

ANÁLISE BIDIMENSIONAL DO CAMPO DE PRESSÕES E DA TURBULÊNCIA EM QUEBRAMARES SUBMERSOS

Analysis of the Pressure and Turbulence Fields on Submerged Breakwaters

ANA CRISTINA NEVES ⁽¹⁾, FERNANDO VELOSO-GOMES ⁽²⁾ e FRANCISCO TAVEIRA-PINTO ⁽³⁾

⁽¹⁾ Professora Auxiliar, UFP,
Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Fernando Pessoa, Praça 9 de Abril, 349, 4249-004 Porto, avneves@ufp.edu.pt

⁽²⁾ Professor Catedrático, FEUP,
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua do Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, vgomes@fe.up.pt

⁽³⁾ Professor Associado, FEUP,
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua do Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, fpinto@fe.up.pt

Resumo

Os principais objectivos deste estudo estão relacionados com a necessidade de uma análise particular, nomeadamente do escoamento e do campo de pressões e de velocidades nas proximidades de quebramares submersos, uma vez que estes interferem directamente com a funcionalidade da estrutura e a sua estabilidade, entre outros. Assim, foi analisada a variação do campo de oscilações, de velocidades e de pressões exercidas sobre modelos de quebramares submersos com características distintas, sob a acção de diferentes condições de agitação regular, bem como a distribuição destas variáveis para estados de agitação irregulares. A análise baseia-se nos resultados de uma série de ensaios bidimensionais onde foram avaliadas as pressões e as velocidades tangenciais na superfície das estruturas e nas suas imediações.

As principais conclusões apontam para que a zona superior dos modelos e, nomeadamente, a extremidade exposta do coroamento, sejam as secções mais críticas. A rugosidade da superfície dos modelos e a permeabilidade permitiram confirmar o seu papel relevante na atenuação da energia da agitação incidente. A submergência dos modelos revelou ter uma influência significativa nas pressões dinâmicas e nas velocidades devido ao facto de afectarem a propagação e a rebentação da agitação sobre estas estruturas.

Palavras-chave: Erosão costeira, quebramares submersos, campos de pressões.

Abstract

Submerged breakwaters, as coastal structures, are submitted to different types of actions. The knowledge of these forces is, therefore, of a significant importance for its design and, as the forces result from the wave-induced pressure diagrams, their detailed analysis is also important. The main objectives of this study are related with the necessity of a comprehensive analysis, particularly of the pressure field and velocities in this type of structures. The velocities and the pressures acting on submerged breakwater models with different characteristics were analyzed under different conditions of regular waves and an investigation of the distribution of these variables for irregular sea states was also done.

The main conclusions of this work point that the upper zone of the models and, particularly, the exposed edge of the crown, are the most critical sections, in terms of wave-induced pressures and in terms of velocities. The roughness of the surface of the models and their permeability confirmed their role in the attenuation of the energy of the incident waves. The submergence of the models also showed to have a significant influence in the dynamic pressures and in the velocities, mainly due to its effect in the propagation and breaking of the waves.

Keywords: Coastal erosion, submerged breakwaters, pressure fields.

1. Problema da Erosão Costeira

Nas últimas décadas, o fenómeno da erosão costeira tem-se tornado num problema sério em várias zonas costeiras do mundo, particularmente em zonas mais vulneráveis, como por exemplo, em costas arenosas. As causas deste fenómeno estão relacionadas tanto com processos naturais, como com intervenções humanas várias. O agravamento da erosão, com a conseqüente redução e, no limite, desaparecimento das praias, pode causar graves impactes no ambiente costeiro, na economia e turismo das regiões afectadas por este problema, particularmente em zonas onde existe uma ocupação humana importante.

2. Os Quebramares Destacados

A protecção duma zona costeira pode efectuar-se de várias formas, implicando muitas vezes que, numa mesma zona, sejam utilizados diferentes tipos de estruturas para a redução ou, pelo menos, para o controlo da erosão costeira ou da evolução da linha de costa. Os quebramares destacados surgem como uma dessas possíveis soluções. A Figura 1 apresenta uma situação onde foi utilizado um sistema de quebramares destacados, ilustrando ainda a acumulação da areia na zona abrigada destas estruturas, sob a configuração de um tómbolo.

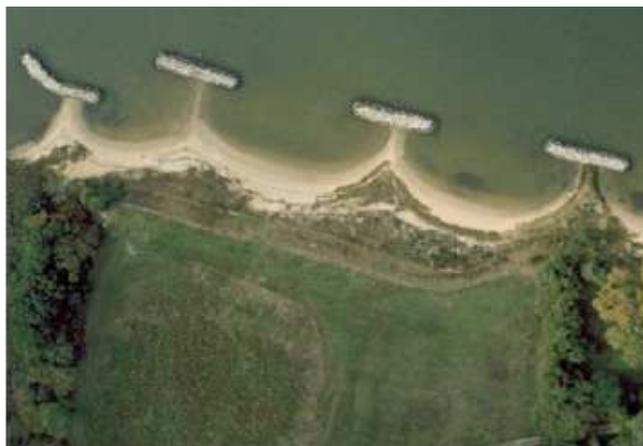


Figura 1. Utilização de um campo de quebramares destacados (foto tirada pelo *Virginia Institute of Marine Science*).

Este tipo de estruturas, não aderentes à linha de costa, tem uma aplicação mais recente e poderá ser uma alternativa para a estabilização e acreção das praias. Encontram-se a uma certa distância da costa e a pequenas profundidades de água, podendo ser construídos com a função de defesa costeira relativamente à agitação, de criar uma zona mais protegida destinada a embarcações e/ou de alterar o padrão de deposição de sedimentos na entrada de um canal de navegação, por exemplo. Os quebramares destacados podem ser utilizados individualmente, na protecção local de um trecho de costa, ou em conjunto, na defesa de uma secção de praia mais extensa, alterando a morfologia do trecho de costa.

Estas estruturas podem ainda ser classificadas como emersas ou submersas em relação ao nível médio da água do mar.

A Figura 2 ilustra os diferentes tipos de quebramares destacados, assim como os principais fenómenos ocorrentes na interacção da agitação com estas estruturas.

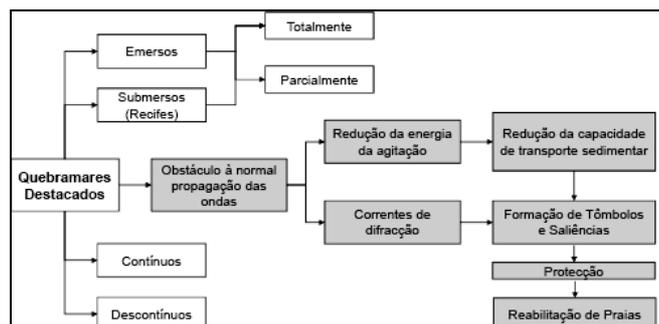


Figura 2. Quebramares destacados: classificação e fenómenos ocorrentes na sua interacção da agitação.

A utilização de quebramares destacados para fins de protecção costeira tem vindo a aumentar um pouco por todo o mundo, constituindo na maioria das vezes casos de sucesso no combate à erosão e sendo frequentemente apontadas como eficientes e versáteis, em particular em ambientes de agitação marítima não muito severa (agitação baixa a moderada), Zeidler e Pilarczyk, 1996.

Os quebramares destacados convencionais ou emersos são projectados de modo a atenuar significativamente a energia da agitação na zona abrigada da estrutura.

Muitas vezes a altura de onda de projecto é de tal modo elevada que estas estruturas adquirem dimensões significativas, de forma a comportar as forças do impacto da rebentação da agitação, eliminando frequentemente ou degradando a circulação da água e os habitats naturais na zona protegida pelo quebramar.

As principais vantagens e desvantagens destas estruturas são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1. Vantagens e desvantagens dos quebramares destacados submersos

VANTAGENS
<ul style="list-style-type: none"> • Menor volume de material para a sua construção; • Possibilidade de circulação da água da zona exposta para a zona abrigada, garantindo a qualidade desta para uso banhar e recreativo; • Prevenção da degradação dos habitats marinhos naturais na “zona de abrigo”, reduzindo o impacto ambiental e ecológico; • Cota de coroamento reduzida, diminuindo o impacto visual; • Preservação das praias; • Defesa de outras estruturas, aumentando o seu nível de segurança; • Não necessitam de aberturas como nas estruturas emersas, que podem originar correntes de retorno e erosões nas suas imediações podendo ser construídas de forma mais extensa e contínua.¹ • Teoricamente mais económicas face aos menores volumes de material requeridos para a sua construção.
DESVANTAGENS
<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldade de percepção nomeadamente para banhistas e para a navegação; • Eficácia afectada para grandes amplitudes de maré; • Eficácia afectada em climas de agitação de elevada severidade; • Técnicas de construção mais delicadas, com equipamento flutuante, que podem tornar a sua construção mais onerosa; • Capacidade de retenção de sedimentos mais suave e consequentemente com menores efeitos nas praias adjacentes; • Nível de protecção mais reduzido; • Métodos de dimensionamento estrutural pouco desenvolvidos ou não completamente definidos; • Maior fluxo de massa/energia associado à rebentação da agitação, podendo levar à erosão nesta zona; • O coeficiente de transmissão, fundamental no seu dimensionamento, é função de um elevado número de parâmetros.

Isoladamente ou em combinação com a alimentação artificial das praias, os quebramares submersos são cada vez mais utilizados para fins de controlo da erosão costeira e como forma de defesa de outras estruturas de protecção costeira, provocando a pré-rebentação da agitação de altura superior a um dado limite.

1. Saliente-se que nalguns casos, a não existência de aberturas, mesmo entre quebramares submersos, pode provocar fenómenos de “set-up” (sobrelevação) dos níveis de água na zona “abrigada”, agravando eventuais fenómenos de galgamento.

A grande amplitude de maré, nalguns mares, representa no entanto um inconveniente e entrave à sua construção, pois a profundidade de água acima do coroamento destas estruturas, para além da altura de onda incidente, particularmente durante tempestades mais severas, é um dos parâmetros que mais afecta a sua eficiência. O mar do Norte ou o Atlântico são exemplos disso.

Nalguns casos, a elevada severidade do clima da agitação a que os quebramares submersos estão expostos influencia também negativamente a sua eficácia na atenuação da agitação incidente.

Por essas razões, de acordo com Taveira-Pinto & Neves, 2003, a sua aplicabilidade na costa portuguesa, embora possa ser significativa em termos de estados de agitação médios, deve ser objecto de pesquisas futuras para o caso de estados de agitação extremos.

3. Objectivos do Estudo

As obras costeiras e em particular os quebramares destacados estão sujeitas a diversos tipos de acções. Uma vez que as forças actuantes resultam dos diagramas de pressões estáticas e dinâmicas (induzidos pela passagem da agitação), o seu conhecimento reveste-se de uma importância significativa na concepção e no dimensionamento de estruturas marítimas.

O presente estudo pretendeu analisar as características dos campos de pressões actuantes nos elementos constituintes dos taludes e do coroamento dos quebramares submersos, considerando-se que um estudo pormenorizado da sua distribuição e uma avaliação da sua magnitude são matérias do maior interesse e potencialmente úteis no seu dimensionamento hidráulico e estrutural e na formulação de critérios de dimensionamento.

O conhecimento detalhado do campo de pressões e de velocidades, bem como os fenómenos físicos associados à interacção fluido-estrutura é um assunto que merece, portanto, a abordagem aqui efectuada.

Como foi referido anteriormente, as acções a que uma estrutura deste tipo está sujeita e a forma como esta responde às diversas solicitações dependem das características da agitação incidente, mas também das características da própria estrutura. Assim, foram analisados diferentes parâmetros intervenientes na interacção destas estruturas com o escoamento, tendo sido dada relevância apenas a alguns: a altura e o período da onda incidente, a submergência da estrutura, a rugosidade dos taludes e a permeabilidade do quebramar submerso, tendo sido investigada a sua interferência com o campo de oscilações, de pressões e de velocidades em redor destas estruturas. Crê-se que o aprofundamento destes temas será igualmente extremamente benéfico na calibração de modelos numéricos de propagação da agitação marítima e de interacção da agitação com estas estruturas e/ou de modelos hidrodinâmicos de transporte de sedimentos.

Resumidamente, apresentam-se de seguida os pontos-chave que motivaram o presente estudo, sob a forma do esquema ilustrado na Figura 3.

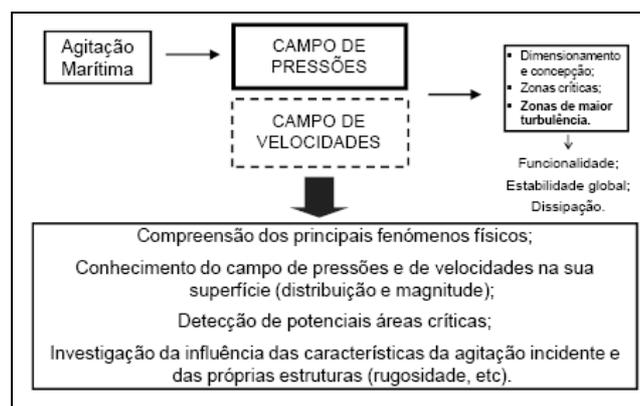


Figura 3. Motivação e objectivos do estudo.

4. Instalação Experimental

Com o intuito da prossecução dos objectivos definidos foram realizados diversos ensaios com modelos de quebramares com diferentes características, sob condições de agitação diversas.

As experiências decorreram no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, onde foi montada uma instalação experimental que englobava um conjunto de equipamentos: sistema de geração da agitação, sistema de medição das velocidades, sistema de medição das pressões e sistema de aquisição de dados.

As técnicas e procedimentos de tratamento dos dados serão posteriormente descritos.

O tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica possui 12 m de largura, 28 m de comprimento e uma profundidade máxima de 1 m. Numa das extremidades do tanque foi posicionado o sistema de geração da agitação, constituído por dois conjuntos de batedores. Os modelos dos quebramares foram colocados entre uma parede divisória e as janelas de vidro do tanque, para mais fácil observação do escoamento.

No lado oposto ao sistema de geração de agitação, com o intuito de dissipar a energia do escoamento e minimizar os efeitos da reflexão da agitação na extremidade do tanque, foi construída uma praia de enrocamento e areia, que se estendeu por cerca de 6 m e apresentava um declive de 5%.

A instalação experimental permitia prevenir o aparecimento do efeito do *pillling up*, uma vez que o sistema adoptado no tanque de ondas possibilitava a recirculação da água de forma natural graças à construção da parede divisória, que se prolongou apenas até cerca do meio da praia do tanque de ondas. A divisória possibilitava que a água que passava sobre ou pela estrutura seguisse ao longo do canal e se escoasse para fora deste (não se concentrando imediatamente após a estrutura). A Figura 4 apresenta uma vista do tanque de ondas. As pressões foram medidas em tomadas de pressão situadas no coroamento e nos taludes do modelo (à superfície do quebramar), tendo-se igualmente medido as velocidades à superfície deste nos mesmos pontos. As velocidades nas proximidades da estrutura e a elevação da superfície livre da água foram também avaliadas em diferentes secções.



Figura 4. Vista geral do tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP.

A Figura 5 apresenta uma das situações de teste, ilustrando o equipamento utilizado nas medições.



Figura 5. Equipamento utilizado nas medições.

A influência da rugosidade e da permeabilidade destas estruturas no escoamento foi analisada através da execução de ensaios com recurso a modelos de taludes de três diferentes tipologias: lisos impermeáveis, rugosos impermeáveis e rugosos permeáveis. Na Figura 6 apresentam-se dois dos modelos utilizados, construídos de acordo com a semelhança de Froude, à escala geométrica 1/40.

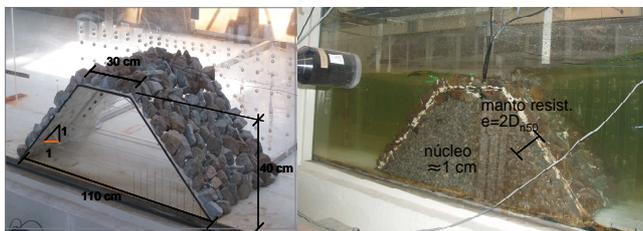


Figura 6. Modelos utilizados: quebramar rugoso impermeável e quebramar rugoso permeável.

A medição da elevação da superfície livre do escoamento foi feita através de sondas de nível, modelo HR Wallingford. Para a medição das pressões foram utilizados quatro sensores de pressão, modelo miniatura PDCR 35/D da Druck que, para além de serem, submersíveis, apresentavam características que permitiam medições dentro da gama de pressões estimadas.

Uma vez que estes sensores apresentavam uma membrana que se podia posicionar à face da secção de medição (*flush mounted*), a medição das pressões era minimamente intrusiva, não provocando alterações significativas nas características do escoamento.

A medição das velocidades foi feita recorrendo à anemometria Laser Doppler (LDA). Este sistema foi já utilizado em Taveira-Pinto, 2001, onde podem ser encontradas as principais características do sistema de medição de velocidades utilizado.

A instalação experimental dispunha de dois sistemas de aquisição de sinais, sendo a sua selecção feita de acordo com a especificidade dos ensaios. Neste estudo, porém, será apenas referido um deles, uma vez que foi o utilizado no decorrer destas experiências. Foi utilizado o sistema de aquisição de sinais Doppler (*Burst Spectrum Analyser*), que permitia para além da medição dos níveis de água e/ou as pressões, a medição simultânea das velocidades, possibilitando que a cada valor da velocidade medida em determinado instante e em determinado ponto do escoamento, pudesse ser atribuído um valor da posição da superfície livre e/ou da pressão, nesse mesmo instante.

5. Medições

Os ensaios permitiram a análise dos campos e espectros de energia nas imediações dos modelos, assim como as pressões e as velocidades tangenciais actuaantes na sua superfície.

Os resultados obtidos experimentalmente permitiram analisar a influência de algumas variáveis nas grandezas medidas, quer respeitantes às características dos próprios modelos, como a submergência, a rugosidade dos taludes ou a permeabilidade das estruturas, quer ligadas às características da agitação incidente, como sejam a altura e o período e outros parâmetros característicos da agitação. As Figuras 7 e 8 esquematizam a localização dos pontos de medição.

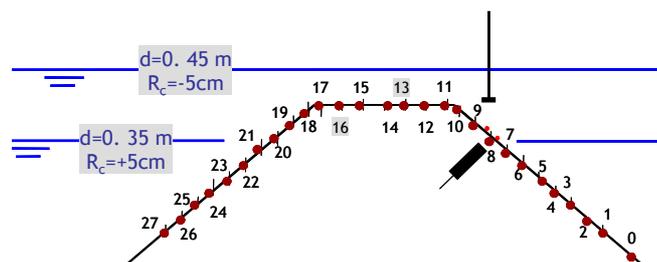


Figura 7. Localização dos pontos de medição.

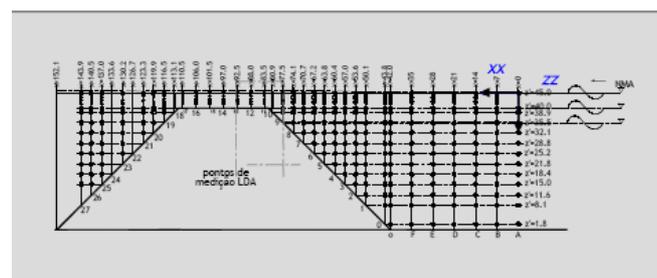


Figura 8. Localização dos pontos de medição.

Foram utilizadas diferentes condições de teste, de modo a ser considerada uma larga gama de condições de agitação. Assim, foram testadas diferentes alturas de onda incidentes, períodos de onda e submergências dos modelos, tendo sido realizados ensaios com agitação regular e com agitação do tipo irregular. O Quadro 2 apresenta as condições de teste dos ensaios com agitação do tipo regular e o Quadro 3 as condições de teste dos ensaios com agitação do tipo irregular.

Quadro 2. Classificação dos ensaios com agitação regular.

H (m)	T (s)	d (m)	Variáveis medidas
0.065	1.5	0.40 0.45	<ul style="list-style-type: none"> Elevação da superfície livre; Componente horizontal e vertical da velocidade Pressão total

Quadro 3. Classificação dos ensaios com agitação irregular.

	H _{si} (m)	T _p (s)	d (m)	Variáveis medidas
C.I	0.065	1.5	0.40 0.45	<ul style="list-style-type: none"> Elevação da superfície livre; Componente horizontal e vertical da velocidade.
C.II	0.05, 0.065, 0.075, 0.15	1, 1.5, 2	0.45	<ul style="list-style-type: none"> Elevação da superfície livre; Componente tangencial da velocidade Pressão total.
C.III	0.05, 0.065, 0.075, 0.15	1.5 1, 2	0.40 0.45	<ul style="list-style-type: none"> Elevação da superfície livre; Pressão total.

6. Tratamento de Dados e Medições

6.1. Agitação regular

A possibilidade de aquisição simultânea dos dados relativos às velocidades e à elevação da superfície livre (e/ou da pressão) permitiu atribuir a cada valor de velocidade (e/ou pressão) adquirido um valor de elevação da superfície livre e, consequentemente localizá-lo ao longo do período da onda.

Dividindo o período de onda em cinquenta intervalos (a que correspondem 50 valores diferentes da fase da onda), agruparam-se os valores contidos no mesmo intervalo e determinou-se o seu valor médio e o desvio padrão correspondente. Este tratamento foi feito para cada um dos pontos de medição, para cada uma das condições de agitação e relativamente às medições da pressão, da elevação da superfície livre e da velocidade tangencial ao talude.

O tratamento dos dados desta forma foi feito com base em alterações num outro programa de cálculo desenvolvido por Taveira-Pinto, 2001. Entre outros, o programa determinava em cada ponto de medida as características do escoamento médio e as correspondentes flutuações ao longo do período da onda, para diferentes valores da fase, após a aquisição de um número suficiente de dados.

A Figura 9 esquematiza o processo de tratamento dos dados relativos à agitação regular.

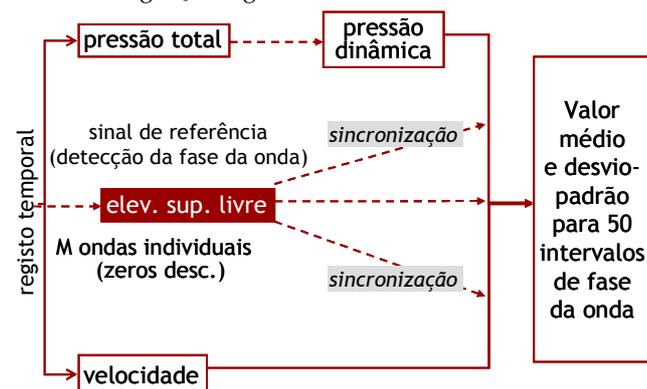


Figura 9. Processo de tratamento dos dados.

Na Figura 10 apresenta-se uma compilação de alguns dos resultados obtidos com os três modelos utilizados, relativos à componente turbulenta da velocidade vertical, v'_{rms} e à componente turbulenta da velocidade horizontal, u'_{rms} .

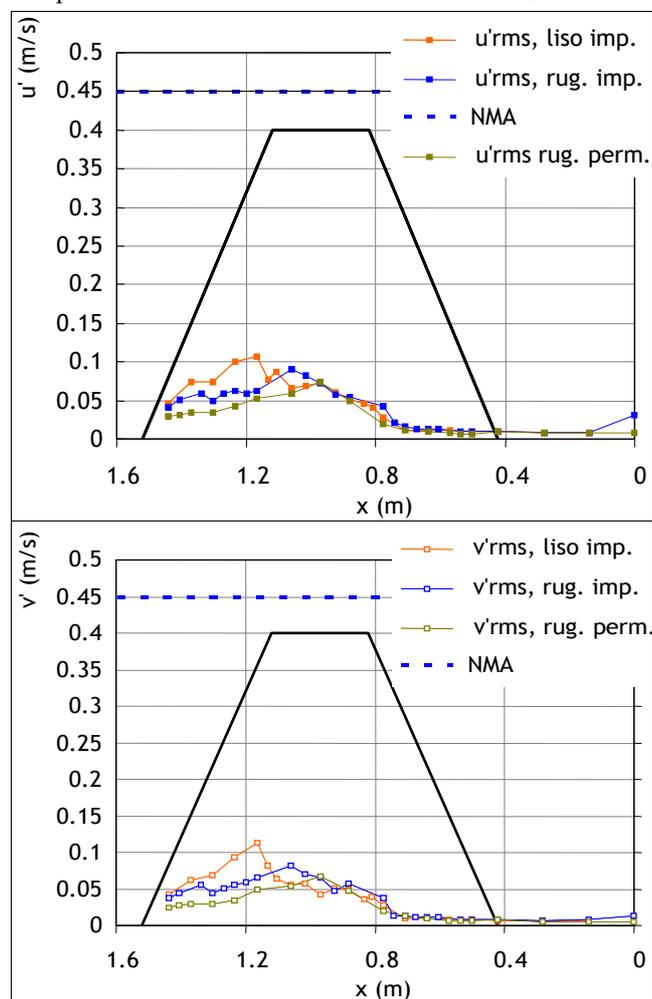


Figura 10. Parcela turbulenta das componentes da velocidade.

Da Figura 10 (e dos restantes resultados) concluiu-se que a componente turbulenta da velocidade horizontal era superior à vertical, em qualquer um dos modelos. Além disso, o valor destas variáveis aumentava no coroamento ou secções imediatamente seguintes devido à geração de turbulência causada pela rebentação da agitação e pela passagem sobre a estrutura, reduzindo-se aquando da passagem para barlamar dos modelos.

Os menores valores verificaram-se no modelo rugoso permeável. Observou-se ainda um ligeiro “atraso” do valor de pico de u'_{rms} e v'_{rms} no modelo liso impermeável, talvez devido à menor capacidade de dissipação da energia da agitação deste modelo.

6.2. Agitação irregular

Os registos obtidos nos ensaios com a agitação irregular mereceram um tratamento distinto do anterior. O tratamento dos dados foi feito através do programa *WAFO*, que permitiu a determinação das densidades espectrais relativas às medições das elevações da superfície livre, das pressões e das velocidades. Este programa permitia a conversão dos sinais no domínio dos tempos para o domínio das frequências através da transformada de *Fourier*. Relativamente aos dados relativos às velocidades recolhidas, era feita a reamostragem e a reconstrução prévia dos dados, isto é, as medições (aleatórias) de velocidades eram transformadas em registos temporais espaçados por intervalos de tempo igualmente distanciados.

Na análise das medições foi dada relevância à frequência de aquisição do sinal, importante na análise da turbulência e na detecção de todos os vórtices do escoamento, inclusive os mais pequenos, pelo que se determinaram previamente as escalas de turbulência.

6.3. Características dos espectros de superfície livre

Na Figura 11 apresentam-se os espectros relativos aos registos da elevação da superfície livre nas várias secções verticais dos taludes e do coroamento da estrutura, quando sujeitas a uma das condições de teste.

As diferenças são notórias, estando algumas delas já documentadas em Bleck *et al.*, 2001. São evidentes as diferenças ao nível das energias registadas na frequência de pico entre os espectros relativos a pontos situados a barlar e a sotamar da estrutura.

A densidade espectral máxima relativa às medições efectuadas a barlar da estrutura, é significativamente menor que as registadas a sotamar, resultado do processo de dissipação da energia.

Os espectros relativos aos perfis localizados no talude posterior apresentam densidades espectrais maiores para frequências mais elevadas (devido à geração de agitação secundária, que, conseqüentemente, origina o alargamento do espectro).

6.4. Características dos espectros de pressão

As conclusões relativas aos espectros das pressões actantes no modelo mostraram ser semelhantes às verificadas nos espectros respeitantes à elevação da superfície livre, isto é, verificou-se um aumento das pressões à medida que a secção se aproximava do coroamento da estrutura (para profundidades menores) e o oposto, no talude posterior.

À semelhança do verificado com as elevações da superfície livre, observou-se que os espectros relativos a pontos situados no talude posterior apresentavam um segundo pico (o que poderá ser explicado pelo facto das pressões estarem directamente relacionadas com a elevação da superfície livre).

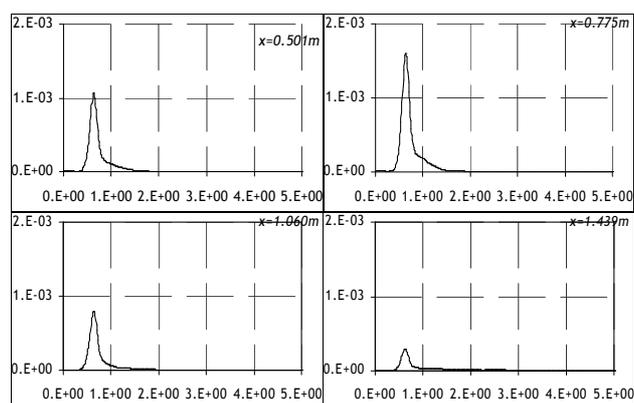


Figura 11. Espectros da elevação da superfície livre, $H_{si}=0.065m$, $f_p=0.67Hz$, $d=0.45m$.

6.5. Características dos espectros de velocidade

A Figura 12 apresenta sinteticamente os espectros relativos à componente horizontal da velocidade medida no modelo rugoso permeável. No que respeita aos espectros da componente horizontal da velocidade é de referir que para cada um dos perfis, as densidades espectrais das velocidades aumentavam para os níveis mais elevados relativamente ao fundo do tanque, facto também observado nos ensaios com agitação do tipo regular.

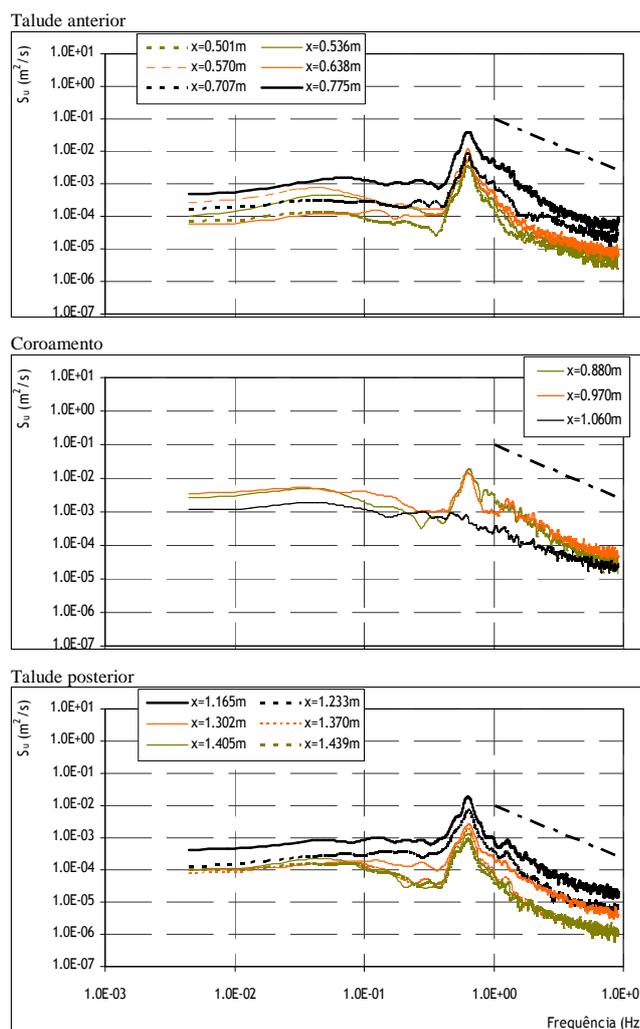


Figura 12. Espectros relativos à componente horizontal da velocidade, para diferentes secções do modelo, $H_{si}=0.065m$, $f_p=0.67Hz$, $d=0.45m$.

As maiores diferenças situaram-se no domínio das frequências inferiores à frequência de pico da agitação. Foi novamente observado um aumento genérico das velocidades nos perfis dos pontos situados na parte superior da estrutura.

As densidades espectrais das velocidades registaram um decréscimo nos pontos localizados a sotamar da estrutura, após o coroamento, sendo mais visíveis as diferenças entre os espectros de um mesmo perfil, respeitantes a diferentes alturas de medição. Em todas as situações, a densidade espectral das velocidades era máxima na frequência de pico da agitação.

Verificou-se que o pico dos espectros das velocidades ocorria para uma frequência igual a 0.1 Hz, o que coincidia com a frequência de pico da agitação. Os espectros relativos a pontos situados sobre o coroamento da estrutura apresentaram uma forma um pouco distinta dos restantes, com uma maior irregularidade, facto que pode ser explicado por nesta zona ocorrerem diversos processos não lineares.

É notório que o processo de dissipação de energia associada à formação de uma zona de turbulência e de elevadas velocidades, que se estendeu até aos pontos localizados no talude posterior, apresenta espectros de velocidades com valores de pico significativos, que se foram atenuando, à medida que se avançava para pontos localizados na parte inferior do talude.

Foi também investigado o efeito da submergência da estrutura nas velocidades na superfície do talude, tendo sido efectuados testes semelhantes para uma profundidade de água igual à cota do coroamento do modelo, isto é, $R_c=0\text{cm}$.

A comparação dos resultados obtidos permitiu concluir que não existem grandes diferenças no que respeita aos espectros das velocidades medidas dos pontos situados no talude anterior. Já nos espectros relativos às velocidades dos pontos localizados no talude posterior, o mesmo não acontece. Os espectros relativos aos ensaios com $R_c=-5\text{cm}$ foram significativamente superiores aos correspondentes à profundidade de água igual a 0 cm, para todas as frequências, facto que poderá ser explicado pelo maior galgamento da estrutura, que conduz consequentemente a maiores velocidades.

7. Síntese Final

Este estudo possibilitou uma análise detalhada do campo de velocidades nas imediações de quebramares submersos, com distinção da sua componente média e da sua componente turbulenta e o estudo da influência das características de rugosidade e de permeabilidade destas estruturas no campo de velocidades, com modelos e escalas diferentes dos estudos já efectuados sobre esta temática.

Foram determinadas as pressões actuantes nestas estruturas e investigada a influência de diferentes características da agitação incidente e das estruturas nas pressões actuantes nos seus taludes e coroamento.

A análise espectral, com base nos ensaios com agitação irregular, da elevação da superfície livre, pressões e velocidades, veio complementar algumas das conclusões obtidas com os ensaios com agitação regular, relativas à produção e dissipação da turbulência.

Entre muitas outras conclusões, salientam-se de seguida algumas:

- Os espectros de energia relativos aos perfis do talude abrigado mostraram ser mais “largos”, isto é, com densidades espectrais maiores nas frequências mais elevadas e uma segunda frequência de pico (devido à geração de agitação secundária);
- Os espectros das pressões mostraram um comportamento semelhante, uma vez que as pressões estão directamente relacionadas com a elevação da superfície livre;
- Nos espectros das velocidades, verificou-se que a densidade espectral era maior na parte superior da estrutura, decrescendo na zona abrigada, após o coroamento (devido principalmente ao processo de dissipação de energia e a formação de uma zona de turbulência);
- A densidade espectral era máxima para a frequência de pico;
- Os espectros relativos ao modelo submerso ($R_c=-5\text{cm}$) eram significativamente superiores aos do modelo com $R_c=0$, facto explicado pelo maior galgamento da estrutura;
- As principais conclusões deste estudo apontam para que a zona superior dos modelos e, nomeadamente, a extremidade exposta do coroamento, sejam as secções mais críticas, quer em termos de pressões dinâmicas, quer em termos de velocidades registadas;
- A rugosidade da superfície dos modelos e, particularmente a sua permeabilidade, mostraram afectar consideravelmente o valor destas grandezas, permitindo assim confirmar igualmente o seu papel relevante na atenuação da energia da agitação incidente;
- A submergência dos modelos também revelou ter uma influência significativa nos valores da pressão dinâmica e das velocidades, quer na superfície dos modelos, quer nas suas imediações, devido essencialmente ao facto de afectar a propagação e a rebentação da agitação sobre estas estruturas.

Referências

- Bleck, M., Oumeraci, H. (2001). Wave Damping and Spectral Evolution at Artificial Reefs, Proceedings of the 4th International Symposium on Ocean Wave Measurements and Analysis, San Francisco, California, USA, Vol. 2, p 1062-1071.

Neves, A. C. (2008). *Análise do Campo de Pressões em Quebramares Submersos*, Dissertação para Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Taveira-Pinto, F. (2001). *Análise das Oscilações e dos Campos de Velocidades nas Proximidades de Quebramares Submersos sob a Acção da Agitação Marítima*, Dissertação para Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Taveira-Pinto, F., Neves, A. C. (2003). *Environmental Aspects of Using Detached for Coastal Protection Purposes*, Proceedings of the International Symposium ENVIRONMENT 2010: Situation and Perspectives for the European Union, Porto, Portugal.

Zeidler, K. Pilarczyk, W. (1996). *Offshore Breakwaters and Shore Evolution Control*, Taylor & Francis, 560 p., ISBN 9054106271.