

Simulação numérica 3D de um modelo de dispositivo de aproveitamento da energia das ondas (tipo coluna de água oscilante) em grande profundidade

Eric Didier^{1,2,3}, José M. Paixão Conde^{2,4} e Paulo R.F. Teixeira⁵

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente,
Av. do Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, Portugal
email: edidier@lnec.pt; <http://www.lnec.pt>

² Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia
2829-516, Monte de Caparica, Portugal

³ MARETEC, Instituto Superior Técnico,
Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal

⁴ IDMEC, Instituto Superior Técnico,

Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

⁵ Universidade Federal do Rio Grande,
Av. Itália, km 8, Campus Carreiros, 96201-900, Rio Grande, RS, Brasil

Sumário

O sistema de coluna de água oscilante (CAO) é considerado um dos tipos de dispositivo de aproveitamento da energia das ondas (DAEO) do oceano tecnicamente mais conhecido, em virtude do grande esforço de investigação nos últimos anos. Já foram construídas diversas instalações junto a costa e a médio prazo prevê-se a instalação de parques de DAEO-CAO ao largo. No presente trabalho são aplicados dois códigos de cálculo que resolvem as equações de Navier-Stokes em valor médio (RANS) para simular os fenómenos resultantes da interacção das ondas com um DAEO-CAO. Um dos códigos, FLUINCO, é baseado na técnica dos elementos finitos e o outro, FLUENT, na técnica dos volumes finitos. O objectivo do trabalho consiste na aplicação destes códigos, já validados para resultados laboratoriais para um modelo de DAEO-CAO com e sem os efeitos dissipativos de um equipamento de extracção de energia, numa situação de águas profundas.

Palavras-chave: Energia das ondas; Coluna de água oscilante; Simulação numérica; FLUENT; FLUINCO.

1 INTRODUÇÃO

O potencial de utilização em grande escala da energia das ondas oceânicas tem a capacidade de cobrir uma parcela considerável do consumo de energia eléctrica a nível mundial. Apesar de já ter sido proposta uma grande variedade de sistemas de conversão de energia das ondas, com base em vários métodos de extracção desta energia, apenas alguns protótipos reais foram construídos e instalados em águas costeiras.

O sistema de coluna de água oscilante (CAO) é considerado um dos tipos de dispositivo de aproveitamento da energia das ondas (DAEO) do oceano tecnicamente mais conhecido, em virtude do grande esforço de investigação de que foi objecto nos últimos anos. Um DAEO-CAO é constituído por uma estrutura parcialmente submersa, aberta abaixo da superfície livre da água, dentro da qual fica aprisionada uma bolsa de ar acima da superfície livre. O movimento oscilatório da superfície livre no interior na câmara pneumática, produzido pelas ondas incidentes, faz o ar escoar pelas turbinas que estão directamente acopladas aos geradores eléctricos. Já foram construídas diversas instalações junto a costa, em diferentes partes do mundo. Alguns dispositivos flutuantes já foram também desenvolvidos, como o Mighty Whale (Japão), Energetech (Austrália), OE buoy (Irlanda), Sperboy (Inglaterra). A médio prazo prevê-se a instalação de parques de DAEO-CAO ao largo.

O DAEO-CAO a colocar ao largo tem a forma de um tubo vertical, com diâmetro pequeno quando comparado com o comprimento da onda incidente, e pode ser considerado como um absorvedor pontual. É um dispositivo que já foi estudado analiticamente e experimentalmente por diversos autores.

Evans [1] simulou a superfície livre pelo movimento de um pistão rígido sem massa para o caso de um tubo vertical de diâmetro pequeno em relação ao comprimento da onda. Falcão e Sarmento [2] e Evans [3] consideram uma superfície oscilante com distribuição de pressão uniforme. A potência instantânea absorvida das ondas é o produto do caudal volumétrico deslocado pela superfície livre interna e a pressão de ar na câmara pneumática. Outros autores usaram códigos baseados no método dos elementos de fronteira (*Boundary Element*

Method), destacando-se os trabalhos de Brito e Melo [4], Delauré e Lewis [5], Josset e Clément [6] e Lopes *et al.* [7].

O estudo desse tipo de problema está mais próximo da realidade, se na simulação numérica for usado um modelo que considere as equações completas de Navier-Stokes, permitindo a simulação simultânea do escoamento hidrodinâmico e aerodinâmico, e os fenómenos não lineares que ocorrem. Alguns estudos foram recentemente realizados usando os modelos RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) para investigar os dispositivos CAO, reproduzir ensaios, validar modelos numéricos e prever o desempenho destes sistemas destacando-se os trabalhos de Wang *et al.* [8], Hong *et al.* [9], El Marjani *et al.* [10], Liu *et al.* [11] [12], Barreiro *et al.* [13] e Davyt *et al.* [14].

No entanto, do conhecimento dos autores, a modelação numérica de dispositivos CAO off-shore foi apenas realizada utilizando métodos potenciais. Em trabalhos anteriores realizados pelos autores [15] [16] [17] [18] [19], compararam-se os resultados obtidos com dois códigos numéricos RANS, FLUINCO e FLUENT, com os resultados obtidos para um modelo físico sujeito à acção de ondas regulares (Lopes *et al.* [7]). O código FLUINCO [20] [21] utiliza o método de elementos finitos para resolver as equações de Navier-Stokes e considera a superfície livre da água como uma fronteira onde é aplicada a pressão atmosférica. O código comercial FLUENT [22] resolve as equações de Navier-Stokes e utiliza a técnica VoF (*Volume of Fluid*) para a determinação da superfície livre.

Os dois códigos já foram validados para a configuração laboratorial do modelo de DAEO-CAO com e sem os efeitos dissipativos devidos a um equipamento de extracção de energia [15] [16] [17] [18] [19]. No entanto, estes resultados são também apresentados neste artigo com uma análise estatística complementar dos resultados que permite estimar a precisão dos dois códigos. Apresenta-se também a aplicação do código FLUENT numa situação de águas profundas e sem interferência das paredes laterais do canal físico. São comparados os resultados em águas profundas com os numéricos e laboratoriais obtidos em profundidade intermédia.

2 CASO DE ESTUDO: MODELO CAO AO LARGO

Os códigos numéricos foram validados com os ensaios experimentais descritos por Lopes *et al.* [7]. A Figura 1 mostra um desses ensaios realizados com protótipo no canal de testes do Departamento de Arquitectura e Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico (IST), em Lisboa, Portugal. Este canal tem 20m de comprimento e 0.70m de largura. O modelo físico simplificado do DAEO-CAO consiste num cilindro oco aberto nas extremidades e colocado na vertical (Figura 1). O seu eixo está coincidente com o plano de simetria do canal e a 9m do gerador de ondas. O cilindro tem diâmetro interno, D , e espessura, t , iguais a 0.025m e 0.0025m, respectivamente. A profundidade da água em repouso, d , e a altura das ondas, H , são iguais a 0.4m e 0.03m, respectivamente. No estudo experimental foram considerados diferentes comprimentos submersos, s , respectivamente, 0.1m, 0.18m e 0.245m, diferentes frequências, f , na faixa de 0.5Hz a 1.6Hz. No presente estudo consideram-se apenas os ensaios com o comprimento submerso $s = 0.18$ m.

Foram realizados dois tipos de ensaios:

- Ensaios com o topo do cilindro aberto para a atmosfera
- Ensaios com o efeito dissipativo de um DAEO-CAO, modelado usando uma membrana porosa (têxtil) colocada na extremidade superior do cilindro vertical. Esta membrana porosa permite simular a perda de carga devida a uma turbina do tipo Wells instalada num dispositivo real e avaliar a resposta do dispositivo numa configuração semelhante a um protótipo.

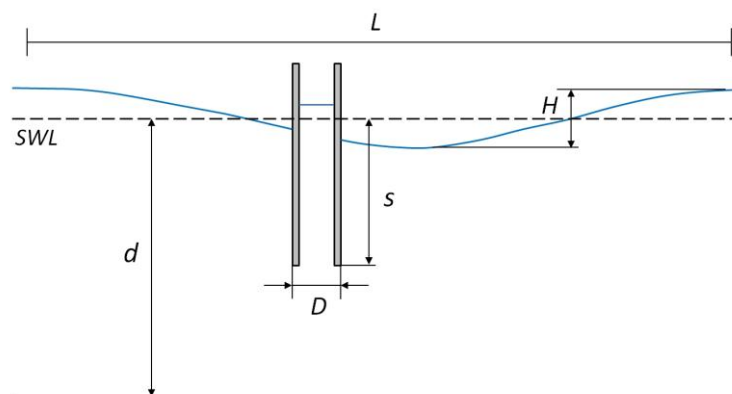


Fig. 1. Ensaios em modelo físico [7] e esquema do problema.

3 MODELOS E CODIGOS NUMÉRICOS

No presente trabalho são aplicados dois códigos numéricos que resolvem as equações RANS para simular os fenómenos resultantes da interacção das ondas com um DAEO-CAO. O primeiro código, FLUINCO, é baseado na técnica dos elementos finitos e de seguimento de superfície livre e o segundo, FLUENT, é baseado na técnica dos volumes finitos e no método de captura de superfície livre VoF.

Os dois códigos são aplicados a duas configurações:

- Configuração dos ensaios em canal de ondas, ou seja em profundidade limitada (profundidade do canal, $d=0.4\text{m}$), sendo a largura do canal de 0.7m . No intervalo de frequência considerado, 0.5 a 1.6Hz , a razão d/L , onde L é o comprimento de onda, encontra-se compreendida entre 0.11 e 0.66 . As ondas incidentes encontram-se em condição de água profunda ($d/L > 0.5$) para as frequências superiores a 1.4Hz e na condição de água intermédia para as frequências inferiores a 1.4Hz .
- Simulação do dispositivo em condições de águas profundas, sendo a profundidade nunca inferior 1.0m , ou seja $d \geq 1.0\text{m}$. De forma a garantir uma condição de águas profundas, no intervalo de frequência considerado, 0.5 a 1.6Hz , assumiu-se $d/L \sim 0,7$ para as frequências inferiores a 1.0Hz . Para as frequências superiores a 1.0Hz assumiu-se que o fundo se encontra a 1.0m de profundidade para, deste modo, minimizar possíveis efeitos de interferência entre o fundo do canal e a abertura inferior do cilindro. Para limitar igualmente os efeitos das paredes laterais do canal, embora a razão entre o diâmetro exterior do cilindro e a largura do canal seja pequena ($\sim 7,9\%$), considera-se que a largura do canal é igual a 1.4m , reduzindo para $3,9\%$ a razão entre o diâmetro exterior do cilindro e a largura do canal.

3.1 Código FLUENT

O código FLUENT (versão 6.3.26) utiliza uma técnica de volumes finitos para discretizar a equação da continuidade e as equações RANS. Neste código as variáveis são definidas no centro de cada elemento. Os termos difusivos das equações são discretizados pelo esquema de diferenças centrais de segunda ordem. Estão disponíveis diferentes esquemas de interpolação para os termos convectivos (*Upwind* de primeira ordem, lei de potência de primeira ordem, *Upwind* de segunda ordem, MUSCL e QUICK), diferentes algoritmos de resolução (Acoplado, SIMPLE, SIMPLEC e PISO) e diferentes modelos de turbulência [22].

A modelação da superfície livre é feita utilizando o método VoF. Este método, desenvolvido inicialmente por Hirt e Nichols [23], identifica a posição da superfície livre a partir de um indicador escalar, a fracção de volume, que toma o valor de 0 no ar e 1 na água. A posição da superfície livre é definida arbitrariamente pelo valor 0.5 .

Nas simulações efectuadas no âmbito deste artigo foram utilizados: o módulo tridimensional do código; a formulação implícita e discretização temporal de 2ª ordem; e o modelo de turbulência *k-ε standard*. Na resolução do sistema de equações utilizou-se o algoritmo SIMPLEC, com subrelaxação apenas nas equações de k e ϵ , sendo o coeficiente de subrelaxação igual a 0.8 . Os termos convectivos nas faces dos volumes de controlo para as componentes da quantidade de movimento, k e ϵ , são determinados pelo esquema *Upwind* de 2ª ordem.

A fracção de volume nas faces dos volumes de controlo é determinada por uma versão modificada do esquema HRIC (*High Resolution Interface Capturing*) [24]. A pressão é determinada pelo esquema PRESTO! (*PREssure STaggering Option*) [22].

Aproveitando a simetria do problema em relação ao plano longitudinal e vertical, o domínio computacional é apenas metade do domínio real.

A malha de discretização utilizada para a configuração de profundidade finita é composta aproximadamente de 5.8×10^5 volumes de controlo, conforme a frequência, sendo mais refinada nas proximidades do cilindro (Figura 2). Para a configuração de profundidade infinita, a malha é composta, em média, de cerca de 8.2×10^5 volumes de controlo. O perímetro da semicircunferência do cilindro é discretizado por 40 segmentos. Na região de propagação das ondas, a discretização vertical é composta de 24 segmentos iguais, com 18 segmentos por altura de onda e utilizam-se aproximadamente 60 segmentos por comprimento de onda, assegurando assim uma boa precisão não só da propagação da onda mas também da conservação da sua altura ao longo do canal [25].

No fundo do canal e nas paredes do cilindro é utilizada a condição de aderência com velocidade nula. Na fronteira superior é imposta a pressão atmosférica, permitindo a entrada ou saída do ar. Na abertura superior do cilindro é imposta a pressão atmosférica (simulação sem perda de carga) ou a pressão no interior da câmara pneumática devida à perda de carga imposta pela membrana porosa (secção 3.4).

O passo de tempo usado é $T/640$, onde T é o período da onda incidente. É imposto um número máximo de 5 iterações por cada passo de tempo, este valor é suficiente para reduzir todos os resíduos a valores inferiores a 10^{-3} [13].

Como condições iniciais, foram impostas as componentes da velocidade, nulas em todo o domínio, e a pressão hidrostática, considerando-a nula na superfície livre.

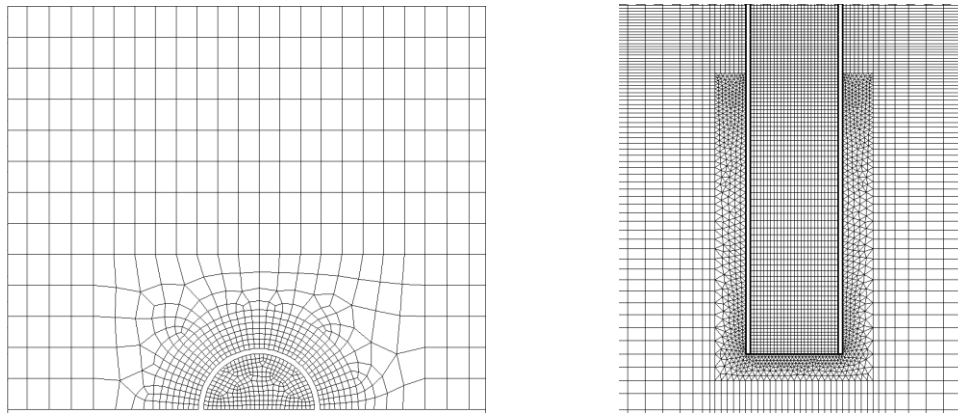


Fig.2. Malha nas proximidades do cilindro vertical (FLUENT): Plano da superfície livre ao repouso e plano de simetria.

3.2 Código FLUINCO

O código FLUINCO, desenvolvido por Teixeira [20] [21], integra as equações de Navier-Stokes de forma completa.

O modelo utiliza um método fraccionado para simular problemas de escoamentos 3D de fluidos incompressíveis com superfície livre. Emprega o método semi-implícito de Taylor-Galerkin de dois passos para discretizar no tempo e no espaço as equações de Navier-Stokes. É empregada uma formulação Lagrangeana-Euleriana arbitrária (*arbitrary lagrangean eulerian* - ALE) para permitir a solução de problemas que envolvem grandes movimentos relativos entre corpos e superfícies e movimentos da superfície livre.

Para a discretização no espaço é aplicado o método clássico dos resíduos ponderados de Galerkin empregando um elemento tetraédrico. O elemento tetraédrico tem a vantagem de se adaptar aos domínios de geometrias complexas e de ser um elemento de boa eficiência computacional.

O modelo FLUINCO considera a superfície livre sujeita a uma pressão atmosférica constante (geralmente o valor de referência é nulo) e impõe a condição de contorno cinemática da superfície livre (CCCSL), usando a formulação ALE [26].

A distribuição espacial da velocidade da malha é tal que a distorção dos elementos é minimizada pela sua suavização através do uso de funções que ponderam a influência da velocidade de cada nó pertencente às superfícies de contorno.

Para modelar a turbulência utiliza-se uma viscosidade turbulenta, definida por Mittal e Tezduyar [27], utilizando o comprimento de mistura proposto por Johns [28].

Outros detalhes relativos à aplicação deste código a este tipo de problemas podem ser encontrados em Teixeira *et al.* [14] [15].

Aproveitando a simetria do problema em relação ao plano longitudinal e vertical, como já foi referido anteriormente, o domínio computacional é apenas metade do domínio real.

Nas simulações efectuadas o eixo do cilindro está localizado a 2.0 m da secção de geração das ondas. A malha de elementos finitos possui aproximadamente 1.2×10^5 nós e 6.6×10^5 tetraedros (Figura 3). Para a configuração de profundidade infinita, a malha é composta de cerca de 1.3×10^5 nós e 7.0×10^5 tetraedros. O tamanho médio da aresta dos elementos localizados na região a montante do cilindro é de aproximadamente 0.02m. Na região próxima ao cilindro, adoptou-se um tamanho médio de aresta de elemento de 0.002 m, equivalente a 40 divisões da circunferência interna do cilindro. O passo de tempo adoptado foi de 0.0002s, que satisfaz a condição limite de Courant, ou seja, $v \Delta t / \Delta x < C$, com $C=0.25$. O valor de Δt é obtido para cada elemento, sendo escolhido o menor entre eles em todo o domínio [21].

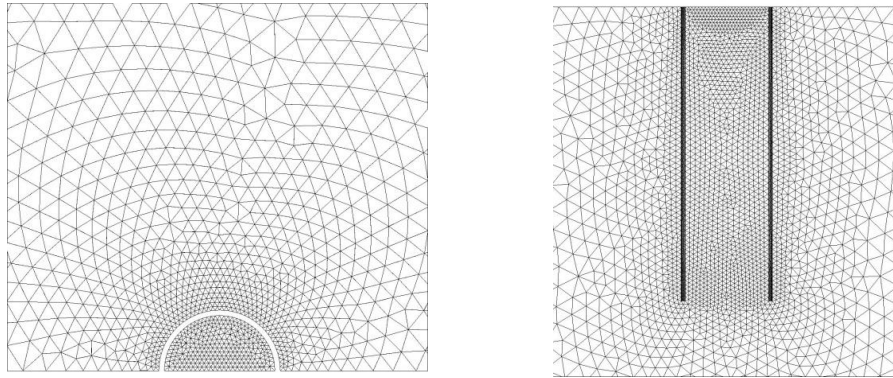


Fig. 3. Malha nas proximidades do cilindro vertical (FLUINCO): Plano da superfície livre ao repouso e plano de simetria.

3.3 Geração de ondas

As ondas regulares são geradas através da imposição de três condições limites na fronteira de entrada do domínio computacional: a elevação de superfície livre e as duas componentes de velocidades (na direcção horizontal e vertical). Estas grandezas são determinadas a partir dos perfis de velocidade e posição da superfície livre obtidos pela teoria linear das ondas [29].

Estas condições limites são identicamente impostas quer no modelo FLUENT quer no modelo FLUINCO.

3.4 Modelo da membrana porosa e da perda de carga induzida

Nos ensaios em modelo físico de Lopes *et al.* [7], o efeito dissipativo de um DAEO-CAO foi modelado usando uma membrana porosa (têxtil) colocada na extremidade superior do cilindro vertical (Figura 1). Esta membrana porosa permite simular a perda de carga devida a uma turbina do tipo Wells instalada num dispositivo real e avaliar a resposta do dispositivo numa configuração semelhante a um protótipo.

Para escoamentos a números de Reynolds baixos (baseados na dimensão média dos poros da membrana) é possível determinar a perda de carga no meio poroso pela lei de Darcy [30]:

$$-\nabla p = \frac{\mu U}{K} \quad (1)$$

Onde p é a pressão, μ a viscosidade do fluido, K a permeabilidade e U a velocidade média na secção.

Numericamente, a perda de carga no meio poroso é imposta utilizando uma UDF (do inglês, *User Defined Function*) [22]. Nesta função determina-se o valor da velocidade média na secção de saída do cilindro vertical e impõe-se a perda de carga como uma condição de fronteira de pressão que varia ao longo do tempo em função da velocidade média [18] [19]:

$$\Delta p = K'U = \frac{\mu \Delta x}{K} U \quad (2)$$

O valor da permeabilidade do meio poroso utilizada nos ensaios em modelo físico por Lopes *et al.* [7] não é conhecido. Esta foi estimada através de várias simulações numéricas. Para cada simulação foi utilizada uma diferente permeabilidade, sendo os resultados numéricos da elevação de superfície livre e de queda de pressão dentro da câmara pneumática da CAO comparados com os dados experimentais. Obteve-se deste modo $K'=125\text{Pa.s/m}$ [19].

Esta condição limite é apenas aplicada no modelo numérico FLUENT, no qual o escoamento de ar é simulado na câmara-de-ar. No entanto, uma condição limite similar foi desenvolvida no modelo FLUINCO para tomar em conta a variação de pressão na câmara-de-ar devido a perda de carga, embora o modelo não modelar o escoamento de ar. Embora não seja apresentado neste artigo simulações do FLUINCO, está em desenvolvimento um modelo aerodinâmico que permite o cálculo da pressão do ar dentro da câmara a cada passo de tempo. Esta pressão actua sobre a superfície livre como condição de contorno para a equação de Poisson da pressão do modelo hidrodinâmico. As equações do modelo aerodinâmico são obtidas através do primeiro princípio da termodinâmica aplicada ao sistema interior da câmara que troca energia com o exterior [6]. O ar é considerado um gás ideal em uma transformação iso-entrópica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na modelação numérica foram consideradas as seguintes condições: o comprimento submerso é $s = 0.18\text{m}$, a altura de onda é $H = 0.03\text{m}$ e a frequência varia na faixa de 0.5 até 1.6Hz.

Os dois códigos já foram validados para resultados laboratoriais em profundidade intermédia, com e sem os efeitos dissipativos devidos a um meio poroso que simula um equipamento de extracção de energia.

A Figura 4 apresenta os resultados dos dois códigos e uma comparação com os resultados em modelo físico obtidos com o topo do cilindro aberto para a atmosfera [15] [16] [17] [18]. A Figura 4a apresenta o factor de amplificação, Q , definido normalizando a elevação da superfície livre na CAO pela altura da onda incidente, e a Figura 4b apresenta o ângulo de fase, θ , que corresponde à diferença angular entre a série temporal de elevação de superfície livre da onda incidente e a série temporal de elevação de superfície livre na CAO. Observa-se uma muito boa concordância entre os resultados, embora os dois programas numéricos sejam baseados em métodos totalmente diferentes.

Para as frequências mais baixas, 0.5 até 0.6Hz, constata-se o aparecimento de uma segunda frequência no interior do cilindro [15] [17] [18] responsável pela mudança de comportamento do factor de amplificação e do ângulo de fase. Lopes *et al.* [7] observaram um efeito semelhante para a frequência 0.6Hz. Para as restantes frequências constata-se um comportamento semelhante nas simulações obtidas pelos dois códigos numéricos. Para um cilindro de pequeno diâmetro em relação à profundidade imersa, a ressonância ocorre a uma frequência de $f = \sqrt{g/l}$, onde l é o comprimento do cilindro imerso na água (0.18m para o caso estudado) e g a aceleração gravítica, resultando em $f = 7.382\text{rad/s} = 1.17\text{Hz}$. Pode-se observar na Figura 4a que a frequência de ressonância encontrada tanto nos ensaios experimentais como nas simulações é de cerca de 1.1Hz, próximo do valor teórico.

Relativamente ao ângulo de fase, na gama 0.5-0.6Hz, existe uma diferença entre o comportamento observado para os resultados dos códigos FLUENT e FLUINCO e os resultados experimentais, devido provavelmente a existência de harmónicas com amplitudes e fases diferentes quer nos ensaios quer nas simulações numéricas. Constata-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais na gama 0.7-0.9Hz. Na região de transição, na gama de frequência 0.9-1.3Hz, em torno da frequência de ressonância, ambos os códigos numéricos tendem a sobreavaliar a defasagem. Na gama de frequências 1.3-1.6Hz o código FLUINCO obtém resultados mais próximos dos experimentais do que o código FLUENT, que tende a sobreavaliar a defasagem.

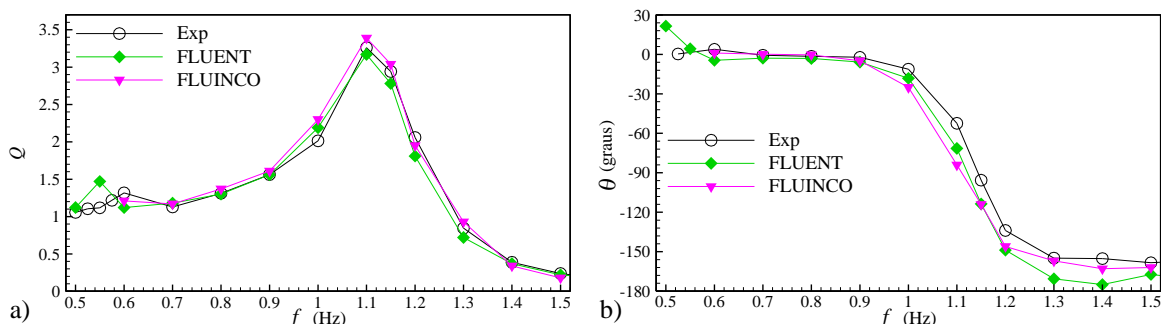


Fig. 4. Factor de amplificação, Q , e ângulo de fase, θ , em função da frequência da onda incidente para a profundidade intermédia e com o topo do cilindro aberto para a atmosfera.

A Figura 5, apresenta os resultados numéricos obtidos com o FLUENT e uma comparação com os resultados em modelo físico, considerando os efeitos dissipativos [18] [19]. A Figura 5a apresenta o factor de amplificação, Q , e a Figura 5b apresenta o ângulo de fase, θ . Observa-se uma muito boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais.

Observa-se, como referido por Lopes *et al.* [7], que a frequência de ressonância não é alterada pela presença da membrana porosa e da perda de carga induzida. Apenas verifica-se uma redução de amplitude do factor de amplificação para esta frequência comparando com os resultados obtidos sem efeitos dissipativos. Exceptuando a gama de frequências 0.5-0.6Hz, o factor de amplificação obtido pelas simulações numéricas tem um comportamento muito similar ao experimental. Verifica-se também apenas uma pequena diferença entre experimental e numérico para a frequência de ressonância.

Para o ângulo de fase, observa-se também uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais na gama 0.7-1.2Hz. Existe uma diferença no valor do ângulo de fase na gama 0.5-0.6 Hz, como foi identificado também para o factor de amplificação. Na gama de frequências 1.3-1.6Hz, a modelação numérica tende a sobreavaliar a defasagem, com diferenças significativas em relação aos dados experimentais. Não foi encontrada a razão destas diferenças para as frequências as mais altas.

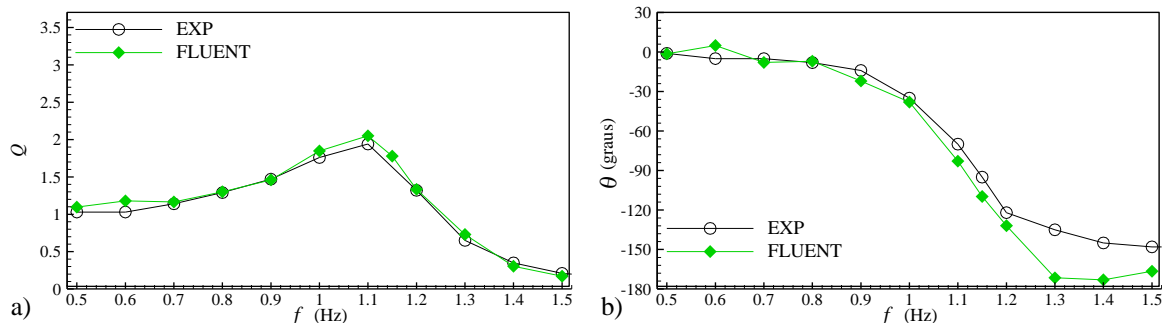


Fig. 5. Factor de amplificação, Q , e ângulo de fase, θ , em função da frequência da onda incidente para água intermédia, com efeitos dissipativos (resultados obtidos com FLUENT).

Apresenta-se na Tabela 1 os resultados da análise estatística realizada com base nos valores de factor de amplificação e fase angular dos resultados numéricos e experimentais obtidos para as várias frequências. Assim, são calculados parâmetros estatísticos como o erro médio quadrático, $RMSE$, o $Bias$ e índice de concordância, IC , para a configuração dos ensaios, água intermédia, com e sem efeitos dissipativos. Com base na Tabela 1, verifica-se, na configuração sem efeitos dissipativos, que os valores de factor de amplificação obtidos pelos modelos FLUENT e FLUINCO são, respectivamente, inferiores e superiores aos experimentais. Para a fase angular, os valores obtidos pelos dois modelos são inferiores aos experimentais. O erro quadrático é da mesma ordem de grandeza para o FLUENT e o FLUINCO. O IC do FLUENT é um pouco superior ao IC do FLUINCO. Na configuração com efeitos dissipativos, o FLUENT sobrestima o factor de amplificação e o ângulo de fase. O IC para o factor de amplificação é de 0.995, mas apenas de 0.984 para o ângulo de fase devido as diferenças significativas observadas para as frequências altas.

Tabela 1. Parâmetros estatísticos do factor de amplificação e de fase angular.

		Topo do cilindro aberto para a atmosfera			Efeitos dissipativos		
		$Bias$	$RMSE$	IC	$Bias$	$RMSE$	IC
Factor de amplificação	FLUENT	-0.017	0.152	0.992	0.042	0.073	0.995
	FLUINCO	0.039	0.118	0.990	-	-	-
Fase angular	FLUENT	-11.21	11.96	0.991	-10.32	16.86	0.984
	FLUINCO	-8.44	12.67	0.990	-	-	-

A Figura 6 apresenta os resultados do factor de amplificação e da fase angular para o código FLUENT, para uma condição de água intermédia e profunda, sem efeitos dissipativos. Observa-se uma diminuição do factor de amplificação para a configuração de água profunda comparando aos resultados obtidos em água intermédia, pois em condição de água profunda não se verifica empolamento da onda incidente como é o caso em água intermédia. Para as frequências mais elevadas, superiores ou iguais a 1.2Hz, a diferença não é tão significativa, o que era de esperar pois para estas frequências já se verifica a condição de água profunda nos ensaios em modelo físico. A diferença observada é assim provavelmente devida ao eventual efeito de interação entre o jacto de água, que sai na base do cilindro vertical, e o fundo do canal na configuração experimental. Verifica-se que a fase angular não é alterada pela variação de profundidade.

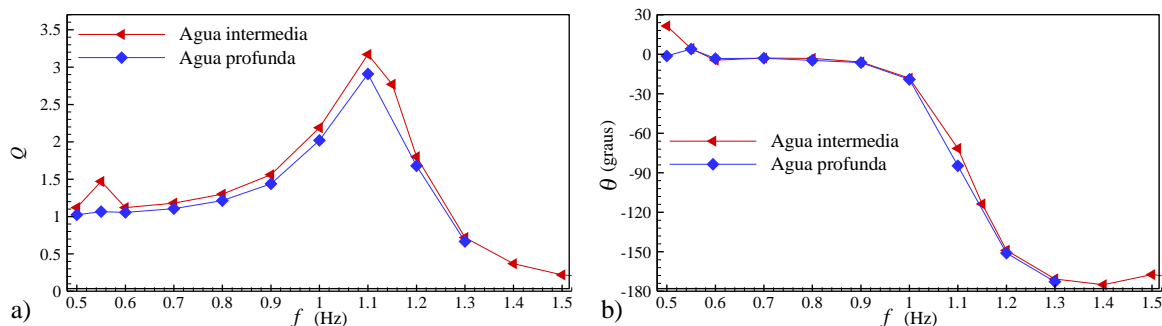


Fig. 6. Factor de amplificação, Q , e ângulo de fase, θ , em função da frequência da onda incidente para água profunda, com o topo do cilindro aberto para a atmosfera (resultados obtidos com FLUENT).

O objectivo principal do presente trabalho consiste na aplicação do código FLUENT, numa situação onde o dispositivo de aproveitamento de energia das ondas se encontra em águas profundas. Os resultados são comparados com os obtidos nas condições experimentais, cujos resultados foram apresentados anteriormente.

A Figura 7 apresenta uma comparação das séries temporais de elevação de superfície livre, fora e dentro do dispositivo, da pressão na câmara-de-ar e da potência pneumática instantânea (calculada pelo produto da diferença de pressão entre a câmara pneumática e o exterior com o caudal volumico escoado no meio poroso), para o modelo de DAEO nas condições experimentais e em condição de água profunda, para a frequência de ressonância $f=1.1\text{Hz}$. Verifica-se que a onda incidente sofre menos alterações em água profunda que em água intermédia (Figura 7a), o que se traduz por uma altura de onda incidente maior em águas intermédias e também uma variação da altura de nível da superfície livre maior no interior do dispositivo (Figura 7b). Consequentemente, a variação de pressão é também maior em profundidade intermédia (Figura 7c) o que induz uma potência pneumática instantânea superior à obtida em águas profundas (Figura 7d).

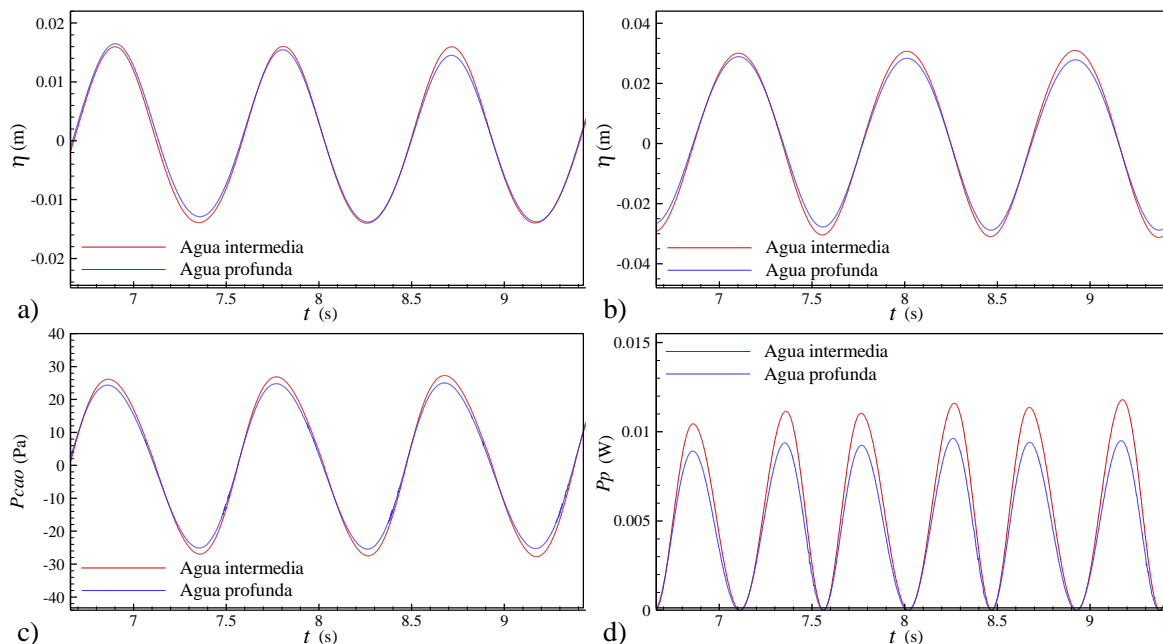


Fig. 7. Elevação de superfície livre fora (a) e dentro (b) do dispositivo, pressão na câmara-de-ar (c) e potência pneumática (d) para a configuração de água intermédia e profunda, com efeitos dissipativos (resultados obtidos com FLUENT).

A Figura 8 apresenta o factor de amplificação e a potência pneumática média para a gama de frequência 0.5-1.5Hz, comparando os resultados obtidos para a configuração de água intermédia e profunda, com efeitos dissipativos. Como se verificou no caso sem efeito dissipativo, o factor de amplificação é ligeiramente menor na configuração de água profunda quando comparando com os resultados obtidos em água intermédia, pois em condição de água profunda não se verifica empolamento da onda incidente como é o caso em água intermédia. Para as frequências mais altas a diferença é atenuada, pois para estas frequências a condição de água profunda já se verifica para as condições dos ensaios em modelo físico. A diferença máxima ocorre na região de ressonância, em torno de 7-8%, e a diferença média é de 5%. Verifica-se também que a potência pneumática média em condição de água profunda é menor que a obtida em profundidade intermédia, devida à alteração da onda incidente com a profundidade, tal como se verificou para o factor de amplificação. A diferença máxima na estimativa da potência pneumática média ocorre para a frequência de ressonância, com um valor de 19%, e a diferença média é de 13% (para as frequência simuladas entre 0.9Hz e 1.2Hz). Estes valores já são significativos quando se pretende estimar a potência pneumática média disponível num dispositivo pontual de aproveitamento da energia das ondas.

5 CONCLUSÕES

Neste artigo apresentou-se a aplicação de dois códigos numéricos RANS 3D, FLUENT e FLUINCO, na simulação de um modelo simplificado de DAEO-CAO, testado em laboratório. Os dois códigos já foram validados para a configuração do laboratório sem efeitos dissipativos e em profundidade intermédia.

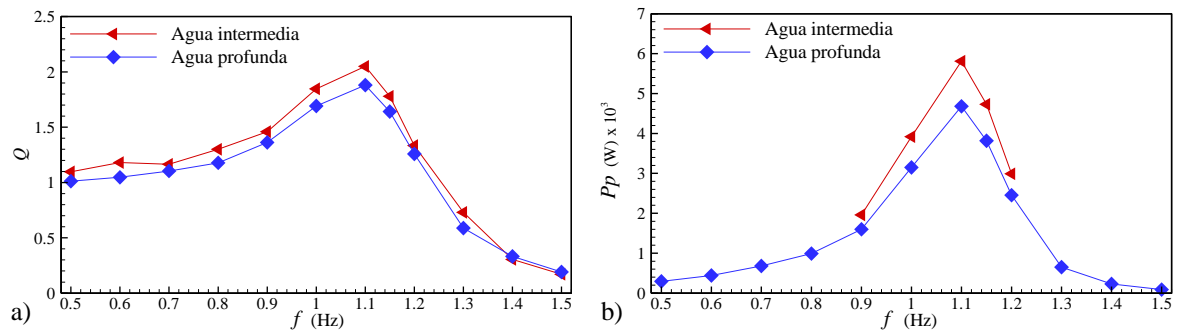


Fig. 8. Factor de amplificação, Q , e potência pneumática, P_p , em função da frequência da onda incidente para água intermédia e profunda, com efeitos dissipativos (resultados obtidos com FLUENT).

Os resultados das simulações numéricas realizadas com o modelo FLUENT, quer em água intermédia quer em água profunda, no qual foi integrado os efeitos dissipativos devidos a um equipamento de extracção de energia (modelado por uma membrana porosa nos ensaios em modelo físico), são comparados aos dados experimentais, obtidos em água intermédia.

As simulações efectuadas permitiram obter o factor de amplificação, o ângulo de fase e a potência pneumática média em função da frequência das ondas incidentes. Os resultados numéricos mostram um comportamento semelhante aos experimentais, em condições de profundidade intermédia. A ressonância ocorre à frequência de 1.10Hz, tal como previsto pela análise teórica. Concluiu-se que o modelo numérico permite reproduzir os efeitos dissipativos produzidos pela membrana porosa colocada no topo do cilindro vertical nos ensaios.

As simulações em água profunda foram comparadas com os resultados obtidos em água intermédia, sem e com efeitos dissipativos. Verifica-se que o factor de amplificação é sistematicamente menor em água profunda do que em água intermédia, excepto para as frequências mais altas, devido ao empolamento das ondas incidentes em condição de água intermédia. No entanto, a fase angular não sofre alteração devido a variação de profundidade e a ressonância ocorre na mesma frequência em ambas profundidades. No que diz respeito a potência pneumática média disponível em água profunda, verifica-se que é inferior à obtida em condições de água intermédia, tal como o factor de amplificação.

Os presentes resultados mostram claramente a influência que tem a profundidade (intermédia ou águas profundas) do fundo do canal nos resultados obtidos para o factor de amplificação e na previsão do desempenho de dispositivos de aproveitamento da energia das ondas pontuais posicionados ao largo.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento dos centros de investigação IDMEC e MARETEC. Os autores agradecem ainda a M.F.P. Lopes a cedência dos seus dados experimentais apresentados neste artigo. O terceiro autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq através do projeto 303308/2009-5.

REFERÊNCIAS

1. Evans, D.V., The oscillating water column wave-energy device, *Journal of the Institute of Mathematics and Applications*, 22 423-433, 1978.
2. Falcão, A.F.O., Sarmento, A.J.N.A., Wave generation by a periodic surface pressure and its application in wave-energy extraction, *Proc. 15th Int. Cong. Theor. Appl. Mech.*, Toronto, Canada, 1980.
3. Evans, D.V., Wave-power absorption by systems of oscillating surface pressure distributions, *Journal of Fluid Mechanics*, 114 481-499, 1982.
4. Brito-Melo, A., *Modeling and pre-dimensioning of oscillating water column power plants: application to the Pico (Azores) wave power plant*, Tese de doutorado, Instituto Superior Técnico (Lisbon) / École Centrale de Nantes, 2000.
5. Delauré, Y.M.C., Lewis, A., 3D hydrodynamic modeling of fixed oscillating water column wave power plant by a boundary element methods, *Ocean Engineering*, 30 309-330, 2003.
6. Josset, C., Clément, A. H., A time-domain numerical simulator for oscillating water column wave power plants, *Renewable Energy*, 32 1379-1402, 2007.

7. Lopes, M.F.P., Ricci, P., Gato, L.M.C., Falcão, A.F.O., Experimental and numerical analysis of the oscillating water column inside a surface-piercing vertical cylinder in regular waves, *Proc 7th European Wave and Tidal Energy Conference*, Porto, Portugal, 2007.
8. Wang, D., Katory, M., Li, Y., Analytical and experimental investigation on the hydrodynamic performance of onshore wave-power devices, *Ocean Engineering*, 29 871-885, 2002.
9. Hong, K., Shin, S., Hong, D., Choi, H., Hong, S., Effects of Shape Parameters of OWC Chamber in Wave Energy Absorption, *Proc. ISOPE*, Lisbon, Portugal, 2007.
10. El Marjani, A., Castro, F., Bahaji, M., Filali, B., 3D Unsteady Flow Simulation in na OWC Wave Converter Plant, *Proc. ICREPQ'06*, Palma de Mallorca, Espanha, 2006.
11. Liu, Z., Shi, H., Hyun, B., Practical design and investigation of the breakwater OWC facility in China, *Proc. 8th EWTEC – European Wave and Tidal Energy Conference*, Uppsala, Sweden, 2009.
12. Liu, Z., Hyun, B., Hong, K., Lee, Y., Investigation on Integrated System of Chamber and Turbine for OWC Wave Energy Converter, *Proc. ISOPE*, Osaka, Japão, 2009.
13. Barreiro, T., Didier, E., Gil, L., and Alves, M., Simulação numérica não linear do escoamento gerado pela interação entre a agitação marítima e conversores pontuais de energia das ondas, *Proc. III Conferência Nacional em Mecânica de Fluidos Termodinâmica e Energia*, Bragança, Portugal, 2009.
14. Davyt, D., Teixeira, P.R.F., Ramalhais, R., Didier, E., Numerical analysis of regular waves over an onshore Oscillating Water Column, *Proc. ENCIT 2010*, Uberlandia - MG, Brasil, 2010.
15. Teixeira, P.R.F., Didier, E., Paixão Conde, J.M., Análise numérica de um equipamento de energia das ondas do tipo OWC, *Proc. 6as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Funchal, Portugal, 2009.
16. Paixão Conde, J.M., Didier, E., Simulação numérica de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante, *Proc. CIBIM9*, Las Palmas de Gran Canaria, Espanha, 2009.
17. Paixão Conde, J.M., Teixeira, P.R.F., Didier, E., Simulação numérica de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante: comparação de dois códigos numéricos, *Proc. Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica – IV SEMENGO*, Rio Grande – RG, Brazil, 2010.
18. Paixão Conde, J.M., Teixeira, P.R.F., Didier, E., Numerical Simulation of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter: Comparison of two Numerical Codes, *Proc. 21st Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE*, Maui, Hawaii, USA, 668-674, 2011.
19. Didier, E., Paixão Conde, J.M., Teixeira, P.R.F., Numerical simulation of an oscillating water column wave energy converter with and without damping, *Proc. International Conference on Computational Methods in Marine Engineering – MARINE 2011*, Lisboa, Portugal, 2011.
20. Teixeira, P.R.F., Awruch, A.M., Numerical simulation of three dimensional incompressible flows using the finite element method, *Proc 8th ENCIT*, Porto Alegre, Brazil, 2000.
21. Teixeira, P.R.F., *Simulação numérica da interação de escoamentos tridimensionais de fluidos compressíveis e incompressíveis e estruturas deformáveis usando o método de elementos finitos*, Porto Alegre, 2001. Tese de doutorado, PPGEC-UFRGS, 2001.
22. Fluent, *Fluent 6.3 User's Guide*, Fluent Inc, USA, 2006.
23. Hirt, C.W., Nichols, B.D., Volume of fluid (VoF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Comp. Phys.*, 39 201-225, 1981.
24. Peric, M., Ferziger, J.H., *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Second edition, Springer, 1997.
25. Didier, E., Gil, L., Anselmo, A., Analise do escoamento viscoso em torno dum cargo (Tipo Série60, Cb=0.6), *Proc. Métodos Numéricos e Computacionais em Engenharia – CMNE*, 548 (19 p. CDrom), Porto, Portugal, 2007.
26. Ramaswamy, R., Kawahara, M., Arbitrary lagrangian-eulerian finite element method for unsteady, convective, incompressible viscous free surface fluid flow, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 7 1053-1075, 1987.
27. Mittal, S., Tezduyar, T.E., Parallel finite element simulation of 3D incompressible flows–fluid-structure interaction, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 21 933-953, 1995.
28. Johns, B., The modeling of the free surface flow of water over topography, *Coastal Engineering*, 15 257-278, 1991.
29. LeMéhauté, B (1976). *An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves*, Springer-Verlag.
30. Hsu, C.-T., *Dynamic Modeling of Convective Heat Transfer in Porous Media*, in *Handbook of Porous Media*, Ed. Kambiz Vafai, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2006.