



DESENVOLVIMENTO DO MODELO NUMÉRICO AMAZON PARA O CÁLCULO DO GALGAMENTO DE ESTRUTURAS MARÍTIMAS POROSAS

Maria Teresa Reis, Maria da Graça Neves e Luís Gabriel Silva
Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P.

RESUMO

Neste artigo descrevem-se os desenvolvimentos que o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. (LNEC), em colaboração com o Dr. Keming Hu (Royal Haskoning, UK), tem vindo a efectuar desde 2007 ao modelo numérico AMAZON de forma a permitir o cálculo do galgamento de estruturas marítimas porosas. O modelo é baseado nas equações não lineares de águas pouco profundas e na sua versão original não permitia modelar explicitamente o escoamento em meios porosos.

Para ilustrar as novas capacidades do AMAZON no cálculo do caudal médio de galgamento por metro linear de estrutura, apresentam-se dois casos de aplicação reais, para os quais existem resultados de ensaios em modelo físico realizados no LNEC: um envolvendo um quebra-mar com manto de enrocamento e o outro um quebra-mar com manto composto por blocos artificiais. A comparação dos resultados do modelo com os de ensaios em modelo físico permite verificar que os resultados obtidos com a nova versão do modelo são satisfatórios. Por fim, descrevem-se os futuros desenvolvimentos previstos para o modelo.

1. INTRODUÇÃO

Em Portugal, as zonas costeiras e portuárias assumem uma importância indiscutível em termos económicos, sócio-culturais, recreativos e ambientais. No entanto, estas zonas estão sujeitas a um conjunto de riscos de origem diversa, tais como o risco de inundação costeira. A segurança e funcionalidade destas zonas dependem, em grande parte, do comportamento das estruturas marítimas que as protegem, especialmente no que respeita à sua estabilidade e galgamento.

Numa era de aquecimento global, subida do nível médio da água do mar e aumento de ocorrência de temporais (que podem resultar num aumento das solicitações nas estruturas), por um lado, e em que as normas e a sociedade exigem, cada vez mais, uma quantificação dos riscos e um aumento da fiabilidade de infra-estruturas de engenharia, por outro, é fundamental a existência de ferramentas precisas e eficientes para o estudo do galgamento de estruturas marítimas.

Nos últimos tempos, devido à melhoria dos meios de cálculo, intensificou-se o desenvolvimento de modelos numéricos para o cálculo do galgamento e a sua aplicação começa a tornar-se cada vez mais atractiva. No entanto, para que as simulações efectuadas sejam realistas, os modelos devem ser capazes de representar todos os fenómenos hidrodinâmicos relevantes e de modelar um número de ondas suficiente para gerar resultados consistentes.

Actualmente, embora ainda não existam modelos numéricos que sejam simultaneamente precisos e eficientes do ponto de vista computacional, os diversos tipos de modelos disponíveis, reúnem, cada um, parte destes requisitos.

A aplicação a casos práticos de Engenharia dos modelos mais complexos (e.g. Ingram et al., 2004; Dalrymple e Rogers, 2006; Losada et al., 2008), baseados nas equações completas de Navier-Stokes, ainda apresenta limitações, essencialmente relacionadas com o seu tempo de cálculo, que não se compadece com o pouco tempo usualmente disponível para projecto.

Os modelos baseados nas equações não lineares de águas pouco profundas (e.g. Van Gent, 1994; Dodd, 1998; Hu, 2000; Clarke et al., 2004), apesar das suas limitações (essencialmente relacionadas com as equações de base), permitem simulações realistas e rápidas, se bem que



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

simplificadas. Estão já a ser utilizados em dimensionamento de estruturas marítimas galgáveis e na previsão de inundações, uma vez que permitem simular rapidamente 1000 (ou mais) ondas. Estes modelos têm sido validados essencialmente para estruturas impermeáveis (e.g. Dodd, 1998; Hu et al., 2000) e para praias permeáveis (e.g. Van Gent, 1996; Clarke et al., 2004), não tendo sido ainda validados sistematicamente para o estudo do galgamento de estruturas marítimas porosas.

Assim, desde 2007, o LNEC, em colaboração com o Dr. Keming Hu (Royal Haskoning, UK), tem vindo a desenvolver um modelo deste tipo, o modelo AMAZON (Hu, 2000), e a proceder à sua validação sistemática (Reis et al., 2008b, 2009a, 2009b). Para simular o escoamento em meios porosos, foram implementadas no modelo as equações de Darcy (válida para escoamentos laminares estacionários) e de Forchheimer (válida para escoamentos turbulentos estacionários).

Neste artigo, descrevem-se as alterações efectuadas à versão inicial do modelo e ilustra-se a sua aplicação, utilizando a equação de Darcy, a dois casos de estudo reais, para os quais existem resultados de ensaios em modelo físico realizados no LNEC: cálculo do caudal médio de galgamento por metro linear de um quebra-mar de enrocamento e de um quebra-mar com manto de cubos Antifer. Os resultados do modelo são apresentados, discutidos e comparados com os resultados dos ensaios em modelo físico. Estes exemplos permitem ilustrar as capacidades do modelo, assim como as suas vantagens e limitações.

No ponto 2 apresenta-se uma descrição sucinta dos desenvolvimentos que o LNEC, em colaboração com o Dr. Keming Hu (Royal Haskoning, UK), tem vindo a efectuar ao modelo AMAZON. Nos pontos 3 e 4 descrevem-se os casos de estudo, apresentam-se os resultados obtidos e a discussão dos mesmos. Por fim, o ponto 5 contém as considerações finais do trabalho e os futuros desenvolvimentos do modelo numérico.

2. DESCRIÇÃO DOS DESENVOLVIMENTOS DO MODELO

O modelo numérico AMAZON foi desenvolvido originalmente em Manchester Metropolitan University e baseia-se na resolução das equações não lineares de águas pouco profundas (NLSW). Em Hu (2000) e em Reis et al. (2007, 2008a), apresenta-se uma descrição detalhada da versão original do modelo.

Na sua versão original, o AMAZON estava essencialmente desenvolvido para estruturas impermeáveis. Para o caso de estruturas permeáveis, o modelo permitia, como aproximação, a utilização de um parâmetro de atrito de fundo para se introduzir dissipação de energia (Hu, 2000). No entanto, os resultados do modelo sugerem que a utilização deste parâmetro para modelar a porosidade não é eficiente, pois tem uma influência muito reduzida quando os meios se encontram submersos e não simula convenientemente o seu efeito quando esses meios não estão submersos ou a submersão se dá sobre uma fina camada de água e apenas num curto período de tempo (Neves et al., 2008).

Assim, tendo em conta a eficiência do AMAZON do ponto de vista de esforço computacional, desde 2007 que o LNEC tem vindo a desenvolver o modelo de forma a permitir modelar explicitamente o escoamento em meios porosos e a proceder à sua validação sistemática para o estudo do galgamento de estruturas marítimas porosas (Reis et al., 2008b, 2009a, 2009b). O objectivo final é desenvolver um modelo numérico que seja de fácil utilização e que represente um bom compromisso entre tempo de cálculo e precisão em termos de resultados de galgamento.

O desenvolvimento da nova versão do modelo inclui a introdução de uma única camada porosa em que a porosidade é considerada constante para toda a camada. Para estruturas com mais do que uma camada porosa e/ou com um núcleo com diferentes características, a estrutura terá que ser representada por uma estrutura permeável homogénea ou por uma estrutura permeável com um núcleo impermeável.

Para simular o escoamento em meios porosos, foram implementadas no modelo as equações de Darcy (válida para escoamentos laminares estacionários) e de Forchheimer (válida também para escoamentos turbulentos estacionários):

- Equação de Darcy: $I = u/K$ (1)

- Equação de Forchheimer: $I = au + bu|u|$ (2)

em que I é o gradiente hidráulico, u é a velocidade do escoamento na camada porosa (integrada na vertical), K é a condutividade hidráulica (ou coeficiente de Darcy) e a e b são coeficientes para os quais existem na literatura diversas expressões de cálculo (no AMAZON adoptaram-se as expressões indicadas em CIRIA/CUR/CETMEF, 2007).

A transferência de água entre a camada porosa e a camada superficial é limitada pela velocidade máxima que o escoamento de água pode ter durante a transferência entre as duas camadas, denominada IP. As duas camadas usam a mesma malha computacional. Assim, cada célula na camada superficial tem uma célula correspondente na camada porosa. A transferência da água entre as duas camadas é actualizada em cada passo de cálculo:

- Se a célula porosa não estiver cheia e se a célula superficial correspondente estiver molhada, há transferência de água da célula superficial para a célula porosa, limitada pelo valor de IP (Figura 1a).
- Se a célula porosa estiver cheia e a pressão da água na camada porosa for superior à pressão da água na camada superficial, então há transferência de água da célula porosa para a célula superficial correspondente, limitada pelo valor de IP (Figura 1b).

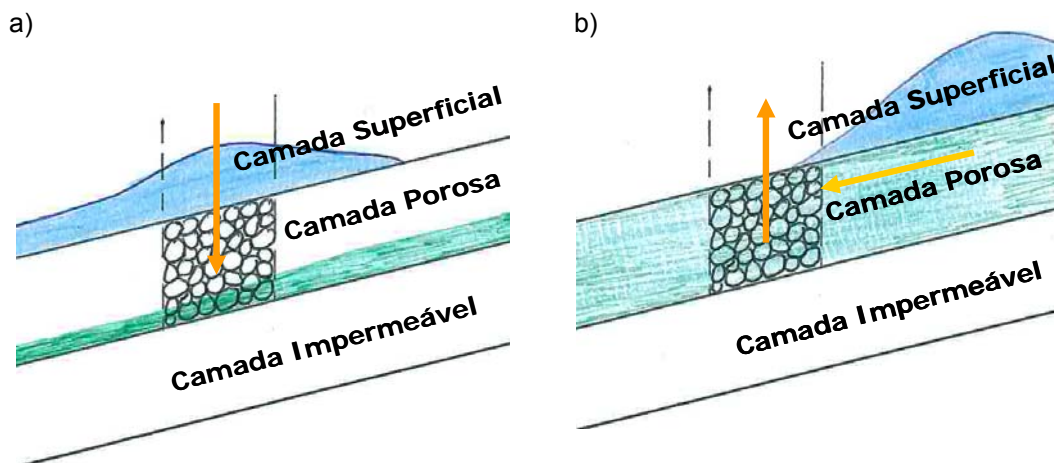


Figura 1 – Representação esquemática da transferência de água entre a camada porosa e a camada superficial no modelo AMAZON.

No AMAZON, assume-se que IP é constante e é um dado do modelo. Para a equação de Darcy, os parâmetros K e IP têm que ser calibrados. Alguns autores (e.g. Van Gent, 1994; Clarke et al., 2004) assumiram que o gradiente hidráulico, I , na interface entre as duas camadas não é superior a 1, o que corresponde a considerar que $IP \leq K$ para a equação de Darcy.

3. GALGAMENTO DE UM QUEBRA-MAR COM MANTO DE ENROCAMENTO

3.1. Descrição

O quebra-mar com manto de enrocamento considerado neste estudo correspondente a uma das várias soluções alternativas propostas para a reabilitação do enraizamento do molhe sul do porto de pesca da Póvoa de Varzim (Figura 2). O perfil-tipo proposto consiste num quebra-mar misto, composto por um talude reperfilado com a inclinação de 2:1, rematado superiormente por uma banquetta com 15 m de largura à cota +5.25 m (ZH). O reperfilamento é feito por enrocamentos da gama 75-100 kN, sem filtro nem núcleo, encostado ao paramento vertical exterior do molhe. Este enrocamento assenta sobre o maciço irregular existente, constituído por enrocamento da gama 10-50 kN. A solução estudada visa reduzir a valores aceitáveis os galgamentos, mesmo nas condições mais adversas de agitação e de níveis oceânicos.

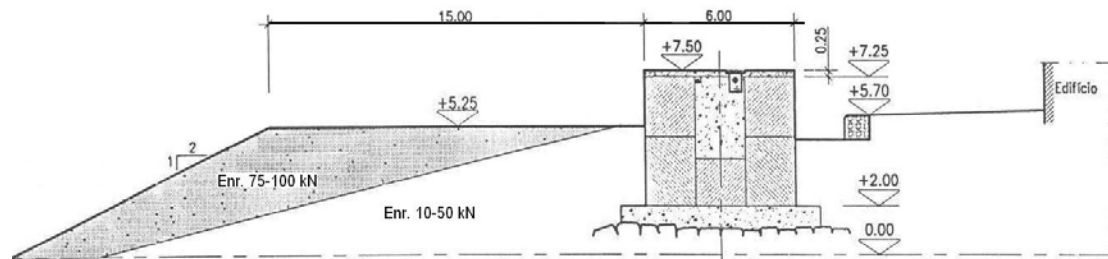


Figura 2 – Perfil-tipo para a reabilitação do enraizamento do molhe sul do porto da Póvoa de Varzim utilizado neste estudo (os valores apresentados são valores de protótipo e as cotas são relativas ao ZH).

3.2. Ensaios em Modelo Físico

Para verificar a eficácia do perfil-tipo proposto no que respeita aos galgamentos, foram realizados no LNEC ensaios em modelo físico bidimensional (Lemos et al., 2006). O modelo foi construído e explorado de acordo com a lei de semelhança de Froude, tendo sido utilizada a escala geométrica de 1:50.

Para além destes ensaios, foram realizados ensaios adicionais que envolveram diferente equipamento (Figura 3), com o intuito de estudar em maior profundidade os galgamentos na estrutura (Reis et al., 2008c). Primeiro, para cada condição nominal de ensaio e para três durações de ensaio distintas, foram testadas diferentes séries incidentes, todas com a mesma configuração espectral empírica de JONSWAP. Segundo, uma das condições nominais de ensaio foi considerada novamente, mas para doze durações de ensaio diferentes.

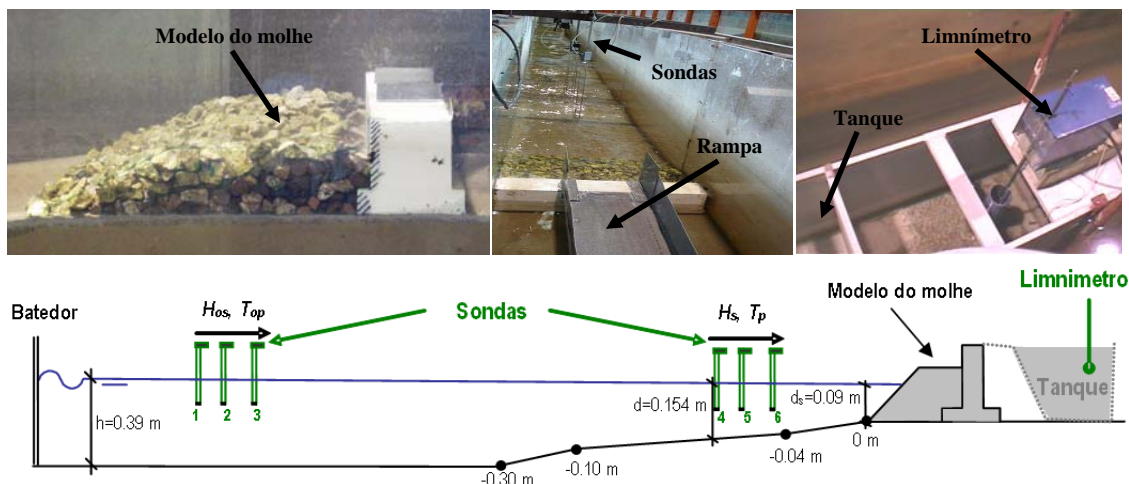


Figura 3 – Modelo físico da solução proposta para a reabilitação do molhe sul do porto da Póvoa de Varzim. Representação esquemática do canal dos ensaios, do modelo do molhe e do equipamento utilizado.

Para cada condição nominal de ensaio, a totalidade dos ensaios efectuados permitiu a análise da variabilidade do volume de água que transpunha o paramento vertical do molhe, originando uma gama de variação dos valores medidos do caudal médio de galgamento, q_{MF} (com um valor mínimo e um valor máximo). As diferenças no valor de q_{MF} devem-se às diferentes características das ondas que incidem no molhe e à sua diferente forma de rebenção.



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

Os ensaios adicionais encontram-se descritos detalhadamente em Reis et al. (2008c). Este artigo concentra-se nos resultados de 4 ensaios a cada um dos quais corresponde uma duração, D , de 270 s. No Quadro 1 apresentam-se os valores médios de volumes galgados por metro linear de estrutura, q_{MF} , para estes 4 ensaios, bem como a gama de variação de q_{MF} obtida com base na totalidade dos ensaios (valores mínimos e máximos). Neste quadro, os valores apresentados correspondem a valores do modelo, onde H_{os} e T_{op} representam valores incidentes da altura de onda significativa e do período de pico do espectro junto ao bater e H_s e T_p valores em frente à estrutura. Estes valores foram obtidos aplicando o método de Mansard e Funke (1980) de separação da energia incidente e reflectida aos dados medidos nas 3 sondas colocadas junto ao bater e nas 3 sondas colocadas em frente à estrutura, respectivamente.

Quadro 1 – Valores médios de volumes galgados por metro linear de estrutura, q_{MF} , medidos nos 4 ensaios considerados neste estudo e gama de variação de q_{MF} .

Ensaio	D (s)	H_{os} (m)	T_{op} (s)	H_s (m)	T_p (s)	q_{MF} ($m^3/s/m$)	Gama de variação de q_{MF} ($m^3/s/m$)
1	270	0.09	1.69	0.07	1.75	1.66E-5	0.90E-5 a 2.83E-5
2	270	0.08	2.24	0.07	2.24	2.65E-5	2.65E-5 a 8.44E-5
3	270	0.11	2.28	0.08	2.33	1.65E-4	1.15E-4 a 2.02E-4
4	270	0.14	2.21	0.09	2.93	4.44E-4	3.43E-4 a 4.69E-4

Os ensaios estão numerados por ordem crescente de galgamento, q_{MF} . Como seria de esperar, a variação dos valores de q_{MF} em relação à média é maior para os menores valores de q_{MF} e diferentes séries incidentes (todas com a mesma configuração espectral empírica de JONSWAP) têm um impacto diferente no volume de galgamento.

3.3. Aplicação do Modelo AMAZON

Para ilustrar a aplicabilidade da actual versão do AMAZON ao cálculo do galgamento de estruturas marítimas porosas com manto de enrocamento, esta versão foi aplicada, à escala do modelo, aos 4 ensaios acima descritos.

A fronteira de saída do modelo é uma fronteira de absorção total e foi colocada a 0.16 m a jusante da superestrutura do molhe. A localização da fronteira de entrada recomendada por Hu e Meyer (2005) foi utilizada neste estudo, i.e. a fronteira de entrada foi colocada a aproximadamente um comprimento de onda, L_s , do pé da estrutura (isto é, na sonda 4; ver Figura 3), em que L_s é o comprimento de onda à profundidade d_s do pé da estrutura e L_s é calculado da seguinte forma: $L_s = T_p \sqrt{gd_s}$, sendo g a aceleração da gravidade e T_p o período de pico do espectro incidente junto à obra.

Assim, na fronteira de entrada do modelo, aplicou-se a série incidente em frente à obra obtida por aplicação do método de Mansard e Funke (1980) aos dados medidos nas sondas 4, 5 e 6. Consequentemente, é de esperar que a série incidente aplicada no modelo seja ligeiramente diferente da série nos ensaios em modelo físico, devido às limitações inerentes a este método (Lin e Huang, 2004). Mais ainda, tal como mencionado anteriormente, séries incidentes distintas têm um impacto diferente no volume de galgamento. Como tal, para entrar em linha de conta com estas diferenças, o desempenho do AMAZON foi avaliado comparando os seus resultados com os dados em que esta variabilidade foi tida em consideração, i.e. o resultado do AMAZON para cada um dos 4 ensaios foi comparado com a correspondente gama de variação de q_{MF} (última coluna do Quadro 1), em vez de ser comparado simplesmente com o resultado do ensaio em modelo físico correspondente (penúltima coluna do Quadro 1).

Para os 4 casos a que se aplicou o modelo, d/L_{op} varia entre 0.019 e 0.035, em que d é a profundidade na fronteira de entrada (ver Figura 3) e L_{op} é o comprimento de onda junto ao



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

batedor, calculado segundo a teoria linear da onda através de $L_{op} = gT_{op}^2 / 2\pi$. Estes valores estão dentro dos limites que a literatura existente tem indicado ($0.016 < d/L_{op} < 0.19$) como valores para os quais se obtém bons resultados com modelos baseados na resolução das equações não lineares de águas pouco profundas (Pullen e Allsop, 2003).

O domínio de cálculo utilizado foi de 2.4 m de comprimento e o número total de células foi de 555. A malha de cálculo utilizada tem uma discretização de: 1 cm na parte mais profunda do domínio, ou seja, em frente ao local de implantação do molhe, e na zona a sotamar da estrutura; 4 mm na zona junto ao pé da estrutura; e 2 mm na zona do molhe. A altura de água mínima em cada célula da malha de cálculo foi de 2×10^{-5} cm, o que significa que qualquer célula com uma profundidade inferior a esta é removida dos cálculos e tratada como seca.

As características geométricas dos fundos em frente ao molhe e da envolvente do molhe do modelo físico foram fielmente representados no AMAZON. Os fundos em frente ao molhe e a superestrutura foram modelados como impermeáveis e sem atrito.

A permeabilidade do manto inferior de enrocamento foi ignorada. Só o manto superior de enrocamento foi considerado como uma camada permeável, com uma porosidade de 0.54 e um diâmetro médio do enrocamento de 33.2mm (como no modelo físico). O efeito da permeabilidade do manto superior de enrocamento foi tida em consideração através da aplicação da equação de Darcy, para a qual os parâmetros K e IP têm que ser calibrados. Na literatura (e.g. CIRIA/CUR/CETMEF, 2007), existem valores de referência de K para diferentes gamas de diâmetros e para um diâmetro médio de 33.2mm o valor de K apresentado é de aproximadamente 0.1 m/s. Para estudar a sensibilidade dos resultados do AMAZON, q_{AM} , aos valores de K, variou-se K entre 0.05 m/s e 0.15 m/s e IP foi variado de forma a que $IP \leq K$.

Os casos foram simulados num computador Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E6550, com 2.33 GHz e 2 GB de RAM. Os tempos de execução médios aumentaram com o valor de IP e variaram entre 1h e 1h30min, aproximadamente, para ensaios de 270 s.

A Figura 4 mostra a variação de q_{AM}/q_{MF} , quer com K, quer com IP, para os 4 ensaios. Como referido anteriormente, para cada ensaio em modelo físico, o que se pretende é um resultado do AMAZON que esteja dentro da correspondente gama de variação de caudais médios, representada na Figura 4 pelas 2 linhas a tracejado. A figura indica que a variação de K não tem um efeito significativo nos resultados, qualquer que seja o ensaio analisado, pelo menos para a gama de valores de K considerada ($0.05 \text{ m/s} \leq K \leq 0.15 \text{ m/s}$). Este resultado sugere que o tipo de escoamento no meio poroso poderá ser de importância secundária para a determinação do caudal médio de galgamentos e que a equação de Darcy poderá ser uma aproximação satisfatória para simular o escoamento na camada de enrocamento, apesar de, teoricamente, ser válida apenas para escoamentos laminares estacionários. Ao contrário de K, o impacto de IP nos resultados é significativo.

Assim, a Figura 5 mostra a variação de q_{AM}/q_{MF} apenas em função de IP. Estes resultados foram obtidos considerando $K=IP$ e sugerem, tal como a Figura 4, que o impacto de IP nos resultados depende do ensaio considerado: o impacto reduz-se para ensaios com maior galgamento (i.e., ensaios 3 e 4). As Figuras 4 e 5 sugerem ainda que os resultados do AMAZON que melhor se ajustam aos dados do modelo físico foram obtidos para valores de IP entre 0.125 m/s e 0.15 m/s: tal como pretendido, para esta gama de valores de IP os resultados do AMAZON para os 4 ensaios analisados estão praticamente todos dentro das gamas de caudais médios obtidas nos ensaios e $0.79 \leq q_{AM}/q_{MF} \leq 1.39$ (Figura 6). Note-se no entanto que, na ausência de dados de ensaios em modelo físico que possibilitem a calibração do modelo, os resultados do AMAZON usando $IP=K=0.1 \text{ m/s}$, valor recomendado na literatura, são bastante satisfatórios ($0.99 \leq q_{AM}/q_{MF} \leq 1.96$), apesar de os resultados do AMAZON para os ensaios 1 e 3 serem ligeiramente superiores às correspondentes gamas de caudais médios obtidas nos ensaios.

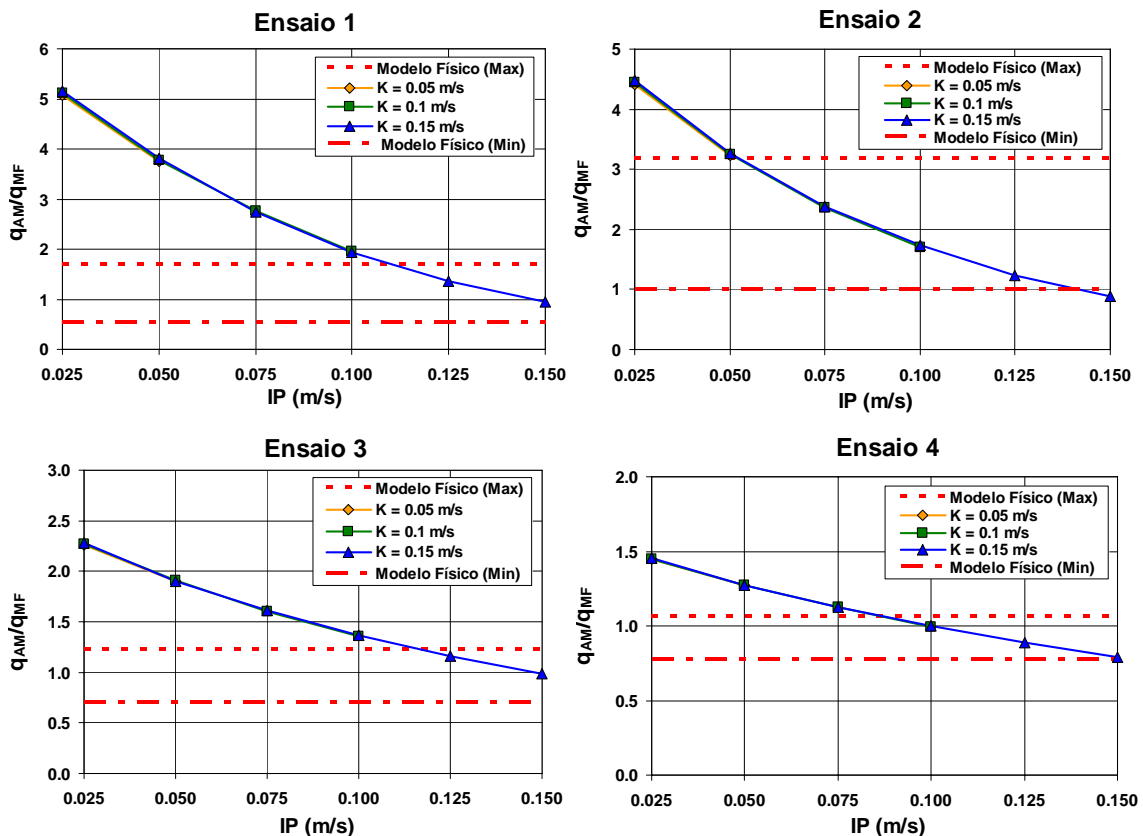


Figura 4 – Resultados do AMAZON obtidos através da aplicação da equação de Darcy: variação de q_{AM}/q_{MF} com K e com IP para os Ensaio 1 a 4.

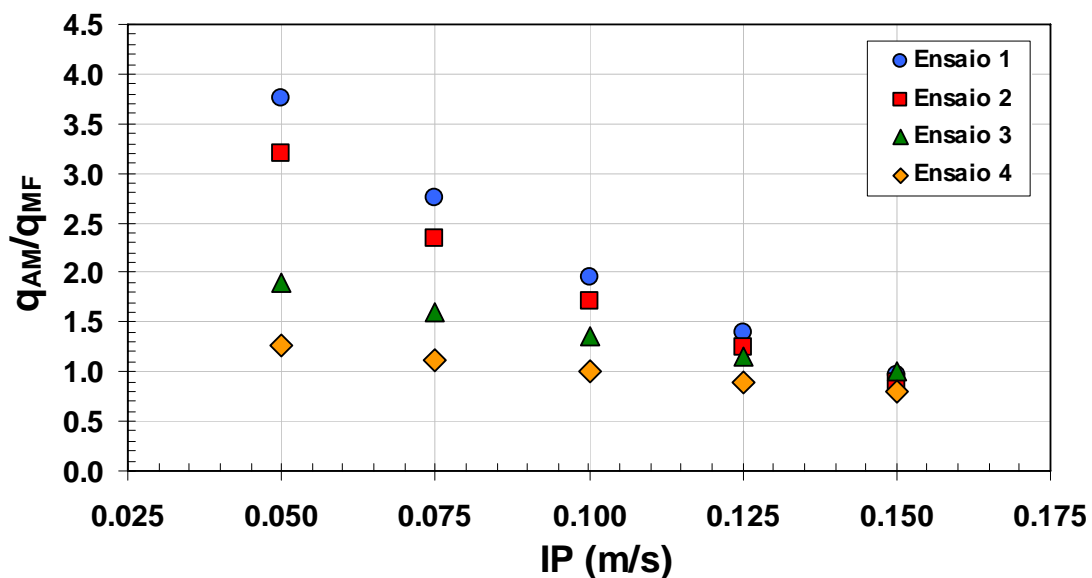
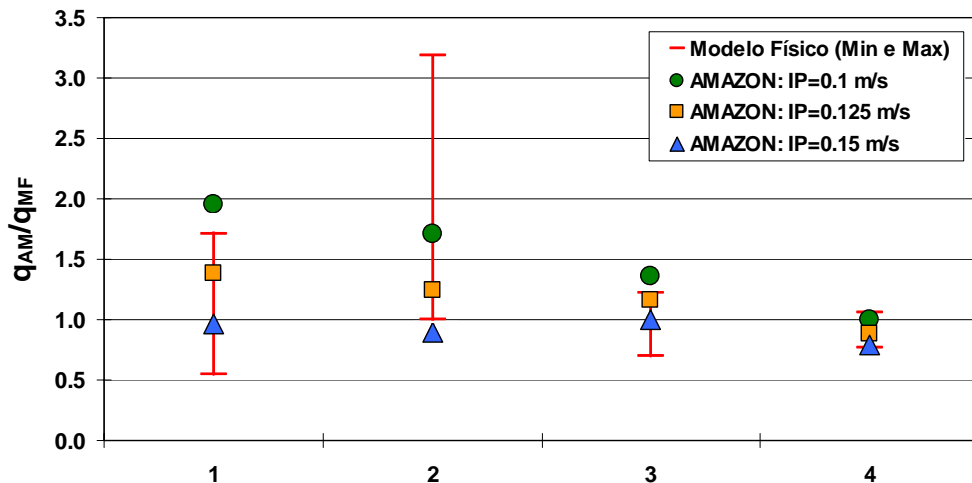


Figura 5 - Resultados do AMAZON obtidos através da aplicação da equação de Darcy: variação de q_{AM}/q_{MF} com IP para os Ensaio 1 a 4.



Ensaio

Figura 6 - Melhores resultados do AMAZON obtidos através da aplicação da equação de Darcy para os Ensaio 1 a 4 e resultados obtidos para o valor de IP recomendado na literatura (0.1 m/s).

4. GALGAMENTO DE UM QUEBRA-MAR COM MANTO COMPOSTO POR BLOCOS ARTIFICIAIS

4.1. Descrição

O quebra-mar com manto composto por blocos artificiais considerado neste estudo correspondente a uma das várias soluções alternativas propostas para a reabilitação final do molhe oeste do porto de Sines (Figura 7). O perfil-tipo proposto consiste num quebra-mar de taludes, com um manto exterior de cubos Antifer de 900 kN, colocados irregularmente em duas camadas abaixo do ZH e regularmente numa camada acima do ZH. O coroamento é composto por uma banqueteta com 14 m de largura à cota + 13.2 m (ZH), encostada a uma superestrutura de betão fundada à cota - 5.0 m (ZH), com um túnel incorporado, com plataformas às cotas + 13.2 m (ZH) (não protegida contra o galgamento) e + 8.0 m (ZH) (protegida contra os galgamentos).

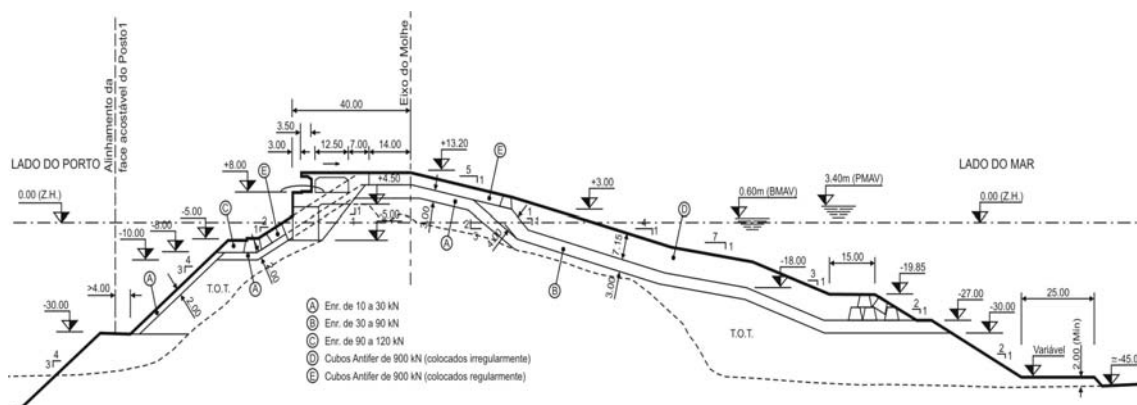


Figura 7 – Perfil-tipo para a reabilitação final do molhe oeste do porto de Sines utilizado neste estudo (os valores apresentados são valores de protótipo).

Actualmente, dos três postos de acostagem existentes no molhe oeste, apenas 2 estão em funcionamento: os postos 2 e 3. A solução aqui estudada é uma das soluções alternativas que

visam reactivar o posto 1 (para recepção, carga e descarga de petroleiros), mas também melhorar as condições de abrigo e a operacionalidade do porto (CONSULMAR, 2006, 2008).

4.2. Ensaios em Modelo Físico

Para verificar a eficácia do perfil-tipo proposto no que respeita à estabilidade e aos galgamentos, foram realizados no LNEC ensaios em modelo físico bidimensional (Lemos e Silva, 2008). O modelo foi construído e explorado de acordo com a lei de semelhança de Froude, tendo sido utilizada a escala geométrica de 1:60. A porosidade das duas camadas de cubos Antifer colocados irregularmente era de 47% e da camada de cubos colocados regularmente era de 37%. O tamanho nominal dos blocos no modelo era de 54.5 mm, determinado através da raiz cúbica do seu volume (35 m^3 no protótipo). A porosidade do enrocamento utilizado era de aproximadamente 43%.

Os ensaios foram realizados para dois níveis de maré: + 0.0 m (ZH) e + 4.0 m (ZH) (valores do protótipo), originando profundidades, d_s , no pé do modelo do molhe de 0.75 m e 0.82 m, respectivamente (Figura 8). Os fundos em frente ao local de implantação do molhe foram reproduzidos por intermédio de rampas até à cota - 55.0 m (ZH), originando profundidades, h , em frente ao gerador de 0.92 m e 0.98 m, para os dois níveis de maré ensaiados.

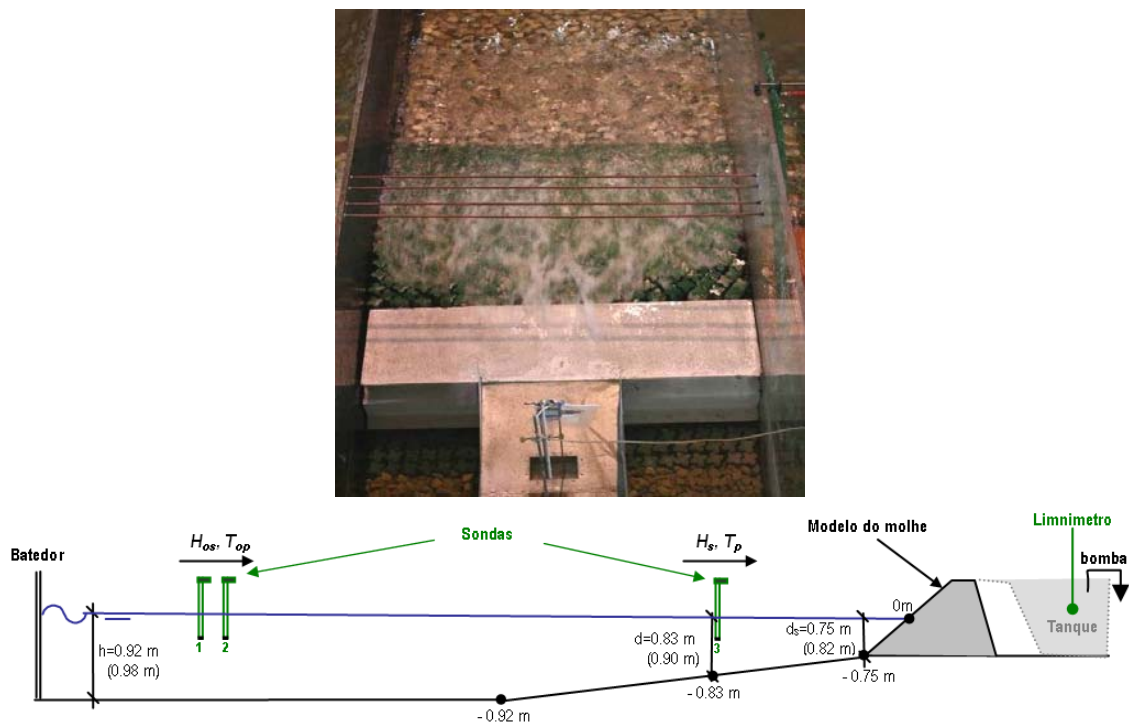


Figura 8 – Modelo físico da solução proposta para a reparação final do molhe oeste do porto de Sines. Representação esquemática do canal dos ensaios, do modelo do molhe e do equipamento utilizado.

Os ensaios de estabilidade e galgamentos realizados para o perfil-tipo apresentado na Figura 7, bem como para outras soluções alternativas, encontram-se descritos detalhadamente em Lemos e Silva (2008). Este artigo apresenta apenas o galgamento verificado em 12 ensaios realizados para o perfil-tipo considerado neste estudo (Quadro 2). Neste quadro, os valores apresentados correspondem a valores do modelo, onde T_p e H_s representam valores do período de pico do espectro e da altura de onda significativa medidos na sonda 3, colocada em frente à estrutura, à profundidade d (Figura 8) e q_{MF} representa os valores médios de volumes galgados por metro linear de estrutura.



Quadro 2 – Valores médios de volumes galgados por metro linear de estrutura, q_{MF} , obtidos para os 12 ensaios considerados neste estudo.

d (m)	T_p (s)	H_s (m)	q_{MF} ($m^3/s/m$)	Ensaio
0.83	1.29	0.10	0.0E+00	1
	1.81	0.15	0.0E+00	2
	2.32	0.19	5.3E-05	3
	2.07	0.20	3.2E-05	4
	2.58	0.22	3.4E-04	5
	2.58	0.23	4.2E-04	6
0.90	1.29	0.10	0.0E+00	7
	1.81	0.15	1.4E-05	8
	2.32	0.19	5.3E-04	9
	2.07	0.20	3.4E-04	10
	2.58	0.22	1.4E-03	11
	2.58	0.23	2.0E-03	12

4.3. Aplicação do Modelo AMAZON

Para ilustrar a aplicabilidade da actual versão do AMAZON ao cálculo do galgamento de estruturas marítimas porosas com manto composto por blocos artificiais, esta versão foi aplicada, à escala do modelo, aos 12 ensaios acima descritos.

A fronteira de saída do modelo é uma fronteira de absorção total e foi colocada a 0.5 m a sotamar do coroamento do molhe. A fronteira de entrada foi colocada na sonda 3, em frente à estrutura (à profundidade d) e aplicou-se, nesta fronteira, a série da superfície livre medida na sonda 3.

Para os 12 casos a que se aplicou o modelo, d/L_{op} varia entre 0.080 (para $T_p=2.58$ s) e 0.346 (para $T_p=1.29$ s). Todos os valores de d/L_{op} obtidos para $T_p>1.29$ s são inferiores a 0.176, o que significa que, à excepção dos ensaios para os quais $T_p=1.29$ s (ensaios 1 e 7), os valores de d/L_{op} estão dentro dos limites que a literatura existente tem indicado ($0.016<d/L_{op}<0.19$) como valores para os quais se obtém bons resultados com modelos baseados na resolução das equações não lineares de águas pouco profundas (Pullen e Allsop, 2003).

O domínio de cálculo utilizado foi de 6.1 m de comprimento e o número total de células foi de 1254. A malha de cálculo utilizada tem uma discretização que varia entre 5 cm (nos fundos em frente ao local de implantação do molhe e na parte mais profunda deste) e 2 mm (na zona superior do molhe). A altura de água mínima em cada célula da malha de cálculo foi de 2×10^{-5} cm.

As características geométricas dos fundos em frente ao molhe e da envolvente do molhe do modelo físico foram fielmente representados no AMAZON. Os fundos em frente ao molhe e a superestrutura foram modelados como impermeáveis e sem atrito.

A permeabilidade do núcleo foi ignorada. As camadas com blocos Antifer e com enrocamento foram consideradas como uma camada permeável apenas, com uma porosidade constante, n . O efeito da permeabilidade desta camada foi tida em consideração através da aplicação da equação de Darcy, para a qual os parâmetros K e IP têm que ser calibrados. Como mencionado anteriormente, na literatura (e.g. CIRIA/CUR/CETMEF, 2007), existem valores de referência de K para diferentes gamas de diâmetros e para um tamanho nominal dos blocos de de 54.5 mm, o valor de K apresentado é de aproximadamente 0.1 m/s. Para estudar a sensibilidade dos resultados do AMAZON, q_{AM} , aos valores de K , IP e n , variou-se K entre 0.05 m/s e 0.15 m/s, IP foi variado de forma a que $IP \leq K$ e n variou-se entre 0.4 e 0.47.

Os casos foram simulados num computador Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E6550, com

2.33 GHz e 2 GB de RAM. Os tempos de execução médios aumentaram com o valor de IP e variaram entre 12h e 2 dias, aproximadamente, para ensaios de 1380 s ou 2760 s.

A Figura 9 mostra a variação de q_{AM}/q_{MF} , quer com K, quer com IP, para os ensaios 4, 6, 8 e 11 (ver Quadro 2), considerando $n=0.47$. Tal como para o caso de estudo apresentado na secção 3, a figura indica que a variação de K não tem um efeito significativo nos resultados e, neste caso, este efeito parece ainda diminuir para os maiores caudais (i.e., ensaios 6 e 11). Assim, o tipo de escoamento no meio poroso poderá ser de importância secundária para a determinação do caudal médio de galgamentos e a equação de Darcy poderá ser uma aproximação satisfatória para simular o escoamento na camada porosa (de blocos Antifer e de enrocamento), apesar de, teoricamente, ser válida apenas para escoamentos laminares estacionários. Ao contrário de K, o impacto de IP nos resultados é significativo.

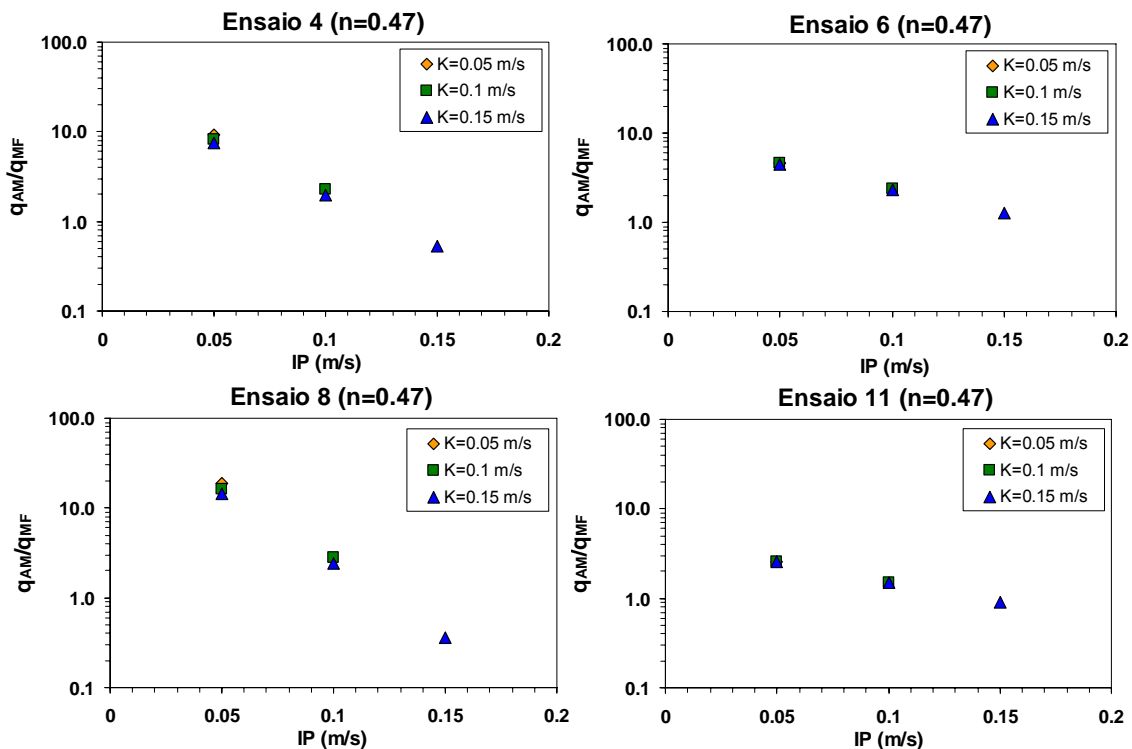


Figura 9 – Resultados do AMAZON obtidos através da aplicação da equação de Darcy: variação de q_{AM}/q_{MF} com K e com IP para os Ensaios 4, 6, 8 e 11 ($n=0.47$).

A Figura 10 mostra a variação de q_{AM}/q_{MF} para os ensaios 4, 6, 8 e 11 em função de IP e de n. Estes resultados foram obtidos considerando $K=IP$ e, assim como a Figura 9, sugerem que o impacto de IP nos resultados depende do ensaio considerado: o impacto reduz para ensaios com maior galgamento (i.e., ensaios 6 e 11). Tal como K, o valor de n não tem um efeito significativo nos resultados, pelo menos para $0.40 \leq n \leq 0.47$, independentemente do ensaio (i.e. do valor do caudal de galgamento) e do valor de IP considerados.

A Figura 11 (bem com as Figuras 9 e 10) sugere ainda que os resultados do AMAZON que melhor se ajustam aos dados dos ensaios 4, 6, 8 e 11 foram obtidos para valores de IP de aproximadamente 0.125 m/s, para os quais $1.03 \leq q_{AM}/q_{MF} \leq 1.72$ para $n=0.40$. Note-se que também se obtêm resultados satisfatórios para $IP=0.15$ m/s ($0.39 \leq q_{AM}/q_{MF} \leq 1.27$) e para $IP=0.1$ m/s ($1.52 \leq q_{AM}/q_{MF} \leq 3.02$), valor recomendado na literatura. Contudo, para $IP=0.15$ m/s há tendência para as previsões obtidas com o AMAZON serem por defeito, especialmente para os menores caudais (ensaios 4 e 8) enquanto que para $IP=0.1$ m/s as previsões do caudal médio são todas por excesso.

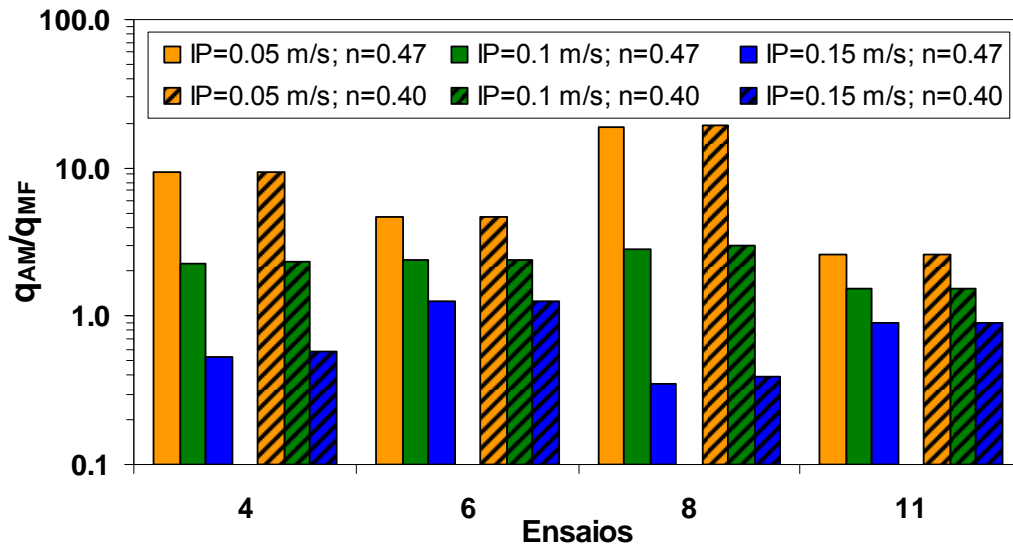


Figura 10 - Resultados do AMAZON obtidos através da aplicação da equação de Darcy: variação de q_{AM}/q_{MF} com IP e com n para os Ensaios 4, 6, 8 e 11.

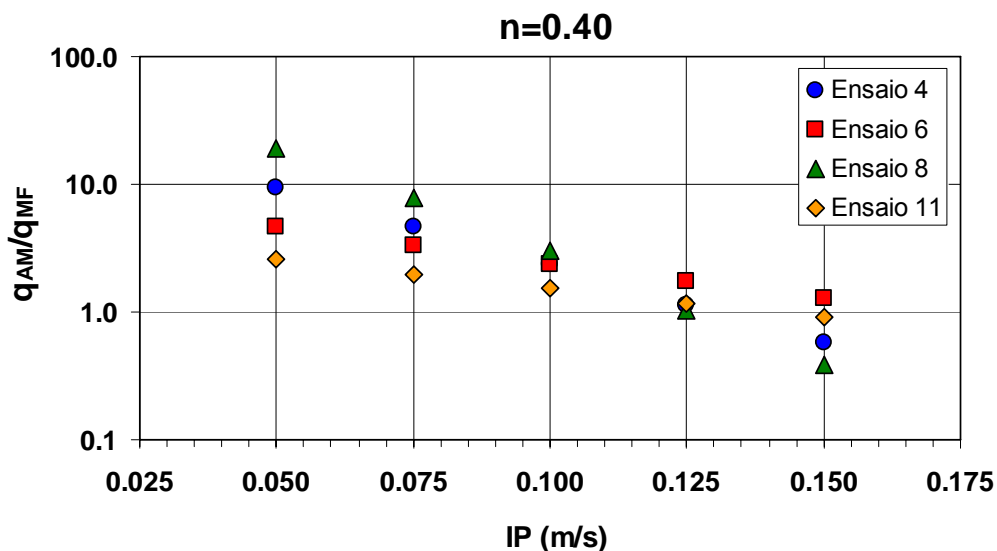


Figura 11 – Resultados do AMAZON obtidos através da aplicação da equação de Darcy: variação de q_{AM}/q_{MF} com IP para os Ensaios 4, 6, 8 e 11 (n=0.40).

Baseado nas conclusões obtidas da análise de sensibilidade apresentada nas Figuras 9 a 11, correu-se o AMAZON para os 12 ensaios apresentados no Quadro 2, para IP=0.1 m/s, IP=0.125 m/s e IP=0.15 m/s, considerando n=0.40 (Figura 12). A Figura 12 mostra que, para os 12 ensaios analisados, a maioria dos pontos se situa entre $0.5 \leq q_{AM}/q_{MF} \leq 2$ para os três valores de IP considerados. A Figura 12 confirma ainda que, de um modo geral, os melhores resultados do AMAZON foram obtidos para IP=0.125 m/s: para este valor de IP, todos os pontos da Figura 12 estão entre as linhas $q_{AM}/q_{MF}=1$ e $q_{AM}/q_{MF}=2$, ou seja, o AMAZON apresenta uma tendência para prever os caudais médios por excesso, apesar de existir um bom ajuste entre os resultados do modelo e dos ensaios para os menores caudais ($q_{MF} < 2.0E-4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$). Para IP=0.15 m/s, o AMAZON apresenta uma tendência para prever os caudais médios por defeito, especialmente para os menores caudais: a maioria dos pontos da Figura 12 para IP=0.15 m/s está entre as linhas $q_{AM}/q_{MF}=0.5$ e $q_{AM}/q_{MF}=1$; contudo, existem dois pontos para os quais $1 \leq q_{AM}/q_{MF} \leq 2$ (ensaios 6 e 10) e um ponto para o qual $q_{AM}/q_{MF} \leq 0.5$

(ensaio 8). Para $IP=0.1$ m/s, valor recomendado na literatura, todas as estimativas do AMAZON são por excesso (para quatro pontos $1 \leq q_{AM}/q_{MF} \leq 2$ e para cinco pontos $q_{AM}/q_{MF} \geq 2$), com a excepção dos três ensaios para os quais $q_{MF}=0$, para os quais também $q_{AM}=0$.

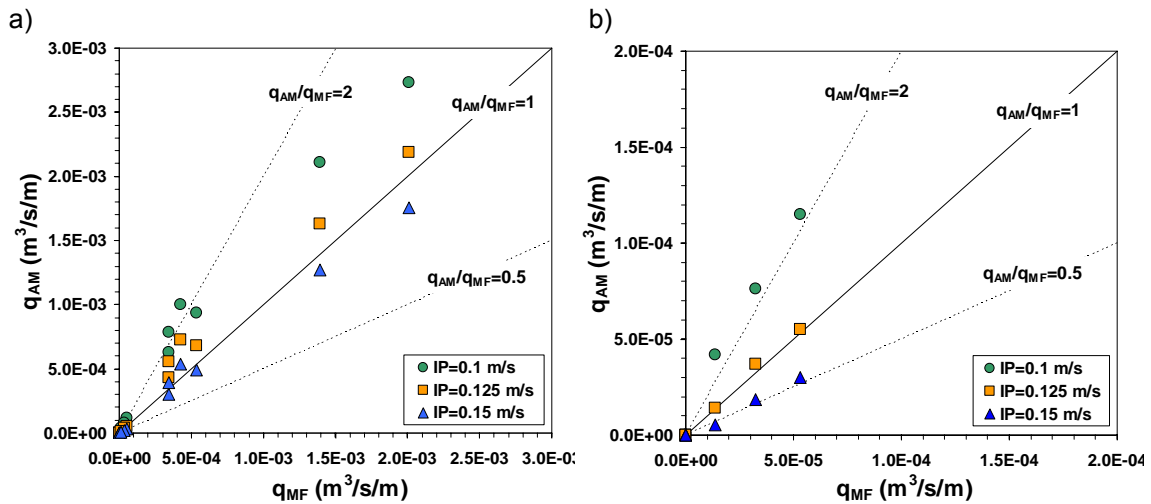


Figura 12 - Comparação entre os valores médios de volumes galgados por metro linear de estrutura obtidos no modelo físico, q_{MF} , e através do AMAZON, q_{AM} , aplicando a equação de Darcy para $n=0.4$ e valores de IP de 0.1 m/s, 0.125 m/s e 0.15 m/s: a) todos os resultados; b) resultados para caudais inferiores a $2.0E-4$ m³/s/m.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Neste artigo descrevem-se os desenvolvimentos que o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. (LNEC) tem vindo a efectuar, em colaboração com o Dr. Keming Hu (Royal Haskoning, UK), desde 2007 ao modelo numérico AMAZON (Hu, 2000) de forma a permitir modelar explicitamente o escoamento em meios porosos e a proceder à sua validação sistemática para o estudo do galgamento de estruturas marítimas porosas. O modelo baseia-se na resolução das equações não lineares de águas pouco profundas e na sua versão original estava essencialmente desenvolvido para estruturas impermeáveis. Para simular o escoamento em meios porosos, foram implementadas no modelo as equações de Darcy (válida para escoamentos laminares estacionários) e de Forchheimer (válida para escoamentos turbulentos estacionários).

Para ilustrar as novas capacidades do AMAZON no cálculo do caudal médio de galgamento por metro linear de estrutura, apresentam-se dois casos de aplicação reais, para os quais existem resultados de ensaios em modelo físico realizados no LNEC: um envolvendo um quebra-mar de estrutura mista, com manto de enrocamento, e o outro um quebra-mar de taludes, com manto composto por blocos artificiais. Ilustra-se apenas a aplicação da equação de Darcy.

A comparação dos resultados do modelo com os de ensaios em modelo físico permite verificar que, quer para o quebra-mar com manto de enrocamento, quer para o quebra-mar com manto composto por blocos artificiais, os resultados obtidos com a nova versão do modelo AMAZON aplicando a equação de Darcy são bastante satisfatórios. Estes resultados mostram que os caudais médios de galgamento simulados com o AMAZON são mais sensíveis ao valor da velocidade máxima que o escoamento de água pode ter durante a transferência entre a camada porosa e a camada superficial, IP , do que à escolha da condutividade hidráulica e da porosidade. De uma forma geral, os resultados do AMAZON que melhor se ajustam aos dados dos ensaios em modelo físico foram obtidos para $IP=0.125$ m/s. Para $IP=0.1$ m/s, valor recomendado na literatura, os resultados do AMAZON são ainda satisfatórios, mas o modelo apresenta uma tendência para prever por excesso os caudais médios obtidos nos ensaios.

Assim, tendo em conta a eficiência do modelo do ponto de vista de esforço computacional, pretende-se continuar a testar o modelo para diferentes geometrias de estruturas marítimas e



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

diferentes características do seu meio poroso, investindo, simultaneamente, na optimização da discretização da malha de cálculo. Pretende-se também aplicar o AMAZON usando a equação de Forchheimer; até à data, foram apenas feitos alguns testes em que foi utilizada esta equação (Reis et al., 2009a). Por fim, pretende-se acoplar o modelo, que por definição se limita a águas de pequena profundidade, a um modelo de propagação da agitação desde o largo até à estrutura galgada. Estes desenvolvimentos permitem assim estender a sua aplicação à maior parte dos casos de estruturas reais.

O objectivo final é desenvolver um modelo numérico que possa ser utilizado por consultores em casos práticos de engenharia que envolvam a determinação do galgamento de estruturas marítimas porosas no pouco tempo usualmente disponível para projecto, ou seja, desenvolver um modelo que seja de fácil utilização e que represente um bom compromisso entre tempo de cálculo e precisão em termos de resultados de galgamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Portuário e dos Transportes Marítimos, I.P. e à Administração do Porto de Sines, S.A. a permissão dada para a publicação de alguns resultados dos ensaios em modelo físico reduzido realizados no LNEC.

REFERÊNCIAS

- CIRIA/CUR/CETMEF (2007). The Rock Manual: The Use of Rock in Hydraulic Engineering. CIRIA C683, June.
- Clarke, S., Dodd, N.; Damgaard, J. (2004). Modelling flow in and above a porous beach. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 130(5), 223-233.
- CONSULMAR (2006). Reconstrução e Activação do Posto 1 do Molhe Oeste do Porto de Sines. Estudo Prévio. Lisboa, Abril.
- CONSULMAR (2008). Reconstrução e Activação do Posto 1 do Porto de Sines. Reabilitação do Molhe Oeste. Projecto de Execução. Lisboa, Dezembro.
- Dalrymple, R.A.; Rogers, B.D. (2006). Numerical modeling of water waves with the SPH method. *Coastal Engineering*, 53(2-3), 141-147.
- Dodd, N. (1998). A numerical model of wave run-up, overtopping and regeneration. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 124(2), 73-81.
- Hu, K. (2000). High-Resolution Finite Volume Methods for Hydraulic Flow Modelling. PhD Thesis, Centre for Mathematical Modelling and Flow Analysis, Manchester Metropolitan University, UK.
- Hu, K.; Meyer, D. (2005). The validity of the non-linear shallow water equations for modelling wave runup and reflection. *Proc. ICE Coastlines, Structures & Breakwaters '05*, Thomas Telford, London, 195-206.
- Hu, K.; Mingham, C.G.; Causon, D.M. (2000). Numerical simulation of wave overtopping of coastal structures using the non-linear shallow water equations. *Coastal Engineering*, 41(4), 433-465.
- Ingram, D.M.; Causon, D.M.; Gao, F.; Mingham, C.G.; Troch, P.; Li, T.; De Rouck, J. (2004). Free Surface Numerical Modelling of Wave Interactions with Coastal Structures. CLASH WP5 – Report, Manchester Metropolitan University and University of Gent, Manchester, UK.
- Lemos, R.; Reis, M.T.; Silva, L.G. (2006). Scale Model Tests of the South Breakwater Root of Póvoa de Varzim Harbour: Overtopping Two-Dimensional Tests. Relatório 05/06-NPE, LNEC.
- Lemos, R.; Silva, L.G. (2008). Ensaios em Modelo Reduzido da Reconstrução do Molhe Oeste do Porto de Sines. Relatório 141/2008-NPE, LNEC.
- Lin, C.-Y.; Huang, C.-J. (2004). Decomposition of incident and reflected higher harmonic waves using four wave gauges. *Coastal Engineering*, 51(5-6), 395-406.
- Losada, I.J.; Lara, J.L.; Guaniche, R.; Gonzalez-Ondina, J.M. (2008). Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering*, 55(1), 47-62.
- Mansard, E.P.D.; Funke, E.R. (1980). The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. *Proc. 17th International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*, Sydney, Australia, B.L. Edge (Ed.), ASCE, New York, 1981, 154-172.



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

- Neves, M.G.; Reis, M.T.; Losada, I.; Hu, K. (2008). Wave overtopping of Póvoa de Varzim breakwater: physical and numerical simulations. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 134(4), 226-236.
- Pullen, T.; Allsop, N.W.H. (2003). Use of Numerical Models of Wave Overtopping: A Summary of Current Understanding. <<http://www.hrwallingford.co.uk/downloads/projects/overtopping/nummodelguidance.pdf>>.
- Reis, M.T.; Neves, M.G.; Hu, K.; Hedges, T. (2007). Aplicação do modelo numérico Amazon ao cálculo do galgamento de estruturas costeiras e portuárias. 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, AIPCN/PIANC, Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007.
- Reis, M.T.; Neves, M.G.; Hu, K.; ten Voordem, M. (2008a). Numerical and physical modelling of wave overtopping over a porous breakwater. The 18th International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference (ISOPE), Vancouver, BC, Canada, July 6-11, 2008.
- Reis, M.T.; Hu, K.; Neves, M.G.; Hedges, T.S. (2008b). Numerical modelling of breakwater overtopping using a NLSW equation model with a porous layer. Proc. 31st International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Hamburg, Germany, August 31 to September 5, World Scientific (in press).
- Reis, M.T.; Neves, M.G.; Hedges, T.S. (2008c). Investigating the lengths of scale model tests to determine mean wave overtopping discharges. *Coastal Engineering Journal*, 50(4), 441-462.
- Reis, M.T.; Neves, M.G.; Hu, K. (2009a). Wave overtopping of a porous structure: numerical and physical modeling. *Journal of Coastal Research*, SI 56(II), 539-543.
- Reis, M.T.; Neves, M.G.; Hu, K.; Lopes, M.R.; Silva, L.G. (2009b). Final rehabilitation of Sines west breakwater: physical and numerical modelling of overtopping. Proc. Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2009, 16-18 September, Edimburgh (to be published).
- Van Gent, M.R.A. (1994). The modelling of wave action on and in coastal structures. *Coastal Engineering*, 22, 311-339.
- Van Gent, M.R.A. (1996). Numerical modeling of wave interaction with dynamically stable structures. Proceedings 25th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Orlando, Florida, 1930-1943.