

DESENVOLVIMENTO DE UM TANQUE DE ONDAS NUMÉRICO RANS-VOF 3D PARA APLICAÇÕES EM ENGENHARIA COSTEIRA E MARÍTIMA

Eric Didier

LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, edidier@lnec.pt

UNIDEMI, FCT-UNL, Campus de Caparica, 2829-516, Monte de Caparica

Paulo R.F. Teixeira

FURG, Av. Itália, km 8, Campus Carreiros 96201-900 Rio Grande, RS, Brasil, pauloteixeira@furg.br

Maria da Graça Neves

LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351.218443451, gneves@lnec.pt

DEC, FCT-UNL, Campus de Caparica, 2829-516, Monte de Caparica

RESUMO

Os modelos numéricos baseados nas equações RANS-VoF (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes Volume-of-Fluid) têm tido um aumento de popularidade para aplicações em projectos de engenharia costeira e marítima devido ao aumento do recurso computacional e as melhorias numéricas.

No entanto, para a correta modelação dos fenómenos envolvidos na interacção ondas-estruturas é necessário implementar algoritmos específicos nestes modelos numéricos como os batedores estáticos ou dinâmicos integrando a absorção activa 3D e usando batedores múltiplos e independentes uns dos outros.

Apresenta-se, nesta comunicação, o modelo numérico tridimensional RANS-VoF FLUENT® no qual foram implementadas rotinas específicas que permitem modelar um tanque de ondas 3D e analisar as interacções complexas onda-estrutura que interessam os projetos de engenharia costeira e marítima. Apresenta-se ainda a aplicação deste modelo ao estudo da interacção de ondas com três tipos diferentes de estruturas marítimas: um emissário submarino; um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas; e uma parte de uma ponte-cais.

Palavras-chave – Modelação numérica, tanque de ondas 3D, RANS-VoF, absorção activa das ondas.

1 INTRODUÇÃO

A utilização das equações de Navier-Stokes aplicadas aos processos de engenharia costeira e marítima tem permitido avanços neste campo nas últimas décadas. O aumento do recurso computacional e as melhorias numéricas, principalmente das condições limites e dos métodos numéricos de captura de superfície livre nos modelos RANS (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes), explicam o aumento da popularidade dos modelos numéricos baseados nestas equações. É assim possível utilizar actualmente estes modelos numéricos para modelar casos complexos tridimensionais de interacção ondas-estruturas embora as extensões simuladas, i.e. os domínios computacionais, ficam limitadas pelo recurso computacional disponível.

No entanto, para a correta modelação dos fenómenos envolvidos na interacção ondas-estruturas, é necessário implementar algoritmos específicos nos modelos RANS-VoF (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes Volume-of-Fluid), tal como os batedores estáticos ou dinâmicos, para gerar as ondas, mas que devem também permitir a absorção das ondas reflectidas e difractadas. A implementação destes algoritmos é relativamente simples em 2D e vários modelos numéricos RANS-VoF 2D, tal como IH2VOF (Lara et al., 2011), FLUENT® 2D (Didier et al., 2016; Teixeira et al., 2017) ou IHFoam (Higuera et al., 2013), ou SPH (Smoothed Particles Hydrodynamics) 2D, tal como SPHyCE (Didier e Neves, 2012) ou DualSPHysics (Altomare et al., 2017), permitem modelar canais de ondas bidimensionais ou canais quasi-tridimensionais. No entanto, se a implementação da geração das ondas é relativamente trivial em 3D, a absorção das mesmas é mais complexa, particularmente em domínios computacionais totalmente tridimensionais. Assim, para a absorção ativa 3D das ondas é necessária a implementação de ferramentas específicas que usam batedores múltiplos independentes uns dos outros, tal como no modelo IHFoam (Higuera et al., 2013) e FLUENT® 3D (Didier et al., 2016; Teixeira et al., 2017). Estas ferramentas são indispensáveis e permitem uma melhor representação do campo de ondas, já que as ondas refletidas e difratadas são absorvidas, e, simultaneamente, uma redução da dimensão do domínio computacional, resultando numa diminuição do tempo de cálculo.

Os modelos RANS-VoF mostram a sua fiabilidade e precisão, quando bem utilizados, em múltiplas aplicações e hoje em dia podem ser aplicados para resolver problemas reais de engenharia costeira e marítima, pois simulam os processos de transformação das ondas tais como a reflexão e a difracção, o escoamento em meios porosos, a rebentação e o espraçamento e o galgamento das estruturas. Permitem analisar com grande precisão os campos de velocidade, de vorticidade e de turbulência. A distribuição de pressão nas estruturas pode ser determinada e, por consequência, as forças nas mesmas.

Apresenta-se nesta comunicação o modelo numérico tridimensional RANS-VoF FLUENT® (Fluent, 2006; Didier et al., 2016; Teixeira et al., 2017) no qual foram implementadas rotinas específicas que permitem modelar um tanque de ondas 3D e analisar as interacções complexas ondas-estruturas que interessam os projectos de engenharia costeira. São apresentados três casos concretos de interacção de ondas com diferentes estruturas para ilustrar as possibilidades de aplicação do modelo numérico: i) um emissário submarino; ii) um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas; e iii) uma parte de uma ponte-cais.

2 TANQUE DE ONDAS NUMÉRICO

Apresentam-se as equações 3D RANS-VoF e descreve-se o modelo numérico, definindo os métodos de resolução, os esquemas de discretização e as condições limites mais apropriadas às aplicações aqui apresentadas e que ilustram o potencial de um tanque de ondas numérico 3D com absorção activa das ondas.

2.1 Equações RANS-VOF

O escoamento de um fluido incompressível é descrito pelas equações de conservação da massa e de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

onde $i, j=1, 2, 3$, u_i são as componentes i da velocidade, t o tempo, p a pressão, ρ a massa volúmica, g_i as componentes da aceleração da gravidade e τ_{ij} o tensor das forças viscosas. As equações RANS são obtidas a partir da decomposição da velocidade e pressão instantâneas das equações de Navier-Stokes, Eqs. 1 e 2, numa componente média e flutuante e da integração no tempo destas equações. A turbulência no escoamento é assim introduzida a partir dos tensores de Reynolds. Um modelo de turbulência permite fechar o sistema de equações e relacionar os tensores de Reynolds com as variáveis médias do escoamento. Classicamente é usado o modelo $k-\varepsilon$ *standard*, com coeficientes padrões. O movimento da superfície livre é definido pela técnica VoF (Volume of Fluid) proposta por Hirt and Nichols (1981). O método consiste em identificar a posição da superfície livre através do transporte de um escalar, a fracção de volume, α , que toma o valor 0 no ar e 1 na água:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_j \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

A posição da interface entre os dois fluidos, a superfície livre, é definida pelo valor $\alpha = 0.5$.

2.2 Implementação numérica

O modelo numérico RANS-VoF FLUENT®, versão 6.3.26, (Fluent, 2006), é utilizado para desenvolver o tanque 3D de ondas aqui apresentado. É aplicada uma técnica de volumes finitos para resolver as equações RANS e VoF, sendo que as variáveis são definidas no centro dos elementos da malha. Os dois fluidos, ar e água, são incompressíveis.

O modelo numérico deve ser optimizado em função do tipo de problema a resolver. Dois modelos são utilizados: um modelo implícito e um modelo explícito.

2.2.1 Modelo implícito

A integração no tempo é efectuada com uma formulação implícita e uma discretização no tempo de segunda ordem. Os termos viscosos são discretizados por um esquema de diferenças centradas de segunda ordem. Os termos convectivos são determinados pelo esquema MUSCL, de terceira ordem, e UPWIND de segunda ordem para as equações de conservação de quantidade de movimento e as equações do modelo de turbulência $k-\varepsilon$, respectivamente. A pressão é determinada pelo esquema PRESTO! (PREssure STaggering Option), classicamente utilizado para modelação de propagação de onda no FLUENT® (Fluent, 2006), que integra o efeito da aceleração da gravidade. O modelo de turbulência $k-\varepsilon$, com os coeficientes padrões, é o utilizado, pois foi verificado que permite propagar com precisão as ondas tomando em conta os principais efeitos e fenómenos devido ao escoamento turbulento. O algoritmo SIMPLER, acoplado velocidade e pressão, é o utilizado. Os coeficientes de sub-relaxação são iguais a 1 para a quantidade de movimento e o VoF e 0.8 para o modelo $k-\varepsilon$. No método VoF, a fracção de volume é determinada pelo esquema HRIC (High Resolution Interface Capturing) desenvolvido por Perić e Ferziger (1997).

O passo de tempo para as simulações é da ordem de $T/600$, sendo T o período da onda incidente, e são realizadas a cada passo de tempo 6 iterações não-lineares para reduzir os resíduos de pelo menos 2 a 3 ordens de grandeza, o que se verifica ser suficiente para assegurar a propagação das ondas com precisão (Didier et al, 2011; Paixão-Conde et al., 2011; Teixeira et al., 2013).

2.2.2 Modelo explícito

No modelo explícito, a integração no tempo é efectuada com uma formulação explícita e uma discretização no tempo de primeira ordem e a fracção de volume, no método VoF, é determinada pelo esquema GEO-Reconstruct, um esquema de reconstrução geométrica da interface entre os dois fluidos (Youngs, 1982). As outras características são iguais às do modelo implícito.

A integração no tempo, sendo explícita, é feita com o passo de tempo, a cada iteração, determinado pela condição de Courant (CFL) e para reduzir os resíduos de pelo menos 2 a 3 ordens de grandeza são ainda realizadas, a cada passo de tempo, 6 iterações não-lineares.

2.3 Condições iniciais e limites específicas ao tanque de ondas

O tanque de ondas é definido através da imposição das condições limites apresentadas a seguir:

- No topo do tanque de ondas é imposta a pressão atmosférica;
- As ondas são geradas utilizando um gerador de ondas estático à entrada do tanque, com a onda a ser imposta através do perfil das componentes da velocidade horizontal (normal ao batedor) e vertical e da fracção de volume correspondente à posição da superfície livre. O gerador de ondas integra uma técnica de absorção activa das ondas, caso haja ondas refletidas que chegam ao batedor. Devido à possibilidade de reflexão e difração induzidas pelo dispositivo colocado no tanque de ondas e o fundo e à consequente aparição de ondas tridimensionais, é absolutamente necessário recorrer a uma técnica de batedores múltiplos (do tipo *snake*) que permite uma absorção das ondas mais eficaz. Esta técnica de absorção ativa integra igualmente uma correcção da obliquidade das ondas, caso as ondas refletidas/difratadas apresentem uma direcção oblíqua relativamente à direcção normal ao plano do batedor (Higuera et al., 2013; Didier et al., 2016; Teixeira et al., 2017);
- A condição de aderência é imposta nas paredes sólidas da(s) estrutura(s) colocada(s) no tanque;
- A condição de aderência é também imposta no fundo do tanque de ondas;
- A absorção dinâmica das ondas no final do tanque permite evitar a reflexão das ondas no interior do tanque. É utilizado um batedor múltiplo integrando uma correcção da obliquidade das ondas, o que permite um melhor desempenho da absorção activa no final do tanque (Higuera et al., 2013; Didier et al., 2016; Teixeira et al., 2017);
- Uma condição de deslizamento é imposta nas paredes laterais do tanque de ondas.

As condições iniciais são de água parada, com campo de velocidades nulo, e de pressão hidrostática.

2.4 Requisitos para a construção da malha

Estudos anteriores indicam que a propagação das ondas com o modelo numérico é bem simulada com uma malha Cartesiana ortogonal e com discretização da ordem de 70 segmentos por comprimento de onda na direcção de propagação e 20 segmentos por altura de onda na direcção vertical, na zona de deformação da superfície livre (Didier et al., 2011; Paixão-Conde et al., 2011; Teixeira et al., 2013).

É realizado um refinamento da malha perto das paredes sólidas das estruturas colocadas no tanque de ondas, no fundo do tanque e nas proximidades dos batedores estáticos, quer na zona da geração das ondas, quer na zona de absorção das ondas no final do tanque.

3 EXEMPLOS DE MODELAÇÃO NUMÉRICA DE INTERACÇÃO ONDA-ESTRUTURA 3D

Com o objectivo de ilustrar as capacidades de aplicação, em futuros projetos, do tanque de ondas numérico 3D com batedor com absorção ativa anteriormente descrito, são aqui

apresentados três exemplos de interação onda-estrutura, quer à escala de modelo físico, quer à escala de protótipo, com estruturas totalmente tridimensionais:

- Emissário submarino submetido a uma onda regular com incidência de 30° ;
- Dispositivo de aproveitamento da energia das ondas de tipo coluna de água oscilante instalado na costa (Central do Pico, Açores, Portugal);
- Cabeça de uma estrutura do tipo ponte-cais (laje, vigas e pilares) submetida a uma onda regular com incidência de 20° .

3.1 Emissário submarino

O conhecimento das forças, devido à acção das ondas, que atuam nos emissários submarinos (Figura 1), compostos por uma conduta e anéis de estabilização de betão para agitação com direcção de propagação próxima da direcção do emissário, é essencial para o seu dimensionamento. É tipicamente uma configuração, embora complexa, para a qual a modelação numérica, utilizando modelos 3D, é especialmente adequada para obter uma estimativa das forças na conduta e nos anéis.



Figura 1 – Emissários submarinos: Conduta e anéis.

Esta aplicação de interação onda-estrutura no tanque de ondas numérico 3D consiste na simulação de um emissário submarino com anéis de estabilização, à escala 1:15, que foi ensaiado num tanque de ondas tridimensional, nas instalações do Danish Hydraulics Institute (DHI), para estudar a influência da direcção da agitação incidente (90° , i.e. perpendicular ao emissário, 30° e 10°) e da distância da conduta ao fundo nas forças que atuam no emissário (Neves et al., 2013, 2014).

Para a presente aplicação, a onda incidente regular tem uma altura de 0.15 m e um período de 2.07 s com uma direcção de agitação incidente de 30° . A conduta do emissário tem um diâmetro de 0.07 m e um comprimento de aproximadamente 10.0 m e está posicionada a uma distância ao fundo de 0.033 m, estando os 26 anéis colocados com uma distância fixa entre eles de 0.33 m. A profundidade do tanque é constante e igual a 0.7 m.

O emissário simulado com o modelo numérico (Figura 2), tem um comprimento de 3.20 m, e é composto por duas partes sem anéis, em cada uma das duas extremidades do troço de emissário considerado, com um comprimento de 0.59 m, e uma parte central constituída pela conduta e por 7 anéis, com um comprimento de 2.02 m, dimensão estimada suficiente para reproduzir os fenómenos observados em modelo físico. O modelo de emissário no tanque numérico tem assim as mesmas características geométricas que o modelo utilizado no tanque do DHI, como se pode verificar na Figura 2, excepto o seu comprimento total.

A Figura 3 apresenta o tanque de ondas onde está representada a deformação da superfície livre e um detalhe do emissário, o batedor múltiplo com 10 pás individuais colocado na entrada do domínio computacional para geração/absorção das ondas e o segundo batedor no final do tanque para absorção das ondas. O tanque numérico tem 9.7 m de comprimento e 1.6 m de largura.

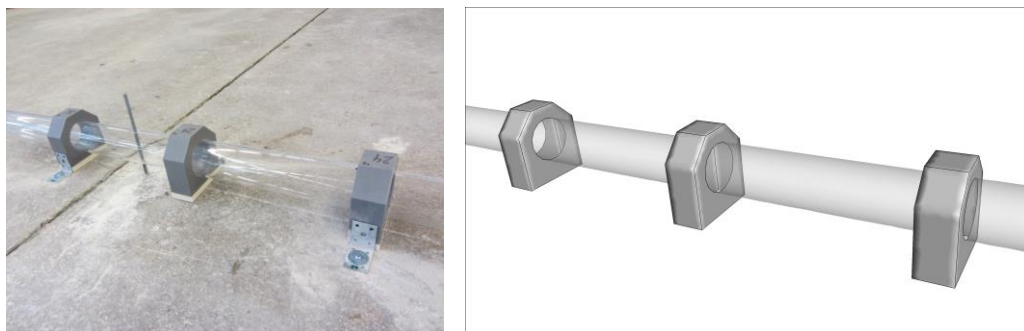


Figura 2 – Modelo do emissário no tanque de ondas em modelo físico e no tanque numérico composto da conduta e dos anéis.

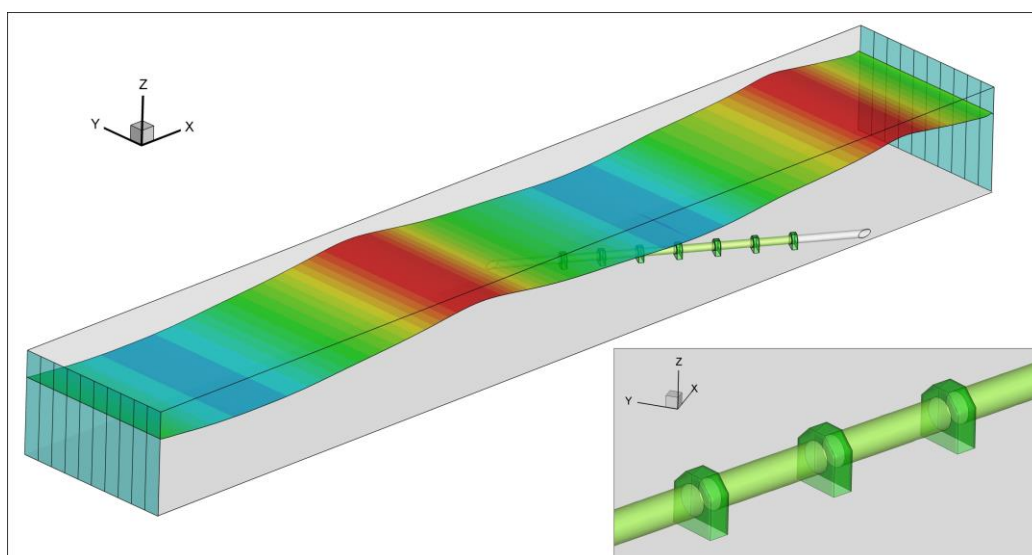


Figura 3 – Domínio computacional com os batedores múltiplos nas duas extremidades do tanque e o modelo de emissário submarino com a conduta e os anéis; Deformação da superfície livre (vermelho: cristas, azul: cavas).

A malha de discretização, Figura 4, de tipo não-conforme, é composta de 410000 elementos prismáticos, paralelepípedicos e tetraédricos, dependendo da zona do domínio computacional. Um refinamento da malha é realizado na zona de variação da superfície livre, nas proximidades das pás dos batedores e em torno do emissário.

É evidente que os modelos numéricos RANS-VoF permitem aceder a muita informação quer no espaço quer no tempo que seriam difícil ou impossível obter em modelo físico ou medição de campo. Aqui apresenta-se apenas alguns resultados, como as forças na conduta e nos anéis, o campo de velocidades junto à conduta e a energia cinética da turbulência, estes últimos resultados difíceis de serem obtidos em modelo físico ou em campo.

As Figuras 5 e 6 apresentam, em dois planos verticais, o primeiro passando por um anel e o segundo no meio da conduta, a intensidade e os vectores da velocidade e a energia cinética da turbulência, respectivamente. Observa-se o aumento de velocidade nas proximidades do anel e em torno da conduta, já que o escoamento é fortemente desviado pelo emissário devido ao ângulo de incidência da onda, assim como o aumento da energia cinética da turbulência nestas zonas de gradientes de velocidade mais forte.

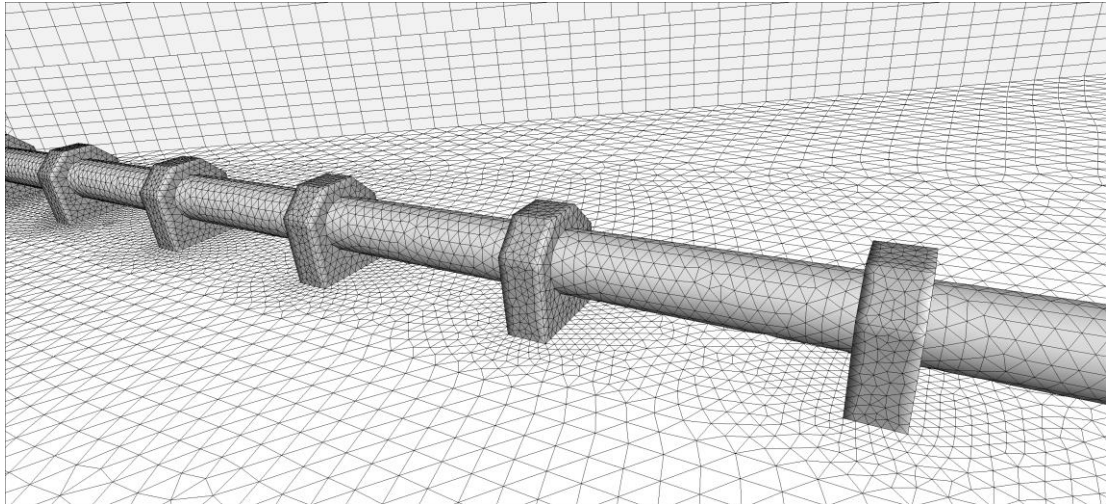


Figura 4 – Malha mista no emissário, no fundo e na parede lateral do tanque.

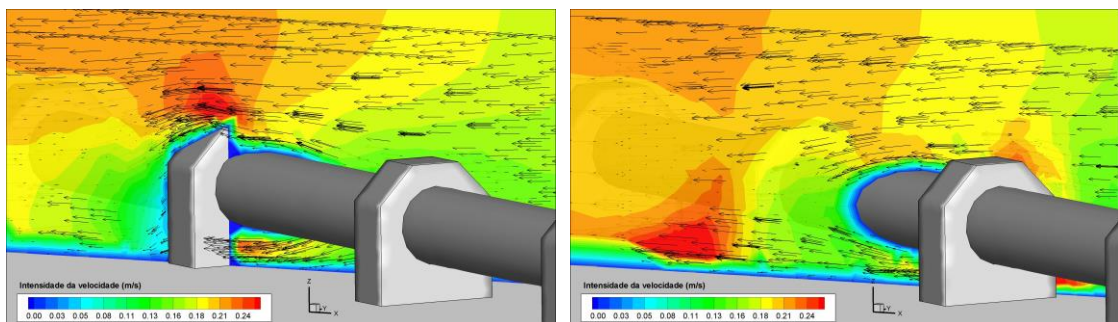


Figura 5 – Intensidade e vectores velocidade em dois planos verticais passando por um anel e no meio da conduta.

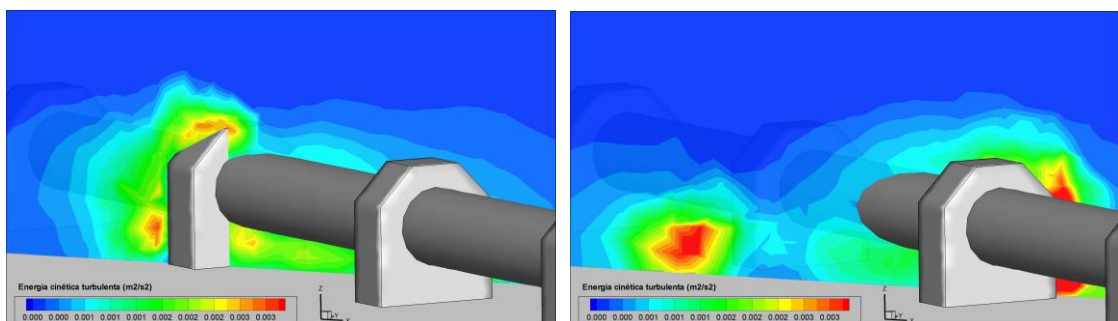


Figura 6 – Energia cinética turbulenta em dois planos verticais passando por um anel e no meio da conduta.

A Figura 7 apresenta a série temporal da força de arrasto, na direcção da propagação das ondas, registada numa secção de 0.66 m de comprimento (conduta e dois anéis) idêntica à secção de medição nos ensaios em modelo físico. Pode-se verificar a regularidade da variação da força de arrasto, com o mesmo período que o da onda incidente. O máximo de força de arrasto determinado numericamente, 229 g, é muito similar o valor medido nos ensaios físicos, 237 g, com uma diferença entre os dois valores de apenas 3.5%.

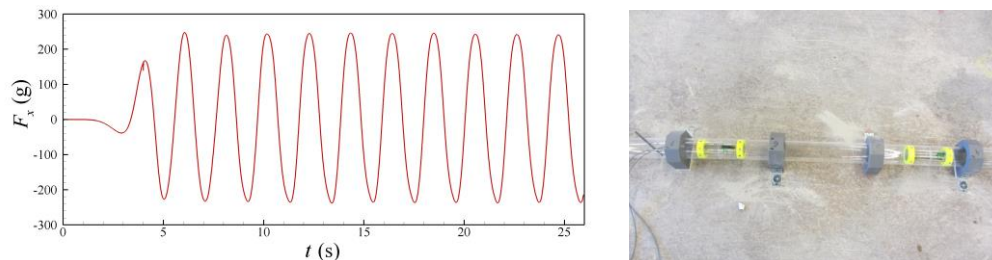


Figura 7 – Série temporal da força de arrasto, na direcção da propagação das ondas, registada numa secção de 0.66 m de comprimento (com dois anéis) idêntica à secção de medição nos ensaios em modelo físico.

3.2 Dispositivos de coluna de água oscilante

O sistema de coluna de água oscilante (CAO) é um dos tipos de dispositivo de aproveitamento da energia das ondas do oceano tecnicamente mais conhecido, em virtude do grande esforço de investigação de que foi objecto nas últimas décadas. O dispositivo 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. Existem diversos protótipos de dispositivos de coluna de água oscilante à escala real, com varias potências instaladas que variam entre 60kW e 500kW: Sakata no Japão, Pico nos Açores (Portugal), Limpet na Escócia no Reino Unido, Mutriku nos País Basco na Espanha, entre outros.

Nas últimas décadas o desenvolvimento dos meios computacionais permitiu modelar, à escala de modelo e de protótipo, de maneira mais ou menos detalhada e completa, estes dispositivos nos quais as duas fases, água e ar, interagem.

Com os modelos RANS-VoF 3D actuais e o recurso computacional disponível, torna-se possível modelar um dispositivo de CAO no seu ambiente próximo. A presente aplicação apresenta a modelação da interacção entre uma onda incidente regular (altura de 0.8 m e período de 10.0 s), com incidência normal ao dispositivo, com a central de aproveitamento da energia das ondas de Porto Cachorro, na ilha do Pico, tomando em conta a linha de costa e o fundo, embora ambos de forma aproximada. A Figura 8 apresenta o dispositivo visto do mar e uma imagem do modelo numérico com a representação dos principais elementos estruturais. A Figura 9 apresenta, em detalhe, o dispositivo onde estão representadas as principais características da câmara, quer a parte submersa quer a imersa, quer a zona exterior, quer interior: guias verticais exteriores arredondadas, extremidade inferior da parede frontal arredondada para favorecer o escoamento, parede frontal inclinada, forma específica da câmara-de-ar, conduta e eixo da turbina. A Figura 9 apresenta também a malha complexa no fundo do tanque e nas faces interiores e exteriores do dispositivo. A malha mista é composta de 1960000 elementos de várias características.



Figura 8 – Central de energia das ondas de Porto Cachorro, Pico, Açores, e modelo numérico do dispositivo no tanque 3D de ondas.

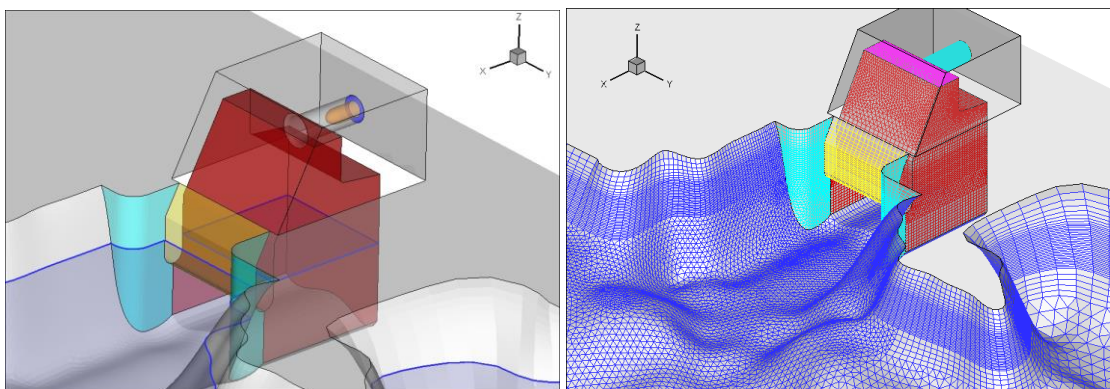


Figura 9 – Modelo numérico da central do Pico e malha mista

Dos numerosos resultados que se obtêm com o modelo numérico, apresenta-se resultados de posição da superfície livre na proximidade e no interior do dispositivo, a velocidade média e o caudal na conduta da turbina, a pressão média na câmara-de-ar, resultados difíceis de serem obtidos em modelo físico ou em campo.

A Figura 10 apresenta a superfície livre em frente e dentro do dispositivo em três instantes de tempo. Observa-se o empolamento no interior do dispositivo, o ligeiro *sloshing* na câmara e a sobrelevação em frente à parede frontal da central devido à onda reflectida.

Na Figura 11 são apresentadas a intensidade da velocidade média na conduta da turbina e o caudal para várias características de turbina Wells ($kt=P/Q$, onde kt é a relação característica da turbina, P a pressão e Q o caudal na turbina). Classicamente nestes dispositivos, o aumento do kt implica uma redução da velocidade máxima e uma diminuição do caudal de ar na turbina, que passa de 90.0 para 40.0 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ quando kt passa de 20.0 e 160.0 $\text{Pa m}^{-3} \text{s}$, respectivamente, para a agitação considerada.

São apresentados, na Figura 12, dois parâmetros para caracterizar a resposta do dispositivo à agitação incidente, variando a característica kt de turbina Wells: o factor de amplificação, rácio entre a altura de onda média no interior do dispositivo e a altura da onda incidente, e a potência pneumática média, calculada a partir da pressão média na câmara-de-ar e o caudal na turbina. O factor de amplificação é máximo para $kt=20 \text{ Pa m}^{-3} \text{s}$ e diminui com o aumento do kt , o que é coerente também com a diminuição do caudal com o aumento do kt . A potência pneumática média toma o valor máximo de 90.0 kW para $kt=60 \text{ Pa m}^{-3} \text{s}$, indicando que é esta a característica ótima da turbina para uma onda incidente de altura 0.8 m e período 10.0 s.

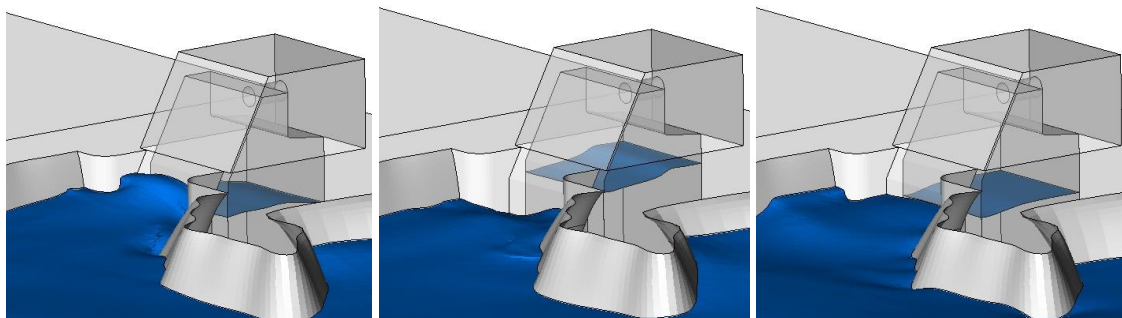


Figura 10 – Elevação da superfície livre em frente a central do Pico e no interior do dispositivo durante a interacção entre a onda incidente e a central

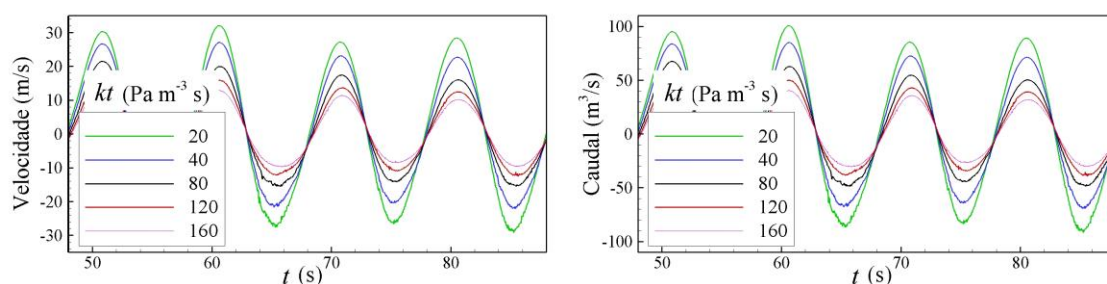


Figura 11 – Intensidade da velocidade média e caudal da turbina para várias características de turbina Wells e para uma onda regular com altura de 0.8 m e período de 10.0 s.

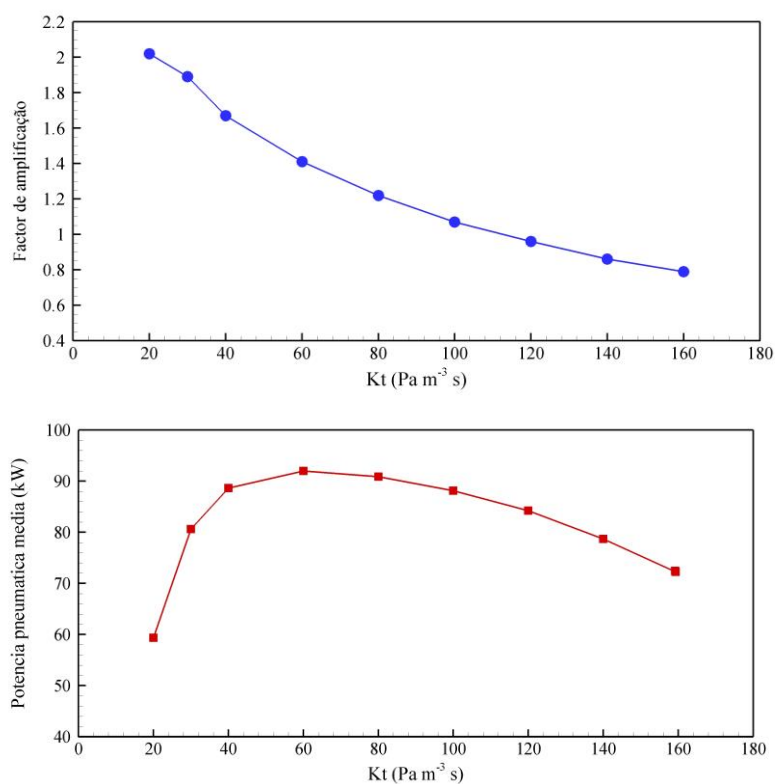


Figura 12 – Amplificação da elevação média da superfície livre no interior do dispositivo e potência pneumática média para várias características de turbina Wells e para uma onda incidente regular com altura de 0.8 m e período de 10.0 s.

3.3 Ponte-cais

A determinação das forças actuantes numa ponte-cais para acostagem de navios, tal como a ponte-cais de Alcochete, no Portugal (Figura 13), e particularmente das forças verticais a que os elementos estruturais horizontais vão estar sujeitos devido à interacção com a agitação marítima, é um dos aspectos importantes na fase de projeto. Estas forças são classicamente calculadas com fórmulas empíricas ou semi-empíricas, com coeficientes obtidos em ensaios em modelo físico e, por isso mesmo, com aplicabilidade reduzida, já que são apenas válidas para as condições desses ensaios. Estas limitações podem ser ultrapassadas recorrendo à simulação numérica com modelos 3D que permitem obter uma estimativa das forças actuantes nas várias partes da estrutura tomando em conta a direcção de propagação da onda incidente e as componentes principais da estrutura, tais como os pilares e as vigas.



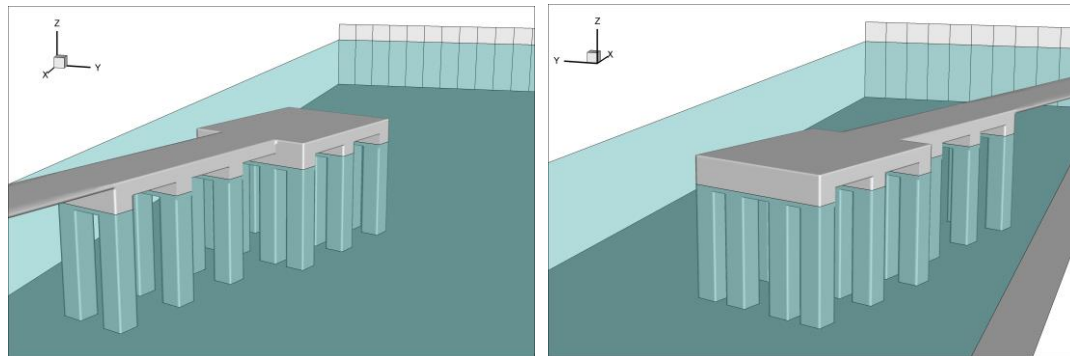
Figura 13 – Ponte-cais de Alcochete (Portugal).

Para a presente aplicação, considera-se o extremo de barlamar de uma ponte-cais de pequena dimensão (Figura 14). A estrutura, inclui os pilares (secção quadrada de 2.1x2.1 m), as vigas longitudinais (secção de 1.0x0.5 m) e transversais (secção de 2.1x2.6 m) e a laje de 0.4 m de espessura. A cabeça e o cais da ponte-cais são constituídos de lajes com dimensões de 14.0 m de largura por 17.1 m de comprimento (laje 1) e 7.0 m de largura por 22.5 m de comprimento (laje 2) (Figura 19). Nos respectivos troços, as vigas transversais estão assentes num conjunto de 4 e 2 pilares. O fundo é horizontal e a superfície livre em repouso encontra-se a 10.4 m do fundo, o que correspondente a uma sobrelevação importante em relação ao nível médio do mar, já que a laje está situada a 13.0 m, do fundo. Assim a laje está apenas a 2.6 m acima da superfície livre em repouso.

A agitação regular, que incide a 20° relativamente ao eixo longitudinal da ponte-cais, é caracterizada por uma altura de onda de 5.0 m e um período de 15.0 s.

O tanque de ondas numérico tem 240 m de comprimento e 48 m de largura. Pode-se verificar na Figura 14, que apresenta duas vistas da ponte-cais no tanque de ondas e a posição da superfície livre em repouso, a importante densidade dos pilares de secção rectangular que vai conduzir a uma forte interacção com a onda incidente, tal como as vigas transversais e longitudinais. Um batedor múltiplo com 12 pás individuais é colocado na entrada do domínio computacional para geração/absorção das ondas, Figura 14a), e um segundo, também composto por 12 pás individuais, no fim do tanque para absorção das ondas, Figura 14b).

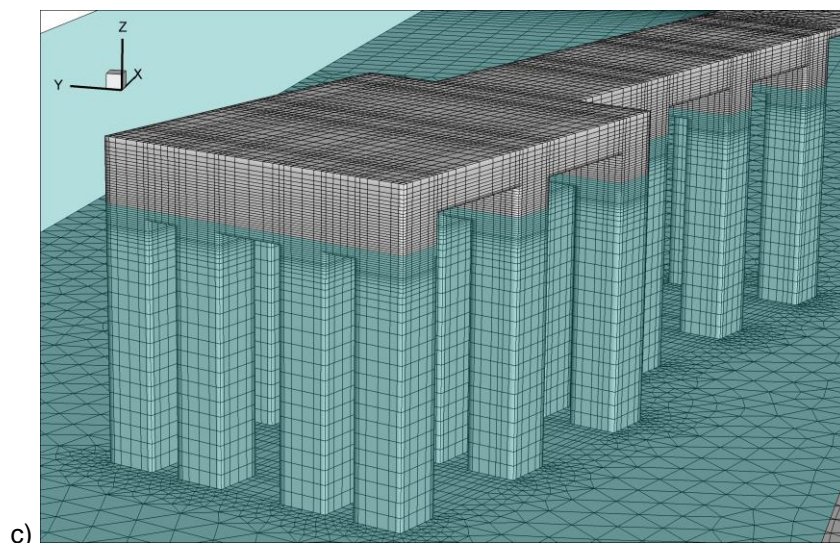
A Figura 15 apresenta a malha mista de discretização, composta de 840000 elementos prismáticos e paralelepípedicos, nas várias faces da ponte-cais e no fundo do tanque, as duas cores indicando a parte emersa e submersa da estrutura relativamente à posição da superfície livre em repouso.



a) Ponte-cais e pás do batedor para gerador/absorção das ondas

b) Ponte-cais e pás do batedor para absorção das ondas no fim do tanque

Figura 14 – Ponte-cais no tanque de onda e posição da superfície livre ao repouso.



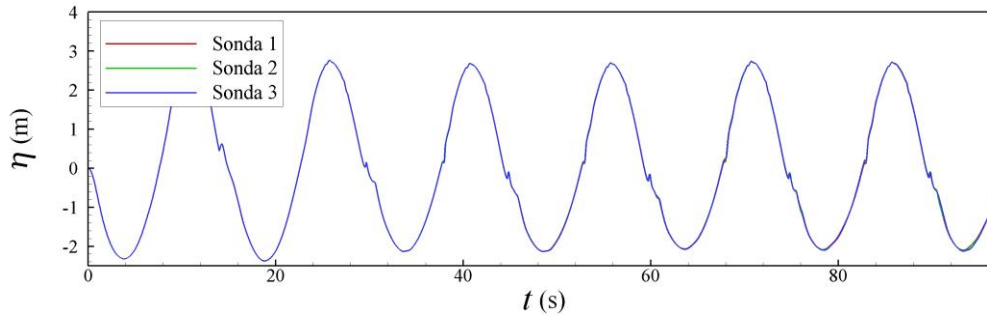
c)

Figura 15 – Malha na ponte-cais e no fundo do tanque e posição da superfície livre ao repouso.

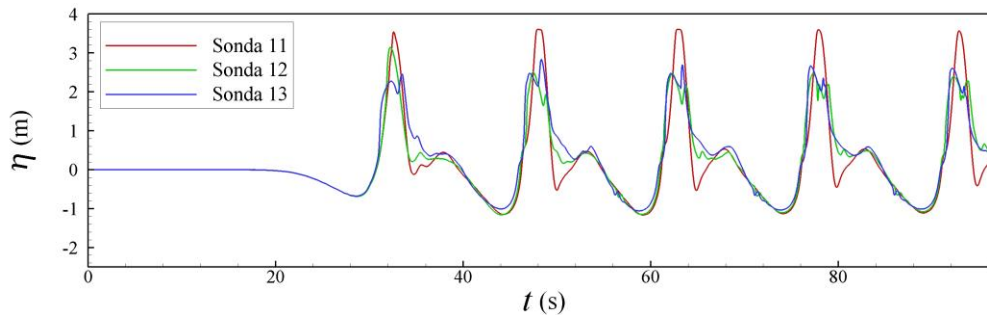
Dos numerosos resultados que podem se obter com o modelo numérico, apresenta-se apenas as séries temporais de elevação da superfície livre perto dos batedores, a deformação da superfície livre nas proximidades da estrutura, o galgamento em cima da laje e as forças nas várias partes da ponte-cais.

As séries temporais de elevação de superfície livre em três sondas igualmente distribuídas em frente a cada um dos dois batedores, no início e no final do tanque, são apresentadas na Figura 16a) e 16b), respetivamente. A análise destas sondas permite verificar que a absorção, quer no início quer no final do tanque, funciona muito bem. Embora se observe que a elevação de superfície livre é bastante perturbada nas sondas localizadas em frente ao batedor localizado no final do tanque, devido á forte interação que ocorre entre a onda incidente e a

ponte-cais, a elevação de superfície livre nas sondas em frente ao batedor no início do tanque apresenta-se muito regular ao longo do tempo, demonstrando que a absorção ativa é eficaz. Esta absorção ativa é indispensável para modelar correctamente a interacção entre a onda incidente e a ponte-cais, assegurando que as características da onda incidente são sempre as mesmas ao longo da simulação.



a) Elevação da superfície livre em três sondas em frente ao batedor no início do tanque.



b) Elevação da superfície livre em três sondas em frente ao batedor no fim do tanque

Figura 16 – Elevação da superfície livre em três sondas em frente aos batedores.

A Figura 17 apresenta uma visualização da deformação da superfície livre resultante da interacção entre a onda incidente e a ponte-cais para dois ângulos de vista e quatro instantes de tempo. A deformação da superfície livre é muito complexa: depois do violento impacto da onda com a viga transversal frontal que se traduz por uma *splash* de grande altura acima da laje 1, a onda “espalha-se” em cima da ponte-cais, produzindo um galgamento importante. A Figura 18 apresenta a série temporal da altura da coluna de água acima e no centro da laje 1 devido ao galgamento, que indica uma altura de 3.0 m no momento do *splash* e 1.3 m logo depois, antes de diminuir.

As forças nas várias partes da ponte-cais podem ser calculadas a partir do campo de pressão. As Figuras 20 e 21 apresentam a força horizontal e a força vertical nos quatro pilares e nos dois conjuntos de lajes (Laje 1 e laje 2) monitorizados, indicados na Figuras 19, respectivamente. Na Figura 20 nota-se que a força horizontal nos pilares 1 e 2 é similar, com uma força horizontal máxima da mesma ordem de grandeza, mas que reduz para os pilares 3 e 4 que se encontram na “sombra” das duas primeiras linhas de pilares que interagem com mais violência com a onda incidente. Assim a força horizontal máxima no pilar 4 é a volta de 35 % inferior à força horizontal máxima no pilar 1. No caso da força vertical (Figura 21), a força máxima que actua na laje 1 e 2 é da ordem de 1400 e 600 kN, o que corresponde a volta de 13 e 9 kN/m².

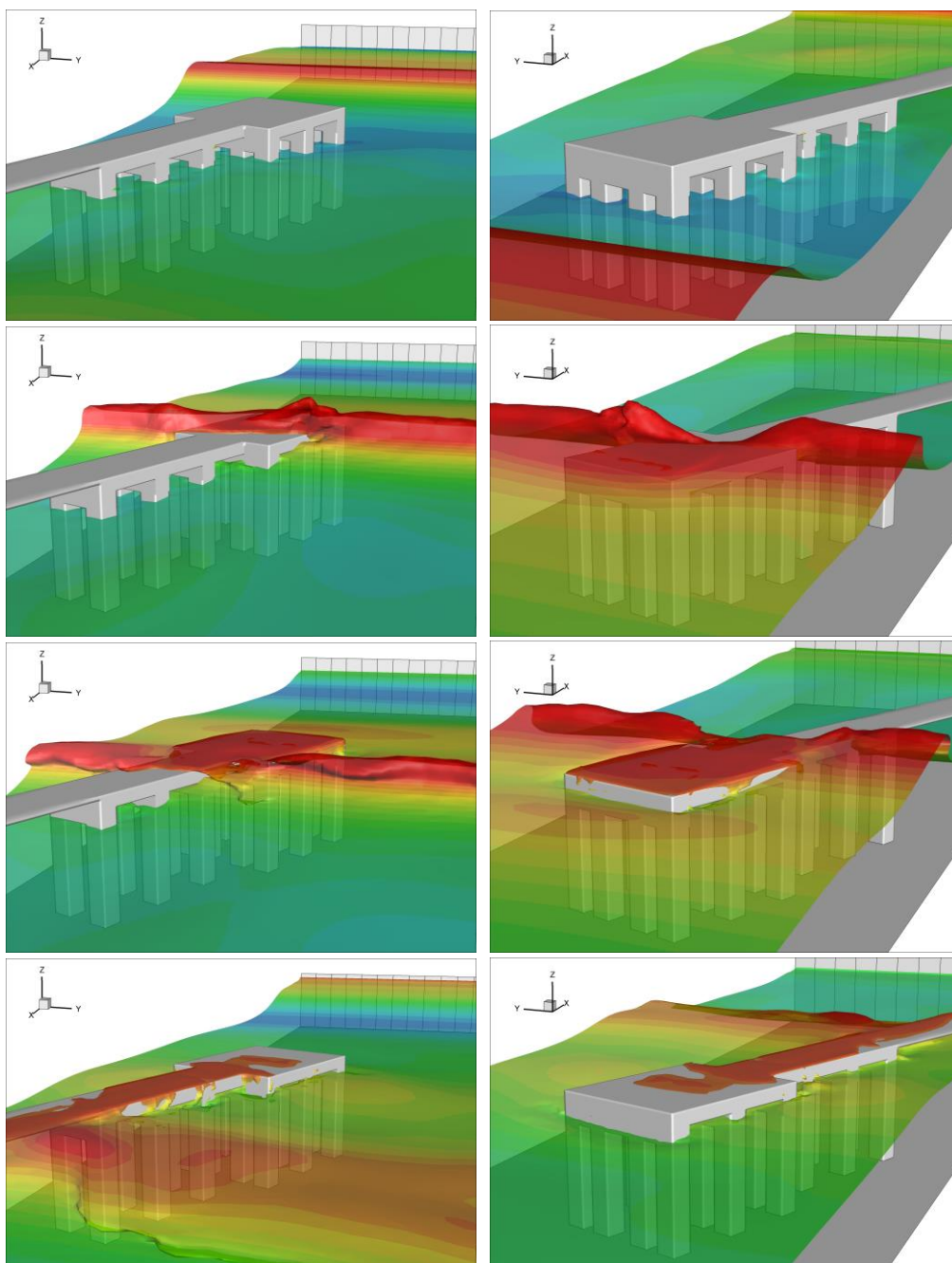


Figura 17 – Deformação da superfície livre resultando da interação da onda incidente com a ponte-cais em 4 instantes de tempo, para dois ângulos de vista: 77.8, 81.6, 82.8 e 85.8 s.

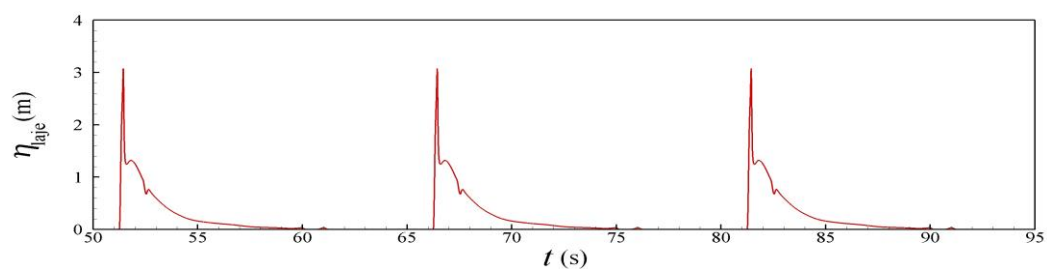


Figura 18 – Altura da coluna de água acima e no centro da laje 1 devido ao galgamento.

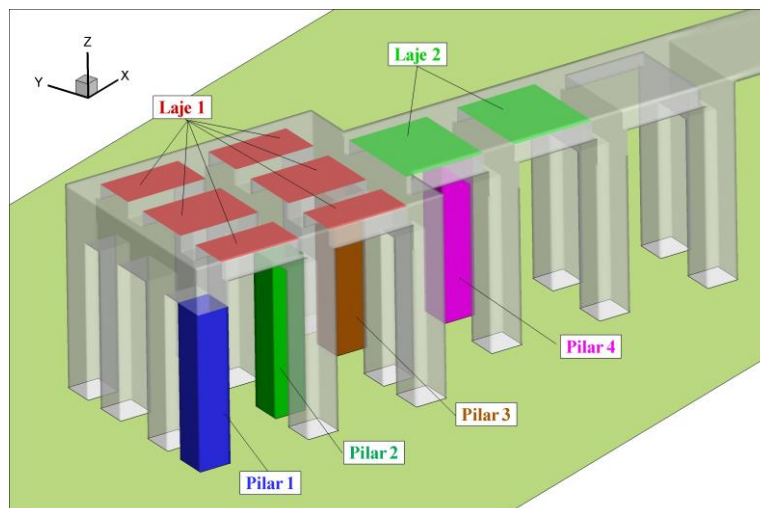


Figura 19 – Identificação das lajes e dos 4 pilares monitorizados.

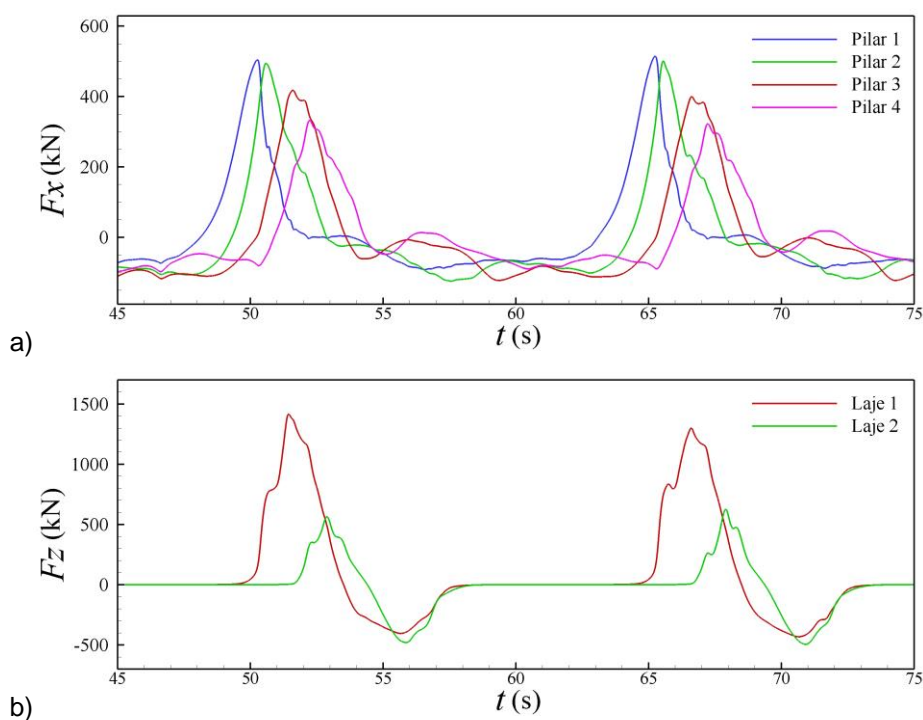


Figura 21 – Série temporal da força horizontal nos 4 pilares monitorizados (a) e da força vertical nas duas lajes (b).

4 CONCLUSÕES

A utilização dos modelos numéricos RANS-VoF (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes Volume-of-Fluid), baseados nas equações de Navier-Stokes e num método de captura de superfície livre, nas aplicações de engenharia costeira e marítima, particularmente na interação onda-estrutura, é atualmente possível graças ao aumento do recurso computacional e as melhorias numéricas, principalmente das condições limites e dos métodos numéricos de captura de superfície livre. No entanto, para a correta utilização destes modelos para projetos de engenharia costeira e portuária é necessário implementar algoritmos específicos nos modelos RANS-VoF que

permitam gerar as ondas através de batedores estáticos ou dinâmicos, integrando absorção activa 3D e usando batedores múltiplos e independentes uns dos outros. Estas ferramentas são indispensáveis e permitem uma melhor representação do campo de ondas, já que as ondas refletidas e difratadas são absorvidas, e, simultaneamente, uma redução da dimensão do domínio computacional, resultando numa diminuição do tempo de cálculo. A dimensão do domínio computacional nestas aplicações é evidentemente dependente do recurso computacional disponível ambos condicionando o tempo de cálculo.

Foi apresentado, nesta comunicação, o modelo numérico 3D URANS-VoF FLUENT® no qual foram implementadas rotinas específicas que permitem modelar um tanque de ondas 3D com geração e absorção ativa de ondas e analisar as interações complexas onda-estrutura que interessam aos projetos de engenharia costeira e portuária. Três casos concretos de diferentes estruturas marítimas foram apresentados, ilustrando as possibilidades de aplicação do modelo numérico a configurações complexas: i) um emissário submarino; ii) um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas; e iii) a cabeça de uma ponte-cais.

Os modelos RANS-VoF mostram a sua fiabilidade e precisão, quando bem utilizados, em múltiplas aplicações e hoje em dia podem ser aplicados para resolver problemas reais de engenharia costeira e portuária e obter muita informação tal como o galgamento das estruturas e as forças nas mesmas, necessárias na fase de dimensionamento destas obras de modo a garantir o seu bom comportamento funcional e estrutural.

5 AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo financiamento concedido no projecto SFRH/BPD/97343/2013 e o apoio financeiro concedido pela Unidade de Investigação e Desenvolvimento em Engenharia Mecânica e Industrial – UNIDEMI – através o projecto UID/EMS/00667/2013.

6 BIBLIOGRAFIA

- Altomare C., Domínguez J.M., Crespo A.J.C., González-Cao J., Suzuki T., Gómez-Gesteira M., Troch P., 2017, Long-crested wave generation and absorption for SPH-based DualSPHysics model. *Coastal Engineering*, Vol. 127, pp. 37-54.
- Didier E., Neves M.G., 2012, A semi-infinite numerical wave flume using Smoothed Particle Hydrodynamics, *IJOPE - International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 22(3), pp. 193-199.
- Didier E., Teixeira P.R.F., Neves M.G., 2016, Tanque de ondas numérico 3D para estudos de engenharia costeira. *Proc. VII SEMENGO 2016 – VII Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica*, Rio Grande, RS, Brasil.
- Didier E., Paixão Conde J.M., Teixeira P.R.F., 2011, Numerical simulation of an oscillation water column wave energy converter with and without damping, *Proc. Fourth International Conference on Computational Methods in Marine Engineering*, Lisbon, Portugal, pp. 206-217.
- Fluent 6.3, 2006, User's Guide, Fluent Inc, USA.
- Higuera P., Lara J.L., Losada I.J., 2013, Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models applications to OpenFoam®, *Coastal Engineering*, Vol. 71, pp.102-118.
- Hirt C.W., Nichols B.D., 1981, Volume of fluid (VoF) method for the dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, pp. 201-225.
- Lara J.L., Ruju A., Losada I.J., 2011, Reynolds averaged Navier-Stokes modelling of long waves induced by transient wave group on a beach, *R. Soc. A.*, Vol. 467, pp.1215-1242.

- Neves M.G., Mendonça A., Didier E., Reis M.T., Inverno J., Figueira P., Afonso M.C., Vílchez M., Clavero M., Ortega-Sánchez M., Losada M., 2014, Experimental study of forces on a submarine outfall: Influence of incident wave direction of stabilizing concrete weights and pipe distance from the bottom. Proc. HYDRALAB IV Joint User Meeting, Lisbon, Portugal.
- Neves M.G., Figueira P., Afonso M.C., Mendonça A., Solis M.V., Didier E., Reis M.T., Clavero M., Ortega-Sánchez M., Losada M.A., 2013, Estudo experimental de forças sobre um emissário submarino: influência da direcção da agitação incidente, da presença dos anéis de estabilização e da distância da conduta ao fundo. Proc. 8as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuaria, eds Delegação Portuguesa da PIANC, Lisboa, Portugal.
- Paixão Conde J.M., Teixeira P.R.F., Didier E., 2011, Numerical simulation of an oscillating water column wave energy converter: Comparison of two numerical codes, Proc. 21th International Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, Estados Unidos, pp. 668-674.
- Peric M., Ferziger J.H., 1997, Computational Methods for Fluid Dynamics, Second edition, Springer.
- Teixeira P.R.F., Davyt D.P., Didier E., Ramalhais R., 2013, Numerical simulation of an oscillating water column device using a code based on Navier-Stokes equations”, Energy, Vol. 61, pp. 513-530.
- Teixeira P.R.F., Didier E., Neves M.G., 2017, A 3D RANS-VOF wave tank for oscillation water column device studies, Proc. VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, MARINE 2017, Nantes, France, pp. 710-720.
- Youngs, D. L., 1982, Time-Dependent Multi-Material Flow with Large Fluid Distortion, In K. W. Morton and M. J. Baines, editors, Numerical Methods for Fluid Dynamics. Academic Press.