



## **ESTUDO NUMÉRICO NÃO LINEAR DA INTERACÇÃO ONDA CILINDRO**

L. Gil <sup>1,2</sup>, T.Barreiro<sup>1</sup>, E. Didier<sup>1,2,3</sup> e M. Alves<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidade Nova de Lisboa Portugal, Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial,  
Campus de Caparica 2829-516, Monte de Caparica, Portugal  
email: [tgb18682@fct.unl.pt](mailto:tgb18682@fct.unl.pt)

<sup>2</sup> MARETEC - Marine and Environmental Technology Center, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior  
Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal  
email: [img@fct.unl.pt](mailto:img@fct.unl.pt)

<sup>3</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)  
Departamento de Hidráulica e Ambiente, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas  
Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal  
email: [edidier@lnec.pt](mailto:edidier@lnec.pt)

<sup>4</sup> Wave Energy Centre, Av. Manuel da Maia, nº 36, r/c Dto., 1000-201 Lisboa, Portugal  
email: [marco@wave-energy-centre.org](mailto:marco@wave-energy-centre.org)

### **RESUMO**

Neste trabalho estuda-se a interacção de ondas regulares com cilindros verticais fixos ao fundo. Na simulação numérica deste problema tridimensional viscoso e com superfície livre utiliza-se o código FLUENT que resolve as equações de Navier-Stokes em valor médio (equações de Reynolds) e utiliza uma técnica VoF (Volume of Fluid) na identificação da superfície livre.

Apresentam-se os parâmetros relativos à discretização e valida-se o modelo numérico por comparação com resultados analítico-experimentais e obtidos com o código WAMIT amplamente validado.

As diferenças entre resultados são correlacionadas com os efeitos não lineares ligados à amplitude relativa (irrotacionalidade do escoamento) e à relação entre o diâmetro do cilindro e o comprimento da onda.

### **1 INTRODUÇÃO**

Neste trabalho estuda-se a interacção de ondas regulares com cilindros verticais fixos. Variando a amplitude relativa da onda e o diâmetro do cilindro abordam-se situações em que os efeitos não lineares evoluem de desprezáveis a importantes.

As simulações numéricas são efectuadas com dois programas de concepção distinta:

- FLUENT (Ansys): resolve as equações de Navier-Stokes-Reynolds utilizando um método de volumes finitos e uma técnica VoF (Volume of Fluid) na identificação da superfície livre.

- WAMIT (inc): sob a hipótese de escoamento potencial utiliza as soluções lineares e de segunda ordem das equações fundamentais da hidrodinâmica no cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos relevantes. Para tal é aplicado um método integral de elementos de fronteira (método de painel).

Apresentam-se os parâmetros de discretização e os esquemas numéricos utilizados nas simulações com o código FLUENT.

As diferenças entre resultados são correlacionadas com os efeitos não lineares ligados à amplitude relativa (irrotacionalidade do escoamento) e à relação entre o diâmetro do cilindro e o comprimento da onda.



## 6<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

As simulações efectuadas com o código FLUENT permitem ainda a análise detalhada dos campos de pressão e de velocidade, da deformada de superfície livre na vizinhança do cilindro e a identificação de zonas em que o escoamento assume características rotacionais.

Os resultados relativos aos esforços totais são também comparados com os obtidos por aplicação da metodologia sugerida no Coastal Engineering Manual do United States Army Corps of Engineers.

## 2 MODELOS NUMÉRICOS

### 2.1 PROGRAMA FLUENT-ANSYS

O código FLUENT (versão 6.3.26) [1] aplica uma técnica de volumes finitos para resolver as equações de Navier-Stokes / Navier-Stokes-Reynolds.

As variáveis velocidade e pressão são definidas no centro dos elementos. O método de volumes finitos é adaptado para malha não estruturada e os elementos podem tomar a forma de triângulos e paralelogramos em 2D e tetraedros, prismas e paralelogramos em 3D.

Dos vários algoritmos disponíveis para resolver o acoplamento entre a velocidade e a pressão, seleccionou-se o algoritmo SIMPLER, mais adaptado para simulações não estacionárias que o modelo SIMPLE. A integração no tempo é realizada por um esquema de 2<sup>a</sup> ordem, indispensável para a modelação da propagação de ondas.

O modelo de turbulência k-ε na sua versão standard foi o escolhido, pois é classicamente utilizado neste tipo de aplicações em engenharia.

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 MUSCL de terceira ordem [1]. A pressão nas faces dos volumes de controlo é obtida por um esquema de interpolação PRESTO, esquema aconselhado pelo User Guide do FLUENT para modelação de escoamentos com superfície livre.

A modelação da superfície livre é realizada usando o método VoF (Volume of Fluid), desenvolvida inicialmente em [2]. A fracção de volume C (um escalar) é determinada a partir de uma equação de transporte:

$$\frac{\partial(C)}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(C) = 0 \quad (1)$$

onde  $\mathbf{u}$  é o vector velocidade e  $t$  o tempo.

Este método consiste em capturar a posição da superfície livre a partir da evolução da fracção de volume, que toma o valor de 0 no ar e 1 na água.

$$C = \begin{cases} 0 & \text{para o ar} \\ 1 & \text{para a água} \end{cases} \quad (2)$$

A posição da superfície livre é assim definida pelo valor 0.5. Os valores intermédios, entre 0 e 1, indicam a presença de uma mistura de ar e água. A dificuldade deste método reside na conservação duma transição reduzida entre os dois fluidos. Assim, é utilizado o método HRIC, [3], especialmente desenvolvido para este tipo de problema e disponível no FLUENT. É de salientar que as equações do movimento utilizadas são as mesmas para cada fase, mas, as características próprias do fluido, como a massa específica e a viscosidade são devidamente assimiladas no cálculo.



## 6<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Como já foi referido anteriormente, opta-se pelo modelo SIMPLEC para resolver o acoplamento entre a velocidade e a pressão. Os coeficientes de relaxação tomam os valores de 1 para a velocidade, pressão e fracção de volume, e de 0.8 para a turbulência.

Um estudo preliminar bidimensional permitiu definir as características da malha, estimar o passo de tempo, o número de iterações não lineares e a precisão dos resultados [4]. A zona de superfície livre necessita de um cuidado especial na construção da malha no que diz respeito à discretização horizontal (direcção da propagação da onda) e vertical (direcção de variação da amplitude da onda). As simulações bidimensionais da propagação de uma onda, sem interacção com um corpo, sem transformação devido à variação de profundidade e sem rebentação) permitiram concluir que a malha deve ter uma discretização horizontal na ordem dos 45-50 elementos por comprimento de onda e uma discretização vertical de 20 elementos entre a cava e a crista [4]. Tratando-se de casos de propagação de onda, a malha, na zona de evolução da superfície livre, tem de ser do tipo estruturada [4]. Uma malha não estruturada, com elementos triangulares por exemplo na zona da superfície livre, induz instabilidades numéricas.

A geração da onda é feita através de um batedor numérico [5] que é definido através de uma UDF (User Define Function), que permite ao utilizador programar condições limites, equações entre outras. O batedor numérico consiste na imposição de uma condição de fronteira nas componentes horizontal e vertical de velocidade,  $u(t)$  e  $v(t)$ , e a correspondente amplitude da deformação da superfície livre,  $\eta(t)$ . As componentes de velocidade são definidas considerando o perfil de velocidade de uma onda linear em profundidade intermédia.

### 2.2 PROGRAMA WAMIT

O programa WAMIT foi desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Oceânica do Massachusetts Institute of Technology [6] e foi aqui utilizado por ser actualmente adoptado pela maioria das empresas de projecto em Offshore. Este código simula a interacção de um corpo flutuante com ondas de superfície apoiando-se numa hipótese de linearidade combinada com resultados de segunda ordem. Assim é admitido como válido o principio da sobreposição sendo o problema total decomposto em dois:

- Problema de difracção, o corpo está fixo interagindo com a onda;
- Problema de radiação, não existe agitação incidente sendo imposto ao corpo um movimento oscilatório que gera ondas.

Evidentemente a sobreposição destes dois problemas permite obter o problema total no entanto neste trabalho apenas se aborda a difracção.

O WAMIT resolve ambos os problemas no domínio da frequência. As equações diferenciais clássicas correspondentes aos potenciais de radiação e de difracção são transformadas em equações integrais aplicando o teorema de Green. De acordo com este teorema obtém-se um conjunto de equações que já não tem de ser resolvido na totalidade do domínio fluido mas apenas nas suas fronteiras. A necessária discretização da fronteira é efectuada recorrendo a painéis sobre os quais se admite constante a função potencial. O sistema de equações integrais é então convertido em equações lineares em que o potencial têm de respeitar as condições de fronteira e a conservação de massa (equação de Laplace). Na construção do sistema de equações lineares o código WAMIT calcula a função de Green e os coeficientes de influência relativos aos termos de fonte colocados sobre a fronteira. Desta forma, a aplicação do WAMIT requer apenas como entrada a discretização em painéis da superfície (média) submersa do corpo. Posteriormente, no centro de cada painel são calculados os potenciais, que, tal como referido atrás, se admite serem constantes na área delimitada pelo painel. Assim, através do potencial de difracção é possível calcular as amplitudes complexas das cargas a que o corpo está sujeito e, através do potencial de radiação, os coeficientes hidrodinâmicos (massa adicionada e radiação) associados aos modos de oscilação do corpo.

### 3 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Para aferir sobre a importância dos efeitos não lineares tanto nos campos de pressão e de velocidade como nos esforços foi idealizado um conjunto de ensaios (tabela 1) em que se variam as relações:  $D/L$  (diâmetro do cilindro/comprimento de onda) e  $a/L$  (amplitude da onda/comprimento de onda).

	D(m)	a(m)	D/L	a/L
Simulação 1	1,5	0,3	0,032	0,0064
Simulação 2	2	0,3	0,042	0,0064
Simulação 3	3	0,3	0,064	0,0064
Simulação 4	4	0,3	0,084	0,0064
Simulação 5	4	0,6	0,084	0,0128
Simulação 6	4	1,2	0,084	0,0256

Tabela 1 – Características dos ensaios realizados.

As dimensões do tanque numérico estão representadas em planta na figura 1.

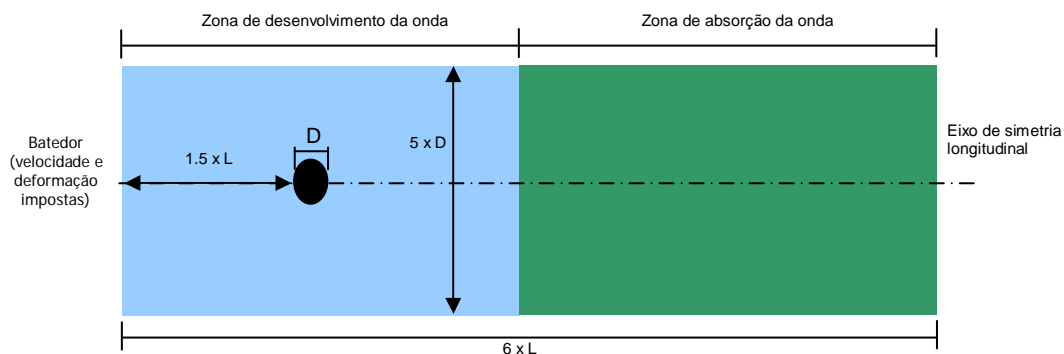


Figura 1 – Dimensões do tanque numérico.

O domínio de cálculo tem de extensão total 6 comprimentos de onda e de largura 5 vezes o diâmetro do cilindro estando este posicionado à distância do gerador de ondas de 1,5 comprimentos de onda. A profundidade é constante e igual a 10 m.

A zona de ar, necessária à aplicação do método VoF, tem uma altura de 2,45m relativamente ao nível da superfície livre no repouso.

As ondas geradas têm amplitude variável e período fixo de  $T=5,5s$ , a que corresponde, para a profundidade considerada, um comprimento de onda de  $L=47,2m$ .

As propriedades de simetria relativas ao plano longitudinal médio do escoamento são aproveitadas para reduzir o domínio de cálculo para metade, o que permite diminuir significativamente o tempo de cálculo.

A discretização do domínio caracteriza-se por uma zona mais refinada em torno do cilindro e na zona de evolução da superfície livre, figura 2. Na zona de geração e onde se pretende que a onda se propague foram utilizados 45 elementos por comprimento de onda. Na zona de absorção a malha é progressivamente estirada até uma densidade de 5 elementos por comprimento de onda. A zona de captura da superfície livre (necessária à aplicação do método VoF) tem no mínimo 20 elementos distribuídos verticalmente. Em profundidade foram utilizados 60 elementos com estiramento progressivo no sentido de aumento da profundidade.

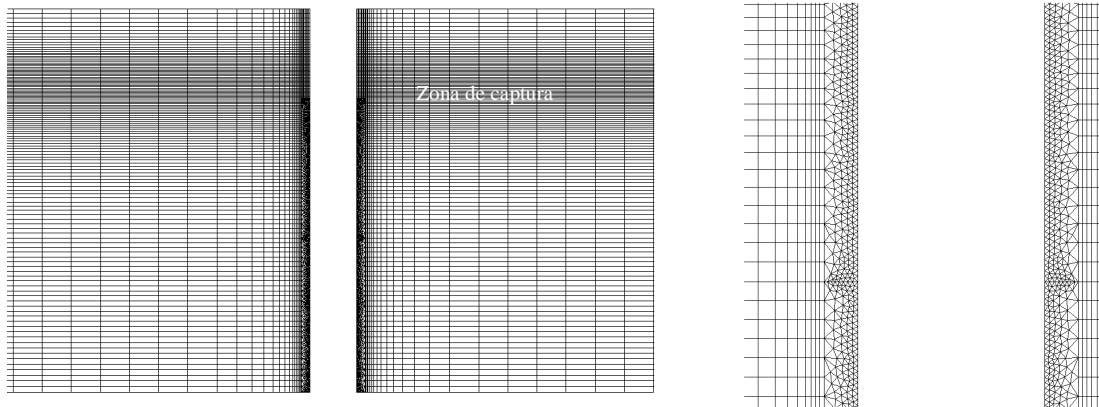


Figura 2 – Malha no plano de simetria longitudinal e pormenor junto à parede do cilindro.

O número total de elementos da malha 3D é de 779290, dos quais 620180 correspondem à água e 151110 ao ar. O passo de tempo utilizado é  $T/600$ , o que corresponde a  $9,2 \times 10^{-3}$  s. As simulações foram realizadas com o modelo de turbulência  $k-\epsilon$ .

No que diz respeito a condições de fronteira impôs-se no fundo uma parede sem aderência e lateralmente condições de simetria. No topo de jusante escolheu-se uma condição de parede.

A geração das ondas foi efectuada impondo-se o perfil de velocidade horizontal e vertical bem como a deformação da superfície livre (calculados a partir da teoria linear) na parede de montante. No ar a pressão foi considerada atmosférica.

O código numérico permite determinar os esforços parcelares em superfícies do dispositivo pré definidas durante o processo de geração de malha. Na figura 3 definem-se essas superfícies.

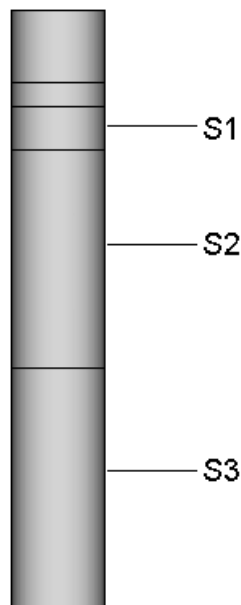


Figura 3 – Superfícies pré definidas para determinação dos esforços.

A superfície livre evolui exclusivamente sobre a superfície  $S_1$ , a superfície  $S_2$  está sempre submersa e corresponde à zona em que o campo de pressão sofre variações apreciáveis por acção da passagem de cristas e cavas. A superfície  $S_3$  está localizada a maior profundidade onde o campo de pressão tende para hidrostático.

A importância dos efeitos não lineares induzidos pela geometria em estudo pode ser avaliada sobrepondo aos resultados obtidos com o código FLUENT aqueles que resultam de uma abordagem linear ao problema. Neste sentido é aplicado ao conjunto de ensaios, registados na tabela 1, o código numérico tridimensional WAMIT. Este código [6], baseado no método dos elementos de fronteira, resolve o problema de difracção e radiação de acordo com a teoria clássica linear das ondas e escoamento potencial. Dada a característica geométrica do sistema em estudo (cilindro fixo ao fundo) o problema a tratar simplifica-se sendo apenas necessário calcular o potencial de difracção. Assim, através do potencial de difracção,  $\hat{\phi}_d$  e da onda incidente,  $\hat{\phi}_0$ , é possível obter a amplitude complexa da carga de excitação,  $\hat{F}_{ext}$ , a que o corpo está sujeito através da integração do potencial resultante na superfície (média) submersa do corpo,  $\Gamma$ :

$$\hat{F}_{ext} = i\omega\rho \int_{\Gamma} (\hat{\phi}_0 + \hat{\phi}_d) d\Gamma. \quad [3]$$

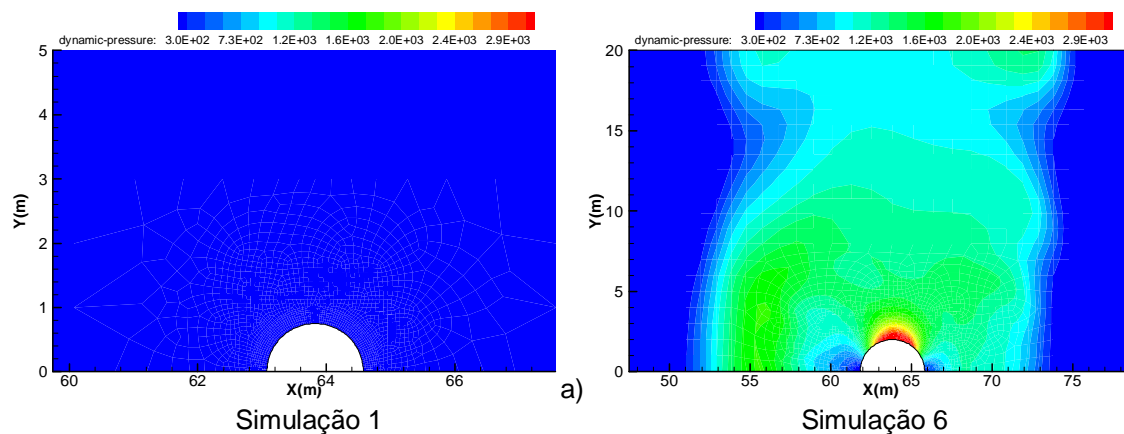
Esta abordagem linear, apesar de amplamente divulgada, requer uma atenção especial no que respeita à sua aplicação. Neste sentido, é apenas expectável que o código WAMIT permita descrever o processo físico com elevado grau de precisão em casos onde a declividade da onda incidente é reduzida bem como a perturbação do campo de velocidades induzida pelas oscilações no corpo na sua vizinhança (perturbação que não acontece no caso em estudo uma vez que se trata de um cilindro fixo ao fundo).

A distinta concepção dos códigos WAMIT e FLUENT, resolução das equações de RANS em todo o domínio de cálculo face à resolução sobre a fronteira do problema de difracção, tem como consequência uma enorme diferença nos tempos de cálculo. Uma simulação típica com o FLUENT necessitou de aproximadamente 9h por período de onda, num PC com processador 3.2 GHz e RAM 2 Gb. Comparativamente pode afirmar-se que o WAMIT permite obter soluções instantâneas.

#### 4 RESULTADOS

Na apresentação dos resultados referentes aos campos de pressão e velocidade, à deformada de superfície livre e aos esforços é dada especial atenção às características não lineares.

No que diz respeito ao escoamento na vizinhança do cilindro opta-se por representar as situações extremas no que diz respeito à não linearidade: ensaio 1 e ensaio 6. Na figura 4 são comparados os campos de pressão dinâmica nos planos horizontal ( $z=0$ ) e vertical (plano de simetria longitudinal) respectivamente para os instantes de passagem por zero ascendente e de passagem de uma crista.



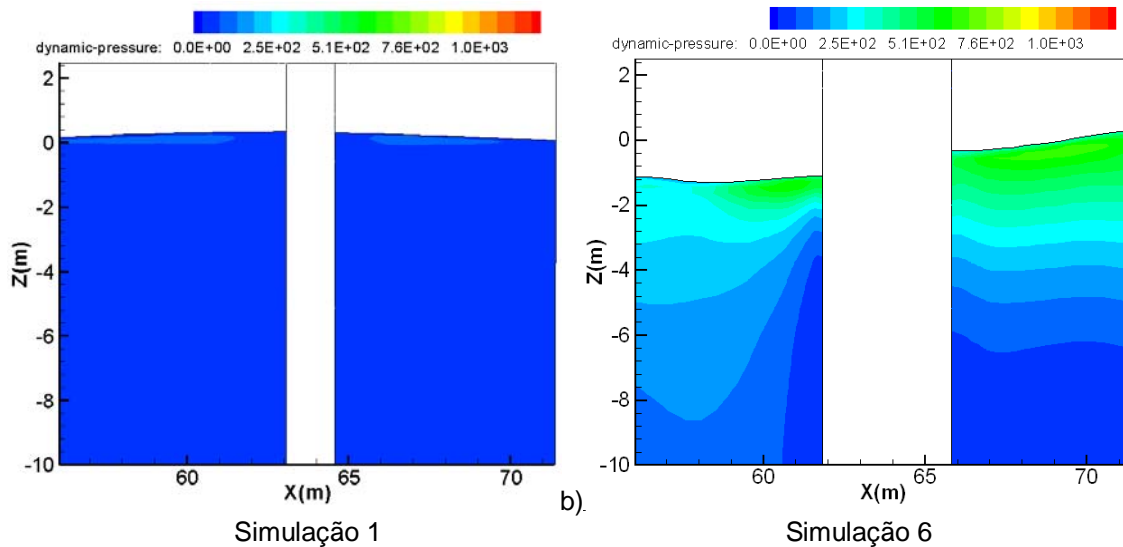


Figura 4 – Campo de pressão dinâmica nos planos:  
a) horizontal,  $z=0$  (passagem por zero ascendente) b) vertical de simetria (passagem de crista).

A utilização da mesma escala para as duas simulações permite constatar a diferença entre os respectivos gradientes de velocidade. Na figura 4 b), observa-se que a superfície livre a montante e jusante do cilindro é praticamente contínua na simulação 1 e apresenta um “degrau” na simulação 6. Neste último caso a superfície livre no plano de simetria médio não parece mesmo corresponder a uma crista. Na realidade a superfície livre encontra-se muito perturbada na vizinhança do cilindro como se pode constatar na figura 5 a).

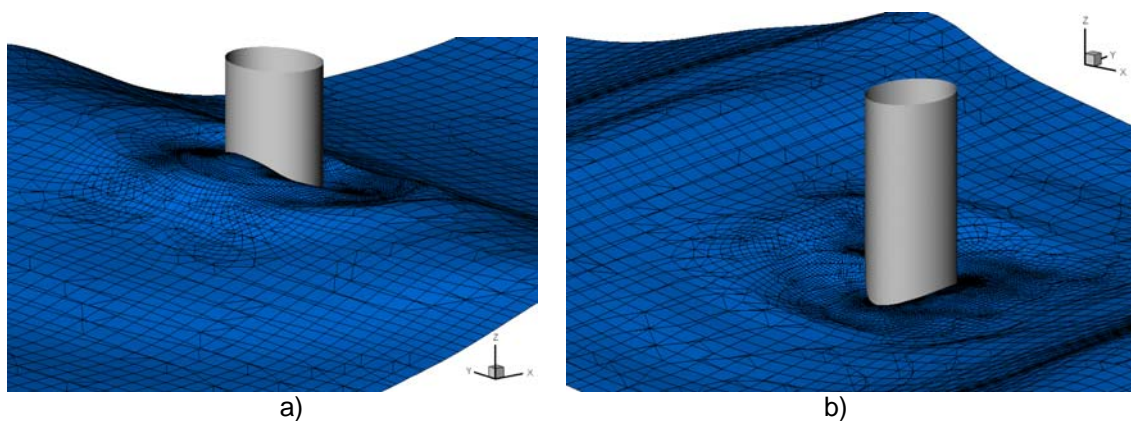


Figura 5 – Superfície livre na vizinhança do cilindro na passagem de a) crista e b) cava (simulação 6).

Evidentemente na simulação 1 (figura 6) em consequência do reduzido diâmetro (cilindro esbelto) e da pequena amplitude da onda a superfície livre perto do cilindro encontra-se pouco perturbada o que permite considerar que a pressão é praticamente a imposta pelo campo de ondas e os efeitos não lineares desprezáveis. Nestas figuras optou-se por representar também a malha na superfície livre para ilustrar a distribuição da sua densidade.

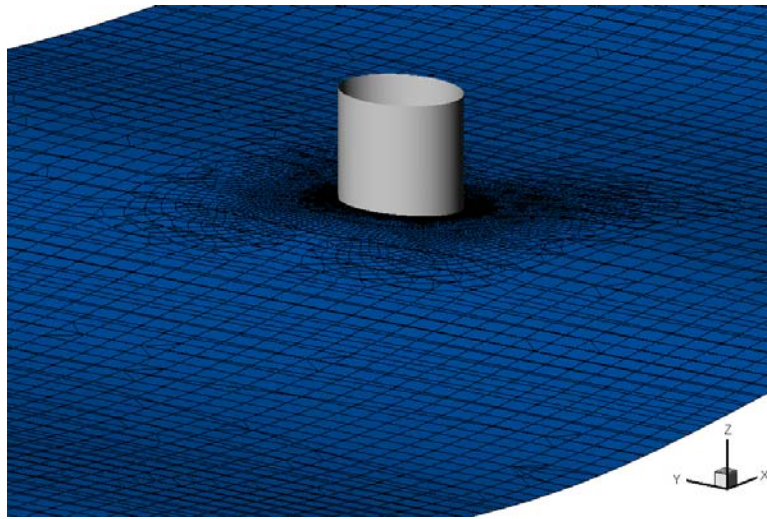


Figura 6 – Superfície livre na vizinhança do cilindro na passagem de uma crista (simulação 1).

Para se poder aferir sobre a importância dos efeitos não lineares nos esforços a que o cilindro está sujeito representa-se nas figuras 7, 8 e 9 os esforços nas superfícies  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ , definidas na figura 3, para as simulações 4, 5 e 6.

Escolheram-se estas simulações para se poder observar a evolução dos esforços de natureza não linear com o aumento da amplitude da onda.

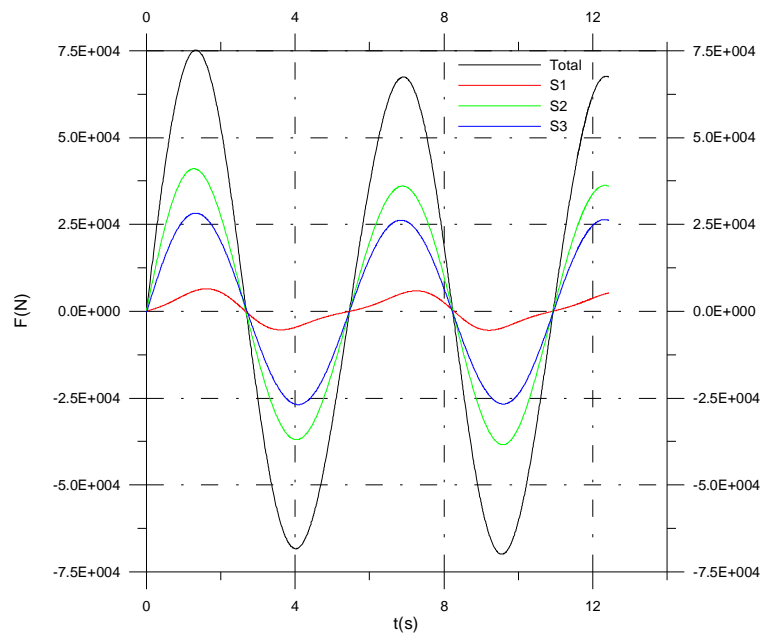


Figura 7 – Esforços total e nas superfícies  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$  para a simulação 4.

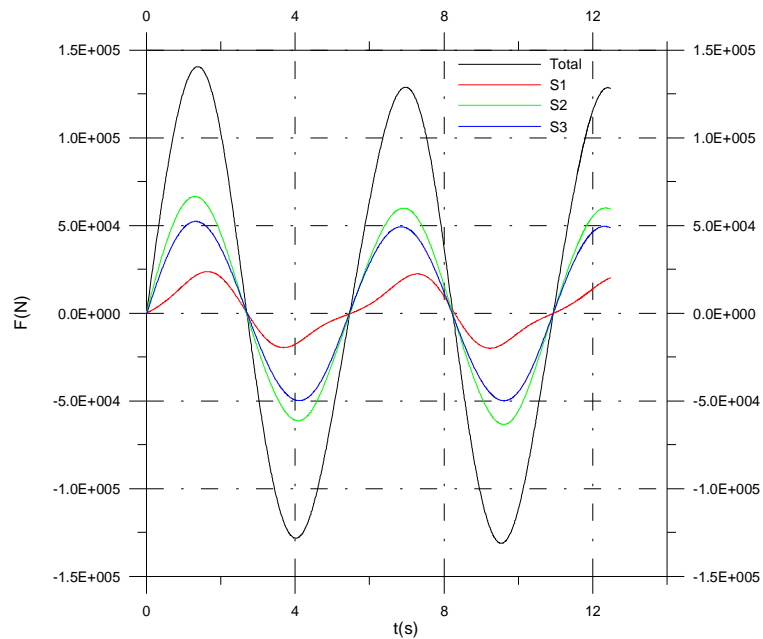


Figura 8 – Esforços total e nas superfícies  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$  para a simulação 5.

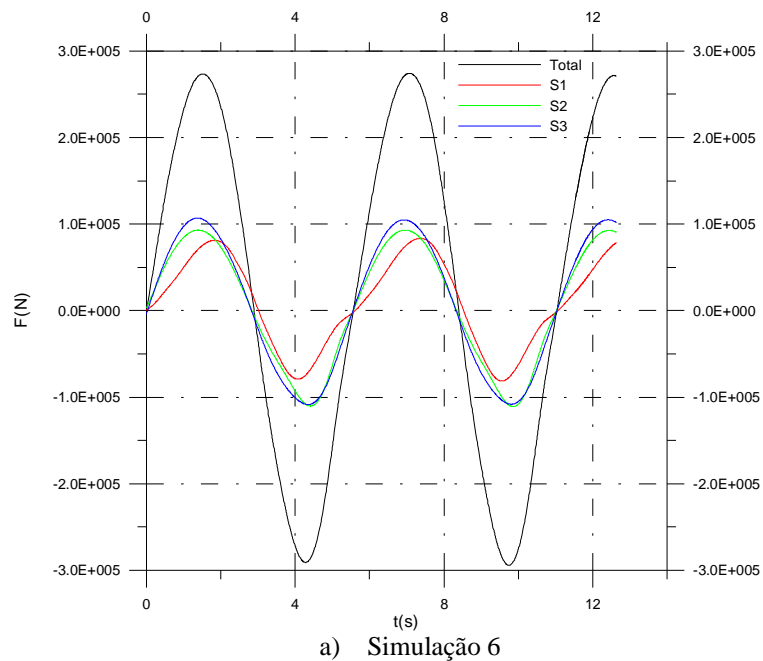


Figura 9 – Esforços total e nas superfícies  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$  para a simulação 6.

A observação das figuras 7, 8 e 9 permite constatar que o esforço na secção  $S_1$  é o único em que se consegue identificar características diferentes de uma sinusóide, apresentando uma variação na sua curvatura na passagem por zero positiva.

Constata-se ainda que os máximos e os mínimos não são coincidentes com os dos esforços nas secções  $S_2$  e  $S_3$ . O aumento da importância relativa da componente  $S_3$  (que



## 6<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

evolui de cerca de 30% na simulação 4 até 95% na simulação 6) face às componentes  $S_1$  e  $S_2$  ilustra bem o crescimento dos efeitos não lineares com a amplitude da onda.

Na simulação 6, correspondente à onda de maior amplitude, é também identificável que o esforço correspondente a  $S_2$  apresenta ligeiras diferenças relativamente a uma forma sinusoidal pura nomeadamente durante a descida para o seu valor mínimo.

A comparação dos esforços totais obtidos com os códigos FLUENT e com o WAMIT para as simulações 4, 5 e 6 é efectuada nas figura 10, 11 e 12.

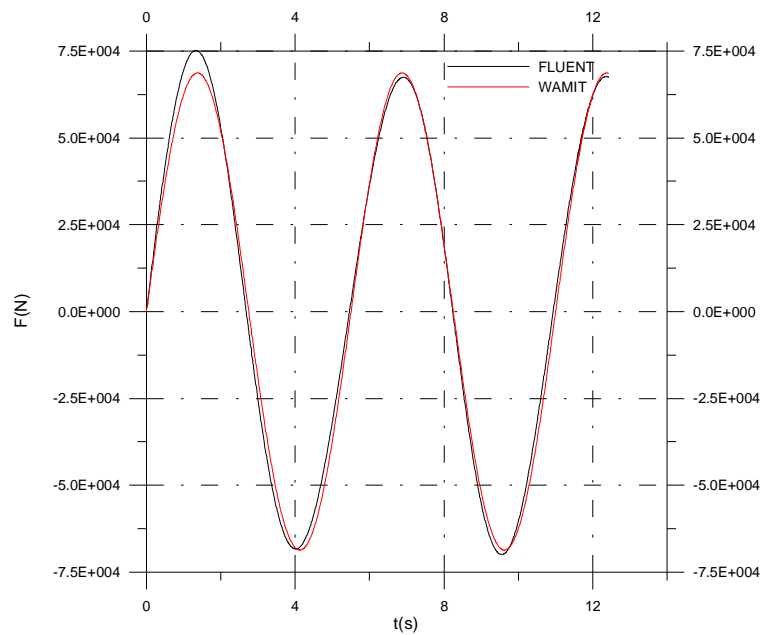


Figura 10 – Comparação do esforço total para a simulação 4.

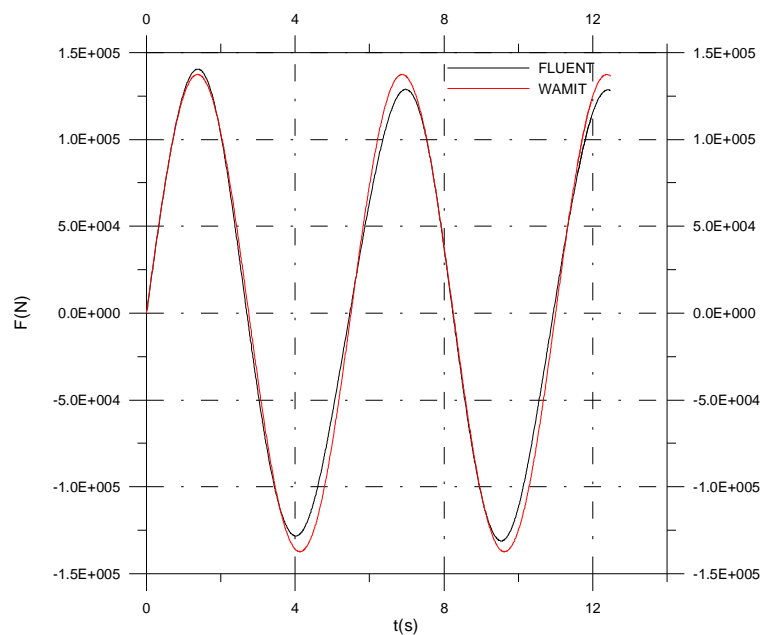


Figura 11 – Comparação do esforço total para a simulação 5.

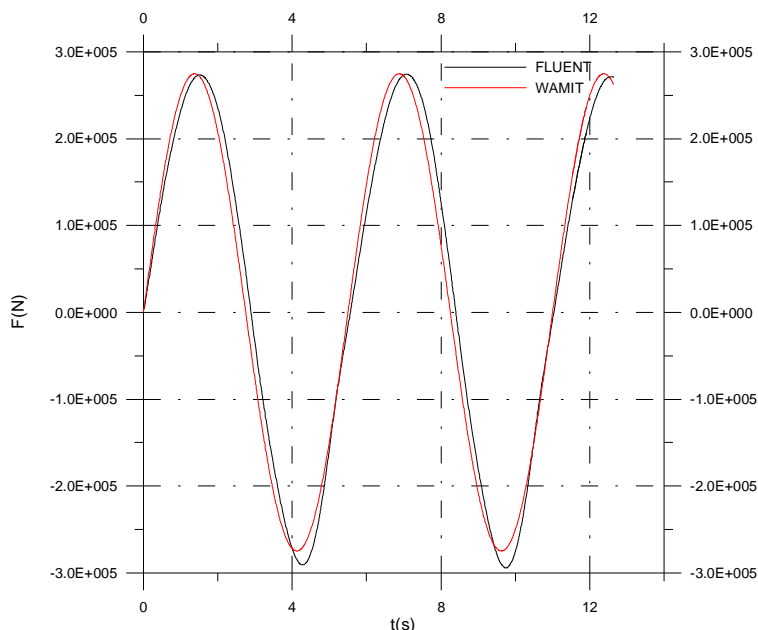


Figura 12 – Comparação do esforço total para a simulação 6.

Os resultados obtidos com os dois códigos são muito semelhantes para todas as amplitudes de onda simuladas.

Na tabela 2 resume-se para os 6 ensaios realizados os valores do esforço máximo obtido com os códigos numéricos e por aplicação de resultados analítico-experimentais propostos no Coastal Engineering Manual - United States Army Corps of Engineers (U.S.A.C.E.) [7]. Os resultados indicados em [7] foram obtidos para a condição  $D/L < 0,05$ , como indicado na tabela 1 apenas a simulação 1 e 2 respeitam esta exigência.

	U.S.A.C.E.	WAMIT (N)	FLUENT (N)
Simulação 1	$9 \times 10^3$	$9,46 \times 10^3$	$9,38 \times 10^3$
Simulação 2	$15 \times 10^3$	$16,91 \times 10^3$	$16,59 \times 10^3$
Simulação 3	-	$38,43 \times 10^3$	$36,93 \times 10^3$
Simulação 4	-	$68,69 \times 10^3$	$67,44 \times 10^3$
Simulação 5	-	$137,39 \times 10^3$	$128,79 \times 10^3$
Simulação 6	-	$274,77 \times 10^3$	$274,21 \times 10^3$

Tabela 2 – Comparação do esforço máximo.

Como se pode constatar das figuras 10, 11 e 12 e da tabela 2 os esforços máximos calculados através dos dois códigos são na prática coincidentes pois a incerteza na determinação da altura da onda gerada nas simulações com o FLUENT introduz um erro semelhante às diferenças observadas. No que diz respeito ao esforço total e não obstante a existência de efeitos não lineares essencialmente na vizinhança da superfície livre o código WAMIT mostrou-se preciso na sua estimativa. A aproximação efectuada neste código de determinar, ainda que linearmente, o esforço médio na zona onda a superfície livre evolui parece assim capaz de aproximar os efeitos não lineares.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho estudou-se um problema tridimensional viscoso com superfície livre de interacção de ondas regulares com cilindros verticais fixos ao fundo. Para tal utilizou-se o



## 6<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

código completamente não linear FLUENT que resolve as equações de Navier-Stokes em valor médio (equações de Reynolds) e utiliza uma técnica VoF (Volume Of Fluid) na identificação da superfície livre.

Por comparação dos resultados obtidos com simulações efectuadas com o código WAMIT (amplamente validado) e com o método de cálculo proposto no proposto no Coastal Engineering Manual validou-se o modelo numérico FLUENT para este tipo de problemas.

Não obstante os resultados integrais (resultante das forças) obtidos através do WAMIT e do FLUENT serem praticamente coincidentes e do tempo de cálculo necessário pelo WAMIT ser notoriamente inferior não se deve concluir ser desnecessário a utilização de códigos baseados nas equações RANS. Na realidade, para este tipo de códigos as situações de corpos isolados ou de vários corpos cuja proximidade implica interações no escoamento são tratadas da mesma forma, o que não acontece com o código WAMIT. O método VoF permite ainda simular situações de pequena profundidade relativa onde os efeitos não lineares e notoriamente a rebentação podem estar presentes.

Os resultados obtidos permitem encarar com optimismo a utilização desta técnica na simulação de problemas de engenharia envolvendo: escoamentos tridimensionais com superfície livre, um ou vários corpos de forma complexa e onde os efeitos não lineares (rebentação, geração harmónica) tenham papel importante.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] ANSYS, FLUENT 6.3 User's Guide, 2008
- [2] C.W. Hirt and B.D. Nichols, Volume of fluid VoF method for the dynamics of free boundaries, J. Comp. Phys., 39 pp 201-225, 1981.
- [3] M. Peric and J.H. Ferziger, Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer, Second edition, 1997.
- [4] T. Barreiro, Estudo da interacção de uma onda monocromática com um conversor de energia, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- [5] E. Didier, M.G. Neves, L. Gil, Modelação numérica da interacção entre uma onda e uma estrutura marginal, 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia costeira e Portuária, Lisboa 11 e 12 de Outubro de 2007, 16pp.
- [6] WAMIT User Manual. (<http://www.wamit.com>) (2008)
- [7] United States Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Manual, <http://chl.erdc.usace.army.mil/cem>.