

APLICAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS AO CÁLCULO DE PRESSÕES NUMA LAJE

Maria Graça Neves

*Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, gneves@lnec.pt*

Eric Didier

*Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, edidier@lnec.pt
MARETEC, Marine and Environmental Technology Center, IST, Lisboa, Portugal*

RESUMO

Neste artigo estuda-se a aplicabilidade de dois modelos numéricos, o modelo COBRAS-UC (Lara et al., 2006) e o modelo SPPhysics (Dalrymple et al., 2006), ao cálculo de pressões sob uma laje horizontal que se localiza sobre uma estrutura em talude composta por um TOT e duas camadas de enrocamento. A grande dificuldade deste caso prende-se com a complexidade do escoamento, onde se geram gotas que se propagam sob a laje e escoamento descontínuo sob e sobre a laje.

Cada um dos modelos apresenta as suas vantagens e limitações. O modelo COBRAS-UC, baseado num método Euleriano, permite simular o escoamento em estruturas porosas, a rebentação e diferentes tipos de agitação incidente. O modelo SPPhysics, baseado num método Lagrangiano, permite simular o escoamento em estruturas impermeáveis, a rebentação e diferentes tipos de agitação incidente. Como resultados, os dois modelos permitem obter valores de diferentes grandezas, tais como o campo de velocidades e pressões.

1. INTRODUÇÃO

Actualmente a redução da agitação no interior de bacias portuárias é uma preocupação crescente no projecto de obras marítimas. Para tal, a redução da reflexão nas fronteiras, frequentemente compostas por paredes verticais, é uma das opções possíveis. Pretende-se que as novas estruturas sejam menos reflectoras mas que não reduzam significativamente a área da bacia. Uma das soluções possíveis é a de introduzir uma estrutura porosa em talude junto à parede vertical, rematada superiormente por uma laje. Nesse caso, a laje terá de ser projectada para resistir às pressões devidas às ondas, que são normalmente caracterizadas por apresentar picos de pressão. Para calcular essas forças recorre-se a formulações empíricas e, posteriormente, a modelação física. A utilização de modelos numéricos é ainda pouco frequente e a verificação da aplicabilidade dos modelos a casos desta complexidade é rara. Pretende-se que os modelos representem tão correctamente quanto possível os vários fenómenos físicos que ocorrem, que incluem o escoamento em meios porosos e os fenómenos não lineares que ocorrem na rebentação.

Neste artigo estuda-se a aplicabilidade de dois modelos numéricos, COBRAS-UC (Lara et al., 2006) e SPHysics (Dalrymple et al., 2006), ao cálculo de pressões sob uma laje horizontal, que cobre uma estrutura em talude composta por um TOT e duas camadas de enrocamento, tal como a que se apresenta na *Figura 1*. A grande dificuldade deste caso prende-se com a complexidade do escoamento, onde se geram gotas que se propagam sob a laje e escoamento descontínuo sob e sobre a laje.

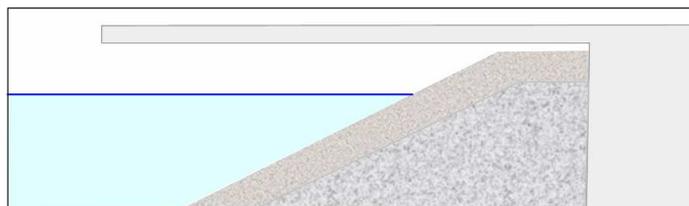


Figura 1. Representação esquemática do caso de estudo.

O modelo COBRAS-UC, baseado num método Euleriano, resolve as equações completas de Reynolds na vertical (RANS), ao que se incorporou um modelo não linear de turbulência, $k-\epsilon$, tridimensional (“two-equation”) e um método de captura da superfície livre do tipo “Volume of Fluid” (VOF). Permite simular o escoamento em estruturas porosas, a rebentação e diferentes tipos de agitação incidente. O modelo SPHysics é baseado num método Lagrangiano onde o fluido é representado através de volumes fluidos, que correspondem conceptualmente a partículas, que têm uma massa, uma densidade, uma pressão, uma velocidade. A diferença de pressão no fluido induz o movimento das partículas ao longo do tempo. O método SPH (“Smoothed Particle Hydrodynamics”), utilizado no modelo SPHysics, permite modelar os escoamentos com superfície livre sem impor condições de fronteira particulares. O método não necessita de malha e só entra no cálculo a parte do espaço ocupado pelo fluido.

Neste artigo descreve-se sucintamente, no ponto 2, cada um dos modelos. No ponto 3 descreve-se o caso de aplicação e apresentam-se, comparam-se e discutem-se os resultados dos modelos COBRAS-UC e SPHysics. Por fim, o ponto 4 contém as considerações finais do trabalho.

2. DESCRIÇÃO DOS MODELOS

2.1. Modelo COBRAS-UC

O modelo COBRAS-UC é baseado no modelo RIPLLE, originalmente desenvolvido pela NASA, e modificado na Universidade de Cornell, dando origem ao modelo COBRAS (COrnell BReaking waves And Structures), especificamente para tratar dos fenómenos da rebentação e ter em conta as estruturas porosas (Lin e Liu, 1998). Finalmente o modelo foi melhorado na

Universidade de Cantábria no que respeita à optimização de cálculo e aos sistemas de entrada e saída do modelo, dando origem ao modelo COBRAS-UC.

COBRAS-UC é um modelo numérico bidimensional que resolve as equações completas de Reynolds na vertical (RANS), ao que se incorporou um modelo não linear de turbulência, $k-\epsilon$, tridimensional. Este modelo de turbulência permite ter em conta as características de escoamento que ocorrem no processo de rebentação e no escoamento através de meios porosos. Para o escoamento em meios porosos inclui-se um modelo de dissipação de energia não linear, que corresponde a uma variação das equações RANS e que se obtêm a partir de uma integração num volume de controlo no meio poroso, considerando-se assim o meio poroso como um meio contínuo. Implementou-se ainda um modelo $k-\epsilon$ no interior do meio poroso.

O modelo incorpora um método de seguimento da superfície livre do tipo "Volume of Fluid" (VOF). Desta forma, a superfície livre pode comportar-se de maneira arbitrária, o que permite que existam zonas desconexas, formação de gotas, etc. Os métodos utilizados para resolver as equações são os métodos interactivos de diferenças finitas, melhorando assim a precisão dos resultados.

Para a execução de um caso, é gerada uma malha formada por elementos rectangulares, cuja dimensão pode variar de forma não linear, podendo formar uma malha fina na zona de interesse do estudo e uma malha grosseira onde não seja necessário um cálculo tão preciso. Os obstáculos e zonas de diferentes porosidades são definidos através de funções contínuas. Para o cálculo do escoamento no meio poroso é necessário definir as propriedades do meio, tais como a porosidade e o tamanho dos elementos que o compõe e uma série de parâmetros adicionais que dependem do escoamento e que precisam de ser calibrados.

O modelo permite obter informação completa de pressão, vorticidade, viscosidade turbulenta, velocidades horizontais e verticais, posição da superfície livre, conservação de massa, volume galgado, etc., e foi já validado em diferentes casos de engenharia costeira com bons resultados ao simular o escoamento em estruturas porosas (Lara et al., 2006).

A eficiência computacional do modelo é função essencialmente das dimensões da malha. No entanto, a precisão dos resultados exige, na maioria dos casos, uma reduzida dimensão da malha, o que acarreta tempos de cálculo elevados.

2.2. Modelo SPHysics

Os métodos SPH foram utilizados inicialmente em astrofísica por Gingold e Monaghan (1977) e foram aplicados mais tarde à hidrodinâmica por Monaghan (1994). O fluido é considerado como constituído por volumes de água assimilados a partículas. O método SPH, que não necessita de malha, permite modelar as trajectórias das partículas do fluido que interagem segundo as equações de Navier-Stokes. Numericamente a interacção entre as partículas é assegurada por uma função de interpolação. As equações, escritas na forma Lagrangiana, resolvem assim o movimento individual de cada partícula a partir do movimento das partículas que estão à sua volta.

O princípio fundamental dos métodos SPH consiste em aproximar um escalar, uma função ou um tensor usando a teoria dos integrais de interpolação. O integral de interpolação de uma função $f(r)$ é dado por:

$$f(r) = \int f(r')W(r-r',h)dr'$$

onde W é o kernel de interpolação, ou seja, uma função analítica, e h determina a dimensão do suporte desta função, a qual limita a resolução do método. O parâmetro h é denominado de "smoothing length" e controla a dimensão do domínio de influência do kernel. Numericamente, a função $f(r)$ é conhecida apenas em pontos discretos, as partículas, e os integrais de interpolação são aproximados por um somatório. A função analítica f pode ser diferenciada sem necessitar de uma malha espacial.

Existem diversos kernels na literatura, sendo a utilização de diferentes kernels análoga à utilização de esquema de discretização nos métodos Eulerianos do tipo volumes finitos ou

diferenças finitas. Assim, a bondade do método SPH depende do tipo de kernel, função que deve verificar várias condições matemáticas.

O kernel de interpolação “quadratic”, utilizado nas simulações numéricas, é definido pela função analítica dada por:

$$W(q, h) = \frac{3}{2\pi h^2} \left(\frac{q^2}{4} - q - 1 \right) \quad 0 \leq q \leq 2 \quad (3)$$

onde $q=(r_a-r_b)/h$, r_a e r_b a posição de uma partícula a e b.

A partir do método SPH, vários modelos numéricos podem ser desenvolvidos baseando-se em diferentes técnicas numéricas. O modelo numérico SPHysics é um modelo baseado num método numérico de fluido pouco compressível. Esta técnica permite resolver uma equação de estado para a pressão em vez de uma equação de Poisson como é o caso quando se considera o fluido incompressível (Koshizuka et al. (1995), Shao e Lo (2003)). Com a hipótese de fluido pouco compressível, a variação de densidade é inferior a 1%, como foi mostrado por Dalrymple e Rogers (2006). A contrapartida é que a integração no tempo necessita de um passo de tempo pequeno.

Conhecendo o campo de pressões e as interações entre as partículas, é possível determinar o movimento das partículas, calculando as velocidades e as posições das mesmas ao longo do tempo.

Na implementação numérica do modelo, é utilizado o esquema numérico predictor-corrector, descrito por Monaghan (1989), para a integração no tempo. A velocidade das partículas é calculada usando a equação discreta de conservação do momento, a densidade é definida a partir da equação discreta de continuidade e a posição das partículas é calculada usando o método XSPH de Monaghan sem a correcção de velocidade ($\epsilon=0$) instabiliza o processo de deslocação das partículas no caso da modelação da propagação das ondas, como foi mostrado por Didier e Neves (2009). A pressão é calculada a partir da densidade, usando a equação de estado.

Quanto às condições de contorno, estas não aparecem de forma natural no formalismo SPH. As diferentes soluções empregues para evitar problemas de contorno consistem na geração de uma série de partículas virtuais que caracterizem os limites do sistema (condição de fronteira dinâmica) ou na determinação de uma força de repulsão nas partículas da fronteira (condição de fronteira repulsiva). Esta última condição é utilizada nas simulações apresentadas nesta comunicação.

Quanto às condições iniciais, as partículas fluidas são colocadas numa determinada posição no espaço, que corresponde às coordenadas espaciais dos nós de uma determinada malha, em geral rectangular. Se se considerar inicialmente o fluido em repouso, a velocidade inicial das partículas é nula e a pressão associada é calculada em função da profundidade.

O método SPH apresenta um grande potencial na modelação de escoamentos onde ocorrem deformações importantes e complexas da superfície livre. Esta capacidade está ligada ao método numérico, que permite modelar a superfície livre sem impor condições de fronteira particulares ou realizar tratamentos especiais e à modelação do movimento de corpos e da sua interacção com o fluido.

3. CASOS DE APLICAÇÃO

3.1. Considerações Gerais

Para reduzir a reflexão no interior de bacias portuárias numa fronteira que seja de parede vertical, uma das soluções possíveis é a de introduzir uma estrutura porosa em talude junto á parede vertical, rematada superiormente por uma laje, que serve de suporte ao atraque de navios. Nesse caso, a laje terá de ser projectada para resistir às pressões devidas às ondas, que são normalmente caracterizadas por apresentar picos de pressão.

Este é o caso que se apresenta neste artigo: estrutura em talude, composta por um manto de enrocamento e um núcleo de TOT, e coberta superiormente por uma laje horizontal. Pretende-se verificar se a solução é efectiva em termos de redução de reflexão e obter informação sobre as pressões induzidas pelas ondas na laje. As dimensões da estrutura são as que se apresentam na *Figura 2* e correspondem a medidas que teriam num modelo físico construído considerando a lei de semelhança de Froude e com uma escala geométrica de 1:35. O manto exterior, de 2.0 m de largura e declive 3:4, é composto por enrocamento de 10 a 30 KN.

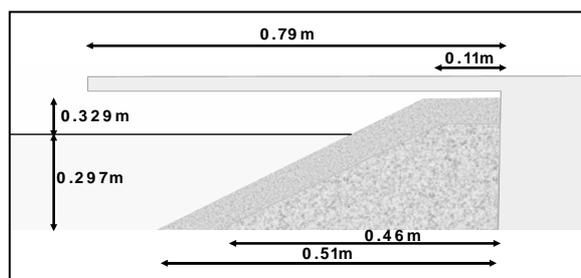


Figura 2. Caso de estudo.

Foram estudadas diferentes condições de agitação e níveis de maré, tal como se descreve no Quadro 1. Assim, foram realizados testes considerando a estrutura impermeável e agitação regular. Para o caso do modelo COBRAS-UC considerou-se ainda a estrutura permeável, composta pelas duas camadas porosa e considerou-se agitação regular. Fizeram-se testes para dois níveis de maré, que correspondem a nível médio (NM) e preia-mar (PM), dois períodos (T) e duas alturas de onda (H).

Quadro 1. Condições modeladas numericamente

Modelo	Geometria	Nível de maré	T(s)	H (m)
COBRAS-UC	Porosa	NM	1.69	0.09
				0.11
		2.37	0.09	
			0.11	
		PM	1.69	0.09
				0.11
2.37	0.09			
0.11				
COBRAS-UC SPPhysics	Impermeável	NM	1.69	0.09
				0.11
		2.37	0.09	
			0.11	

3.3. Aplicação do modelo COBRAS-UC

A fim de ilustrar as capacidades do modelo e as suas limitações, o modelo foi aplicado ao caso de estudo descrito em 3.2.

As características geométricas do molhe foram reproduzidas com as dimensões e características apresentadas anteriormente. Foram simulados dois meios porosos correspondentes ao manto de enrocamento e ao núcleo de TOT. Para os meios porosos, foi necessário definir não só a geometria e os parâmetros físicos (porosidade, p , e diâmetro

nominal, D50), dados que se obtiveram mediante cálculo tradicional, como também os parâmetros numéricos (coeficiente de fricção linear, α , coeficiente de fricção não linear, β , e coeficiente de massa adicionada, χ). Os últimos foram obtidos escolhendo-se valores existentes na literatura. No Quadro 2 apresentam-se os valores considerados nas simulações.

Quadro 2. Parâmetros utilizados pelo COBRAS-UC, referentes aos meios porosos

Armour layer	ρ	D_{50} (m)	α	β	χ
Manto de enrocamento	0.50	0.025	200	0.8	0.34
TOT	0.40	0.002	200	1.1	0.34

O domínio de cálculo utilizado foi de 8.5 m de comprimento. A altura modelada foi de 0,50 m, estando a superfície livre em repouso a 0.257 m para NM e de 0.286 m para PM. A malha de cálculo utilizada tem um número total de células de 1250x141, com uma discretização de $\Delta x = 6$ mm e $\Delta y = 4$ mm na zona de máximo detalhe, que corresponde à zona do molhe (ver *Figura 3*) e uma malha variável em x entre 6 mm e 10 mm, na zona de geração.

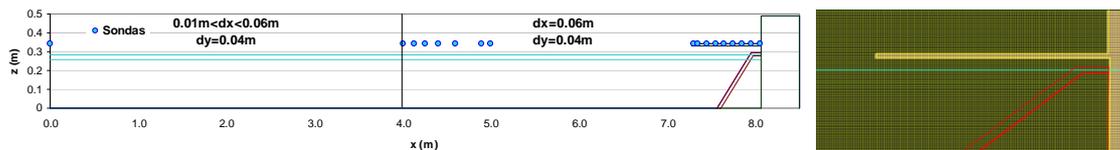


Figura 3. Características da malha e pormenor da malha de cálculo utilizada pelo programa COBRAS-UC.

A geração de ondas foi simulada na fronteira de entrada (fronteira esquerda da malha), onde foram introduzidos os valores da superfície livre e das duas componentes da velocidade ao longo do tempo. Para os casos em que se considerou a estrutura porosa e em que apenas se correu o modelo COBRAS-UC, foi considerado o caso de um batedor com absorção activa de reflexão. No entanto, para os casos de estrutura impermeável, e de forma a permitir a comparação de resultados com o modelo SPHysics, não se considerou a absorção activa de reflexão no batedor numérico.

Neste canal numérico foram colocadas sondas ao longo do canal para se poderem fazer comparações das séries temporais obtidas com o modelo SPHysics. Foram ainda colocadas sondas ao longo de toda a laje, para o cálculo das pressões.

Como se pode observar na *Figura 4*, o escoamento sob a laje é extremamente complexo, com gotas de água que se libertam e se escoam sobre a laje e com a ocorrência de galgamento, o que se gera zonas desconexas.



Figura 4. Aspecto da superfície livre calculada pelo modelo COBRAS-UC para o caso de talude impermeável (esquerda) e poroso (direita) para preia-mar, $T = 1.69$ s e $H = 0.11$ m.

O tempo de simulação foi de 20 s. Os casos foram simulados num computador com processador Dualcore Intel 2.34 GHz e 2 GB de RAM e os tempos de execução médios foram de aproximadamente 30 minutos para cada segundo de simulação.

3.4. Aplicação do modelo SPHysics

O domínio de cálculo utilizado no modelo SPHysics tem 8.067 m de comprimento. A altura da superfície livre em repouso é localizada a 0.257 m.

As partículas sólidas definam os limites do domínio computacional e as partículas fluidas são inicialmente distribuídas regularmente usando uma grelha cartesiana uniforme. O número de partículas é de 79862, sendo 2036 partículas sólidas para a definição dos contornos. A distância inicial entre partículas fluidas é de 6.5×10^{-3} m e o volume de uma partícula é assim de 4.225×10^{-5} m³/m (bidimensional). A *Figura 5* apresenta um detalhe da posição inicial das partículas na proximidade da estrutura e da laje.

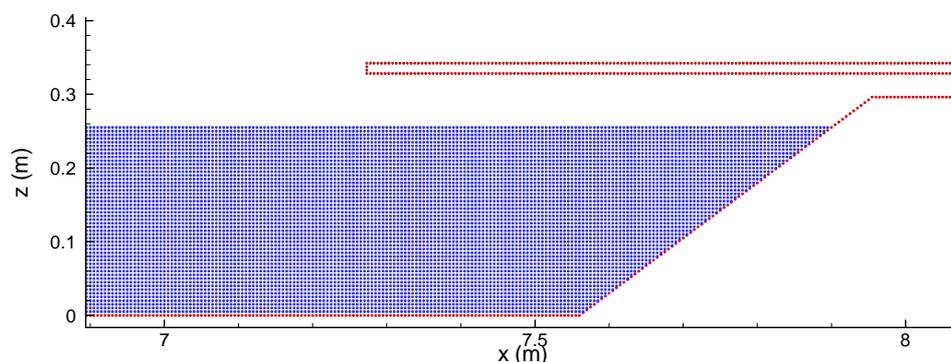


Figura 5. Posição inicial das partículas fluidas e sólidas (limites do domínio de cálculo).

A geração de ondas foi simulada na fronteira de entrada (fronteira esquerda da malha, em $x = 0.0$ m), através um batedor pistão flexível. O batedor consiste no movimento das partículas sólidas deste fronteira em que é aplicado o perfil da componente horizontal de velocidade de uma onda monocromática em profundidade finita intermédia. O modelo SPHysics, na sua versão actual, não integra a absorção activa de reflexão no batedor numérico.

Um programa de pós-tratamento dos dados da simulação permite obter, para qualquer secção do canal, as séries temporais de elevação de superfície livre. O programa permite também definir a pressão pontual na laje ou ao longo de toda a laje.

A pressão local num ponto de uma superfície sólida é calculada a partir da pressão conhecida nas partículas fluidas contidas num área próxima deste ponto (Oger et al., 2006).

O passo de tempo médio, para todas as simulações, é da ordem de 5×10^{-5} s. A simulação de um segundo de escoamento necessita cerca de 3 horas num computador com processador Dualcore Intel 2.34 GHz e 2 GB de RAM.

3.6. Análise dos resultados

3.6.1. Modelo COBRAS-UC

Com base nos cálculos efectuados com o modelo COBRAS_UC, foi possível calcular o coeficiente de reflexão, KR, e as pressões máximas na laje, Pmax, em metros de coluna de água (mca). No Quadro 2 e na *Figura 6* apresentam-se os resultados obtidos.

Quadro 2 – Resultados de KR e Pmax obtidos com o modelo COBRAS-UC

Geometria	Nível de maré	T (s)	H (m)	KR	Pmax (mca)
Porosa	NM	1.69	0.09	0.49	0.07
			0.11	0.54	0.10
	2.37	0.09	0.66	0.08	
		0.11	0.66	0.10	
	PM	1.69	0.09	0.49	0.10
			0.11	0.53	0.10
2.37	0.09	0.49	0.10		
	0.11	0.53	0.10		
Impermeável	NM	1.69	0.09	0.60	0.10
			0.11	0.59	0.10
		2.37	0.09	0.70	0.10
			0.11	0.66	0.10

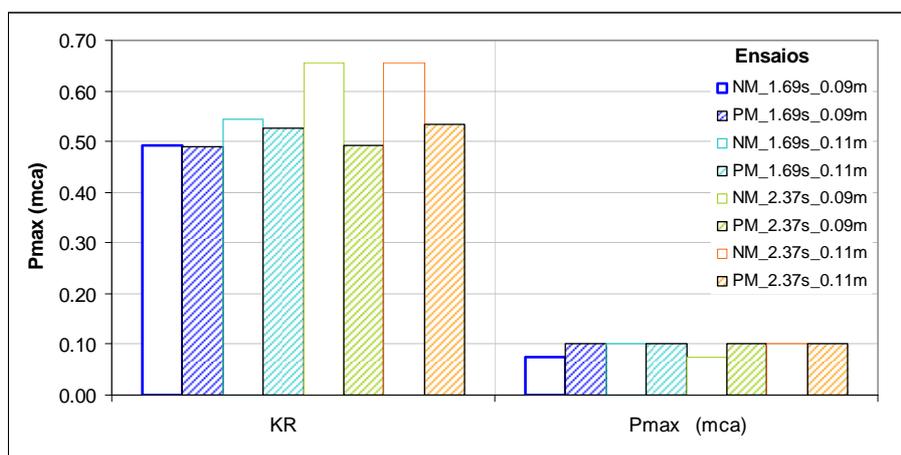


Figura 6. Valores de KR e Pmax obtidos com o modelo COBRAS-UC para a estrutura porosa.

Verifica-se que o coeficiente de reflexão, KR, varia entre 0.5 e 0.7. Verifica-se ainda que os maiores valores de reflexão ocorrem para NM e T = 2.37 s (Figura 6). Isto ocorre porque para PM ocorre galgamento sobre a laje, o que leva a que ocorra maior transmissão, levando a uma redução na reflexão. Na Figura 7 apresenta-se o aspecto da superfície livre num dado momento de cálculo para uma condição de agitação (T = 1.69 s, H = 0.11 m) mas para dois níveis de maré diferentes: NM e PM. Como se pode observar, ocorre galgamento de uma lâmina de água para o caso de PM. Também na Figura 8 se pode observar o mesmo. Nesta figura, apresenta-se a posição da superfície livre numa sonda situada em x = 8m, isto é, numa zona onde temos o meio poroso e a laje. Nesta figura apresentam-se dois exemplos da posição da superfície livre, um para PM e outro para NM. Apresenta-se ainda a posição da laje em cada caso. Como se verifica, para o caso de PM a superfície livre encontra-se acima da laje em vários momentos, o que indica a ocorrência de galgamento, enquanto para NM isto nunca ocorre.



Figura 7. Aspecto da superfície livre para: NM, $T = 1.69$ s e $H = 0.09$ m (esquerda) e PM, $T = 2.37$ s e $H = 0.11$ m (direita)

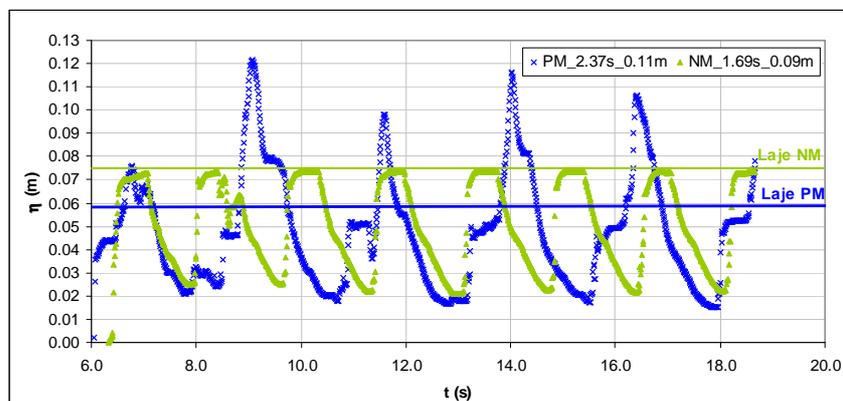


Figura 8. Elevação da superfície livre (η), medidas em $x = 8$ m do modelo, para PM, $T = 2.37$ s e $H = 0.11$ m e para NM, $T = 1.69$ s e $H = 0.09$ m.

Quanto à pressão máxima sob a laje, esta variou entre 6 e 10 cm de coluna de água em modelo, o que corresponderia, considerando uma escala geométrica de 1:35, a valores no protótipo variáveis entre 2.1 mca e 3.6 mca. Os valores de pressão máxima aumentam com a altura de onda para o nível médio de maré. No entanto, para PM isto já não se verifica, já que os valores de pressão máxima praticamente não se alteravam com a variação das condições de agitação, como se pode observar pelos valores do Quadro 2 e da Figura 4. Verifica-se ainda que, na maioria dos casos ensaiados, a pressão máxima se dava na zona da laje mais próxima da fronteira direita do canal, junto à parede vertical.

As pressões na laje são caracterizadas por picos de pressão de elevado valor mas muito curta duração, como se pode observar na Figura 9, onde se apresenta parte da série temporal de pressões obtidas na laje, na sonda mais próxima da parede da fronteira direita do domínio de cálculo.

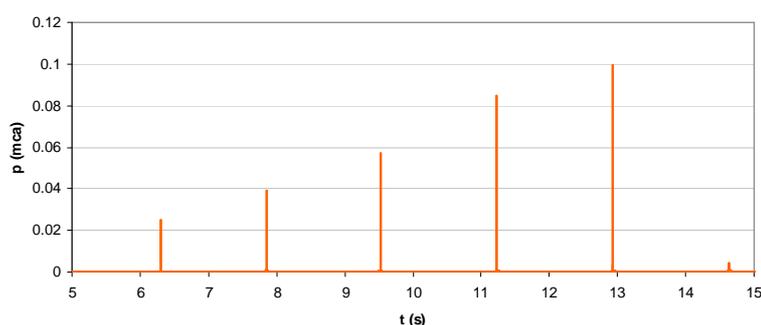


Figura 9. Valores de P_{max} obtidos com o modelo COBRAS-UC para NM, $T = 1.69$ s e $H = 0.11$ m.

Na Figura 10 apresentam-se os resultados obtidos considerando uma estrutura porosa e considerando uma estrutura impermeável, embora estes resultados não possam ser comparadas já que, ao ter uma condição inicial diferente (com ou sem absorção activa de reflexão) os resultados serão necessariamente diferentes. Estas diferenças são bem visíveis na elevação da superfície livre na sonda próxima do batedor numérico, em $x = 0$ m (ver Figura 3) e que se apresenta na Figura 11. A partir de aproximadamente 10 s verifica-se a re-reflexão

das ondas no batedor numérico, alterando significativamente a altura de onda que se propaga para a estrutura e levando a respostas diferentes da mesma quer em termos de reflexão, como de galgamento e, conseqüentemente, de pressões sob a laje.

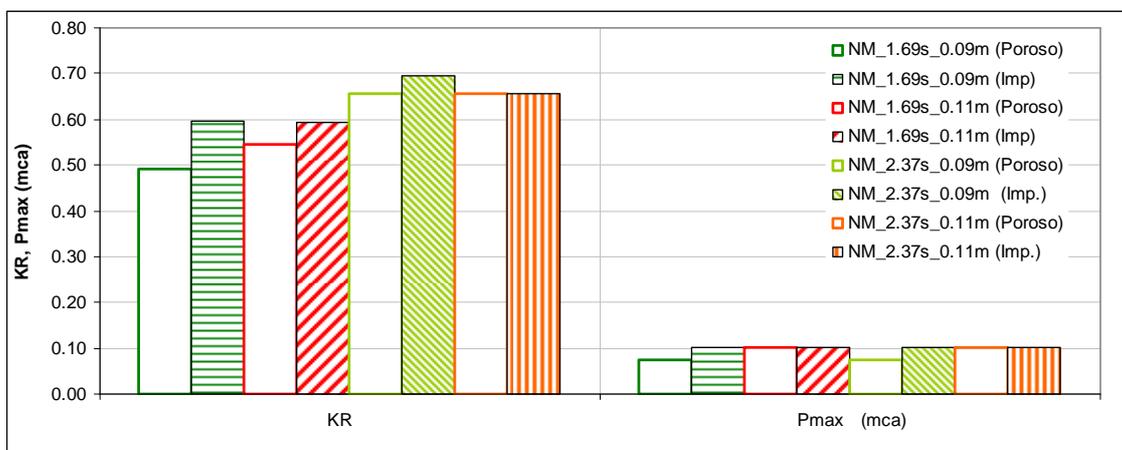


Figura 10. Valores de KR e Pmax obtidos com o modelo COBRAS-UC para a estrutura porosa e impermeável.

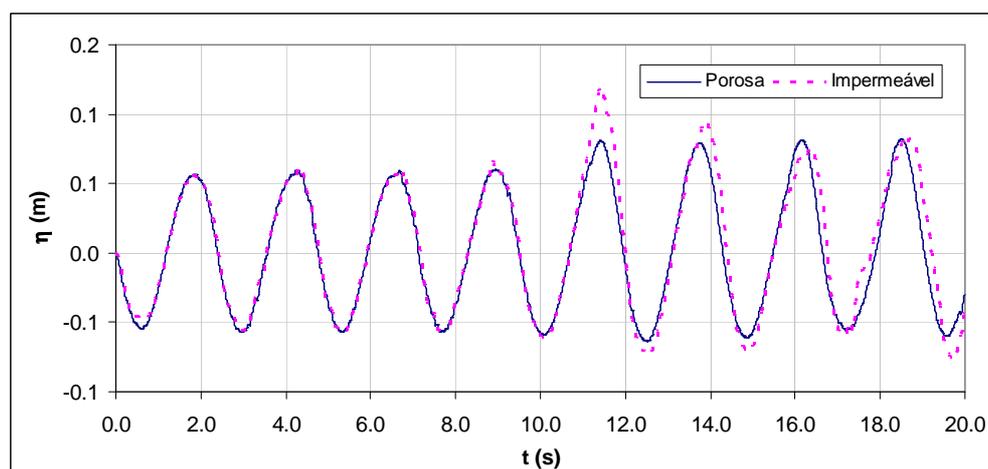


Figura 11. Elevação da superfície livre (η), medidas junto à fronteira de entrada do modelo, para NM, $T = 2.37$ s e $H = 0.11$ m considerando a estrutura como impermeável e como porosa.

Assim, verifica-se que para $H = 0.11$ m, os valores de KR e Pmax são muito semelhantes nos dois casos, o que pode ser devido a que a alteração da altura de onda em frente à estrutura leva a um aumento do volume galgado, não alterando as pressões na laje nem a reflexão. Já para $H = 0.09$ m, quer o valor de KR quer o de Pmax são maiores para o caso da estrutura impermeável. Fica assim claro que o facto de não se considerar as características dos meios porosos pode alterar os resultados quer no que respeita à reflexão da estrutura quer no que respeita às pressões máximas na laje, e que a diferença de resultados é função das características da agitação.

3.6.2. Modelo SPHysics

Com base nos cálculos efectuados com o modelo SPHysics, foi possível calcular o coeficiente de reflexão, KR, e as pressões máximas na laje, Pmax, em metros de coluna de água (mca). No Quadro 3 apresentam-se os resultados obtidos, onde Pmax corresponde à pressão máxima sob a laje para o nível médio de maré.

Quadro 3 – Resultados de KR e Pmax obtidos com o modelo SPHysics

Geometria	Nível de maré	T (s)	H (m)	KR	Pmax (mca)
Impermeável	NM	1.69	0.09	0.57	0.08
			0.11	0.59	0.21
		2.37	0.09	0.63	0.09
			0.11	0.72	0.11

Os valores de pressão máxima aumentam com a altura de onda. A pressão máxima é de 0.081 mca para $H = 0.09$ m e 0.213 mca para $H = 0.11$ m. Verificou-se também que a pressão máxima se localiza na zona da laje mais à direita, onde a distância entre a laje e a estrutura em talude é mínima. Para o período de 2.37 s, a pressão máxima é inferior à obtida para o período 1.69 s. A ocorrência de galgamento na laje produz uma redução da pressão máxima na laje.

A Figura 12 apresenta a pressão máxima sob a laje ao longo do tempo na sonda mais próxima da parede da fronteira direita do domínio de cálculo, para o nível médio de maré, o período de 1.69 s e as duas alturas de ondas, $H = 0.09$ m e $H = 0.11$ m. Como se pode observar na figura, as pressões na laje são caracterizadas por picos de pressão de curta duração.

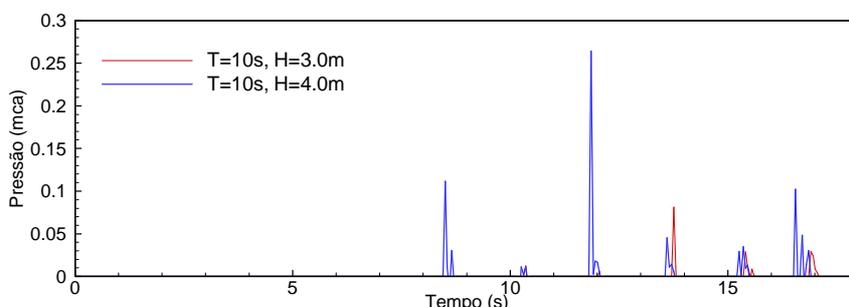


Figura 12. Valores de Pmax obtidos com SPHysics para NM, $T = 1.69$ s, $H = 0.09$ e 0.11 m.

A Figura 13 apresenta a interacção entre a superfície livre, a laje e a estrutura em talude para $T = 1.69$ s e para as duas alturas de onda testadas, para o tempo 11.85 s. A interacção entre o fluido e a laje é mais intensa para a altura de onda maior. A área de contacto é também maior e o intervalo entre a laje e a estrutura em talude é totalmente preenchido para $H = 0.11$ m.

Na Figura 14 apresenta-se as séries temporais da superfície livre para os mesmos casos e para as sondas a 4.13 m, 5.00 m e 7.95 m. Nas duas primeiras sondas observa-se a elevação da superfície livre antes e depois da reflexão induzida pela estrutura. Na última sonda, localizada no espaço estreito entre a laje e a estrutura em talude, nota-se o impacto da superfície livre na laje. Este impacto é mais marcado para a maior altura de onda. Observa-se também, para $H = 0.11$ m, a ocorrência de galgamento que se traduz pela presença de algumas partículas em cima da laje.

3.6.2. Comparação de resultados

Os resultados do coeficiente de reflexão, KR, e de pressão máxima na laje, Pmax, obtidos com os dois modelos é apresentado na Figura 15. Verifica-se que os maiores valores de reflexão obtidos por qualquer um dos modelos ocorrem para $T = 2.37$ s, embora para H diferentes. Os valores obtidos com cada modelo são próximos, embora os valores de KR calculados com base nos resultados do modelo SPHysics sejam sempre inferiores (menos 1% a 10% do valor obtido com o COBRAS-UC), excepto para $T = 2.37$ s e $H = 0.11$ m, onde se inverte esta relação, obtendo-se um valor 10% superior ao do COBRAS-UC. No entanto o andamento com o aumento da altura é diferente, aumentando no caso do SPHysics (tal como ocorria com o COBRAS-UC quando se considerava o meio poroso, ver Quadro 2) e diminuindo

no caso do COBRAS-UC. Isto pode ser consequência das diferenças existentes na superfície livre, como se pode observar nas figuras 16 e 17, apresentadas mais adiante.

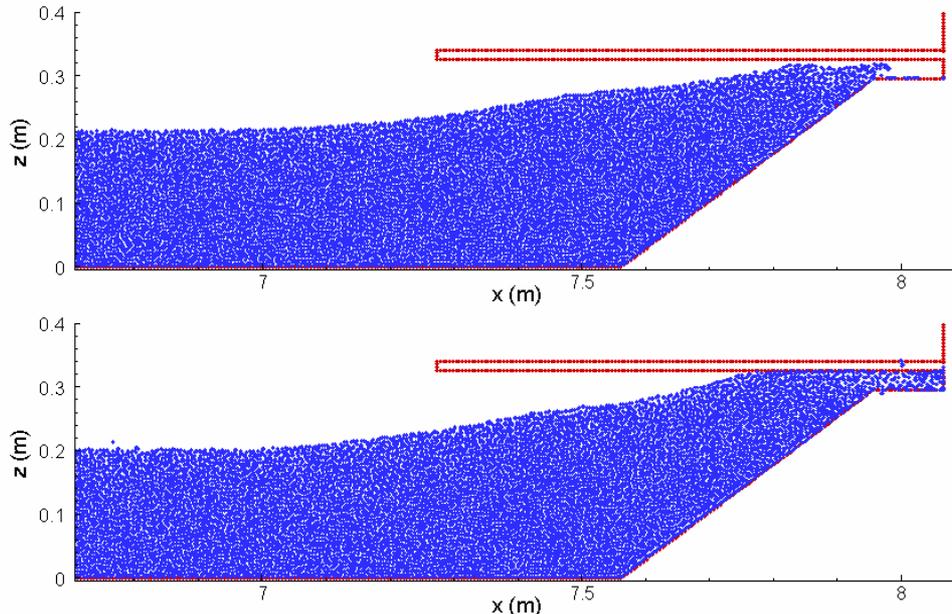


Figura 13. Aspecto da superfície livre para NM, $T = 1.69$ s: $H = 0.09$ m (cima) e $H = 0.11$ m (baixo)

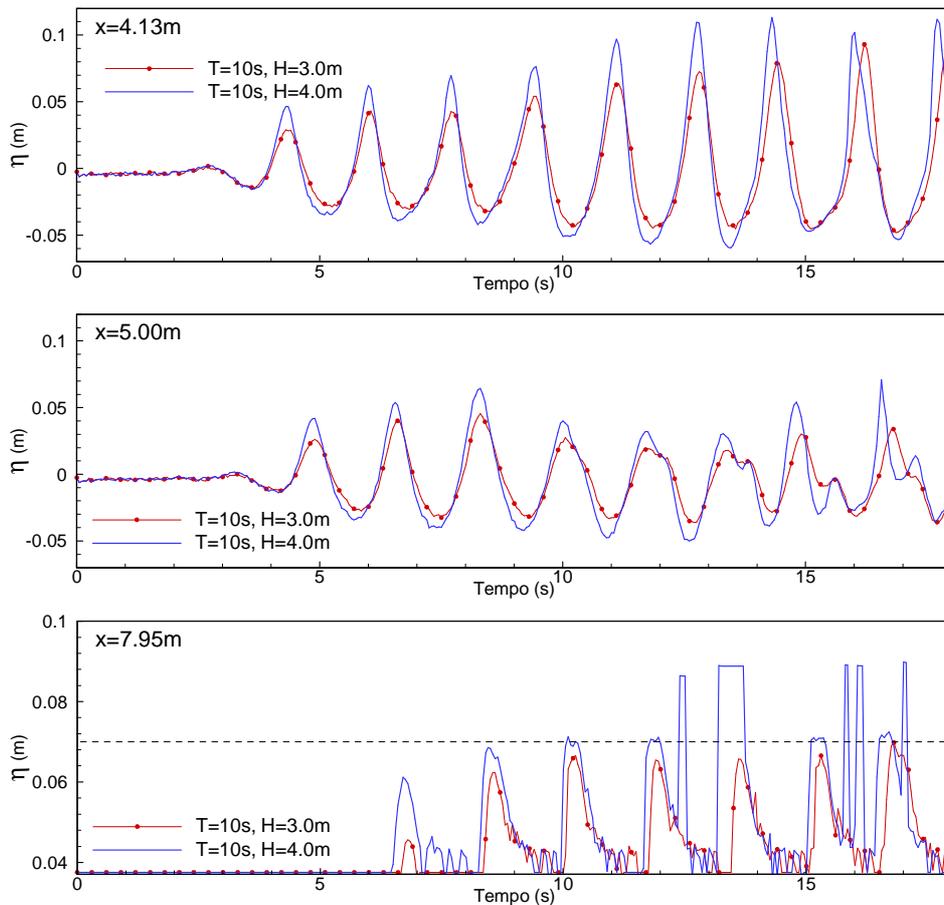


Figura 14. Elevação da superfície livre para NM, $T=1.69$ s, e $H=0.90$ e 0.11 m. A linha a tracejado, na última figura, indica a posição da laje.

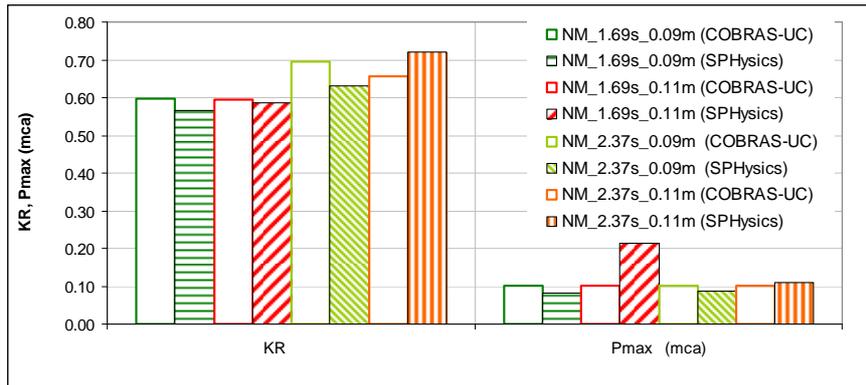


Figura 15. KR e Pmax calculados com o modelo COBRAS-UC e SPHysics

Quanto aos valores de Pmax, estes são próximos, com os valores obtidos pelo modelo SPHysics variando entre 0.8 e 1.1 dos valores obtidos pelo COBRAS-UC, excepto no caso de $T = 1.69$ s e $H = 0.09$ m, onde o valor do modelo SPHysics é bastante maior (2.1 o valor obtido com o COBRAS-UC). Esta diferença pode estar relacionada com as diferenças observadas na reflexão ou com o galgamento sobre a laje, o que leva a que ocorra maior transmissão, levando a uma redução na pressão sob a laje no caso do modelo COBRAS-UC.

Na Figura 16 e na Figura 17 apresenta-se a superfície livre obtida com os dois modelos em quatro secções do domínio de cálculo: $x = 4.0$ m, 5.0 m, 7.75 m e 7.95 m para NM, $T = 1.69$ s e $H = 0.11$ m e $T = 2.37$ s e $H = 0.09$ m respectivamente.

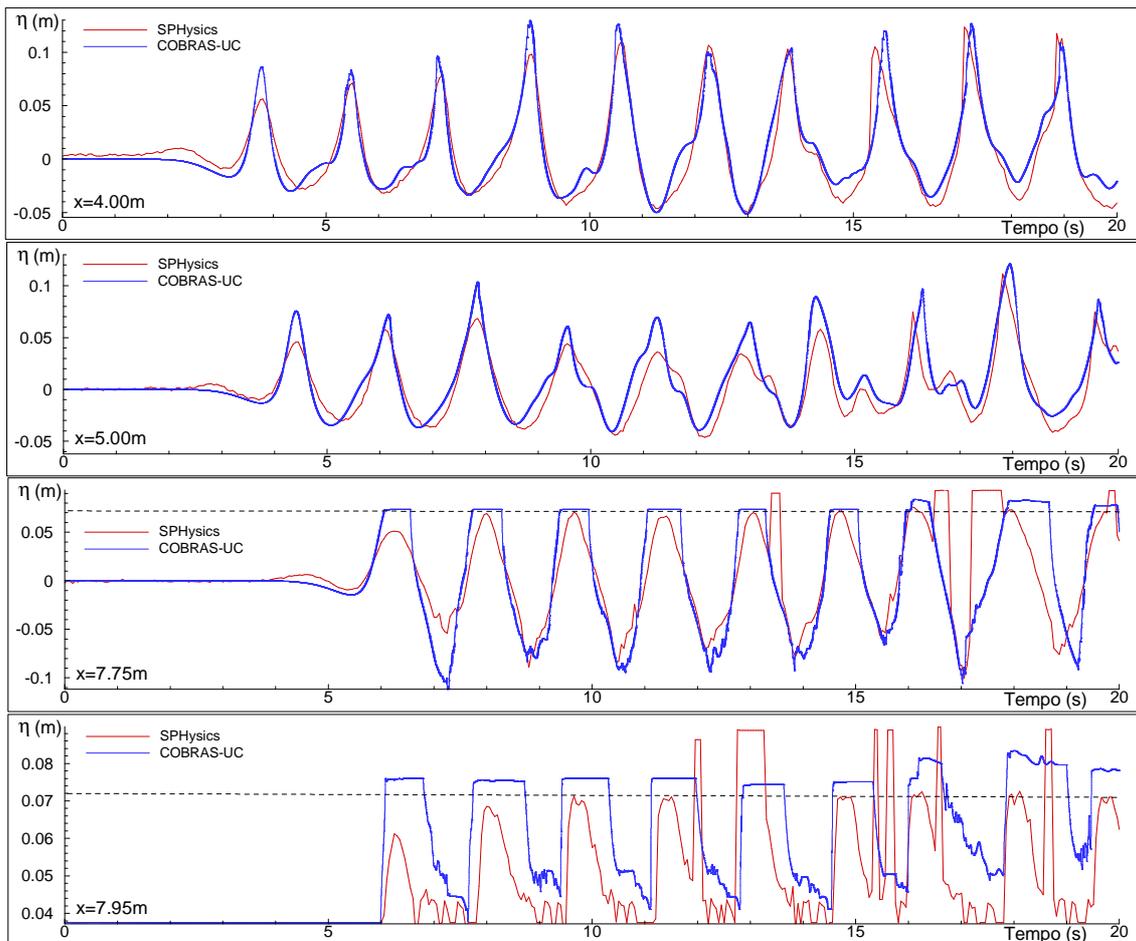


Figura 16. Elevação da superfície livre (η), medidas em $x = 4.00$ m, 5.00 m, 7.75 m e 7.95 m para NM, $T = 1.69$ s e $H = 0.11$ m, obtida com os modelos COBRAS-UC e SPHysics.

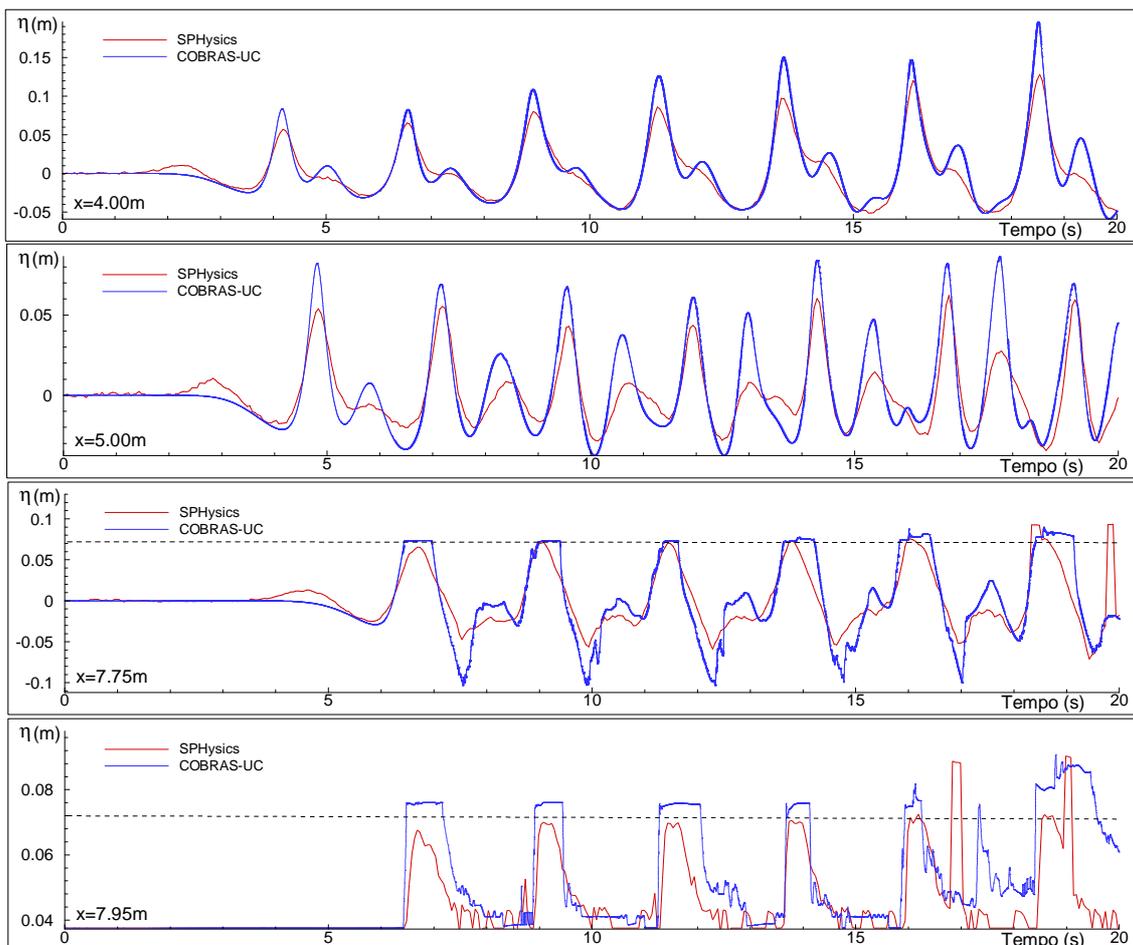


Figura 17. Elevação da superfície livre (η), medidas em $x = 4.00$ m, 5.00 m, 7.75 m e 7.95 m para NM, $T = 2.37$ s e $H = 0.09$ m, obtida com os modelos COBRAS-UC e SPHysics.

Para $x = 4.0$ m, podem comparar-se as condições de agitação na zona próxima da fronteira de entrada do modelo e verifica-se que a altura de onda obtida com o modelo COBRAS-UC é superior à do modelo SPHysics, especialmente para $T = 2.37$ s. Para $x = 5.0$ m, que corresponde ainda à zona horizontal, as diferenças entre resultados dos modelos acentuam-se, com efeitos não lineares visíveis e diferentes. Para $x = 7.75$ m, na zona da plataforma sobre estrutura em talude, verifica-se que se mantém as diferenças que se observaram em $x = 5.0$ m, embora ligeiramente mais atenuadas, com altura de onda superior com o modelo COBRAS-UC e ligeiro desfasamento no galgamento (que ocorre quando a superfície livre ultrapassa a altura da plataforma). No entanto, para $x = 7.95$ m, que correspondem a uma zona sobre a estrutura em talude e próxima do final da plataforma, junto à parede vertical final, verifica-se que os sinais diferem substancialmente. Enquanto, no modelo COBRAS-UC, cada onda produz uma pressão de impacto na laje, com o modelo SPHysics isto não se verifica no início da simulação, mas passa a verificar-se depois. Esta diferença pode estar relacionada com as diferenças de geração dos modelos, que leva a que a superfície livre seja distinta, e consequentemente que o impacto das ondas na estrutura seja também distinto, assim como a reflexão na estrutura.

4. CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Neste artigo apresentou-se a aplicação dos modelos COBRAS-UC e SPHysics ao caso de interação de ondas regulares com uma estrutura composta por um manto de enrocamento coberto por uma laje horizontal. Dada a complexidade do escoamento, onde ocorre interação com o meio poroso, reflexão e galgamento sobre a laje, verificou-se a aplicabilidade dos

modelos e compararam-se os seus resultados no que se refere à reflexão e às pressões na laje.

Verificou-se que o facto de não se considerar as características dos meios porosos pode alterar os resultados quer no que respeita à reflexão da estrutura quer no que respeita às pressões máximas na laje, e que a diferença de resultados é função das características da agitação, não se podendo prever *à priori* este efeito.

Quanto aos valores da pressão máxima na laje, verificou-se que variam bastante nos casos em que há ou não galgamento, pelo qual é relevante que os modelos consigam reproduzir correctamente este fenómeno.

O modelo COBRAS-UC permitiu modelar o escoamento no meio poroso, o galgamento, a reflexão e permitiu calcular as pressões máximas na laje. O modelo SPHysics, tal como se encontra neste momento, não permite ainda ter em conta os meios porosos. Quanto aos resultados da pressão máxima na laje, os valores obtidos pelos modelos são próximos excepto num caso, onde se obteve valores superiores com o modelo SPHysics, o que pode dever-se as diferenças observadas na reflexão ou no galgamento sobre a laje, o que leva a que ocorra maior transmissão, levando a uma redução na pressão sob a laje no caso do modelo COBRAS-UC.

Como foi referido anteriormente, os resultados obtidos com os dois modelos numéricos, de concepção totalmente diferente, são semelhantes, mesmo quando a elevação da superfície livre na zona de propagação da onda diferem. É assim indispensável, para poder comparar os dois modelos com mais precisão, que as características das ondas na zona de geração sejam o mais semelhante possível.

Por outro lado, a determinação da pressão no modelo SPHysics é delicada, pois é definida por uma equação de estado (considerando o fluido pouco compressível), o que pode levar a sob ou sobre estimar o seu valor. Actualmente estão em desenvolvimento alternativas para resolver este problema.

Para verificar a bondade dos resultados dos modelos, seria ainda necessário efectuar mais comparações com dados de modelo físico ou protótipo e análises de erro. Esse será um dos próximos passos que se irá fazer.

AGRADECIMENTOS

O segundo autor agradece à FCT o financiamento da bolsa SFRH/BPD/37901/2007. Os autores agradecem ao Projecto de Investigação Programada do LNEC, "Comportamento de Estruturas Marítimas". Os autores agradecem ainda ao Instituto de Hidráulica Ambiental (IH Cantábria) a permissão para a utilização do modelo COBRAS-UC.

REFERENCIAS

Lara, J.L., Garcia, N. and Losada, I.J. 2006. "RANS modelling applied to random wave interaction with submerged porous structures." *Coastal Engineering*, 53, pp. 395-417

Dalrymple R.A.; Rogers B.D. (2006). "Numerical modeling of water waves with the SPH method." *Coastal Engineering*, 53 (2-3), pp. 141-147.

Lin, P.; Liu, P.L.-F. (1998). "A numerical study of breaking waves in the surf zone". *Journal of Fluid Mechanics*, 359, 239-264.

Gingold R.A., Monaghan J.J. (1977), "Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181, pp. 375-389.

Monaghan J.J. (1994), "Simulating free surface flows with SPH", *Journal of Computational Physics*, 110, pp. 399-406.

Koshizuka S., Tamako H., Oka Y. (1995), "A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation", *Computational Fluid Dynamics Journal*, 4(1) pp. 29-46.

Shao S.D., Lo E.Y.M. (2003), "Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface", *Adv. Water Resour.*, 26(7), pp. 787-800.

Monaghan J.J. (1989), "On the problem of penetration in particle methods", *Journal Computational Physics*, 82, pp. 1-15.

Didier E., Neves M.G. (2009), "Coastal flow simulation using SPH: Wave overtopping on an impermeable coastal structure", Proc. 4th International SPHERIC workshop, Nantes, França.

Oger G., Doring M., Alessandrini B., Ferrant P. (2006), "Two-dimensional SPH simulations of wedge water entries", *Journal of computational Physics*, 213, pp. 803-822.