



MODELAÇÃO NUMÉRICA DA INTERACÇÃO ENTRE UMA ONDA E UMA ESTRUTURA MARGINAL COSTEIRA POROSA

E. Didier*, Maria Graça Neves**, L. Gil*

* Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Monte de Caparica
deric@fct.unl.pt, lmg@fct.unl.pt

** Laboratório Nacional de Engenharia Civil
101 av. Do Brazil, 1700-066 Lisboa
gneves@lnec.pt

RESUMO

Nesta comunicação, ilustra-se a utilização de um modelo numérico no estudo da interacção entre uma onda e uma estrutura marginal costeira porosa. O programa computacional utilizado é o código comercial *FLUENT* que resolve as equações de Navier-Stokes usando um método de volumes finitos e um método "Volume Of Fluid" - *VOF* - para modelar a superfície livre. As potencialidades deste código são ilustradas neste artigo, analisando as forças nas peças do manto, o galgamento e a deformação da superfície livre na proximidade da estrutura.

1. INTRODUÇÃO

No projecto de obras marítimas, o uso de modelos numéricos torna-se cada vez mais atractivo devido à melhoria dos meios de computação e ao desenvolvimento de modelos numéricos cada vez mais potentes. As vantagens dos modelos numéricos estão classicamente relacionadas com a sua rapidez e economia de meios computacionais e com a facilidade com que diferentes geometrias se podem modelar de forma simples. No entanto, estas vantagens não devem comprometer a precisão dos resultados numéricos esperados. Os modelos numéricos permitem ainda analisar com detalhe situações complexas de interacção onda-estrutura e de escoamentos com superfície livre onde os modelos físicos e as medições no terreno se tornam complexas ou impraticáveis.

Um modelo que pode determinar correctamente as características do escoamento sobre a estrutura, permite ainda, com base nos seus resultados, estabelecer parâmetros relacionados quer com a funcionalidade da estrutura, como o cálculo do galgamento, quer com a sua estabilidade, como o cálculo das forças exercidas nos blocos que compõe o manto, por exemplo.

Com o objectivo de conhecer em detalhes os fenómenos que ocorrem na interacção entre uma onda e uma estrutura porosa de protecção marginal, é simulada e analisada uma estrutura esquemática bidimensional. Estas estruturas são típicas da protecção da costa, como é o caso na costa de Caparica (figura 1). O enrocamento que compõe o manto do quebra-mar marginal é representado por formas circulares colocadas em duas camadas regulares sobre um talude impermeável. O código *FLUENT*, baseado nas equações de Navier-Stokes e no método de captura de superfície livre *VOF* (Volume Of Fluid), é utilizado para modelar o escoamento. São consideradas duas estruturas diferentes: a primeira é constituída por um único talude impermeável e a segunda é composta por um talude semelhante ao da primeira mas com uma camada de enrocamento justaposta. Duas alturas de ondas são simuladas, com



respectivamente 1.0 e 3.0m de altura e com um período de 10s, valor típico na costa portuguesa.



Figura 1. Estrutura marginal porosa da Costa de Caparica.

No presente artigo são apresentados e analisados os resultados numéricos obtidos: forças nas peças do manto, galgamento e deformada da superfície livre na proximidade das duas estruturas estudadas. As vantagens e limitações do modelo numérico serão também discutidas.

2. O MODELO NUMÉRICO

O código CFD (Computational Fluid Dynamics) utilizado é o programa comercial *FLUENT*. O código *FLUENT* (versão 6.2.16), Fluent (2005), aplica uma técnica de volumes finitos para resolver a equação da continuidade e as equações de Navier-Stokes. As variáveis são definidas no centro de cada elemento. Dos vários algoritmos disponíveis para resolver o acoplamento entre a velocidade e a pressão, seleccionou-se o algoritmo *SIMPLEC*, Vandoormaal and Raithby (1984), mais adaptado para simulações não estacionárias.

Diferentes modelos de turbulência estão disponíveis neste programa, e podem influenciar de maneira significativa os resultados. No entanto, como o objectivo da presente comunicação não é a análise dos modelos de turbulência na interacção onda-estrutura costeira, o modelo de turbulência $k-\epsilon$ na sua versão standard foi escolhido pois é classicamente o mais utilizado nas aplicações de engenharia.

Os sistemas de equações algébricos obtidos da discretização e linearização das equações são resolvidos com o método de Gauss-Siedel ponto-a-ponto, em conjunto com um método algébrico de malha múltipla.

Os termos difusivos das equações são discretizados pelo esquema de diferenças centrais de segunda ordem. Os termos convectivos nas faces dos volumes de controlo são interpolados pelo esquema *QUICK* de terceira ordem. A pressão nas faces dos volumes de controlo é obtida por um esquema de interpolação de quantidade de movimento proposto por Rhie e Chow (1983). Para a turbulência, os termos convectivos são interpolados pelo esquema *UPWIND* de segunda ordem.

A modelação da superfície livre é realizada usando o método *VOF*, desenvolvido inicialmente por Hirt and Nichols (1981). Este método consiste em capturar a posição da superfície livre a partir de um indicador, a fracção de volume (um escalar), que toma o valor de 0.0 no ar e 1.0 na água. A posição da superfície livre é assim definida arbitrariamente pelo valor 0.5. Os valores intermédios, entre 0.0 e 1.0, indicam a presença de uma mistura entre água e ar. A dificuldade deste método reside na conservação duma transição reduzida entre os dois fluidos.



Assim, é utilizado o método *HRIC*, Peric and Ferziger (1997), especialmente desenvolvido para este tipo de problema e disponível no *FLUENT*.

3. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS: DOMÍNIO DE CÁLCULO E MALHA

O domínio de cálculo utilizado nas simulações numéricas tem um comprimento de 180m da extremidade esquerda, onde é colocado um gerador numérico de ondas, até o pé da estrutura marginal porosa, figura 2. A profundidade varia entre 10m e 3m (ao pé da estrutura), o que corresponde a um declive de 3°. A estrutura é constituída por um talude com um declive de 37° (ou seja, 3:2) e o talude e a parte superior da estrutura são impermeáveis. Dois casos são considerados: o talude impermeável e o mesmo talude impermeável com um manto constituído de estruturas circulares (forma de rocha académica), formando uma estrutura porosa. As peças têm um diâmetro de 0.8m.

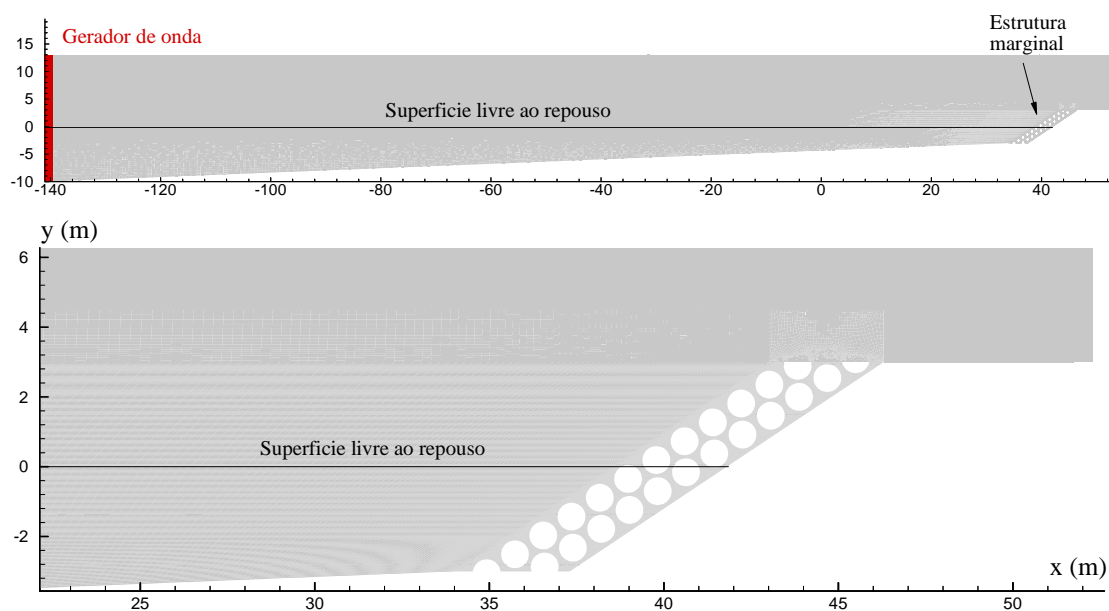


Figura 2. Configuração geométrica do domínio de cálculo.

A malha do domínio de cálculo é constituída por elementos mistos, rectangulares e triangulares. A zona da superfície livre é discretizada com especial atenção para tentar minimizar a difusão numérica ligada aos gradientes de densidade (interface água/ar). A malha é composta de 150000 elementos, com um refinamento na zona da superfície livre, perto do talude e do manto de enrocamento. Alguns detalhes da malha são apresentados nas figuras 3 e 4. A dimensão dos volumes de controlo da malha é variável. Por exemplo, no manto, os elementos têm uma dimensão característica de 0.015-0.020m.

A onda é gerada usando um gerador numérico de onda situado na entrada esquerda do domínio de cálculo. O perfil de velocidade de uma onda sinusoidal e a posição vertical da superfície livre correspondente são impostos nesta fronteira.

O passo de tempo para a simulação numérica é de 0.015s (1:666 do período da onda) e a simulação é realizada para um tempo de 6 a 7 períodos, ou seja 60-70s.

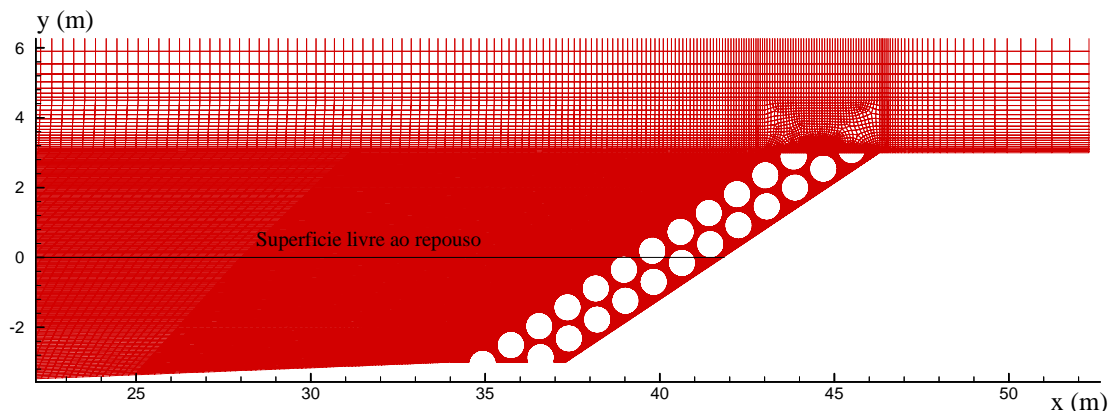


Figura 3. Malha perto da estrutura marginal.

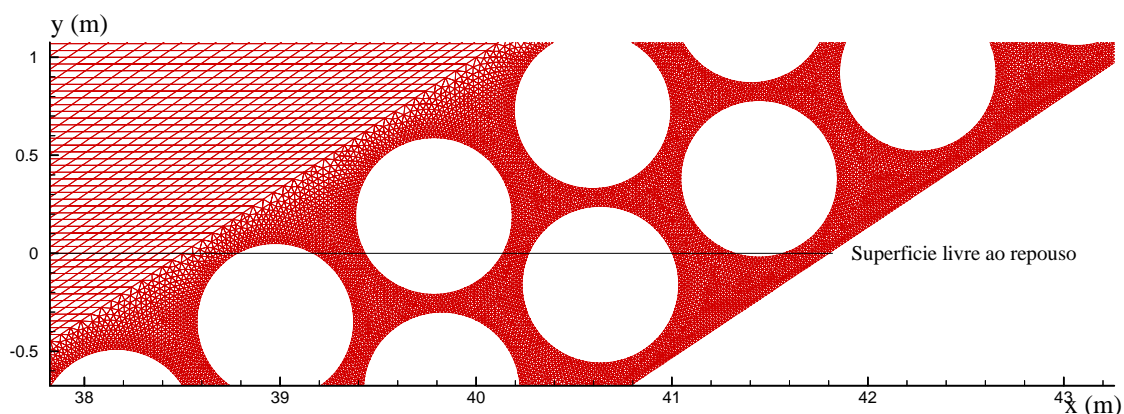


Figura 4. Detalhe da malha, zona da estrutura marginal.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Como referido, os resultados numéricos obtidos são as forças nas peças do manto, o galgamento e a deformada da superfície livre na proximidade das duas estruturas, para cada uma das duas condições de agitação estudadas.

Os esforços F_x e F_y , respectivamente nas direcções x e y , no talude impermeável e nas rochas são estudados ao longo do tempo. A figura 5 indica a nomenclatura de posicionamento das rochas para a análise. A evolução da superfície livre é correlacionada à variação dos esforços. Os vectores velocidade na água são igualmente apresentados nas proximidades da estrutura e na zona desta.

Analisa-se primeiro a influência da porosidade da estrutura nos esforços e na forma de superfície livre para $H=1.0$ m. De seguida, estuda-se a influência da variação da altura da onda nos esforços e na forma de superfície livre. Finalmente, analisa-se a influência da porosidade na forma da superfície livre junto à estrutura e no galgamento sobre a estrutura para $H=3.0$ m.

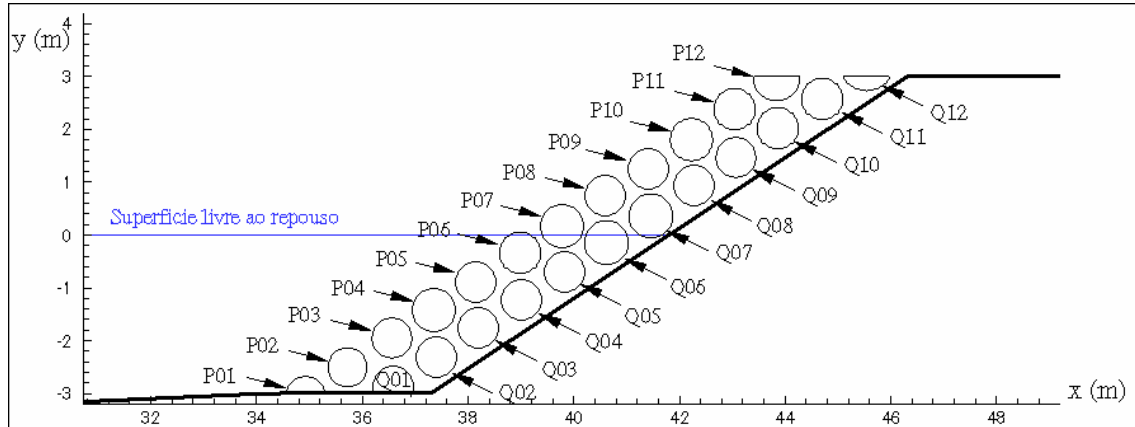


Figura 5. Nomenclatura das rochas do manto.

4.1 Influência da porosidade da estrutura nos esforços na estrutura e na forma da superfície livre

Para $H=1.0$ m, apresenta-se na figura 6 a variação ao longo do tempo do esforço horizontal F_x no talude com e sem enrocamento. A figura 7 apresenta em detalhe o esforço horizontal num intervalo de tempo de um período.

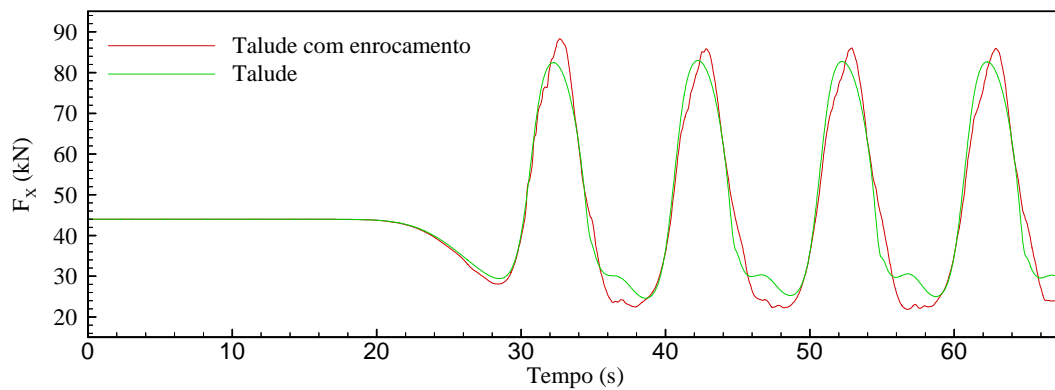


Figura 6. Evolução temporal da força horizontal F_x no talude.

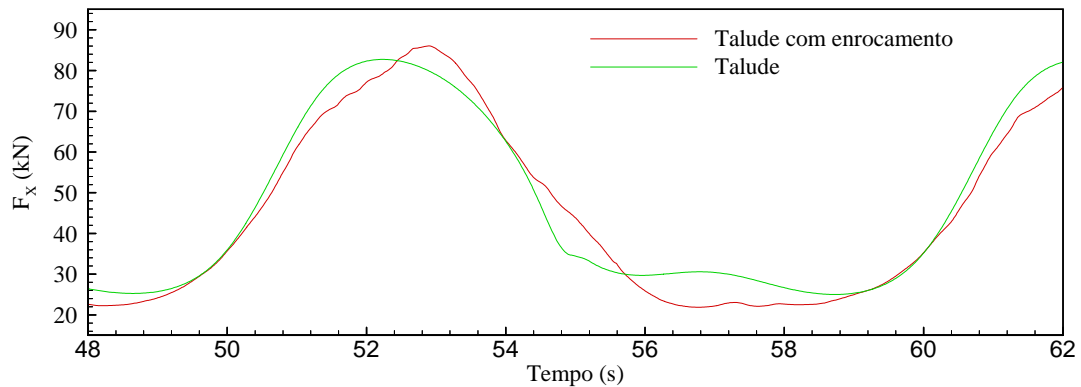


Figura 7. Evolução temporal da força horizontal F_x no talude ao longo de um período.

Observa-se apenas uma diferença pequena entre os esforços máximos e mínimos sobre cada uma das estruturas: o esforço máximo não acontece no mesmo instante mas a evolução do esforço no talude em torno deste valor é similar.

No entanto, observa-se uma evolução diferente para o esforço mínimo ligado ao “run-down” (ver Figura 9). Para a estrutura porosa, a superfície livre em frente à estrutura fica relativamente horizontal o que induz um esforço constante no talude. Para a estrutura impermeável, a camada de água desce o talude e entra em contacto com a superfície livre induzindo à rebentação no talude, o que provoca uma estagnação do esforço. De seguida a superfície livre atinge o seu ponto mas baixo no talude. É de salientar que, no caso desta onda de pequena amplitude e para as duas estruturas, se observa uma periodicidade nos esforços, obviamente ligada a periodicidade da onda.

Na figura 8, os esforços horizontais e verticais em varias rochas são também apresentados no mesmo intervalo de tempo de um período de onda. Foram escolhidas 8 rochas, 4 em cada linha: ao pé do declive (P02 e Q02), em baixo (P05 e Q05) e em cima (P08 e Q08) da superfície livre e perto da cima do manto (P11 e Q11). As componentes do esforço em cada peça do manto são definidas pela integração da pressão (parte estática e dinâmica da pressão) nas respectivas direcções horizontal e vertical.

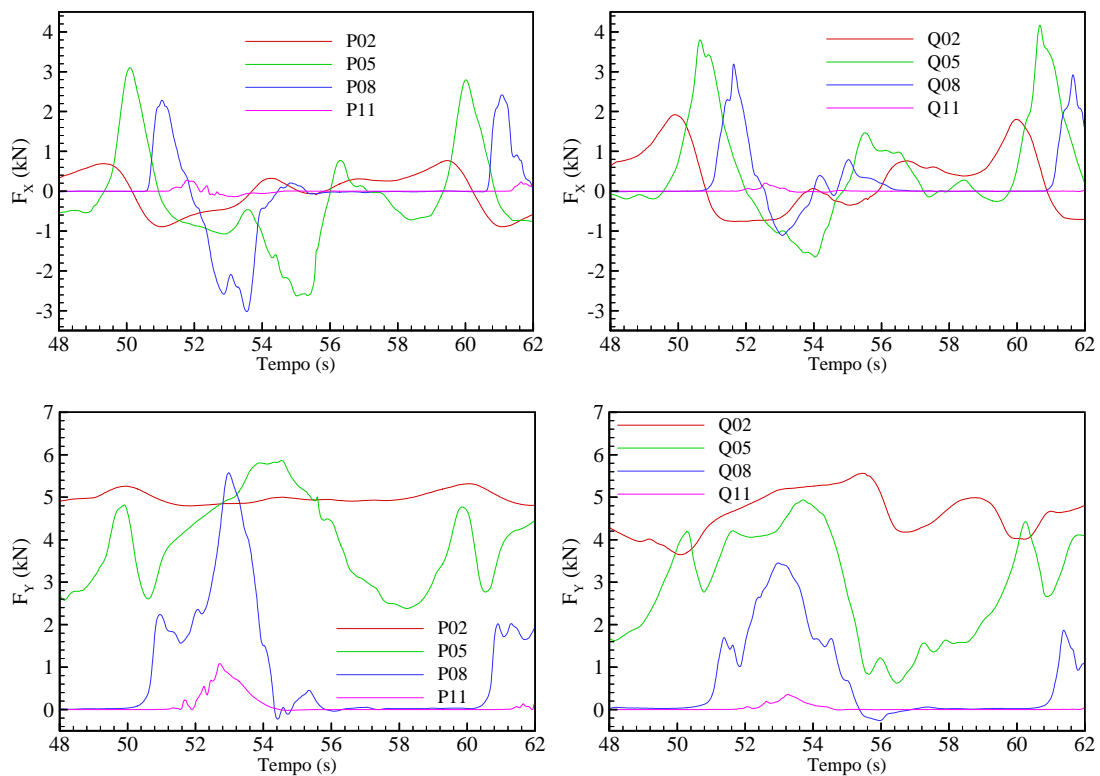


Figura 8. Evolução temporal das forças horizontais e verticais em algumas rochas ao longo de um período: primeira camada de peças (esquerda) e segunda camada (direita).

A observação simultânea das figuras relativas à deformada da superfície livre e aos esforços nas peças do manto mostram que a correlação entre as duas é bem simulada pelo modelo numérico:

- Nas duas peças de cima, P11 e Q11, observa-se um esforço diferente de zero apenas quando a superfície livre entra em contacto com a parte inferior destas rochas (F_y apresenta apenas valores positivos pequenos).



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

- Nas duas peças situadas ao pé do declive, observa-se uma variação da componente horizontal do esforço em torno de 0 enquanto a componente vertical apresenta uma variabilidade em torno de um valor de 4.9kN. Este último valor é devido à pressão estática e é igual para todas as peças totalmente imersas, pois todas elas tem as mesmas características geométricas. As variações de esforços estão ligadas à diferença de pressão estática entre as diferentes faces das peças e também à pressão dinâmica.

- Nas peças P05 e Q05, tal como P08 e Q08, os esforços são mais variáveis pois estas estão situadas perto da superfície livre, imediatamente abaixo e acima desta respectivamente. Na fase de “run-up”, a superfície livre sobe as duas linhas de peças do enrocamento exercendo um esforço horizontal positivo, tanto por causa da pressão estática como pela pressão dinâmica, ligado a um deficit de água na face direita das peças. O esforço máximo acontece nas peças P05 e Q05 em primeiro lugar, depois nas peças P08 e Q08 conforme o movimento da superfície livre ascende. Quando a peça fica totalmente imersa, o esforço horizontal torna-se negativo devido à pressão estática: a altura de água é maior do lado do talude, o que implica o sentido deste esforço. É interessante reparar que para as peças P08 e Q08, o esforço horizontal negativo está ligado ao movimento descendente da superfície livre, com um nível de água mais baixo na face esquerda da peça que na parte direita, mais perto do talude. O esforço nulo indica assim que a peça está fora da água. Para as peças P05 e Q05, observa-se um comportamento similar, embora existam algumas flutuações do esforço ligadas ao movimento local da superfície livre e do escoamento de água. Relativamente ao esforço vertical, as peças P08 e Q08 sofrem a subida da superfície livre que induz um esforço superior a 5kN na primeira peça e de 3.5kN na segunda. Este esforço está naturalmente ligado à parte estática da pressão mas também à parte dinâmica, pois a velocidade da água é da ordem de 2.0m/s com uma direcção ascendente. Como foi mencionado precedentemente, o facto de se observar um esforço vertical nulo, indica que as peças estão fora da água. Os esforços horizontais nas peças P05 e Q05 são mais complexos, estando ligados a fenómenos de rebentações locais e de grandes perturbações no escoamento.

A figura 9 representa, ao longo de um período no intervalo de tempo entre 49.5 e 58.5s, a deformação da superfície livre na proximidade das duas estruturas. Para esta onda de 1.0m de altura, as diferenças da deformada da superfície livre não são muito significativas. O “run-up” e o “run-down” são aproximadamente da mesma amplitude, devido a pequena amplitude da onda.

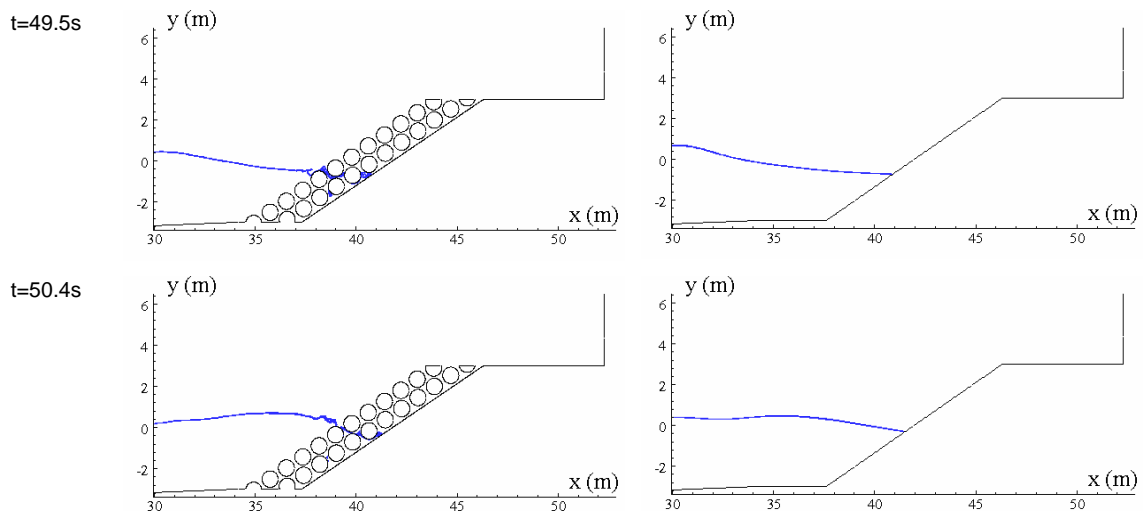


Figura 9. Evolução da superfície livre durante um intervalo de tempo de um período, com $H=1.0\text{m}$, para a estrutura com e sem manto.

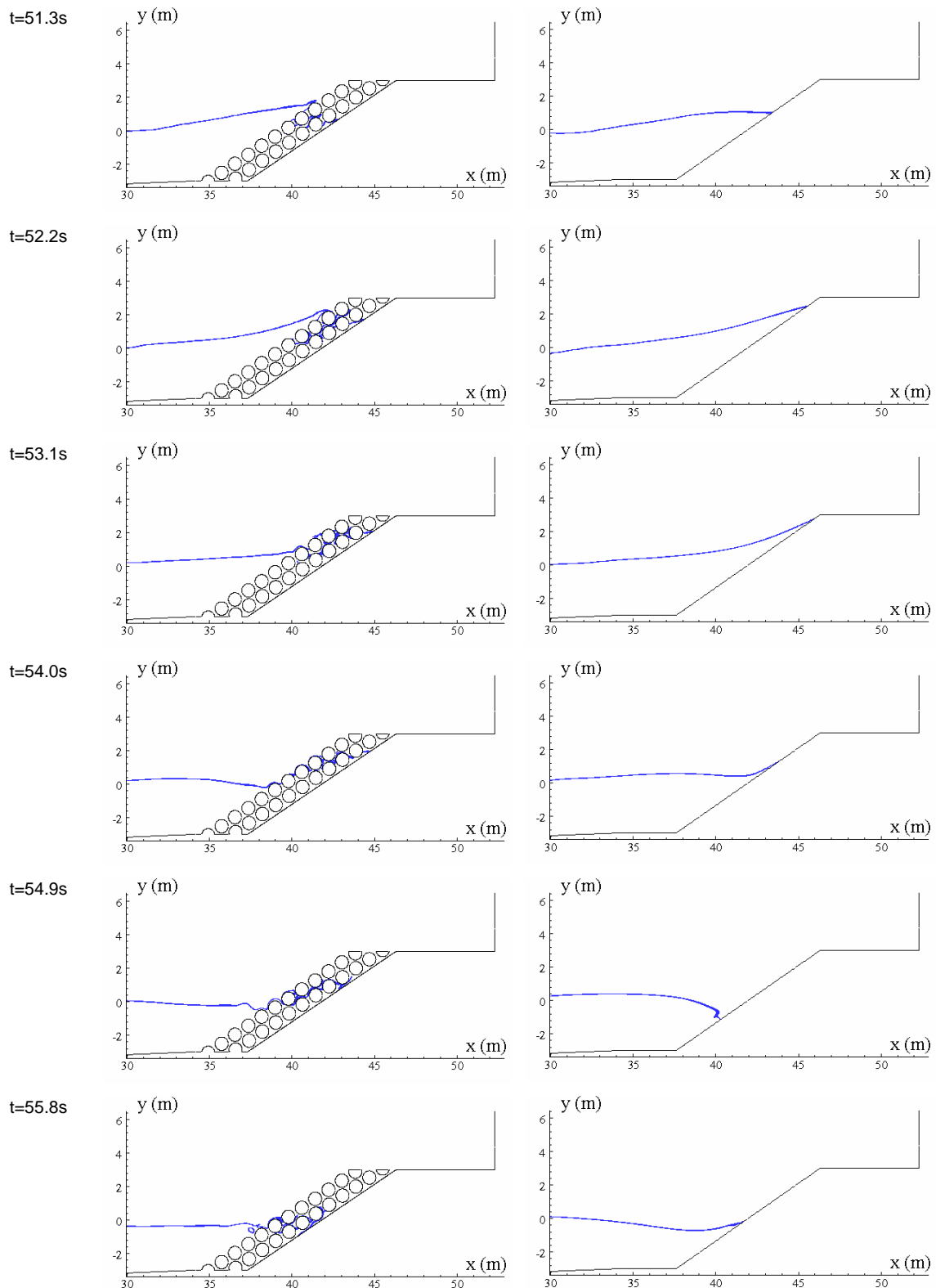


Figura 9 (continuação). Evolução da superfície livre durante um intervalo de tempo de um período, com $H=1.0\text{m}$, para a estrutura com e sem manto.

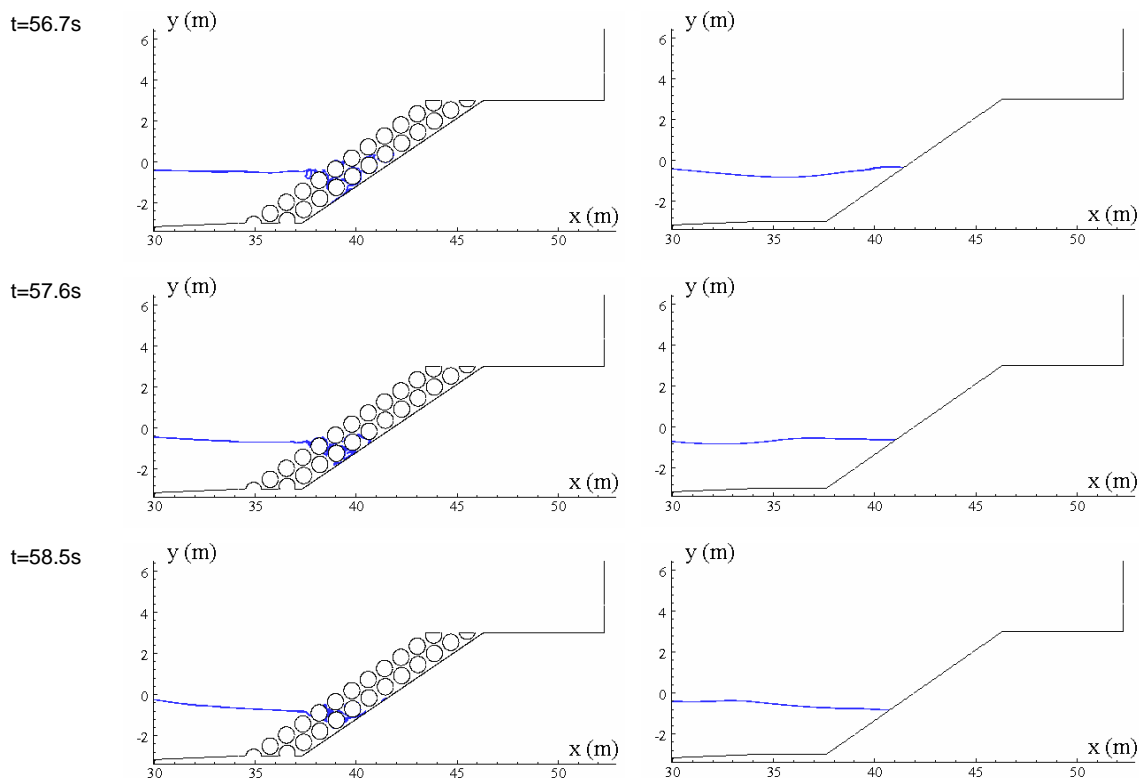


Figura 9 (continuação). Evolução da superfície livre durante um intervalo de tempo de um período, com $H=1.0\text{m}$, para a estrutura com e sem manto.

No caso do talude impermeável, a superfície livre sobe o declive da estrutura e quase atinge o coroamento. A superfície livre em frente à estrutura inicia a sua decida, deixando uma língua de água fina, cobrindo a superfície da estrutura. Esta parte da água adquire uma velocidade grande, resultado da acumulação de energia potencial, e interage com a superfície livre.

Quando o talude está coberto com um manto de rochas, a superfície livre no meio das peças do manto sobe mais lentamente que a superfície livre situada imediatamente em frente das peças cilíndricas. O “run-up” é ligeiramente inferior ao caso sem manto. Quando a superfície livre inicia a sua decida, a água fica retida nos interstícios das peças do manto, o que produz uma decida lenta da superfície livre no meio poroso.

A figura 10 permite comparar as velocidades na proximidade das duas estruturas. O escoamento é muito complexo no caso da estrutura porosa, particularmente entre as peças do manto, como seria de esperar, notando-se a presença de velocidades da ordem de 4m/s entre o talude e as primeiras peças. É interessante observar a retenção de água entre as peças enquanto a elevação da superfície livre em frente da estrutura diminui (“run-down”). No caso do talude sem manto, o escoamento é mais simples. A velocidade máxima ocorre na superfície do talude, quando a água, depois de se acumular na parte superior do talude durante o “run-up”, deixa a superfície da estrutura.

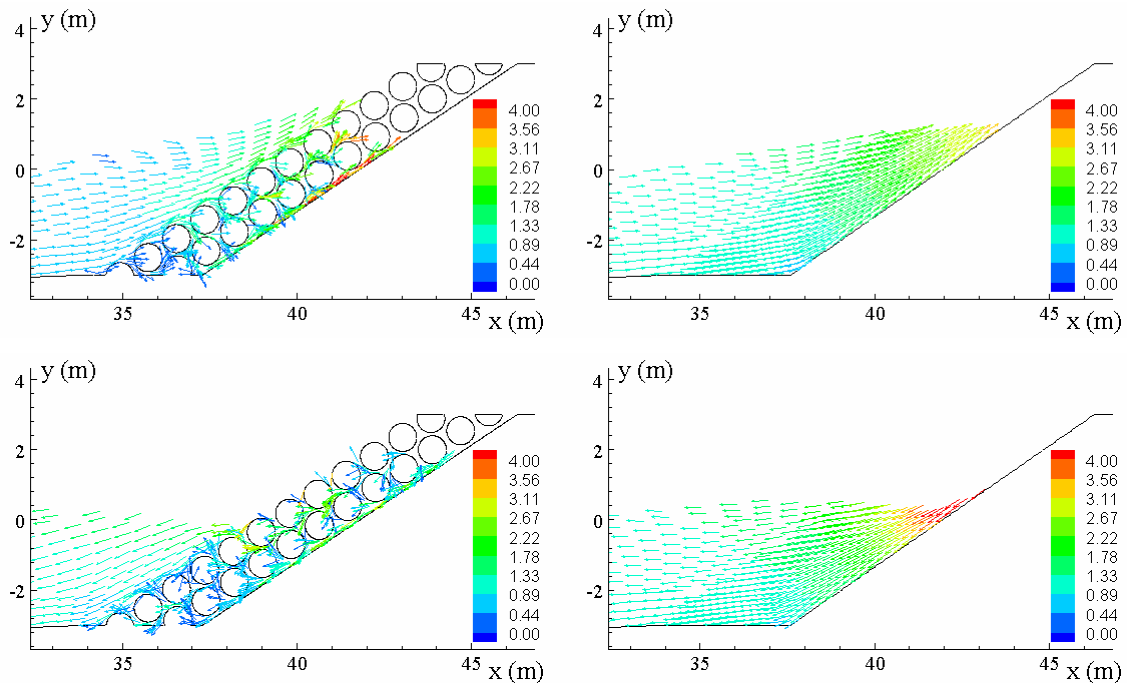


Figura 10. Vectors velocidade aos instantes 51.3s e 54.0s, para as duas estruturas, $H=1.0m$.

Quanto à forma da superfície livre, na zona inicial do domínio de cálculo o trem de ondas adapta-se a profundidade, tornando-se as cristas mais estreitas e as cavas mais achatadas, e propaga-se no declive do fundo com profundidade decrescente. Na figura 11 é representada a deformada da superfície livre a dois instantes, $t=51.3s$ e $t=54.0s$. Uma observação cuidada da deformada da superfície livre permite constatar que existe uma reflexão induzida pela estrutura porosa marginal. Esta reflexão é particularmente visível para o tempo $t=54.0s$. No entanto, a intensidade não foi estimada no presente estudo. Para a estrutura composta apenas do talude, também se observa reflexão.

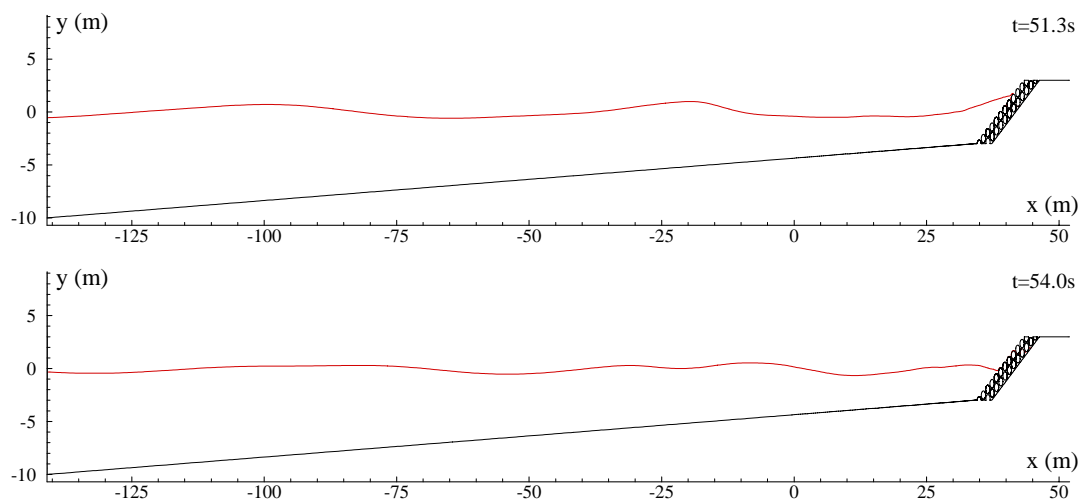


Figura 11. Deformada da superfície livre no domínio para $t= 51.3s$ e $54.0s$, para a estrutura porosa (deformação da escala vertical por um factor 2).

4.2 Influência da variação da altura de onda nos esforços na estrutura e na forma da superfície livre

A primeira grande diferença de resultados entre $H=1.0$ m e $H=3.0$ m é que, para a altura de onda maior a onda tem tendência a rebentar durante a sua propagação antes chegar à estrutura, o que não ocorre no caso da onda de 1.0m de altura. O escoamento é assim mais complexo e é observada uma difusão da fracção de volume no domínio de cálculo. Assim, resultados mais precisos poderiam ser obtidos usando um passo de tempo mais reduzido, da ordem de 0.005s, e uma malha mais fina particularmente na zona do domínio de cálculo onde se observa a rebentação da onda.

Na figura 12 representa-se o respectivo esforço horizontal actuante no talude, F_x , para as duas configurações da estrutura e para as duas alturas de ondas estudadas. O desfaseamento que aparece entre as curvas está apenas ligado à geração da onda. Em todos os casos o esforço máximo é periódico, embora seja mais importante para a onda de 3.0m de altura. Como já foi referido, para uma onda de 1.0m de altura, o esforço máximo no talude é quase independente do tipo de estrutura. Para a onda de 3.0m de altura, observam-se diferenças mais significativas, relacionadas sem dúvida com a complexidade do escoamento perto da estrutura. É interessante observar que o caso do talude impermeável apresenta os esforços máximos e mínimos de maior valor que os calculados para a estrutura porosa. Isto significa claramente que o enrocamento leva a uma redução dos esforços extremos no talude.

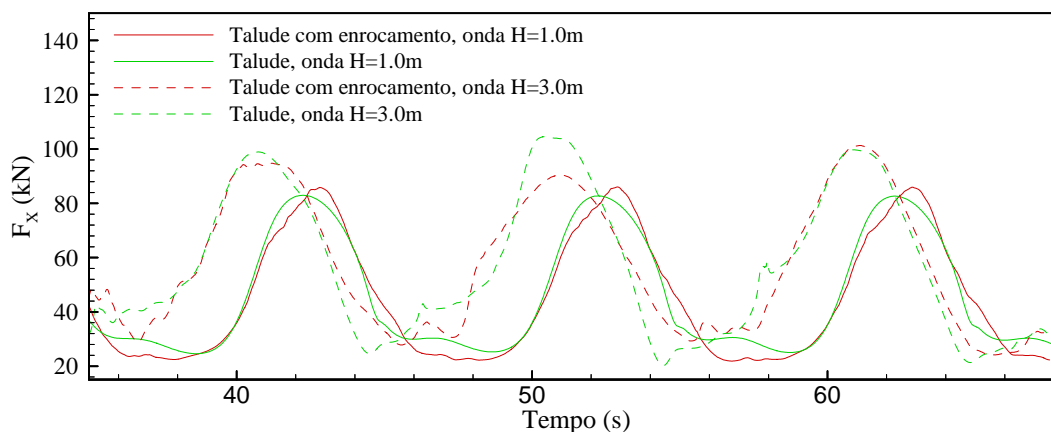


Figura 12. Esforços horizontais no talude com e sem enrocamento $H=1.0$ m e 3.0 m.

Os esforços em 8 peças do manto, P02, P05, P08 e P11 e Q02, Q05, Q08 e Q11 são apresentados na Figura 13. A análise da variação dos esforços é mais complicada no caso de $H=3.0$ m que no caso de $H=1.0$ m: o escoamento é mais complexo, a deformada da superfície livre e os esforços são muito variáveis. No entanto, observa-se uma variação dos esforços similar à onda de menor altura, embora com uma periodicidade alterada nos esforços. O esforço horizontal máximo em cada peça ocorre com a subida da superfície livre: primeiro na peça P02, depois na P05 e finalmente na P08, com um esforço na peça P11 muito variável, ligado ao “run-up” e à ocorrência do galgamento. Nota-se igualmente que o esforço máximo pode variar de maneira muito significativa. Por exemplo, o esforço horizontal máximo toma os valores de 2.0kN, 4.0kN e até 8.0kN. Nas peças P11 e Q11, a variação dos esforços é também importante, pois pode subir de 0.0kN até 4.0kN, devido ao “run-up” intenso e ao galgamento que apresentam ocorrências de grande intensidade.

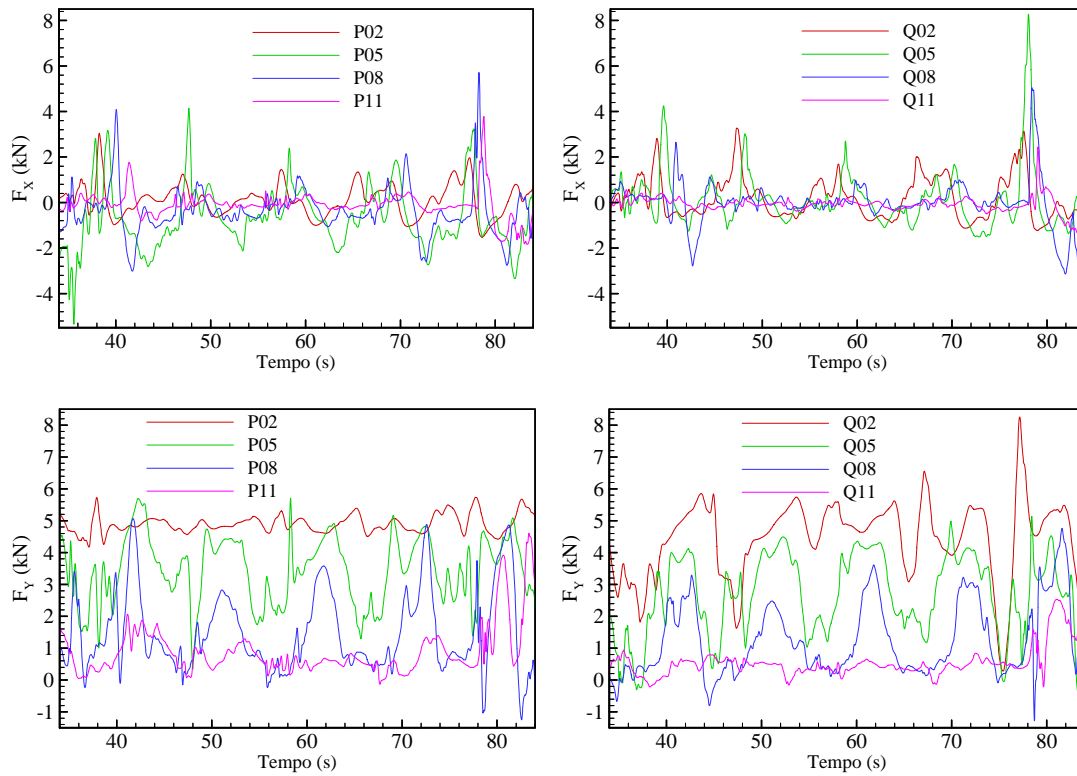


Figura 13. Evolução temporal das forças horizontais e verticais em algumas rochas: primeira camada de peças (esquerda) e segunda camada (direita).

Como já foi referido precedentemente, a velocidade de “queda” da água no talude simples é muito superior à velocidade que se regista quando o talude está coberto por um manto de rochas. Os vectores velocidades são representados na figura 14, para as duas estruturas. A estrutura porosa apresenta um escoamento muito complexo devido à interação forte entre as peças do manto e o escoamento mas, como se pode verificar, a intensidade da velocidade é inferior a 3.5m/s. No caso do talude impermeável a intensidade da velocidade é muito superior a 4m/s, sendo da ordem de 6-7m/s ao tempo $t=53.1$.

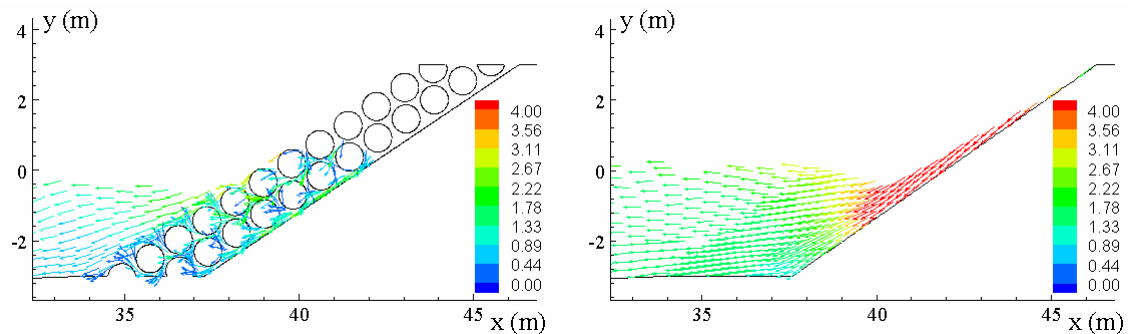


Figura 14. Vectores velocidade ao tempo 53.1s, para as duas estruturas, $H=3.0$ m.

4.3 Influência da porosidade na variação da superfície livre na proximidade da estrutura e no galgamento

Foi indicado nos parágrafos precedentes que não é observado galgamento sobre o talude para a onda de 1.0m de altura, com ou sem enrocamento sobre o talude impermeável.

Na figura 15 representa-se a deformada da superfície livre durante um intervalo de tempo correspondente a um período, para o talude impermeável e para o talude com um manto permeável, para uma altura de onda $H=3.0$ m. A observação das figuras permite verificar a influência da porosidade da estrutura.

Para a estrutura impermeável observa-se um galgamento importante. A onda sobe totalmente o talude, expande-se na parte superior do talude e volta a descer o declive como uma cascata. Com o manto de enrocamento sobre o talude, não se observe galgamento sobre a estrutura. Isso confirma a eficácia deste tipo de estrutura porosa na protecção das zonas de trânsito marginais.

É igualmente verificado nas figuras, que o “run-up” é muito diferente entre as duas configurações da estrutura. Sem protecção no talude, a onda sobe o declive para se espalhar na parte superior da estrutura. O “run-up” é assim da altura do talude. A impermeabilidade da estrutura induz que a água, sob o efeito da gravidade, desce o talude com velocidade importante (da ordem de 6-7m/s, como se pode observar na figura 14). No caso da estrutura porosa, o “run-up” é muito reduzido e a água não consegue chegar à parte superior da estrutura. O “run-up” é, neste caso, da ordem de 1.0m por cima do nível do mar (figura 15c e 15d).

O “run-down” é também atenuado na estrutura porosa. Quando não existe protecção, o “run-down” é importante, pois a superfície livre no declive do talude situa-se 2.0m por baixo do nível do mar, acentuando assim a rebentação da onda no talude.

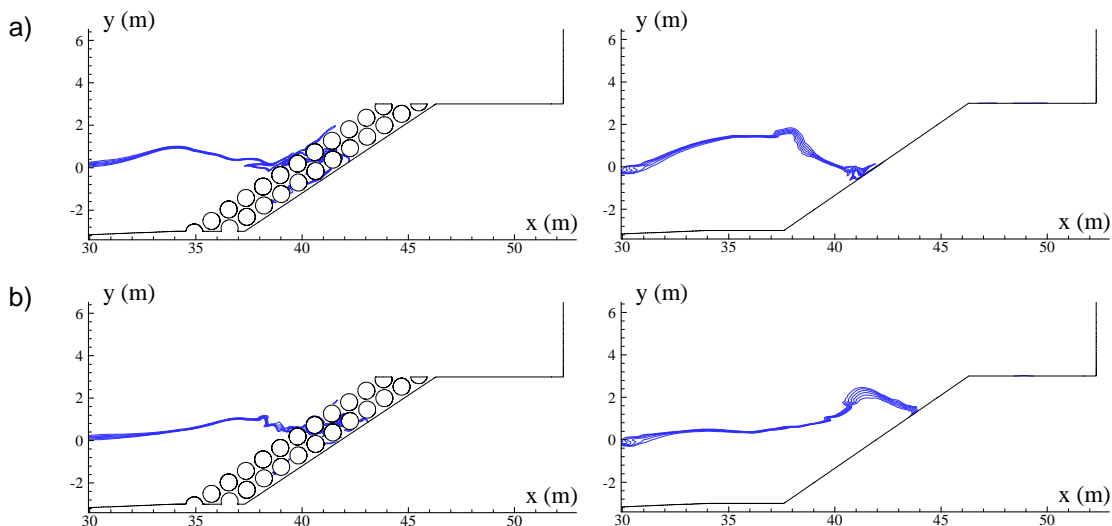


Figura 15. Deformada da superfície livre na proximidade da estrutura marginal, nos dois tipos de estrutura para $H=3.0$ m, durante um intervalo de tempo de um período, a) 49.5s, b) 50.4s, c) 51.3s, d) 52.2s, e) 53.1s e f) 54.0s.

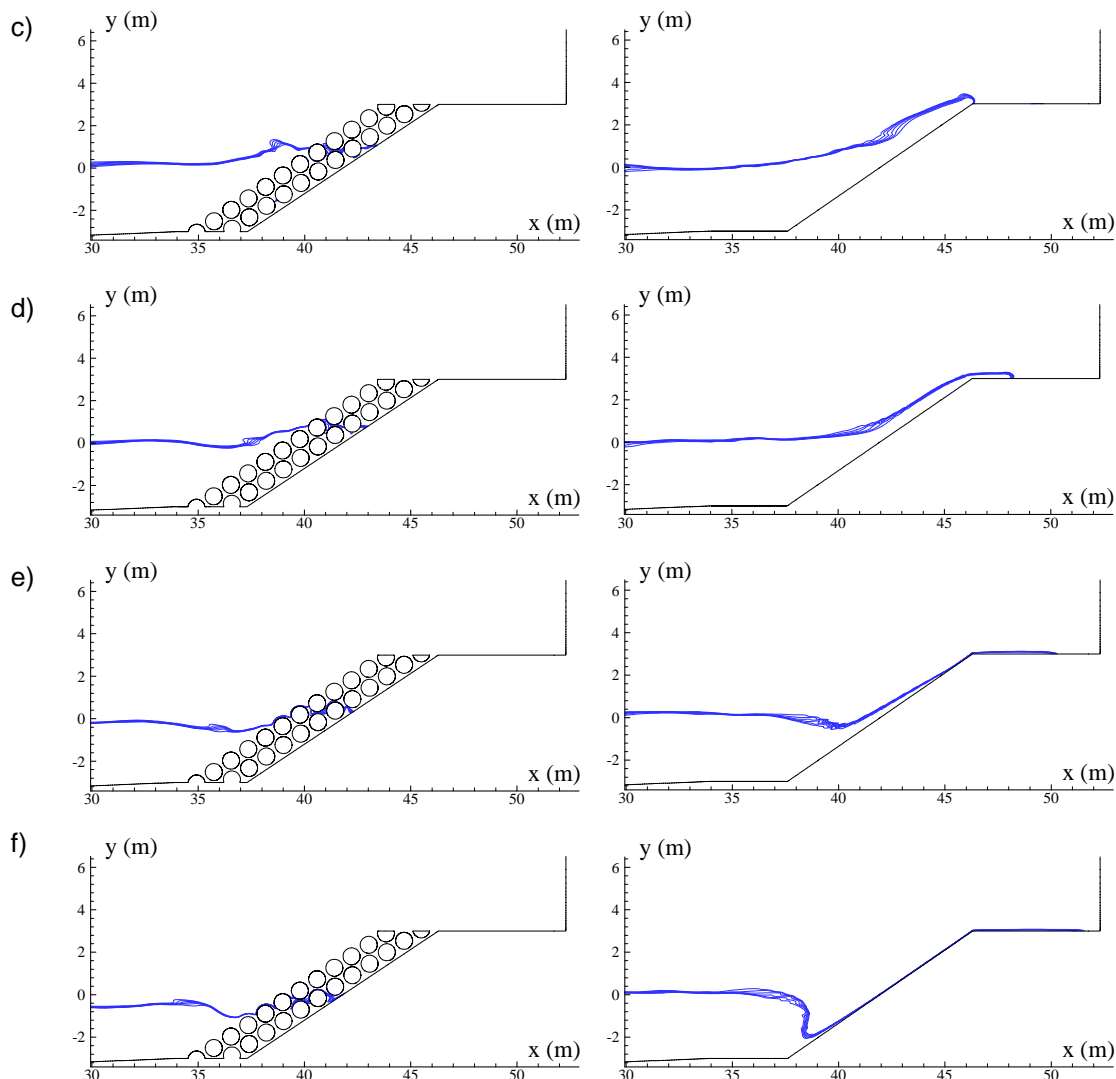


Figura 15. Deformada da superfície livre na proximidade da estrutura marginal, nos dois tipos de estrutura para $H=3.0$ m, durante um intervalo de tempo de um período, a) 49.5s, b) 50.4s, c) 51.3s, d) 52.2s, e) 53.1s e f) 54.0s.

Observa-se também que a amplitude da deformada da superfície livre em frente à estrutura está sujeita a grandes variações no caso do talude simples. Estas variações de amplitude são induzidas pela altura, muito importante, do “run-up” no declive do talude e a velocidade da água resultante, que interage fortemente com a onda. O impacto entre a onda e a velocidade da água que desce o talude pode observar-se na figura 14 e 15f. No caso do talude com o enrocamento, como já foi referido, o “run-up” é reduzido e conseqüentemente a agitação da superfície livre em frente da estrutura é reduzida. No entanto, observa-se uma reflexão das ondas para os dois tipos de estruturas, que não foi estimada no presente estudo.



5. CONCLUSÕES

Nesta comunicação simulou-se a interacção entre uma onda e um modelo de estrutura marginal porosa típica na protecção das instalações costeiras, utilizando o modelo FLUENT, modelo numérico *RANS* com um método *VOF* para a modelação da superfície livre.

Foram consideradas duas estruturas: uma estrutura simples constituída por um talude impermeável e uma estrutura similar, mas com o talude coberto por um manto de peças cilíndricas, representativa das estruturas marginal porosas. Duas ondas, de 1.0m e 3.0m de altura, e para um período de 10s, foram simuladas.

Da análise dos resultados obtidos, o primeiro comentário está ligado à propagação das ondas. Os modelos *RANS* não são os mais apropriados para modelar a propagação das ondas. O tempo de cálculo é demasiado grande e a utilização destes modelos, se não há rebentação, não se justifica. Assim, o mais rápido e sensato consistiria em acoplar um modelo adaptado à propagação das ondas (existem vários modelos, como *FUNWAVE*, Wei *et al.* (1995) ou *CANAL*, Gil *et al.* (2004), Didier *et al.* (2005)) na zona inicial do domínio e um modelo *RANS*, que permite modelar a interacção entre as ondas e a estrutura, na zona próxima à estrutura. Este será o objectivo do trabalho futuro a desenvolver.

No entanto, o presente estudo demonstrou a possibilidade de modelar interacções entre ondas e estruturas, numa configuração complexa, com este modelo número. Foi verificada a correlação entre o estado da superfície livre e os esforços que actuam nas peças do manto, o que permitiu validar a simulação numérica.

Comparando os esforços no talude nas duas configurações, para uma onda de 1.0m de altura, não foram encontradas grandes diferenças nem no "run-up", nem nos esforços no talude. Efectivamente, para esta onda de pequena amplitude, o manto não modifica significativamente a evolução global da superfície livre.

Para a onda de 3.0m de altura, os resultados numéricos apresentam diferenças significativas entre as duas configurações de estrutura. Quando o talude é coberto com um manto de peças cilíndricas, o "run-up" e os esforços são menores. A intensidade da velocidade da água na estrutura apresenta também valores inferiores para a estrutura porosa, da ordem de 3.5-4m/s em vez de 6-7m/s. Como é óbvio, as peças do manto suportam esforços maiores que no caso da onda de 1.0m de altura. O galgamento que se produz na parte superior do talude é suprimido quando é colocado uma cobertura de peças no declive da estrutura.

No caso da onda de maior amplitude, foi verificado uma difusão da fracção de volume demasiado importante, que pode alterar de maneira significativa o cálculo dos esforços. Esta difusão parece, neste caso, estar directamente ligada à rebentação da onda na parte média do domínio de cálculo. Seria assim necessário, num trabalho futuro de validação mais completo, considerar uma malha mais fina e um passo de tempo mais pequeno, condições fundamentais para modelar correctamente a rebentação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Fluent Incorporated (2005) FLUENT 6.2 User's Guide.

Vandormaal J. P. and Raithby G. D. (1984) "Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows". Numer. Heat Transfer, Vol 7, pp 147-163.

Rhie C. M. and Chow W. L. (1983) "Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation". AIAA Journal, Vol 21(11), pp 1525-1532.

Hirt C.W. and Nichols B.D. (1981) "Volume of fluid VOF method for the dynamics of free boundaries", J. Comp. Phys., Vol. 39, pp 201-225.

Peric M. and Ferziger J.H. (1997) "Computational Methods for Fluid Dynamics", Springer, Second edition.



**5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007**

Wei G., Kirby J. T., Grilli S.T. e Subramanya R. (1995), A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations, J. Waterway, Port, Coastal Ocean Engineering, Vol. 120, pp 251-261.

Didier, E., Gil L., Neves M.G., Santos J.A. e Ferreira O., (2005) Modelação numérica da propagação de ondas no sistema de ilhas-barreira da Ria Formosa, Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária.

Gil L., Fortes J., Didier E., Santos J.A., Clément A.H. (2004) Comparative analysis of numerical wave models for wave propagation over varying sloping bottoms, ISOPE, Toulon, France.