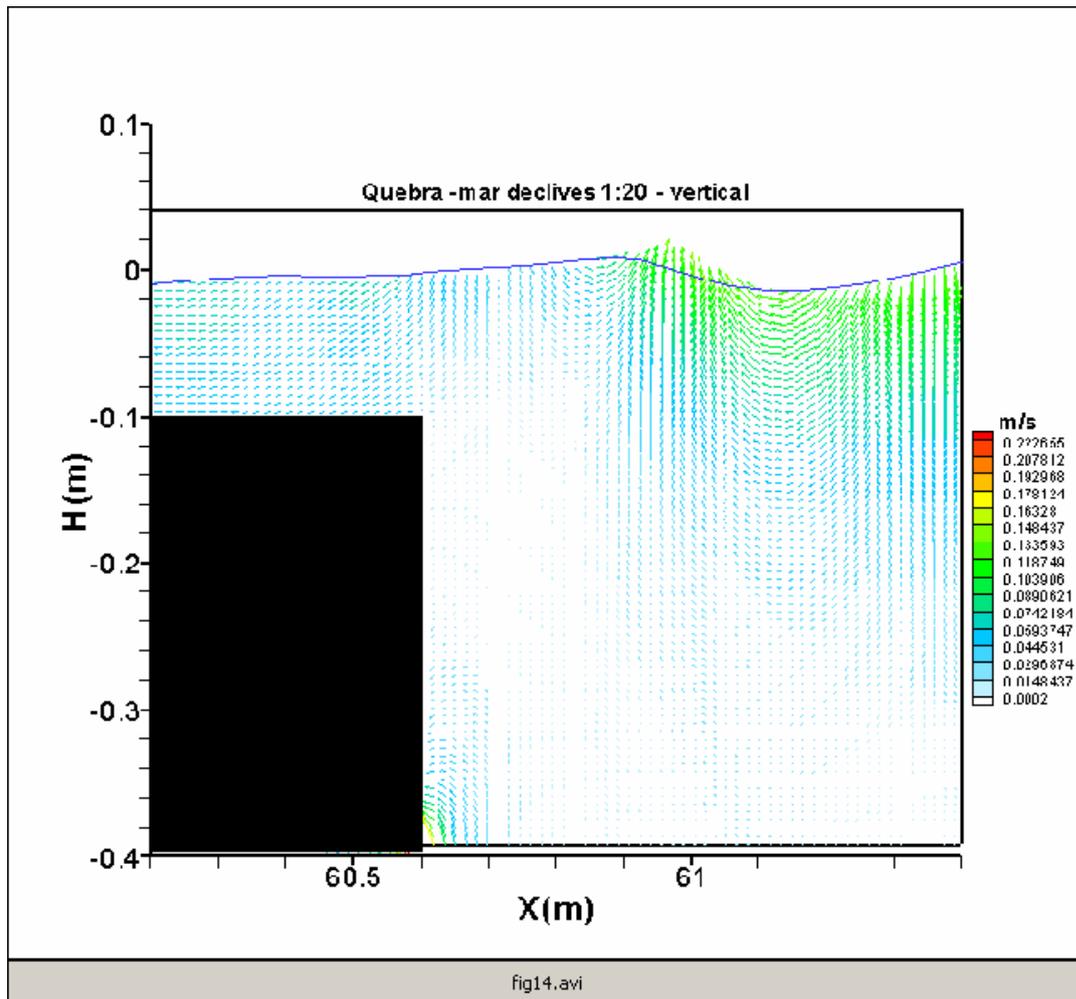


Figura 14. Animação do vector velocidade, quebra-mar declives 1:20 – vertical.

#### 4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Nesta comunicação simulou-se numericamente a transformação de ondas marítimas durante a sua propagação sobre um quebra-mar submarino, utilizando o modelo numérico totalmente não linear Canal.

A qualidade dos resultados permite concluir que os modelos de simulação totalmente não lineares, inicialmente desenvolvidos no âmbito da hidrodinâmica, permitem actualmente, graças à evolução dos meios de cálculo, simular com precisão a transformação das ondas em domínios compatíveis com as dimensões de pequenas regiões costeiras.

No que diz respeito ao caso estudado, a propagação de ondas sobre um quebra-mar submarino foi possível concluir que os efeitos não lineares têm uma importância fundamental na caracterização da agitação transmitida.

Foi possível verificar que as transformações não lineares ditas: geração harmónica e emissão de ondas livres são responsáveis pelas principais características da agitação transmitida. As simulações dos campos de velocidade permitiram ainda relacionar as características geométricas do quebra mar com a intensidade dos efeitos não lineares sofridos pelas ondas.



## 4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

No desenvolvimento deste trabalho serão estudados quebra-mar com diferentes configurações geométricas correlacionando-se a sua forma com as características relevantes da agitação transmitida.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Clément, A. H. (1991) "Exemples de simulations d'écoulements instationnaires non-linéaires à surface libre par la méthode mixte Euler-Lagrange". 3<sup>ième</sup> Journées de l'Hydrodynamique, Grenoble, pp 69-83.
- Clément, A. H. (1996) "Coupling of two absorbing boundary conditions for 2D time-domain simulations of free surface gravity waves". J. Comp. Physics, Vol 126, pp139-151.
- Didier, E., Gil, L., Clement, A. (2003) "Etude de la réflexion de la houle induite par une variation de profondeur". 9<sup>ième</sup> Journée de l'Hydrodynamique, Poitiers.
- Dingemans, M.W. (1994) "Comparison of computations with Boussinesq-like models and laboratory measurements", report H-1684.12 Delft Hydraulics, 32 pp,
- Gil L., Didier E. e Chatry G. (2002) "Estudo comparativo de dois métodos de geração numérica de grupos de ondas de gravidade", V Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia SEMNI, Madrid, España, 171, pp. 1-14.
- Gil L., Didier E., Fortes C. J., Clément A.H. (2005) "Simulação da propagação de ondas sobre um quebra-mar submarino", VI Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia SEMNI, Granada, España.
- Kirby J., Wei G., Chen Q., Kennedy A. e Dalrymple, R. A. (1998) "Fully nonlinear Boussinesq model documentation and user's manual", Research Report NO. CACR-98-06, Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Neward

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido através do projecto da FCT, PDCTM/P/MAR/15239/1999.