

**ANÁLISE DO ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS
SOB A ACÇÃO DE AGITAÇÃO MARÍTIMA REGULAR.
O CASO DO QUEBRAMAR DE TALUDES NORTE DO PORTO DE LEIXÕES**
**Flow Process Analysis of Porous Mediums Under Regular Waves.
The Case Study of the North Roublemound Breakwater of Leixões' Harbour**

PEDRO MIGUEL PEREIRA ⁽¹⁾, FRANCISCO TAVEIRA-PINTO ⁽²⁾ e FERNANDO VELOSO-GOMES ⁽³⁾

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia Civil, MARTIFER Construções Metalomecânicas, SA.,
Zona Industrial, 3680-000 Oliveira de Frades, Portugal, pedro.pereira@martifer.pt

⁽²⁾ Professor Associado com Agregação, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal, fpinto@fe.up.pt

⁽³⁾ Professor Catedrático, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal, vgomes@fe.up.pt

Resumo

Anualmente o terminal de petroleiros do porto de Leixões, designado por posto A, é alvo de dragagens, sendo que a distribuição dos assoreamentos verificados não tem a forma habitual quando se trata de transporte de sedimentos relacionados com fenómenos de difracção. De facto, acumula-se maior quantidade de sedimentos na zona mais afastada da cabeça do quebramar, sendo que esta quantidade diminui com a aproximação à cabeça. Concomitantemente, o paramento anterior do quebramar junto a este terminal tem sido alvo de recargas periódicas de tetrápodes.

Pretende-se com este trabalho, por um lado identificar e analisar os diferentes processos de rotura passíveis de ocorrer nos quebramares de taludes em geral e, por outro lado, aplicando um programa de cálculo automático a um modelo da estrutura em estudo, deseja-se analisar o modo como a agitação regular se propaga no interior do quebramar e assim verificar possíveis debilidades da estrutura que conduzam às deficiências anotadas.

Palavras-chave: Quebramar de taludes, modos de rotura, processos de escoamento, porto de Leixões, percolação.

Abstract

Every year the oil terminal of the Leixões harbour, named "posto A", needs to be dredged; however, the distribution of accumulated sediments does not reflect the usual diffraction phenomena. In fact, more sediments accumulates in the zone further away from the breakwater head than in the zone close to it. In addition, the armour layer of the breakwater near the oil terminal is regularly recharged with tetrapodes.

The aim of this investigation is firstly to identify and analyse the different failure modes that occur on rubble-mound breakwaters in general. In addition, the use of a numerical model of the structure under study allows the regular wave propagation through the inner layers and core of the breakwater to be analysed. Consequently, this should identify possible weaknesses that may be responsible for the problems previously mentioned.

Keywords: Rubble-mound breakwaters, failure modes, flow processes, Leixões harbour, percolation.

1. Introdução

Inicialmente situados nos estuários dos rios ou em reentrâncias naturais da costa, cedo se tornou necessário, por vários motivos, criar portos onde fosse possível a carga e descarga de mercadorias de forma segura. Contudo, o aumento do volume de mercadorias transaccionadas levou à necessidade de se criarem maiores zonas abrigadas da agitação e dotadas de boas condições de atracagem, carga e descarga das embarcações, ou seja, os **portos artificiais**. Estes caracterizam-se pela presença de estruturas que visam a redução da agitação na zona abrigada, os quebramares. Isto é conseguido devido à combinação de mecanismos de reflexão e de dissipação da energia das ondas que incidem no quebramar.

Podem-se distinguir quatro tipos: quebramares verticais; quebramares de taludes; quebramares mistos e quebramares de estrutura mista.

A agitação marítima constitui a principal acção a que os quebramares estão sujeitos. Esta provoca esforços internos, oscilações, eventualmente com choque de blocos do manto resistente, o que os pode conduzir à rotura, queda ou deslocamento.

O custo de construção de um quebramar aumenta significativamente com a profundidade a que este é construído, assim como com a agressividade do clima de agitação marítima do local. Note-se também que o aumento do tamanho das embarcações a aceder ao porto implica que este possua maiores profundidades de água, dado que os barcos necessitam de maiores calados.

Como tal, os quebramares terão de ser construídos em profundidades cada vez maiores, de modo a conceder o devido abrigo e calado. Interessa pois obter o máximo conhecimento sobre o seu funcionamento estrutural, de modo a que a segurança seja a maior possível, mediante custos económicos aceitáveis.

Todos os anos é necessário proceder a dragagens no interior do porto de Leixões, em especial no terminal de petroleiros, visto serem os que necessitam de maior calado. Inúmeros relatos de operadores deste terminal indicam a ejeção de jactos de água e areia através do paramento posterior, quando ocorrem certas condições de agitação marítima. De notar que a distribuição dos assoreamentos verificados no terminal de petroleiros não tem a forma habitual quando se trata de transporte de sedimentos relacionados com fenómenos de difracção, ou seja, acumula-se maior quantidade de areia na zona mais afastada da cabeça do quebramar, sendo que esta quantidade diminui com a aproximação à cabeça. De referir ainda que a zona em análise neste trabalho é também aquela que tem sido alvo das mais significativas recargas periódicas de tetrápodes (em média, cerca de 250 tetrápodes por ano).

Além do mais, têm-se verificado, em média, galgamentos excessivos durante um número significativo de dias do mês, o que associado à existência de correntes locais nas imediações do Posto A (terminal de petroleiros) faz com que os petroleiros não consigam realizar as operações de acostagem, amarração e de descarga dos granéis líquidos, com os níveis de segurança mínimos exigíveis.

O aspecto actual do quebramar Norte, na zona do Posto A, é o que se apresenta na Figura 1.



Figura 1. Pormenor do manto de tetrápodes do quebramar Norte do Porto de Leixões, na secção do Posto A (3 de Junho de 2008).

2. Modos de Rotura

Em engenharia costeira, o termo **rotura** deverá ser entendido num sentido lato, indo de encontro ao significado da terminologia inglesa *failure*.

O termo rotura não deverá querer indicar objectivamente o colapso total ou parcial de determinada estrutura. De acordo com o CEM (2006) o termo rotura deverá ser considerado como um sinónimo de avaria, ou estrago, que origina o comportamento ou funcionalidade da estrutura abaixo do mínimo espectável, segundo os pressupostos de projecto.

De modo sucinto pode enumerar-se os seguintes modos de rotura (Figura 2), indicados por Burcharth (1992), Tomasicchio (2001) e CIRIA (2006):

- Arrastamento de blocos do manto resistente (instabilidade hidráulica);
- Galgamento;
- Rotura ou quebra dos elementos do manto resistente do talude anterior;
- Rotura dos elementos do manto resistente do talude posterior;
- Deslocamento ou rotura do maciço do coroamento;
- Erosão interna do núcleo ou das camadas de filtro (*Piping*);
- Instabilidade das camadas do filtro;
- Erosão da base da fundação do talude e da risberma;
- Erosão da berma do talude;
- Deslizamentos;
- Deslocamento de toda ou parte da estrutura;
- Rotura ou cedência da fundação (rotura geotécnica ou liquefacção);
- Assentamento excessivo da fundação;
- Assentamento excessivo do núcleo;
- Colisão de navios;
- Colisão de massas de gelo.

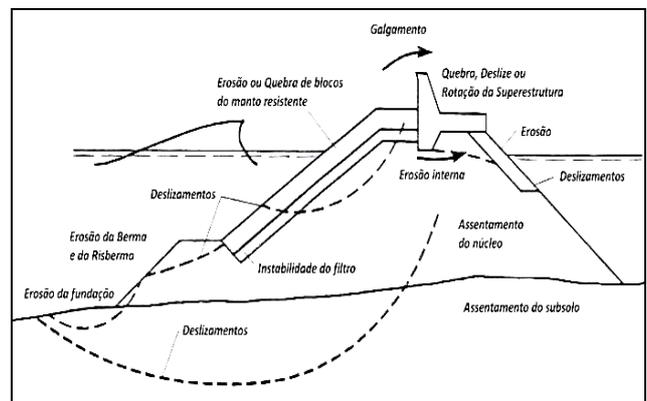


Figura 2. Modos de rotura, Burcharth (1992).

3. O programa COBRAS

A parte experimental deste trabalho foi executada com o auxílio do programa COBRAS (*Cornell Breaking Wave and Structures*). Este é um modelo numérico bidimensional que resolve as equações de Navier Stokes Médias de Reynolds (RANS) na vertical, utilizando um modelo não-linear tridimensional de turbulência.

Este modelo de turbulência permite ter em conta as características de escoamento que ocorrem no processo de rebentação e no escoamento através de meios porosos (Lara, 2006, Troch, 2001)

O modelo de cálculo em questão permite obter informação detalhada sobre a pressão, energia cinética turbulenta, velocidade horizontal e vertical, e configuração da superfície livre, entre outros.

O programa COBRAS é constituído por uma série de ficheiros. Os dados de entrada são compilados no ficheiro *input*. Após o programa ser executado, são criados os ficheiros de saída ou *output* do programa, que serão posteriormente lidos pelo programa MATLAB, no sentido de se criarem representações gráficas dos resultados de cada simulação. Os ficheiros de *output* consistem em seis tipos.

4. Modelação do Caso de Estudo

4.1. Modelação da malha de cálculo

De acordo com as peças desenhadas do Posto A e das secções adjacentes, sabe-se que a estrutura se encontra fundada à cota -17m (referida ao Z.H.) e que a amplitude de maré na região em estudo é de cerca de 4m.

A construção do modelo matemático a utilizar no programa COBRAS depende essencialmente de duas grandezas: a **profundidade de água** e o **comprimento de onda** da agitação incidente. Este, como se sabe, depende também do período e da altura da onda. Uma vez que o *software* COBRAS apenas opera com agitação regular, há que proceder à análise do clima de agitação do local e daí extrair as duas grandezas necessárias (período e altura de onda).

De acordo com os registos da agitação disponíveis e efectuando uma análise de sensibilidade aos comprimentos de onda incidentes, para diversos períodos de pico e profundidades de água, decidiu-se optar por um comprimento de onda de 150m. As simulações efectuadas tiveram como principais características as apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1. Identificação das simulações efectuadas.

Profundidade de água (m)	Altura de Onda (m)	
	3	5
17	Simulação A	-
21	Simulação B	Simulação C

A malha de cálculo utilizada para a realização das simulações está esquematizada na Figura 3.

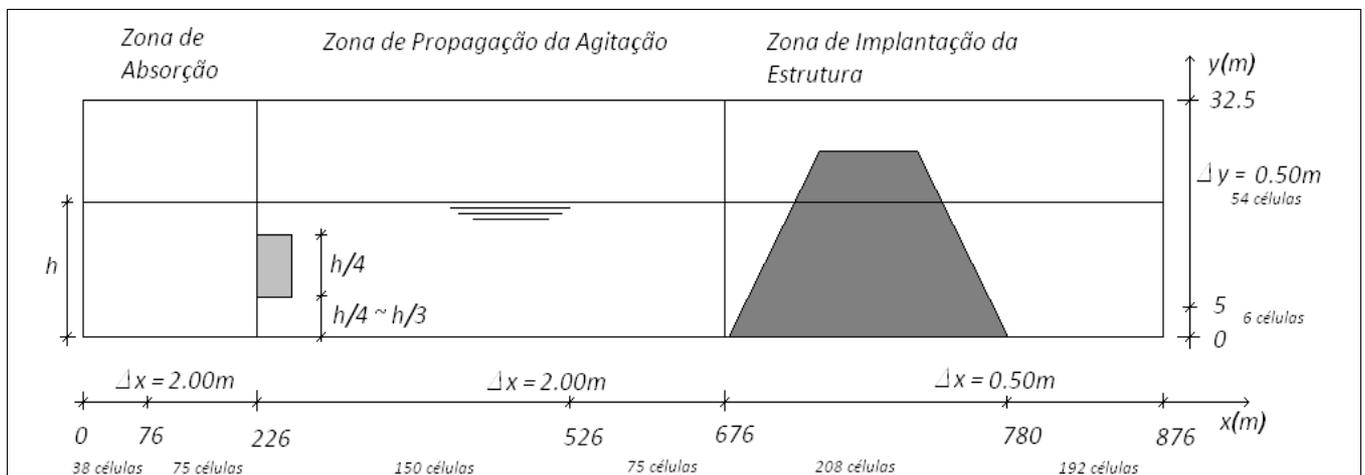


Figura 3. Esquema das dimensões da malha de cálculo utilizada, onde h representa a profundidade de água, Δx e Δy as dimensões horizontal e vertical das células da malha de cálculo, respectivamente.

4.2. Modelação de meios porosos e de obstáculos

No *software* COBRAS, os meios porosos e os obstáculos são definidos de forma idêntica. São utilizadas funções cónicas, sendo utilizados como *input* do *software* as suas constantes $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2, e_1$ e e_2 , de acordo com a seguinte expressão:

$$f(x, y) = a_1x + a_2x^2 + b_1y + b_2y^2 + c_1 + c_2xy + d^1 \cos[(n_x k_{xm})x] + d_2 \sin[(m_x k_{xm})x] + c_s \cos[(n_y k_{ym})y] + c_2 \sin[(m_y k_{ym})y] \quad [1]$$

$$k_{xm} = \frac{2\pi}{x_{\max}} \quad [2]$$

$$k_{ym} = \frac{2\pi}{y_{\max}} \quad [3]$$

em que x_{\max} e y_{\max} representam, respectivamente, os valores máximos na direcção x e y da malha de cálculo e onde n_x, n_y, m_x e m_y podem ser usados para gerar k_{xm} e k_{ym} .

Com efeito, a definição de toda a estrutura é realizada por sobreposição de várias regiões, definidas de acordo com a expressão [1].

A ordem com que é realizada essa sobreposição é importante, uma vez que o *software* COBRAS executa um algoritmo de eliminação de regiões conforme a ordem com que as regiões se sobrepõem.

Cada uma das regiões definidas (meios porosos e obstáculos), incluindo as suas funções, e a ordem com que têm de ser introduzidas no ficheiro de *input* têm de obedecer a uma forma preestabelecida.

Cada meio poroso fica totalmente definido através dos seguintes elementos:

- Definição geométrica – um conjunto de funções define as fronteiras do meio poroso;
- Diâmetro característico, d_{50} , expresso em m;
- Porosidade, n , expressa em m;
- Permeabilidade, k , expressa em m/s;
- Parâmetros α e β da equação de Forchheimer.

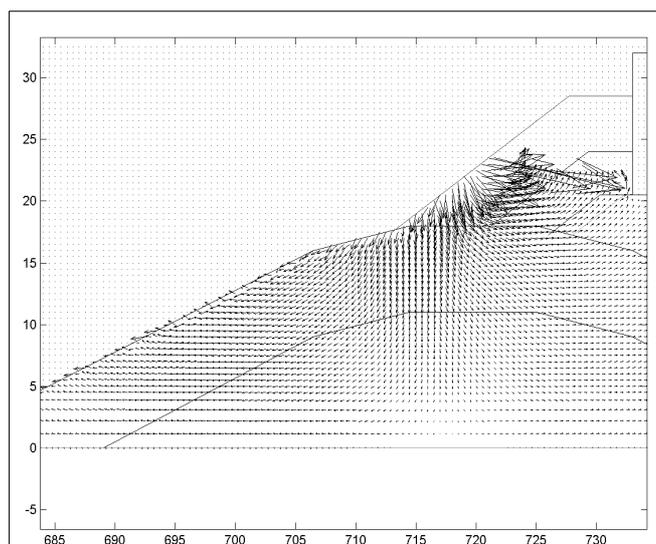


Figura 4. Campo de velocidades registado na simulação B, aquando de um espraçamento.

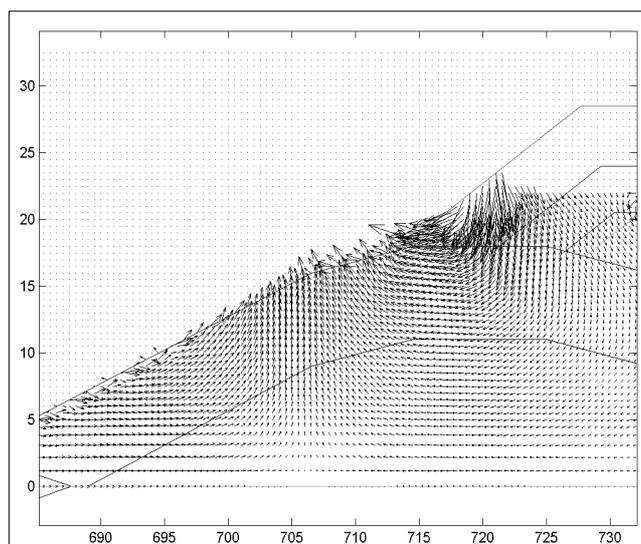


Figura 5. Campo de velocidades registado na simulação B, aquando de um refluxo.

5. Resultados Obtidos

5.1. Velocidade da água

Numa situação de espraçamento, Figura 4, verifica-se que as velocidades da água na base do manto de tetrápodes apresentam um movimento vertical descendente. De um modo geral, a água descreve um movimento de entrada na estrutura nas cotas mais elevadas e um movimento de saída, menos pronunciado, junto à base da estrutura.

Numa situação de refluxo, Figura 5, na base do manto de tetrápodes, as velocidades apresentam um movimento quase horizontal no sentido de barlar. Verifica-se a entrada de água na estrutura através de dois locais diferentes: pela base do manto de tetrápodes e pela base da estrutura (menos pronunciado).

A saída aparenta realizar-se por um único local, a cota onde termina o refluxo. A água parece assim realizar determinados movimentos cuja trajectória é circular.

No tardoz da estrutura, em ambas as situações de refluxo ou espraçamento, o campo de velocidades não se altera significativamente, a menos da grandeza do valor das velocidades. Verifica-se um movimento generalizado da água no sentido do tardoz da estrutura.

No Quadro 2 apresenta-se uma comparação das velocidades máximas verificadas nas simulações B e C, em cada uma das abcissas do modelo. Verifica-se que com um simples aumento de 1m (dada a incompleta geração da agitação verificada na simulação C, Quadro 1) na altura de onda significativa, podem ocorrer aumentos na velocidade máxima de escoamento da ordem de 60%.

Quadro 2. Comparação das velocidades máximas verificadas em cada uma das abcissas, nas simulações B e C.

Abcissa (m)	Localização	Velocidade Máxima (m/s)		Acréscimo (%)
		Simulação B	Simulação C	
715	Tetrápodes	5	5	0
	Meio Fluido	11	12	9
721	Tetrápodes	1	1.6	60
729	Cubos de 90t e Núcleo Antigo	0.009	0.012	33
	Acima dos Cubos de 90t	0.010	0.016	60
733	Núcleo	0.007	0.012	71
	Cubos de 90t e Núcleo Antigo	0.007	0.010	43
738.5	Núcleo	0.006	0.009	50
	Cubos de 90t	0.007	0.009	29
	Núcleo Antigo	0.006	0.009	50
742	Núcleo e Filtro 1	0.007	0.010	43
758	Filtro 2	0.004	0.005	25
	Meio Fluido	0.016	0.020	25

Quadro 3. Valores extremos do fluxo de energia registado nos últimos instantes de simulação, em cada uma das abcissas do modelo, nas três simulações.

Abcissa (m)	Simulação A (N/s)		Simulação B (N/s)		Simulação C (N/s)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
715	0	10	-70	150	-120	300
721	0.02	0.98	0	10	-3	55
729	0.15	0.53	0	0.85	0.10	1.75
733	0.18	0.41	-0.01	0.55	0.18	1.30
738.5	0.22	0.32	-0.02	0.45	0.10	1.05
742	0.22	0.27	-0.03	0.40	0.10	0.86
758	0.21	0.23	-0.05	0.40	0.15	0.70

5.2. Fluxo de energia

O fluxo de energia é a quantidade de energia que atravessa uma determinada secção, no presente caso, a secção da abcissa em questão. O fluxo de energia consiste assim no integral, desde a base do modelo até à superfície livre, do produto da pressão pela velocidade da água.

$$\text{Fluxo_Energia} = \int_{-d}^{\eta} p u dz \quad [4]$$

em que p representa a pressão, u a velocidade, z o nível, d a profundidade da água e η a elevação da superfície livre. O fluxo de energia expressa-se em N/s.

O fluxo de energia é um parâmetro interessante de analisar, na medida em que quantifica a energia da agitação que atravessa a estrutura, ou seja, permite medir a eficiência da estrutura na dissipação da energia incidente.

No Quadro 3 estão representados os valores extremos do fluxo de energia registado em diversas zonas da estrutura (abcissas). A partir deste quadro é possível verificar que a atenuação do fluxo de energia é semelhante em qualquer uma das simulações. Na simulação A, na primeira abcissa, a oscilação do fluxo de energia é de 10N/s, enquanto na última é de 0.02N/s, ou seja, ocorreu uma diminuição de 99,80%. Nas simulações B e C, embora os valores do fluxo de energia sejam mais elevados, a diminuição verificada foi de 99,84% e 99,87%, respectivamente. Estes resultados permitem concluir que a energia que atravessa o quebramar reduz-se significativamente no sentido de sotamar, ou seja, o intervalo de variação do fluxo de energia diminui com a localização de cada uma das abcissas.

6. Conclusões

Em relação aos campos de velocidades registados, apesar da secção do quebramar em estudo ser bastante complexa, verificou-se com clareza o padrão de escoamento indicado por Barends *et al.* (1983). Aquando do espraçamento ocorre a “entrada de água” na estrutura pela sua parte superior, verificando-se nessa zona velocidades verticais descendentes. Por sua vez, no refluxo verificou-se a “saída de água” pela zona da cava da onda, que corporiza a cota de refluxo. As velocidades aqui são também verticais, mas ascendentes.

Tanto no espraçamento como no refluxo, na zona da base da estrutura, verifica-se um movimento da água contrário ao indicado, embora menos pronunciado, ou seja, com velocidades menores.

No que se refere a velocidades máximas, comparando as simulações B e C verifica-se que com um simples aumento de cerca de 1m (dada a incompleta geração da agitação) na altura de onda significativa, podem ocorrer aumentos na velocidade máxima de escoamento da ordem de 60%.

Em ambas as situações de Preia-Mar (simulações B e C), as velocidades da água na base do manto de tetrápodes apresentam um movimento vertical descendente durante o espraçamento. Durante o refluxo, as velocidades adquirem uma direcção quase horizontal no sentido de barlar.

Quer no espraçamento, quer no refluxo verifica-se também um movimento generalizado da água no sentido de sotamar. Em ambos os casos o valor da velocidade não se altera significativamente, sendo igual à velocidade mínima de escoamento verificado. Dado que esta velocidade nunca se revelou inferior a 0,001m/s, verificou-se o pressuposto de que o escoamento é turbulento. Este movimento generalizado da água no sentido de sotamar despoletou um fenómeno inconveniente e revelou uma debilidade do *software*. Não havendo um método de restituição da água no tardo da estrutura, verificou-se a sua acumulação, isto é, o nível da água ao final de 300s de simulação aumentou cerca de 0.15m. Esta é uma desvantagem do programa, cuja principal consequência é o facto de não se poder dizer que a qualidade dos resultados aumenta quando se aumenta o tempo de simulação.

Os registos do fluxo de energia permitem corroborar o facto de que o quebramar em estudo é mais eficaz a dissipar energia quando a água está ao nível da maré baixa do que quando está ao nível da preia-mar. A energia registada na última abcissa do modelo é maior na simulação B do que na simulação A, quando em ambas é simulada uma igual altura de onda. Registe-se também que a maior limitação do programa COBRAS é o facto de não se tratar de um programa comercial, razão pela qual a sua utilização se revela muito pouco amigável. A modelação dos meios porosos e da malha de cálculo não é simples e o *software* não fornece qualquer auxílio à detecção de erros no ficheiro de *input*.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao professor Peter Troch, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Gent, Bélgica (Universiteit Gent Faculteit Ingenieurswetenschappen), pelo auxílio na delimitação da estratégia de definição e construção do modelo numérico a utilizar neste trabalho.

Agradece-se também a hospitalidade e simpatia demonstrada pelo professor Javier López Lara, da Universidade de Cantábria, Espanha (Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, Universidad de Cantabria), aquando da visita a Santander, para aprendizagem da utilização do modelo numérico COBRAS.

Especiais agradecimentos são também devidos aos investigadores da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da FEUP, Eng. Raquel Silva, Eng. Paulo Santos e Eng. Hugo Lopes.

Referências

Barends, F. B. J. (1999). European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. A. A. Balkema, Amsterdam.

Burcharth, H. F. (1992). *Rehabilitation Evaluation of Structures at Sea - The design of breakwaters*. Proc. of the Short Course on Design and Reability of Coastal Structures, Tecnoprint Bologna, Venice, Italy.

CEM - *Coastal Engineering Manual (2006). Part VI - Chapter 5 - Fundamentals of Design*.

<http://chl.erdc.usace.army.mil>

CIRIA; CUR; CETMEF (2006). *The Rock Manual - The use of rock in hydraulic engineering*. Second Edition, C683, CIRIA, London.

Lara, J. L; Garcia, N.; Losada, I. J. (2006). *RANS Modelling Applied to Random Wave Interaction with Submerged Permeable Structures*. Coastal Engineering, vol.53, no5-6, pp.395-417, Elsevier, Amsterdam.

Tomasicchio, Ugo (2001). *Manuale Di Ingegneria Portuale e Costiera*. Bios, Bologna.

Troch, Peter (2001). Experimental Study and Numerical Modeling of Pore Pressure Attenuation inside a Rubble Mound Breakwater. Paper awarded the international PIANC G. Willems Prize Competition.