

OTIMIZAÇÃO NUMÉRICA DO QUEBRAMAR VERTICAL LOWREB Numerical Optimization of the LOWREB Vertical Breakwater

CRISTINA MOREIRA ⁽¹⁾, FRANCISCO TAVEIRA-PINTO ⁽²⁾ e PAULO ROSA-SANTOS ⁽³⁾

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia Civil, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, ec08345@fe.up.pt

⁽²⁾ Professor Catedrático, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, fpinto@fe.up.pt

⁽³⁾ Professor Auxiliar Convocado, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, pjr Santos@fe.up.pt

Resumo

O presente artigo apresenta o estudo desenvolvido com vista à otimização numérica de uma nova tipologia de quebramar vertical perfurado – o quebramar LOWREB, com uma geometria singular, permitindo que uma parte da energia da agitação marítima incidente na estrutura seja dissipada.

Para estudar a interação das ondas incidentes com a estrutura do quebramar LOWREB, foi usado um modelo numérico de CFD (IHFOAM 2.0), baseado nas equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS). Apesar de se tratar de um modelo numérico já validado para um conjunto de aplicações tipo no domínio da engenharia costeira e portuária, neste trabalho foi inicialmente feita a validação da aplicação do modelo ao caso em estudo, através da comparação dos resultados obtidos numericamente com os resultados experimentais obtidos por Ciocan (2014), com um modelo físico à escala geométrica 1/50. Posteriormente, o modelo numérico foi utilizado na otimização da geometria do quebramar perfurado LOWREB, tendo em vista a melhoria do seu comportamento hidráulico em relação à reflexão.

Em termos qualitativos, verificou-se que o modelo numérico utilizado consegue simular de uma forma muito satisfatória a interação da onda incidente com o quebramar perfurado. Em termos quantitativos, os coeficientes de reflexão estimados numericamente seguem a tendência que foi observada nos testes em modelo físico, apresentando valores próximos, mas inferiores aos experimentais, o que poderá indiciar a existência de uma maior dissipação de energia no modelo numérico. Pôde também concluir-se que a redução da cota de coroamento das câmaras dissipadoras do quebramar LOWREB se traduz numa melhoria do funcionamento global da estrutura, para os vários níveis de maré considerados. Por outro lado, nas situações estudadas, a utilização do modelo de turbulência $k - \varepsilon$ mostrou ser, aparentemente, mais adequada que a utilização do modelo $k - \omega$.

Palavras-chave: Quebramares perfurados, coeficiente de reflexão, dissipação de energia das ondas, CFD, IHFOAM 2.0, OpenFOAM®.

Abstract

The present paper presents the developed study aiming the optimization of a new typology of vertical perforated breakwaters – the LOWREB breakwater. Since it is a vertical breakwater with dissipation chambers, it allows partially dissipating the energy of the incident sea waves.

In order to study the hydrodynamic interaction between the incident waves and the LOWREB vertical breakwater, a CFD (Computational Fluid Dynamics) numerical model was used (IHFOAM 2.0) that is based on the Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) equations. This numerical model was already validated for several typical applications in the domain of coastal and port engineering. Nevertheless, in this work, initially, the numerical modeling results of the LOWREB breakwater were validated by comparison with the observed hydraulic behavior and the obtained experimental results in the physical model study carried out by Ciocan (2014), on a geometric scale of 1/50. Afterwards, a study was conducted to optimize the geometry of the LOWREB breakwater, aiming the improvement of its hydraulic behavior regarding the reflection.

Qualitatively, it was verified that the numerical model can simulate in a very satisfactory way the interaction between the incident waves and the perforated breakwater. In quantitative terms, the numerically assessed reflection coefficients follow the trends observed in the physical model tests, being however smaller than the experimental ones (but close), which suggest the existence of a higher energy dissipation in the numerical model. It was also possible to conclude that the reduction of the crest elevation of the LOWREB dissipation chambers improves the overall performance of the breakwater for the considered tide range. On the other hand, in the studied situations, the use of the $k - \varepsilon$ turbulence model was, apparently, more suitable than the use of $k - \omega$ model.

Keywords: Perforated breakwaters, reflection coefficient, wave energy dissipation, CFD, IHFOAM 2.0, OpenFOAM®.

1. Introdução

As estruturas portuárias são normalmente dimensionadas com base em fórmulas semi-empíricas e na modelação física, requerendo, portanto, a realização de testes experimentais a escala reduzida, muitas vezes dispendiosos e demorados, e passíveis de serem afetados por efeitos de escala e por efeitos de laboratório, que prejudicam a qualidade dos resultados e sua posterior análise.

O avanço científico e tecnológico tem impulsionado o desenvolvimento e a utilização de modelos numéricos avançados, que permitem simular uma grande variedade de processos físicos complexos no domínio da engenharia costeira e portuária, com um nível de detalhe e precisão elevados, e sem os inconvenientes da modelação física. Alguns desses modelos numéricos foram já validados para um amplo conjunto de aplicações no domínio da engenharia costeira e portuária, como por exemplo, o Porto de Laredo (Higuera, 2015).

1.1. O quebramar LOWREB

O quebramar vertical LOWREB foi inicialmente proposto por Pinto (2012) e estudado experimentalmente por Ciocan (2014). A geometria proposta é constituída por uma parede frontal parcialmente perfurada, duas paredes intermédias também parcialmente perfuradas e uma parede posterior impermeável, Figura 1.

Estas paredes limitam as três câmaras dissipadoras que constituem o quebramar, permitindo a entrada da massa de água movimentada pela onda incidente, promovendo a dissipação da sua energia dentro das câmaras.

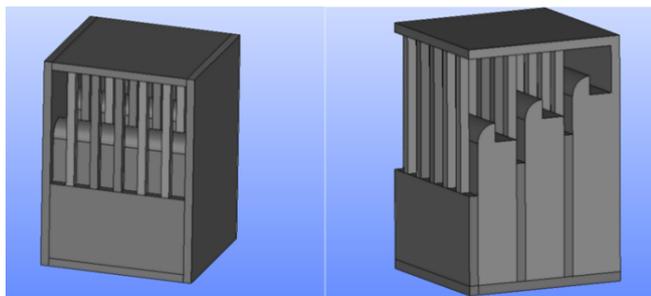


Figura 1. Quebramar vertical LOWREB.

Pinto (2012) propôs a geometria LOWREB tendo em atenção a importância das características de porosidade das paredes perfuradas da estrutura, bem como da extensão das câmaras dissipadoras, na eficiência hidráulica à reflexão da estrutura de acordo com o demonstrado por Li *et al.* (2003) e por Lee e Shin (2014).

Relativamente à escolha do número de câmaras a usar, Pinto (2012) justifica a sua escolha baseando-se na eficiência hidráulica de estruturas com características semelhantes, nomeadamente, a de quebramares construídos no Porto de Torres, em Itália. Recorre, ainda, a conclusões obtidas com base em resultados de testes realizados por Bergmann e Oumeraci (2000) para corroborar a eficácia da utilização de estruturas perfuradas com múltiplas câmaras dissipadoras.

Por seu turno, Ciocan (2014) melhorou a proposta inicial, tendo procedido ao dimensionamento hidráulico - estrutural do quebramar LOWREB, e à análise da sua eficiência hidráulica através de ensaios laboratoriais com três modelos físicos diferentes, testados tanto com agitação regular como irregular, para as condições de baixa-mar e de preia-mar, garantindo uma duração dos ensaios adequada à simulação do comportamento hidráulico da estrutura à reflexão (Figura 2): cerca de 150 ondas nos testes com ondas regulares e aproximadamente 280-300 ondas nos testes com ondas irregulares.

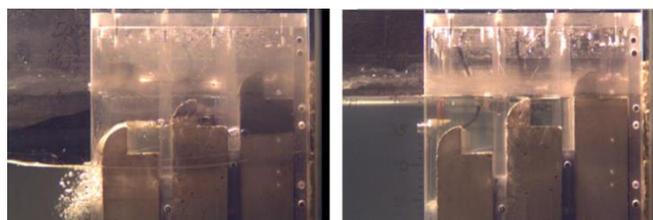


Figura 2. Modelo físico do quebramar LOWREB para a condição de baixa-mar (à esquerda - 0.0m Z.H.) e preia-mar (à direita - 4.0m Z.H.) (Ciocan, 2014).

Com esses modelos, Ciocan (2014) estudou a influência da porosidade das paredes verticais perfuradas no coeficiente de reflexão, para diferentes configurações e espaçamentos entre ranhuras, mantendo fixa a extensão das câmaras dissipadoras, comprovando a importância da porosidade no comportamento hidráulico do quebramar LOWREB.

Apesar de Ciocan (2014) ter analisado a influência da porosidade das paredes do quebramar no coeficiente de reflexão para três modelos diferentes, neste estudo apenas foi analisada a geometria correspondente a um desses modelos, com ondas regulares. Importa acrescentar que o estudo experimental mostrou que as diferenças entre os três modelos testados eram pequenas (Ciocan, 2014).

Ciocan (2014) comparou, também, os valores do coeficiente de reflexão, C_R , obtidos para os dois níveis de maré testados e a eficiência hidráulica do quebramar LOWREB com a de uma estrutura impermeável.

1.2. Conclusões da modelação física

O modelo do quebramar de paramento frontal impermeável apresentou valores médios, para o coeficiente de reflexão, compreendidos entre 0.87 e 0.93. Ciocan (2014) justificou a discrepância dos valores obtidos em relação à unidade e aos valores típicos, 0.9 e 1.0 (Goda, 1985), com a existência de perdas de energia nas paredes laterais do canal de ondas, possíveis galgamentos e rebentação das ondas incidentes, devido à consideração de condições de agitação energéticas nos ensaios realizados.

Para condições de agitação regular, o quebramar LOWREB apresentou coeficientes de reflexão compreendidos entre 0.60 e 0.85, para o nível de baixa-mar, e entre 0.50 e 0.80 para o nível de preia-mar. A eficiência hidráulica à reflexão foi maior para os menores períodos de onda, tal como seria de esperar.

2. Modelação Numérica do Quebramar LOWREB

2.1. Modelo numérico IHFOAM 2.0

Para estudar e otimizar o quebramar vertical LOWREB foi aplicado o modelo numérico open source IHFOAM 2.0, desenvolvido para simular a interação da agitação marítima com estruturas costeiras e portuárias. Trata-se de um modelo numérico de CFD (Computational Fluid Dynamics), desenvolvido com base no OpenFOAM® (Open source Field Operation And Manipulation) e de aplicação genérica (Higuera *et al.*, 2015).

O modelo IHFOAM 2.0, desenvolvido usando C++, resolve problemas complexos através da geração de malhas com o domínio pretendido, definição dos parâmetros hidráulicos necessários à simulação, decomposição do processamento e cálculo e pós-processamento dos resultados.

Uma das grandes vantagens do OpenFOAM® é possibilitar o uso de softwares auxiliares à modelação numérica, como é o caso do Salome, do Helyx - OS e do Kitware ParaView. Os dois primeiros utilizados na geração e no refinamento da malha e o último na análise, visualização e extrapolação de resultados.

2.2. Preparação das simulações numéricas

2.2.1. Características computacionais

As simulações numéricas foram realizadas usando o sistema operativo *Linux - Ubuntu*, disponibilizado pela FEUP, versão 12.04, OpenFOAM® 2.2.2 e IHFOAM 2.0. O cálculo computacional foi realizado com recurso à Grid da FEUP, uma rede de computação de alta performance. Nos cálculos realizados foram usados 12 núcleos de cálculo.

2.2.2. Metodologia

A simulação numérica requereu uma preparação adequada, envolvendo a análise do problema e definição dos objetivos pretendidos. A estratégia de preparação da simulação e as ferramentas computacionais usadas no desenvolvimento do trabalho encontram-se discriminadas na Figura 3.



Figura 3. Metodologia usada.

Para definir a estrutura, e como complemento à ferramenta snappyHexMesh, foi necessário recorrer a dois programas auxiliares, o Salome e o Helyx-OS.

O primeiro foi utilizado para gerar o ficheiro “.stl” que permite definir o contorno do modelo numérico do quebramar LOWREB e o segundo, o Helyx-OS, para validação do primeiro.

2.2.3. Simplificações adotadas

Optou-se por reproduzir o quebramar vertical LOWREB no modelo numérico à escala do modelo físico (escala 1:50), de forma a replicar, o melhor possível, as condições simuladas em laboratório por Ciocan (2014), e evitar ainda a influência negativa de eventuais efeitos de escala na transposição dos valores experimentais para valores no protótipo.

Por outro lado, é possível fazer uma comparação direta de resultados entre os modelos numérico e físico. No entanto, foi necessário introduzir algumas simplificações, nomeadamente, encurtar a distância entre o local de posicionamento do modelo físico e o gerador de ondas, de forma a reduzir as dimensões da malha, não descuidando, porém, a adoção de uma distância adequada para a avaliação do coeficiente de reflexão da estrutura, que foi assegurada pela consideração de cerca de 3.5 comprimentos de onda entre a estrutura e a fronteira de geração.

Outra das simplificações, relativamente ao modelo físico, consistiu na definição de um modelo numérico de menores dimensões, na direção transversal, y , reduzindo, desta forma, o número total de células da malha e tornando o cálculo numérico mais leve e rápido. A Figura 4 apresenta a construção do modelo numérico do quebramar LOWREB e as suas componentes.

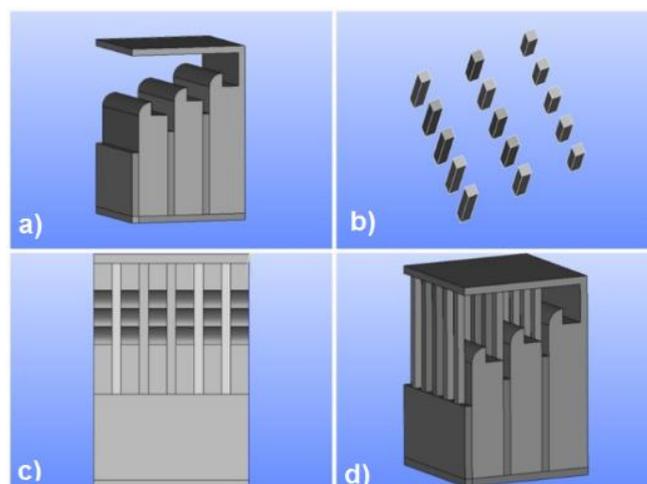


Figura 4. Construção do modelo numérico do quebramar LOWREB: a) modelo do quebramar LOWREB sem os pilares; b) disposição dos pilares; c) modelo numérico do quebramar LOWREB com os pilares, vista da zona de interação com a agitação marítima; d) modelo numérico do quebramar LOWREB com os pilares, em perspetiva.

2.2.4. Cenários

A interação das ondas com o quebramar LOWREB, em 2D, pode ser analisada considerando dois cenários extremos: a onda não encontra o pilar, passando para as sucessivas câmaras dissipadoras, ou a onda encontra o pilar que atua como obstáculo à sua propagação, com um funcionamento idêntico ao de um quebramar vertical impermeável. Essas duas possibilidades estão representadas na Figura 5.

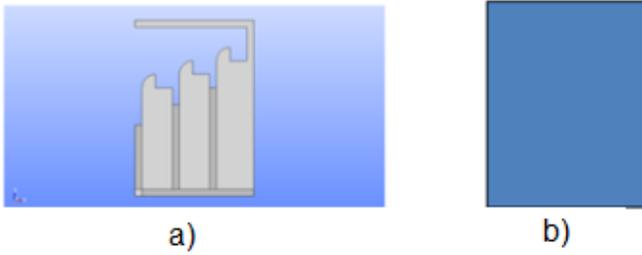


Figura 5. Cenários 2D analisados: a) quebramar LOWREB; b) quebramar impermeável.

2.2.5. Geração e refinamento da malha

A qualidade da malha gerada é crucial para a obtenção de bons resultados. É importante possuir uma malha com boa qualidade, no entanto, é preciso encontrar uma solução de compromisso, uma vez que, quanto maior for o refinamento da malha mais pesado será o cálculo numérico. Após várias tentativas, e tendo em conta a bibliografia da especialidade, definiu-se uma malha base com as características apresentadas no Quadro 1, em que d_x , d_y e d_z representam as dimensões do domínio físico reproduzido numericamente, N_x , N_y e N_z o número de células em cada direção da malha gerada, δ_i o espaçamento das células na direção i , δ_x/L o número de células por comprimento de onda, L e δ_z/H o número de células por altura de onda, H .

Quadro 1. Características da malha gerada.

Domínio da malha 2D base			
dx	dy	dz	
9.86 m	0.33 m	0.86 m	
Número de células, em cada direção, da malha 2D base			
N_x	N_y	N_z	Número de células
600	1	120	72000
Parâmetros de refinamento para $L = 2.97m$ e $H = 0.08m$, valores no modelo			
Zonas comuns			
$\delta_x = 0.016$	$\delta_z = 0.007$	$\delta_x/L = 181$	$\delta_x/H = 11$
Zonas com refinamento localizado			
$\delta_x = 0.0082$	$\delta_z = 0.0036$	$\delta_x/L = 361$	$\delta_x/H = 22$

O Quadro 2 apresenta também alguns valores de referência dos parâmetros caracterizadores da malha encontrados na literatura.

Quadro 2. Valores de referência.

Valores de Referência				
	(Vanneste e Troch, 2015)	(Lara <i>et al.</i> , 2012)	(Lara <i>et al.</i> , 2013)	(Higuera <i>et al.</i> , 2015)
δ_x/L	50 – 100	71	215	116 – 175
δ_x/H	20	12	20	6 – 12

A geração de uma malha equilibrada, com uma qualidade adequada, é um processo iterativo que requer algum tempo.

É importante garantir a qualidade da malha (i.e., um grau de refinamento adequado) para assegurar a correta simulação da interação entre o escoamento e a estrutura, mas também quanto à sua consistência, assegurando a inexistência de problemas. A malha base foi gerada usando o blockMesh, um gerador de malhas do OpenFOAM®, com as características apresentadas no Quadro 1. Posteriormente optou-se por refinar zonas localizadas, isto é, zonas onde seria necessário uma malha mais refinada, como é o caso da superfície livre, na zona onde se pretendia instalar as sondas virtuais para a realização de medições da elevação da superfície livre, para validação do modelo numérico, e também na aproximação à estrutura, usando o setSet e o refineMesh, técnicas de seleção de células e de refinamento do OpenFOAM®. O refinamento localizado foi utilizado com o objetivo de melhorar a qualidade da malha apenas nos locais onde existe necessidade de um refinamento maior, permitindo, assim, cumprir este requisito sem tornar o cálculo numérico excessivamente pesado e demorado. Posteriormente usou-se o snappyHexMesh (SHM) para definir e refinar o contorno da estrutura, com um refinamento de nível 3, Figura 6.

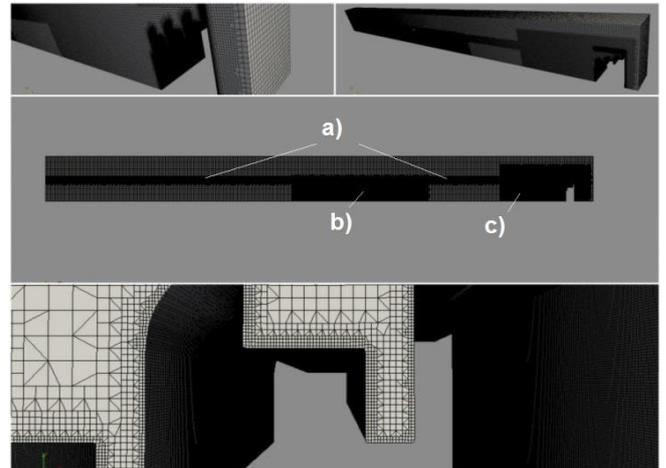


Figura 6. Pormenores da malha refinada com o *snappyHexMesh* e com refinamento localizado: (a) - Refinamento dos limites da superfície livre; (b) - Refinamento da zona onde as sondas virtuais, GaugeVOF, foram posicionadas; c) - Refinamento da zona de interação da agitação marítima com a estrutura LOWREB.

O IHFOAM foi desenvolvido de forma a permitir também a realização de modelação numérica 3D. No caso em estudo, para realizar uma análise 2D, mais “leve” em termos de requisitos de cálculo, executou-se o comando extrudeMesh que permite converter a malha 3D para 2D. Desta forma, foi possível modelar o caso de estudo (o quebramar LOWREB) com tempos de processamento de, aproximadamente, 24 h, utilizando 12 núcleos de cálculo, obtendo-se resultados para cerca de 60-80s dependendo das características da simulação.

2.2.6. Condições base e condições fronteira

A definição das condições base parte da caracterização dos parâmetros necessários à simulação do escoamento turbulento, isto é, escolha do modelo de turbulência e da preparação dos respetivos ficheiros. Nas simulações realizadas foram adotados dois modelos de turbulência diferentes, kEpsilon e kOmega, definidos de acordo com as recomendações especificadas em IHCantabria (2014), Figura 7.

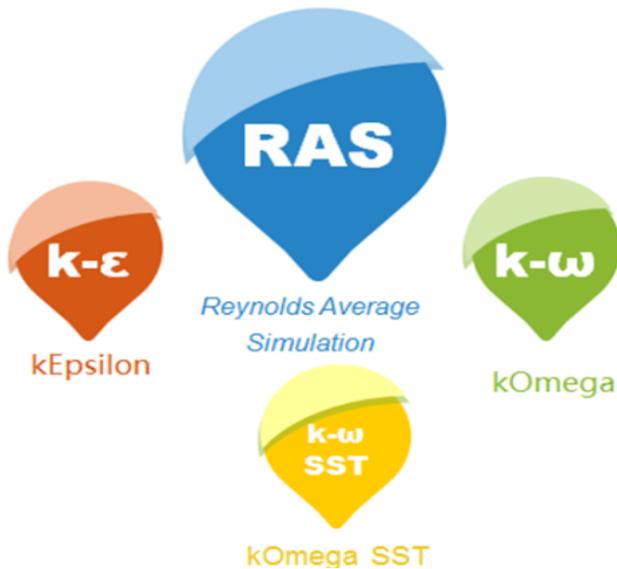


Figura 7. Modelos de turbulência disponíveis para o RAS (RANS).

A definição das características da(s) onda(s) a gerar é feita através do ficheiro IHWavesDict, consoante a teoria de onda, selecionada de acordo com as características da(s) onda(s) e a profundidade de água local, sendo importante que a teoria de geração escolhida seja representativa da realidade.

O ficheiro setFieldsDict define as fronteiras dos fluídos, controlados pela função VoF alpha1, definida nas condições fronteira. As fronteiras serão concretizadas pela definição dos limites (mínimo e máximo) do fluido. Geralmente definem-se as coordenadas do fluido “água” (alpha1 = 1.0), ficando as células do contorno interior definido preenchidas por água. As restantes células do contorno exterior ficam, por exclusão de partes, preenchidas por “ar” (alpha1 = 0), usando o método VoF, o IHFOAM 2.0 descreverá a interface entre os dois fluidos, definindo a superfície livre.

2.3. Interação da agitação marítima com o quebramar LOWREB

A análise da interação da agitação marítima com as estruturas costeiras e portuárias é essencial para o seu dimensionamento uma vez que os fenómenos resultantes dessa interação podem condicionar o seu funcionamento hidráulico. Dadas as características do quebramar LOWREB, essa análise foi centrada, essencialmente, na reflexão e na transmissão, por galgamento, da estrutura.

Assim, numa primeira fase, simulou-se a estrutura LOWREB submetida às condições de agitação marítima definidas no Quadro 3.

Quadro 3. Condições de agitação marítima testadas, valores em modelo (escala 1:50).

Agitação Regular		
d (m)	0.40 (nível de PM)	0.32 (nível de BM)
H (m)	0.08	
T (s)	1.66	
Teoria de onda	Stokes II	

Considerou-se, aproximadamente, uma distância de 1.5 comprimentos de onda entre a estrutura e a fronteira de geração, e uma malha de maior qualidade, em relação à malha com as características apresentadas no Quadro 1, mas sem qualquer refinamento localizado, Quadro 4, para as condições do Quadro 3. Como se pretende, apenas, visualizar a interação “onda - estrutura”, a distância da estrutura à fronteira de geração não é tão importante como nas situações em que se pretende realizar uma análise da reflexão.

Assim, nesta fase, essa distância foi menor de forma a possibilitar uma visualização mais detalhada da interação do escoamento com o quebramar LOWREB, assegurando, porém, uma distância adequada para a onda se poder adaptar ao fundo.

Quadro 4. Características da malha base gerada para análise da interação das ondas com a estrutura (valores no protótipo).

dx	5.0 m
dy	0.33 m
dz	0.86 m
N_x	1200
N_y	1
N_z	240
Número de células	288000

Comparando os resultados da modelação numérica com os resultados da modelação física, é possível validar o modelo numérico no que concerne à interação da agitação marítima com o quebramar LOWREB, mas só em termos qualitativos, Figura 8.

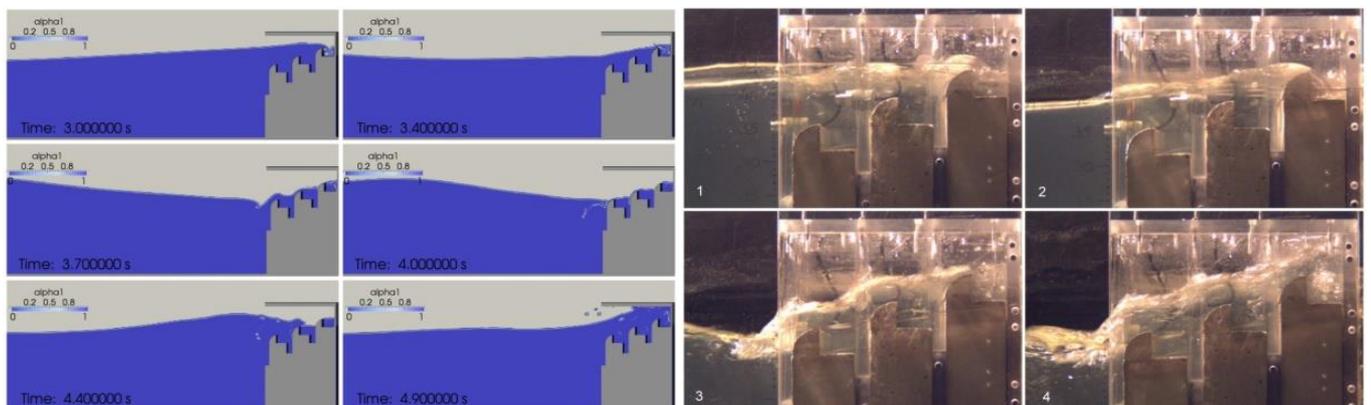


Figura 8. À esquerda: Interação da agitação marítima com a estrutura LOWREB localizada a 1.5 comprimentos de onda da fronteira geradora, para $H = 0.08m, T = 1.66s$ e nível de preia-mar, no modelo numérico (imagem da esquerda); À direita: modelação física do quebramar, para condições de preia-mar e $H = 0.11m$ e $T = 1.41s$, Ciocan (2014).

2.4. Análise da reflexão

A análise da reflexão da estrutura é de extrema importância para verificar a sua viabilidade, principalmente porque se trata de um quebramar vertical, habitualmente caracterizado por um comportamento bastante refletor. O quebramar LOWREB pretende minimizar esse fenómeno, tornando a análise da reflexão e a validação dos resultados ainda mais pertinente. Primeiramente analisou-se a reflexão do modelo LOWREB quando sujeito às condições de agitação marítima descritas no Quadro 3. Posteriormente, para validação dos resultados do modelo numérico, as condições de teste consideradas na simulação numérica foram aproximadas às utilizadas no estudo experimental realizado por Ciocan (2014), Quadro 5. Neste trabalho foi usada a teoria de onda de Stokes de 5ª ordem tendo em consideração a profundidade de água, a altura e o período de onda a simular.

Quadro 5. Condições de agitação marítima testadas na análise da reflexão, valores em modelo (escala 1:50) e protótipo.

Agitação Regular		
	Modelo	Protótipo
d (m)	0.40 (nível de PM)	20
	0.32 (nível de BM)	16
H (m)	0.11	5.5
T (s)	1.41	10
	2.55	18
<i>Teoria de onda</i>	<i>Stokes V</i>	

A Figura 9 apresenta o esquema do domínio utilizado na modelação numérica do quebramar LOWREB e tenta reproduzir, o mais possível, as condições adotadas em laboratório por Ciocan (2014). A estrutura do quebramar LOWREB foi colocada a 9.50 m do gerador de ondas, testando-a para dois diferentes níveis: baixa-mar e preia-mar.

As sondas virtuais de níveis hidrodinâmicos, GaugeVOF, foram instaladas nas mesmas condições que tinham sido consideradas no modelo físico (Ciocan, 2014), isto é, à mesma distância da fronteira geradora, de forma a viabilizar a comparação entre resultados: modelo físico versus modelo numérico.

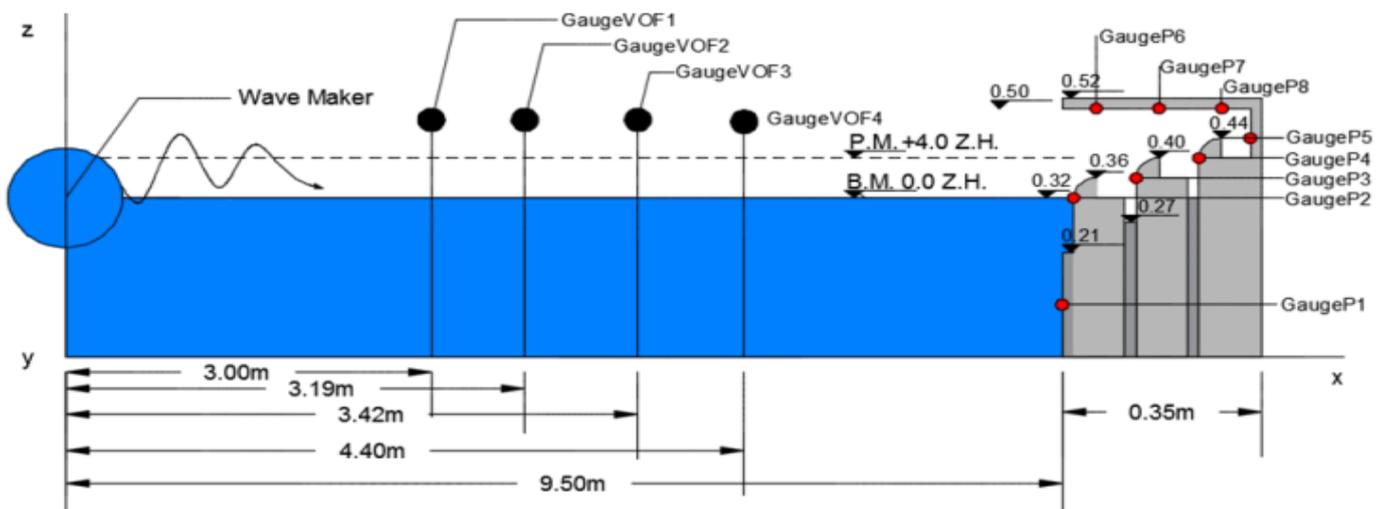


Figura 9. Esquema do domínio simulado no modelo numérico, com as características da malha apresentadas no Quadro 4.

Posteriormente, foram colocadas sondas para medição da pressão a atuar sobre o quebramar LOWREB ao longo do tempo, *GaugePi*. Contudo, e uma vez que não foi possível validar estes resultados, por não terem sido alvo de estudo em laboratório, não serão alvo de análise.

Os registos de elevação da superfície livre da água obtidos pelas sondas virtuais foram analisados com uma rotina escrita em MatLab, que utiliza o método de Baldock e Simmonds (1999), baseado no método de Frigaard e Brorsen (1995), mas tendo em conta o empolamento das ondas na sua propagação em direção à costa/estrutura. Esta rotina permite separar as ondas incidentes das ondas refletidas, estimar o coeficiente de reflexão, a altura de onda incidente e a altura de onda refletida, e obter a série temporal de elevação da superfície livre correspondente à componente incidente e à componente refletida.

A Figura 10 apresenta para um teste, e como exemplo, as séries temporais de elevação da superfície livre da água medidas nas 4 sondas virtuais e os resultados da análise da reflexão: componente incidente e refletida pela estrutura.

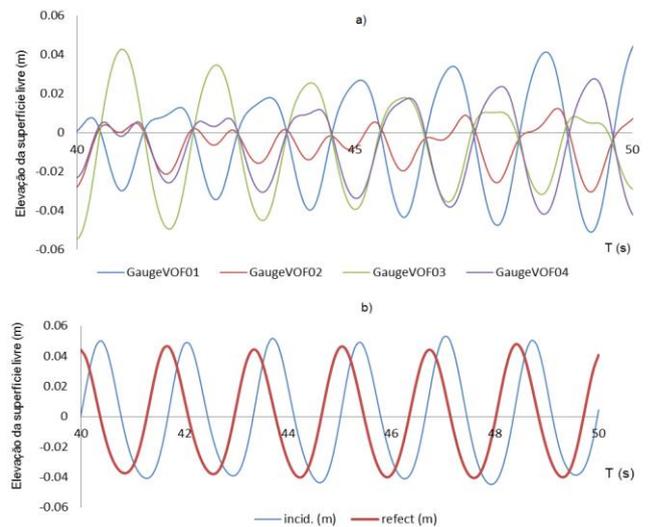


Figura 10. Séries temporais de elevação da superfície livre da água medidas nas 4 sondas virtuais (a) e resultado da análise da reflexão (b): componente incidente e refletida pela estrutura. Quebramar vertical impermeável, condições de preia-mar, $H=0.08m$, $T=1.66s$ e modelo de turbulência $k-\epsilon$.

2.5. Quebramar LOWREB versus quebramar vertical impermeável

Comparando o comportamento hidráulico, à reflexão, do quebramar LOWREB com o quebramar impermeável, pode comprovar-se a eficiência hidráulica do primeiro, quanto à dissipação da energia da agitação marítima, Figura 11. Com efeito, obtiveram-se coeficientes de reflexão menores para o quebramar LOWREB, principalmente para o nível de preia-mar. De salientar, ainda, a coerência dos resultados obtidos face aos valores esperados, em especial no que concerne ao coeficiente de reflexão do quebramar impermeável, que está próximo da unidade.

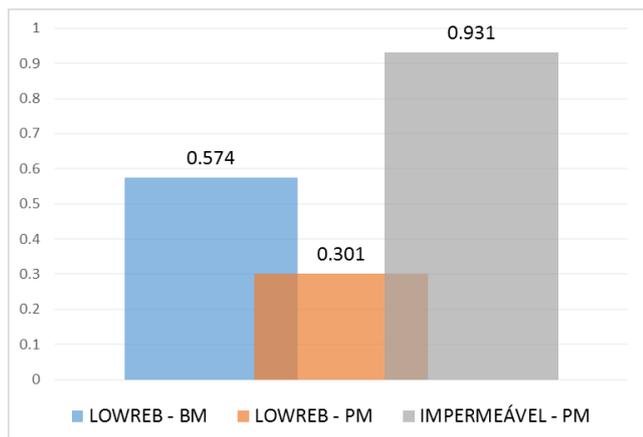


Figura 11. Comparação dos coeficientes de reflexão obtidos para o quebramar LOWREB e os dois níveis de água testados, baixa-mar (BM) e preia-mar (PM), com o obtido para o quebramar vertical impermeável, para $H = 0.08m$, $T = 1.66s$ e $k - \epsilon$ e preia-mar (PM).

De facto, pode verificar-se, por análise da série temporal da elevação da superfície livre da água referente à componente refletida, para o quebramar LOWREB e para os dois níveis de água estudados, que para a baixa-mar, as alturas de onda refletidas são superiores às ocorridas para o nível de preia-mar, Figura 12.

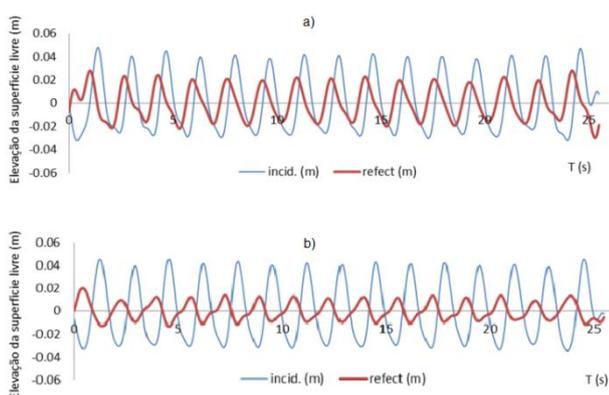


Figura 12. Separação da onda incidente da onda refletida ao longo do tempo, no quebramar LOWREB, para $H = 0.08m$, $T = 1.66s$, $k - \epsilon$: a) condições de baixa-mar; b) condições de preia-mar.

Para o quebramar vertical impermeável, e tal como seria de esperar, obtiveram-se alturas de onda refletidas ainda mais elevadas, e próximas das alturas de onda incidentes, Figura 10, o que está em consonância com o coeficiente de reflexão obtido, próximo do valor teórico, unitário, expectável para este tipo de estruturas.

Em relação à influência do período de onda no coeficiente de reflexão, Ciocan (2014) concluiu que este diminuía com a redução do período de onda, mantendo-se inalteradas as restantes condições de teste. Esta tendência de variação foi também observada nos resultados obtidos com o modelo numérico do quebramar LOWREB, Figura 13.



Figura 13. Comparação dos coeficientes de reflexão obtidos para o quebramar LOWREB, considerando dois períodos de onda diferentes, mantendo as restantes condições de simulação, isto é, nível de preia-mar para $H=0.11m$ e $k - \epsilon$.

2.6. Influência do modelo de turbulência

De forma a analisar a influência do modelo de turbulência adotado nos resultados do IHFOAM 2.0, foram simuladas as mesmas condições usando dois modelos de turbulência distintos, o $k - \epsilon$ e o $k - \omega$.

Verificou-se que, com o modelo $k - \omega$, o coeficiente de reflexão da estrutura era menor, o que poderá indicar a existência de uma maior dissipação da energia da onda, quer na sua propagação, quer na interação com a estrutura, traduzida pela redução da altura de onda refletida, Figuras 14, 15 e 16.

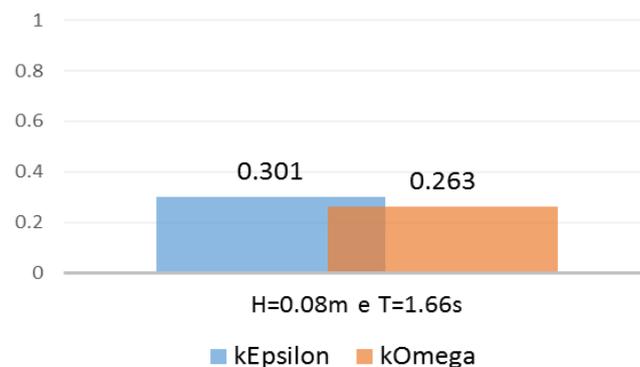


Figura 14. Comparação dos coeficientes de reflexão obtidos para o quebramar LOWREB, considerando dois modelos de turbulência, kEpsilon ($k - \epsilon$) e kOmega ($k - \omega$), para o nível de preia-mar e $H = 0.08m$ e $T = 1.66s$.

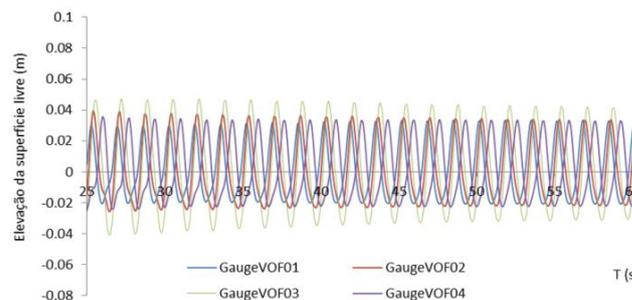


Figura 15. Elevação da superfície livre ao longo do tempo, medida nas quatro sondas virtuais, GaugeVOF, no quebramar LOWREB, para condições de preia-mar e $H = 0.08m$, $T = 1.66s$ e $k - \epsilon$.

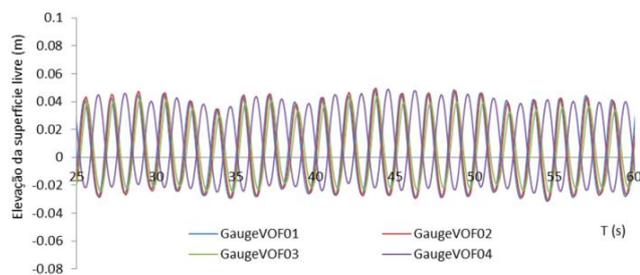


Figura 16. Elevação da superfície livre ao longo do tempo, medida nas quatro sondas virtuais, GaugeVOF, no quebramar LOWREB, para condições de preia-mar e $H=0.08m$, $T=1.66s$ e $k-\omega$

De salientar, porém, que a elevação da superfície livre da água registada pelas sondas virtuais apresenta para esse caso um comportamento mais irregular, Figura 16, quando comparada com a elevação da superfície livre obtida usando o modelo de turbulência $k-\epsilon$, Figura 15.

Assim, pela regularidade dos resultados e pelos valores do coeficiente de reflexão obtidos, o modelo de turbulência $k-\epsilon$ parece ser o mais apropriado para o tipo de aplicação em estudo.

2.7. Modelo físico vs modelo numérico

Comparando os valores do coeficiente de reflexão obtidos na modelação numérica do quebramar LOWREB, com os valores obtidos na modelação física, verificou-se que o uso do modelo de turbulência $k-\epsilon$ permite obter resultados mais próximos dos resultados obtidos experimentalmente por Ciocan (2014). Tal pode ser justificado pelos limites de aplicabilidade de cada um dos métodos de simulação da turbulência, Figura 17.

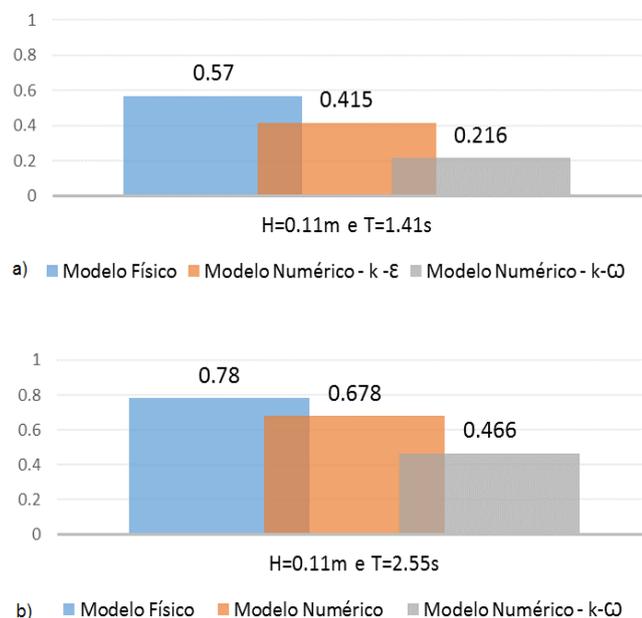


Figura 17. Comparação dos coeficientes de reflexão obtidos para o quebramar LOWREB, no modelo físico e no modelo numérico, para o nível de preia-mar, usando o modelo de turbulência $k-\epsilon$ e o modelo de turbulência $k-\omega$ para: a) $H = 0.11m$ e $T = 1.41s$ e b) $H = 0.11m$ e $T = 2.55s$.

Se tivesse sido utilizado o modelo $k-\omega$ SST na modelação numérica do quebramar LOWREB, os resultados obtidos seriam, provavelmente, mais próximos dos experimentais.

Contudo, acredita-se que a discrepância entre os valores do coeficiente de reflexão obtidos experimentalmente e por via numérica se deva, essencialmente, ao facto de se ter criado um modelo numérico 2D da estrutura que não considera o efeito refletor dos pilares frontais, o qual foi, naturalmente, tido em conta na modelação física.

2.8. Análise dos campos de velocidade

Analisando o comportamento da estrutura LOWREB para as condições apresentadas nos Quadros 3 e 4 pode verificar-se a ocorrência de velocidades maiores, tanto na zona frontal à estrutura, como na interação das ondas com o quebramar, principalmente na passagem do escoamento pelas cristas dos descarregadores, para os dois níveis de maré, Figura 18.

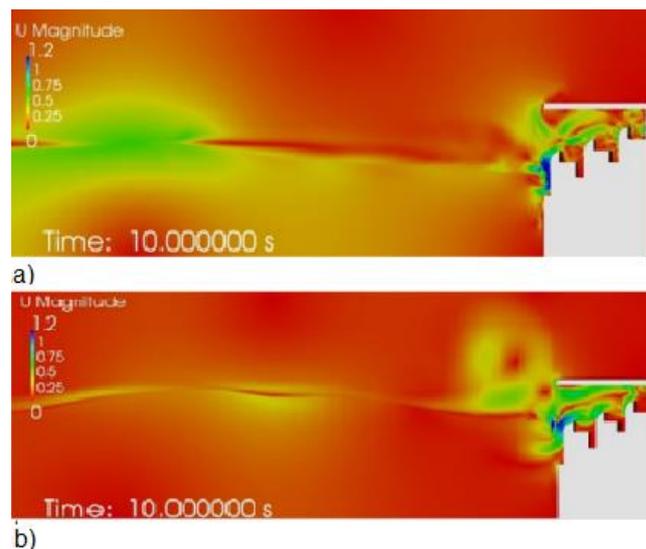


Figura 18. Variação da velocidade do escoamento na proximidade do quebramar LOWREB para $H = 0.08m$, $T = 1.66s$ e modelo de turbulência $k-\epsilon$: a) baixa-mar; b) preia-mar.

Verifica-se também, como seria de esperar, velocidades maiores na aproximação à estrutura do quebramar para o nível de preia-mar. De referir que os gráficos relativos aos campos de velocidade do escoamento apresentam a velocidade para os dois fluidos em estudo, isto é, o ar e a água. O erro associado à não consideração da compressibilidade do ar no modelo numérico é, previsivelmente, de pequena magnitude, particularmente para os níveis de água mais baixos, pois a entrada e a saída do ar das câmaras dissipadoras ocorre com relativa facilidade. Por outro lado, como no modelo numérico se reproduziram as dimensões do modelo físico e não do protótipo, o ar deverá comportar-se, maioritariamente, como incompressível, atendendo aos valores esperados para o número de Mach (Iturrioz *et al.*, 2015).

A Figura 19 apresenta uma comparação qualitativa da variação da velocidade do escoamento entre o modelo físico e o modelo numérico para dois níveis de água diferentes.

Na Figura 19a) a altura de onda considerada no modelo numérico não é igual à considerada no modelo físico, como acontece na Figura 19b), porque os vídeos da modelação física foram disponibilizados numa fase em que a modelação numérica já tinha sido realizada, não tendo existido tempo, quando detetada esta discrepância, para realizar novos testes para os dois níveis de água.

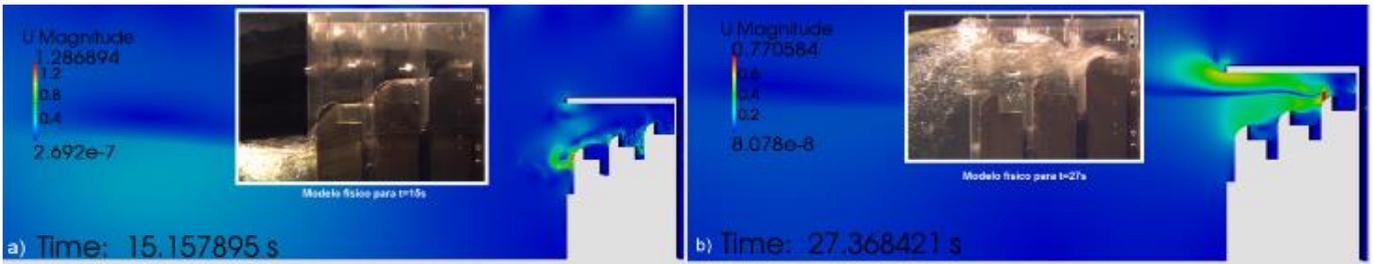


Figura 19. Comparação qualitativa da variação da velocidade do escoamento para: (a) o nível de baixa-mar entre o modelo numérico, para $H=0.11m$ e $T=2.55s$, e o modelo físico, para $H=0.14m$ e $T=2.55s$; (b) o nível de preia-mar entre o modelo numérico e o modelo físico, para $H=0.11m$ e $T=1.41s$.

3. Otimização do Quebramar LOWREB

3.1. Alteração da geometria

Posteriormente, foi realizado um estudo da geometria do quebramar LOWREB tendo em vista a melhoria/otimização do seu comportamento hidráulico em relação à reflexão da agitação, para um intervalo típico de variação do nível de maré na costa oeste portuguesa. Procurou-se encontrar uma solução de compromisso, ou seja, uma configuração que permitisse melhorar a reduzida capacidade de dissipação de energia observada para o nível de baixa-mar, sem, no entanto, prejudicar significativamente o comportamento da estrutura para o nível de preia-mar. Assim, foi testada uma nova geometria, obtida a partir da inicial, através de uma redução de 2 m da cota de coroamento dos descarregadores associados às três câmaras de dissipação, Figura 20.

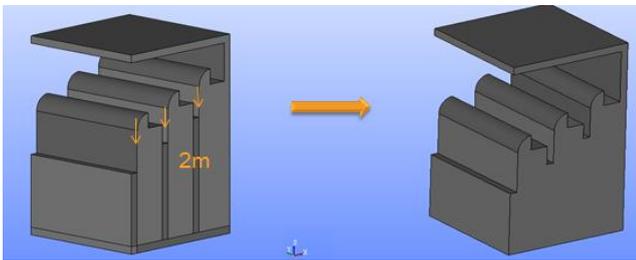


Figura 20. Alteração proposta da geometria do quebramar LOWREB.

3.2. Coeficiente de reflexão

A modificação de geometria proposta permitiu melhorar o comportamento do quebramar LOWREB para o nível de baixa-mar, piorando ligeiramente, e como seria de esperar, o seu desempenho hidráulico para a preia-mar, Figura 21.

O coeficiente de reflexão obtido para o nível médio da água do mar foi muito satisfatório, Figura 22. Uma vez que o nível de baixa-mar e o de preia-mar constituem níveis extremos, conclui-se que a solução proposta cumpre o seu propósito, apresentando, globalmente, melhor desempenho hidráulico que a inicial. No entanto, outras alterações podem também ser observadas tendo em conta o equilíbrio registado entre o coeficiente de reflexão para o nível de baixa-mar e de preia-mar, verificando-se que o primeiro diminui ligeiramente enquanto o segundo aumenta também ligeiramente. Seria ainda interessante avaliar o comportamento hidráulico à reflexão para outras alterações à geometria inicialmente proposta, como por exemplo, considerar as cristas dos descarregadores com cotas diferentes, isto é, com variações de cota diferentes entre si.

Seria, ainda, importante avaliar o desempenho do modelo LOWREB consoante a variação do comprimento relativo das câmaras dissipadoras.

Por falta de tempo não foi possível estudar o comportamento do quebramar LOWREB para estas geometrias alternativas pelo que deverão ser consideradas em desenvolvimentos futuros.

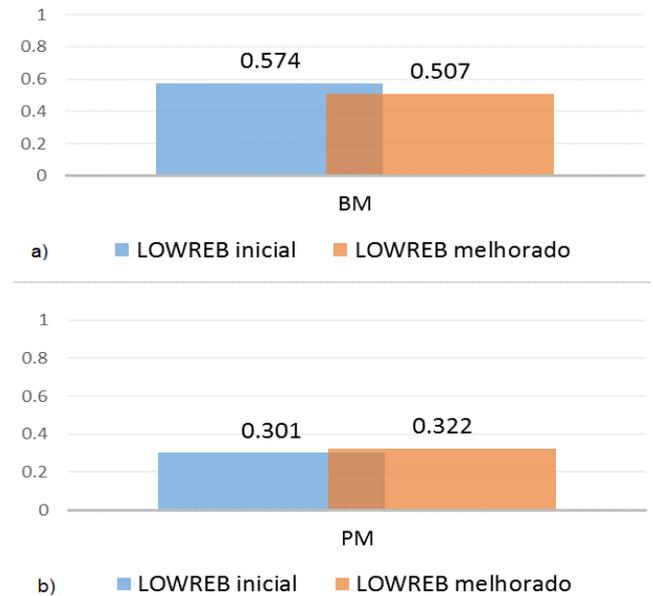


Figura 21. Comparação entre os coeficientes de reflexão obtidos para o quebramar LOWREB, antes e depois de melhorado, para $H=0.08m$ e $T=1.66s$, usando o modelo de turbulência $k-\epsilon$: a) no nível de baixa-mar; b) no nível de preia-mar.

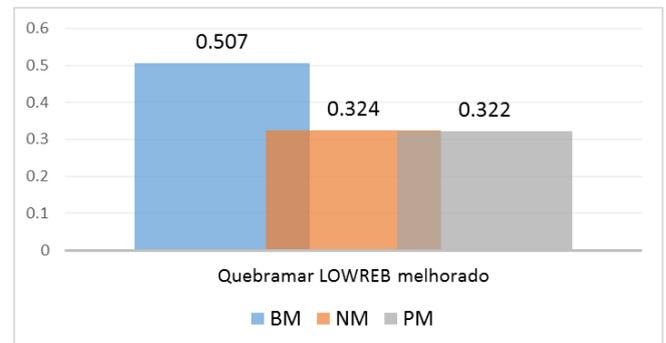


Figura 22. Comparação entre os coeficientes de reflexão obtidos para o quebramar LOWREB melhorado, nos diferentes níveis de água considerados, nomeadamente, baixa-mar (BM), nível médio (NM) e preia-mar (PM), para $H = 0.08m$ e $T = 1.66s$, usando o modelo de turbulência $k - \epsilon$.

4. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

O modelo numérico IHFOAM 2.0, baseado nas equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds, foi aplicado para estudar a interação da agitação com um quebramar vertical perfurado – quebramar LOWREB – e o seu comportamento à reflexão. Os resultados obtidos foram depois comparados com resultados experimentais existentes.

A maior dissipação da energia da onda que foi observada no modelo numérico pode ser justificada, em parte, pela incapacidade do modelo de turbulência adotado em reproduzir fielmente a realidade. Por outro lado, importa referir que a geometria do quebramar usada nas simulações numéricas 2D não correspondia, exatamente, à que foi usada no estudo experimental. Pese embora o referido, foi possível aferir a semelhança entre os resultados numéricos e experimentais, tanto ao nível da interação da agitação com a estrutura como nos fenómenos físicos resultantes, comprovando-se, assim, a capacidade de dissipação da energia das ondas do quebramar LOWREB, bem como a sua eficiência hidráulica à reflexão.

Um estudo mais aprofundado sobre alguns parâmetros, nomeadamente, as condições iniciais de turbulência, o modelo de turbulência e as características da malha, entre outros, poderia resultar na obtenção de melhores resultados. Importa referir que, nas situações estudadas, regra geral, a utilização do modelo de turbulência $k - \epsilon$ se mostrou, aparentemente, mais adequada que a do modelo $k - \omega$.

A modificação da geometria do quebramar LOWREB, por redução da cota de coroamento dos seus descarregadores interiores, resultou na melhoria do funcionamento global da estrutura, para os vários níveis de maré considerados, observando-se um equilíbrio de funcionamento para o nível médio, com razoável eficiência hidráulica à reflexão para os dois níveis mais extremos.

A simulação do comportamento hidráulico à reflexão do quebramar LOWREB, usando uma geometria 3D, mostrou-se difícil devido à complexidade da estrutura e ao tempo de processamento requerido. Esse trabalho constitui, portanto, um dos desenvolvimentos futuros a considerar.

Seria ainda interessante fazer um estudo comparativo entre as forças e as pressões atuantes no quebramar LOWREB e as previstas pela aplicação dos métodos de dimensionamento deste tipo de estruturas e respetivos ensaios laboratoriais, bem como realizar um estudo numérico do comportamento do quebramar LOWREB com agitação irregular.

Referências

Baldock, T.E. e Simmonds, D.J. (1999). *Separation of incident and reflected waves over sloping bathymetry*. Coastal Engineering 38, p.167-176. doi: 10.1016/S0378-3839(99)00046-0.

Bergmann, H. e Oumeraci, H. (2000) - *Wave Loads on Perforated Caisson Breakwaters*. Proc. of 27th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), July 16-21, Sydney, Australia, doi: 10.1061/40549(276)126.

Ciocan, C. (2014). *Estudo do Quebramar Vertical Perfurado LOWREB*. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

Frigaard, P. e Brorsen, M. (1995) - *A Time Domain Method for Separating Incident and Reflect Irregular Waves*. Ocean Engineering 24, p.205-215. doi: 10.1016/0378-3839(94)00035-V.

Goda, Y. (1985) - *Random Seas and Design of Maritime Structures*. Universidade de Tóquio, Japão.

Higuera, P.; Lara, J. e Losada, I. (2015) - *Numerical Analysis of Obliqueness in Wave-Induced Crown Wall Loads*. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress.

Higuera, P. (2015). *Aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional a la Acción del Oleaje Sobre Estructuras*. Tese de Doutoramento, Universidad de Cantabria, Espanha.

IHCantabria, Instituto De Hidráulica Ambiental Da Universidade De Cantabria (2014) - *IHFOAM Manual*.

Iturrioz, A.; Guanche, R.; Lara, J. e Losada, I. (2015) - *Validation of OpenFoam for Oscillating Water Column Three-Dimensional Modeling*, Ocean Engineering 107.

Lara, J., Higuera, P., Maza, M., del Jesus, M., Losada, I. J. e Barajas, G. (2012). *Forces Induced on a Vertical Breakwater by Incident Oblique Waves*. Coastal Engineering Proc., 1(33), structures.14. doi: 10.9753/icce.v33.structures.14.

Lara, J., Higuera, P., Guanche, R. e Losada, I. (2013) - *Wave Interaction with Piled Structures. Application with IHFOAM*. Proc. of 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, ASME, Nantes, France, June 9-14, doi: 10.1115/OMAE2013-11479.

Lee, J.; Shin, S. (2014) - *Experimental Study on the Wave Reflection of Partially Perforated Wall Caissons with Single and Double Chambers*. Ocean Engineering 91, p.1-10. doi: 10.1016/j.oceaneng.2014.08.008.

Li, Y. C., Dong, G., Liu e H., Sun, D. (2003) - *The Reflection of Oblique Incident Waves by Breakwaters with Double-Layered Perforated Wall*. Coastal Engineering 50, p.47-60. doi: 10.1016/j.coastaleng.2003.08.001

Pinto, S. (2012). *Estruturas Portuárias Verticais Perfuradas. Dimensionamento e Avaliação Experimental*. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

Vanneste, D. e Troch, P. (2015) - *2D numerical simulation of large-scale physical model tests of wave interaction with a rubble-mound breakwater*. Coastal Engineering, 103, p.22-41, doi: 10.1016/j.coastaleng.2015.05.008.