



ANÁLISE DO ESCOAMENTO ATRAVÉS DO QUEBRAMAR DE TALUDES NORTE DO PORTO DE LEIXÕES.

PEDRO MIGUEL PEREIRA ⁽¹⁾, FRANCISCO TAVEIRA PINTO ⁽²⁾, FERNANDO VELOSO GOMES ⁽³⁾ e J.L. LARA ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ *Mestre em Engenharia Civil, Aluno de Doutoramento da FEUP, miguel.pereira@fe.up.pt*

⁽²⁾ *Professor Associado com Agregação, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias, fpinto@fe.up.pt*

⁽³⁾ *Professor Catedrático, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias, vgomes@fe.up.pt*

⁽⁴⁾ *Professor, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de CAminos, Canales y Puertos, Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, Universidad de Cantabria
Av. Castros (Santander, Espanha)*

RESUMO

Os quebramares de taludes são estruturas portuárias de protecção contra a acção da agitação marítima. Com a sua construção são criados planos de água calmos, sem grande agitação, de modo a possibilitar as diversas operações portuárias. São estruturas que podem ter um significativo desenvolvimento em planta e que envolvem grandes volumes de materiais, razão pela qual a sua construção tem um custo muito avultado. Interessa pois obter o máximo conhecimento sobre o seu funcionamento hidráulico e estrutural, de modo a que a segurança seja a maior possível, mediante custos económicos aceitáveis.

O porto de Leixões tem uma inigualável importância para o desenvolvimento da região Norte de Portugal. Este porto está protegido por dois quebramares de taludes, fruto de várias etapas de desenvolvimento e aumento da capacidade de operação.

O quebramar Norte é o que tem maior desenvolvimento em planta e é aquele que proporciona um maior abrigo ao porto.

No tardo do quebramar Norte encontra-se instalado o terminal para petroleiros, designado por Posto A. Inúmeros relatos de operadores daquele cais indicam o aparecimento de jactos de água e de areia através do paramento posterior, quando ocorre um certo nível de agitação marítima.

Anualmente, o terminal de petroleiros é periodicamente alvo de dragagens, sendo que a distribuição dos assoreamentos verificados nas imediações do Posto A não tem a forma habitual quando se trata de transporte de sedimentos associados a fenómenos de difracção.

De facto, acumula-se uma maior quantidade de areia 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 assim com este trabalho, aplicando um programa de cálculo automático a um modelo da estrutura em estudo, o Quebramar Norte do Porto de Leixões, analisar o modo como a agitação se propaga no interior do quebramar e assim verificar possíveis debilidades da estrutura que conduzam às deficiências anotadas.

Esta análise será feita utilizando apenas agitação regular. Nesta comunicação são apresentados alguns resultados de algumas das simulações efectuadas.



PALAVRAS-CHAVE: Quebramares de Taludes, Modos de Rotura, Processos de Escoamento, Porto de Leixões.

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.

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 ser o que necessita 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. O Software COBRAS

A modelação 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.

3. Modelação do Caso de Estudo

3.1. 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 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. A malha de cálculo utilizada para a realização das simulações está esquematizada na figura 2.

Quadro 1. Identificação das simulações efectuadas.

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

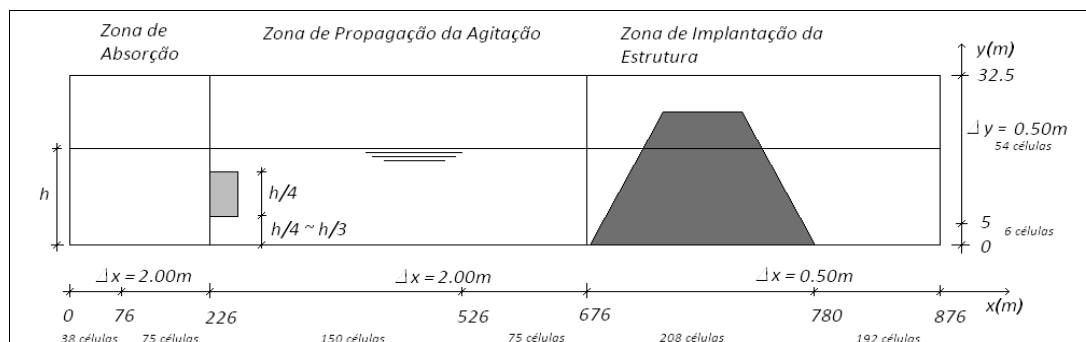


Figura 2. Esquema das dimensões da malha de cálculo utilizada, onde h representa a profundidade de água, Δx e Δy as dimensões horizontal e vertical das células da malha de cálculo, respectivamente.

3.2. 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:

$$f(x, y) = a_1 x + a_2 x^2 + b_1 y + b_2 y^2 + c_1 + c_2 xy + d_1 \cos[(n_x k_{xm})x] + d_2 \sin[(m_x k_{xm})x] + c_s \cos[(n_y k_{ym})y] + c_2 \sin[(m_y k_{ym})y] \quad [1]$$

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

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

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 pré-estabelecida. 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.

4. Resultados Obtidos

4.1. Velocidade da Água

Numa situação de espraiamento, figura 3, 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 4, 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 tardo da estrutura, em ambas as situações de refluxo ou espraiamento, 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 tardo da estrutura.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

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%.

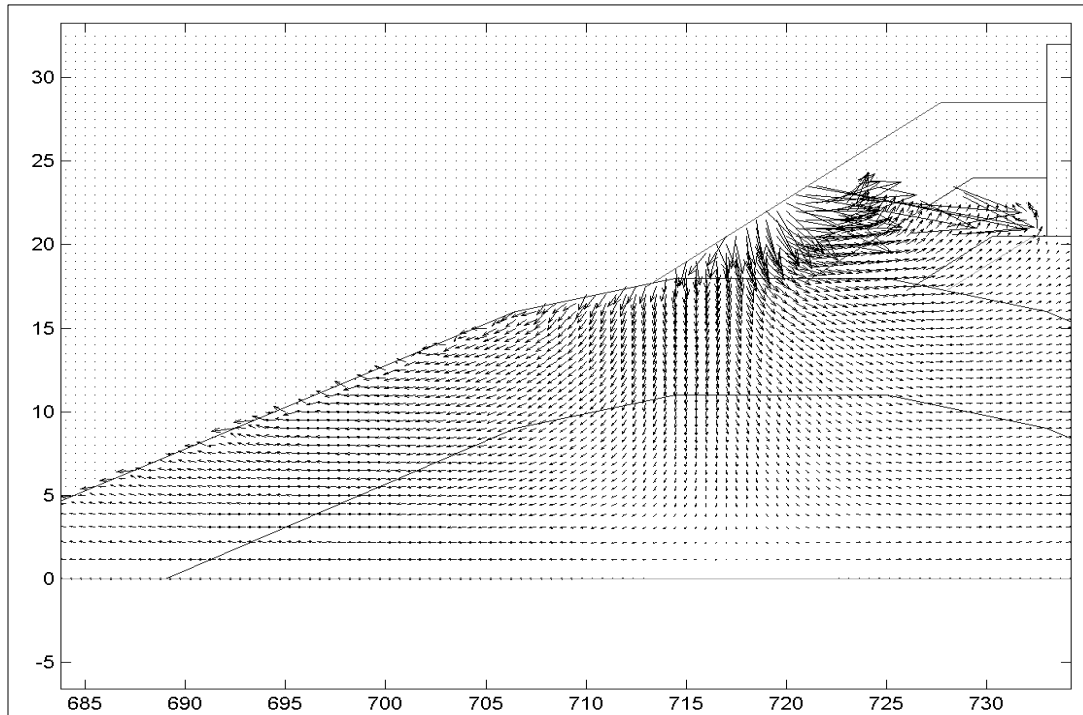


Figura 3. Campo de velocidades registado na simulação B, aquando de um espraçamento.

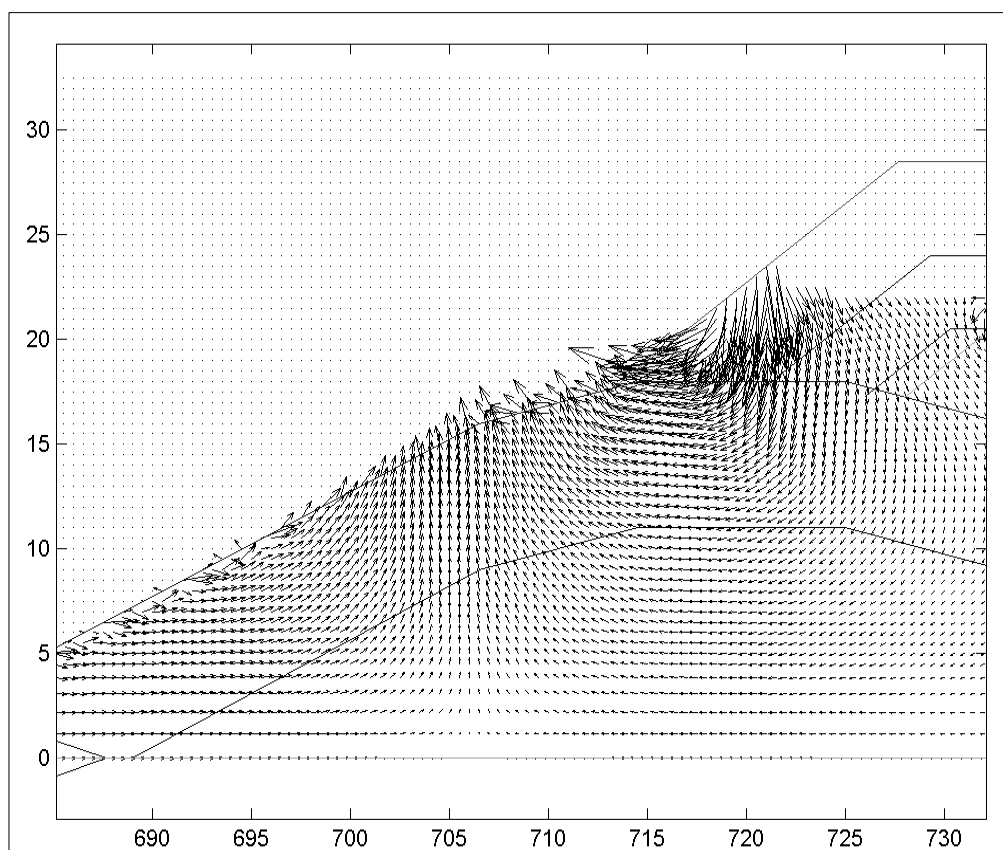


Figura 4. Campo de velocidades registado na simulação B, aquando de um refluxo.

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



4.2. 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 registados em diversas zonas da estrutura (abscissas). 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 abscissas.

Quadro 3. Valores extremos do fluxo de energia registado nos últimos instantes de simulação, em cada uma das abscissas 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. 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 espraiamento ocorre a “entrada de água” na estrutura pela sua parte superior, verificando-se nessa zona velocidades verticais descendentes. Por sua



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

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 espraiamento 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 espraiamento. Durante o refluxo, as velocidades adquirem uma direcção quase horizontal no sentido de barlamar.

Quer no espraiamento, 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 Ingenieurs-wetenschappen), pelo seu auxílio na delineação 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). *Rehability 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.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

<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.

Tomasichio, 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.