



Estudo do Galgamento de Estruturas Marítimas utilizando um Modelo Numérico baseado na Teoria da Onda em Condições de Água pouco Profunda *

Numerical Modelling of Wave Overtopping of Maritime Structures using a NLSW Equation Model

Maria Teresa Reis @,¹, Maria da Graça Neves ¹

RESUMO

Apresenta-se neste artigo o modelo numérico AMAZON, baseado na teoria da onda em condições de água pouco profunda. Na sua versão original, o modelo estava essencialmente desenvolvido para estruturas impermeáveis. Desde 2007, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em colaboração com o Dr. Keming Hu (Royal Haskoning, UK), 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. Os modelos deste tipo existentes têm sido validados essencialmente para estruturas impermeáveis e para praias permeáveis. Para simular o escoamento em meios porosos, foram implementadas no modelo as equações de Darcy e de Forchheimer.

São apresentados dois casos de aplicação do modelo, utilizando a equação de Darcy, para o estudo do galgamento de estruturas de protecção portuária e a validação dos seus resultados por comparação com dados de ensaios em modelo físico reduzido bidimensional realizados no LNEC. O primeiro caso de estudo corresponde a uma solução alternativa proposta para a reabilitação do enraizamento do molhe Sul do porto de pesca da Póvoa de Varzim, trecho sobre o qual recai a maior exigência de eficácia relativamente aos galgamentos. O perfil-tipo proposto consiste num quebra-mar de estrutura mista com manto de enrocamento. O segundo caso de estudo corresponde a duas soluções alternativas propostas para a reabilitação final do molhe Oeste do Porto de Sines, que em 1978/79 sofreu estragos muito avultados. Dos três postos de acostagem existentes neste molhe, apenas dois se encontram em funcionamento actualmente (postos 2 e 3). A reabilitação final visa reactivar o posto 1 e melhorar as condições de abrigo e a operacionalidade do porto. Os perfis-tipo propostos para esta reabilitação consistem num quebra-mar de taludes com manto composto por cubos Antifer.

@ Autor correspondente

¹ LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066, Lisboa. E-mails: Teresa Reis - treis@lnec.pt; Graça Neves - gneves@lnec.pt

* Submissão – 5 Agosto 2010; Avaliação – 20 Outubro 2010; Recepção da versão revista – 12 Novembro 2010; Disponibilização on-line – 6 Janeiro 2011

Os resultados obtidos são bastante satisfatórios, embora o modelo apresente uma ligeira tendência para prever por excesso os caudais obtidos nos ensaios: os valores do cociente entre os caudais médios de galgamento obtidos com a nova versão do AMAZON, q_{AM} , e com o modelo físico, q_{MF} , variam entre 0.9 e 1.4 para o quebra-mar com manto de enrocamento e entre 1.0 e 1.76 para o quebra-mar com manto composto por blocos artificiais. Os resultados mostram ainda que os valores de q_{AM} 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, do que à escolha da condutividade hidráulica e da porosidade.

Com o objectivo de se dispor no futuro duma ferramenta numérica eficiente para estudos de engenharia costeira e portuária, é necessário ainda: validar o modelo para diferentes geometrias de estruturas marítimas, diferentes características do seu meio poroso e diferentes escalas do modelo; investir na optimização da discretização da malha de cálculo; e implementar alguns desenvolvimentos que incluem, entre outros, o acoplamento entre o AMAZON e um modelo de propagação da agitação marítima desde o largo até à estrutura galgada e a paralelização do código.

Palavras-chave: Estruturas marítimas; galgamentos; modelos numéricos; teoria da onda em condições de água pouco profunda; escoamento em meios porosos.

ABSTRACT

This paper presents the numerical model AMAZON, based on the nonlinear shallow water (NLSW) equations. The original version of AMAZON did not explicitly account for porous flow; it was developed basically for impermeable structures. Since 2007, the National Civil Engineering Laboratory (LNEC), Portugal, in collaboration with Dr. Keming Hu (Royal Haskoning, UK), has been developing the porous flow model to allow the numerical simulation of wave overtopping of porous maritime structures and its systematic validation for these structures. The existing NLSW models have mainly been validated for impermeable structures and for permeable beaches. The development includes the addition of one porous layer to the original model design and the porosity is taken as constant for the whole porous element. To govern the water exchange between the porous cells, both the Darcy equation (valid for laminar stationary flows) and the Forchheimer equation (valid for turbulent stationary flows) are implemented in AMAZON. Unlike some other NLSW models, the maximum velocity that the flow can have during the exchange of water between the porous and the free-flow layers has been included as an input to AMAZON.

The paper illustrates AMAZON's application, using Darcy's equation, to study the mean wave overtopping discharge at two porous breakwaters that protect Portuguese harbours and the validation of its results by comparison with two-dimensional physical model data collected at LNEC. The first case study is of a proposed cross-section for the rehabilitation of the root of the South breakwater of Póvoa de Varzim harbour. The root of this breakwater directly protects the local Nautical Club building and, therefore, it is the stretch for which overtopping should be minimal. The proposed cross-section is basically a composite structure, with double layer rock armour. The second case study refers to two proposed solutions for the final rehabilitation of the West breakwater of Sines harbour, which suffered serious damage to the armour layer and superstructure in 1978/79. At present, only two of the three oil tanker berths are in operation: berth 2 and berth 3. The final rehabilitation has the primary objective of reactivating berth 1 (for reception, loading and unloading of oil tankers) but it also aims to generally improve the shelter and operating conditions within the port. The cross-sections proposed for this rehabilitation are basically rubble-mound breakwaters protected by Antifer cubes.

The AMAZON results are quite satisfactory, although the model tends to slightly over-predict the discharges: the ratio between the mean overtopping discharges obtained with the new version of AMAZON, q_{AM} , and with the physical model, q_{MF} , varies between 0.9 and 1.4 for the rock structure and between 1.0 and 1.76 for the Antifer structure. The results also show that the values of q_{AM} are more sensitive to the value of the maximum velocity that the flow can have during the exchange of water between the porous and the free-flow layers than to the choice of the hydraulic conductivity and of the constant porosity.

The results are rather promising, given the different approximations made for modelling the porous breakwaters (such as using the Darcy equation instead of the Forchheimer equation to govern the internal flow and employing only one porous layer to represent multi-layered structures) and AMAZON's inherent restrictions (mainly relating to the shallow water assumptions and the simulation of wave breaking). Nevertheless, to develop a user-friendly numerical model that may be used in real case studies of overtopping of porous structures and that provides a good compromise between computational effort and accuracy in terms of overtopping results, it is necessary to: further test the model, employing different structural configurations, different arrangements of rock or concrete armour blocks and different scales (to consider the implications of using two different governing equations for flow within the porous layer); analyse the grid optimization; and implement some developments of AMAZON, which are expected to include coupling AMAZON with a wave transformation model to propagate the waves to the AMAZON seaward boundary and code parallelization.

Keywords: Maritime structures; wave overtopping; numerical models; non-linear shallow water (NLSW) equations; porous flow.

1. INTRODUÇÃO

Em Portugal, dada a extensão da sua costa, a concentração da população e das actividades económicas nas suas zonas costeiras e portuárias e a severidade do seu clima de agitação marítima, são frequentes as situações de emergência provocadas pelo estado do mar, que põem em causa a segurança de pessoas e bens, com consequências graves para a sociedade, a economia e o ambiente. 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. Os quebra-mares de taludes são as estruturas marítimas mais utilizadas para a criação de condições de abrigo nos portos portugueses (*e.g.*, molhe Oeste do Porto de Sines). No entanto, os quebra-mares de estrutura mista são também usados com alguma frequência (*e.g.*, molhe Sul do Porto da Póvoa de Varzim).

As normas para o projecto, construção e manutenção de estruturas, bem como a sociedade em geral, exigem, cada vez mais, uma quantificação dos riscos e um aumento da fiabilidade de estruturas de engenharia, nas quais se podem incluir as estruturas marítimas. Por outro lado, 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, é fundamental a existência de ferramentas precisas e eficientes para o estudo da estabilidade e do galgamento de estruturas marítimas.

Actualmente, as ferramentas mais utilizadas para determinar o galgamento de uma estrutura marítima são as formulações empíricas (*e.g.*, Besley, 1999) ou semi-empíricas (*e.g.*, Reis *et al.*, 2008a), baseadas em resultados de ensaios em modelo físico. No entanto, a aplicação directa destas formulações é limitada às condições específicas de agitação e às configurações, simples, das estruturas que foram contempladas nesses ensaios.

A modelação física continua a ser o método mais fiável de determinar o galgamento, sendo os seus resultados utilizados em estudos de protótipo e no desenvolvimento, calibração e validação de outros métodos de cálculo do galgamento. Contudo, a modelação física é dispendiosa, morosa, exige infraestruturas e equipamento muito específico e requer

uma elevada experiência de quem realiza os ensaios e analisa os seus resultados.

Recentemente, o uso de redes neuronais tem tido também um papel importante na determinação do galgamento, especialmente em fase de Estudo Prévio. A ferramenta NN_OVERTOPPING2 (*e.g.*, Van Gent *et al.*, 2005), baseada na análise de redes neuronais e desenvolvida no âmbito do Programa Europeu CLASH, muito tem contribuído para tal.

Nos últimos tempos, devido à melhoria dos meios de cálculo e ao desenvolvimento de modelos numéricos cada vez mais potentes, o uso deste tipo de modelos começa a tornar-se cada vez mais atractivo, pois a modelação numérica é mais rápida e mais barata que a modelação física e, uma vez feita a calibração e validação dos modelos, estes são muito flexíveis, quer em termos de condições de agitação, quer relativamente à geometria das estruturas. 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. Entre os modelos existentes podem destacar-se os baseados na teoria da onda em condições de água pouco profunda, NLSW (nonlinear shallow water) (*e.g.*, Van Gent, 1994; Hu & Meyer, 2005), os modelos VOF (volume of fluid) (*e.g.*, Lin & Liu, 1998; Losada *et al.*, 2008), os modelos SC (surface capturing) (*e.g.*, Ingram *et al.*, 2002, 2004) e os modelos SPH (smoothed particle hydrodynamics) (*e.g.*, Dalrymple & Rogers, 2006; Didier & Neves, 2009).

Apesar dos modelos mais recentes (VOF, SC e SPH) serem mais completos, a sua aplicação a casos práticos de Engenharia tem ainda algumas limitações, essencialmente relacionadas com o tempo elevado de cálculo, que não se compadece com o pouco tempo usualmente disponível para projecto, com a necessidade de calibração de cada caso de estudo e com a representação de certas características estruturais, tais como a porosidade (Neves *et al.*, 2008).

Os modelos mais simples (NLSW), apesar das suas limitações essencialmente relacionadas com as equações

de base, permitem simulações realistas e rápidas, se bem que simplificadas (e.g., Van Gent, 1994; Dodd, 1998; Hu, 2000; Clarke *et al.*, 2004). 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). Na sua versão inicial, o AMAZON tinha sido desenvolvido para estudos de galgamento de estruturas em talude impermeáveis, embora permitisse considerar o efeito da porosidade das estruturas através do recurso a uma dissipação artificial.

Neste artigo, após esta introdução, descreve-se o modelo numérico AMAZON, incluindo as alterações efectuadas à sua versão inicial e as suas vantagens e limitações (ponto 2). Ilustra-se a sua aplicação com dois casos de estudo reais, para os quais existem resultados de ensaios em modelo físico realizados no LNEC: cálculo do caudal médio galgado por metro linear de duas estruturas de protecção portuária cujos perfis-tipo consistem num quebra-mar de estrutura mista com manto de enrocamento (ponto 3) e num quebra-mar de taludes com manto de cubos Antifer (ponto 4). Os resultados do modelo são apresentados, discutidos e comparados com os resultados de ensaios em modelo físico. Por fim, o artigo contém as considerações finais do trabalho e os futuros desenvolvimentos do modelo numérico (ponto 5).

2. MODELO NUMÉRICO AMAZON

O modelo AMAZON, desenvolvido originalmente em Manchester Metropolitan University, é um modelo numericamente muito estável e robusto que se baseia na resolução das equações não lineares da teoria da onda em condições de água pouco profunda, que resultam de uma simplificação das equações de Reynolds por integração na profundidade. Hu (2000) apresenta uma descrição detalhada do modelo e das suas equações.

Seguidamente apresenta-se um resumo das características mais relevantes do modelo para os fenómenos em estudo.

No AMAZON, a pressão é considerada como hidrostática e as equações descrevem o escoamento do fluido em função da profundidade e da velocidade integrada na vertical. As equações são resolvidas por um método de volumes finitos de segunda ordem no tempo e no espaço. O modelo utiliza o esquema numérico MUSCL-Hancock (Van Leer, 1979; Van Albada *et al.*, 1982) que é um método de Godunov que usa uma reconstrução monotónica das variáveis para obter valores na interface das células, de modo a prevenir oscilações espúrias da solução. Na fase de correcção, as soluções dos problemas locais de Riemann são calculadas usando a aproximação de HLL (Harten, Lax and Van Leer), que permite descrever a rebentação e simular escoamentos de regime rápido (Harten *et al.*, 1983). O modelo incorpora um modelo de turbulência simples de zero equação.

Utilizando o método de volumes finitos, o AMAZON permite gerar uma malha constituída por elementos que podem ter qualquer forma (e.g., rectangular, triangular e hexagonal) e dimensões variáveis, permitindo gerar uma malha fina na zona de interesse do estudo e uma malha grosseira onde não seja necessário um cálculo mais preciso.

O modelo permite simular ondas irregulares, quer na versão unidimensional (canal) aqui utilizada, quer na bidimensional (em planta) e a rebentação é simulada utilizando o conceito de macaréu.

No que diz respeito à fronteira de entrada do modelo, AMAZON incorpora um método numérico de absorção de ondas imposto nesta fronteira que permite absorver mais de 98% das ondas reflectidas pela estrutura. Este método de absorção permite colocar a fronteira de entrada perto da estrutura, evitando a modelação desde águas profundas, onde o modelo tem limitações, já que se baseia na resolução das equações NLSW. Segundo Hu & Meyer (2005), o modelo requer, para optimização de resultados, que a fronteira de entrada seja colocada a aproximadamente um comprimento de onda do pé da estrutura, L_s , dado por:

$$L_s = T_p \sqrt{gd_s} \quad (1)$$

onde d_s é a profundidade no pé da estrutura, g a aceleração da gravidade e T_p o período de pico do espectro incidente.

O modelo permite considerar estruturas com várias configurações, como estruturas em talude (com ou sem berma, com ou sem superestrutura) e verticais (ou quase verticais). No entanto, por fazer integração na profundidade, não permite modelar a parte deflectora de um muro-cortina e utiliza um artifício para modelar estruturas verticais (Hu, 2000).

Na sua versão original, o AMAZON foi desenvolvido essencialmente para estruturas impermeáveis. Para o caso de estruturas permeáveis, o modelo permitia, como aproximação, a utilização de um parâmetro de atrito de fundo (o coeficiente de Chezy) que introduzia uma 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 o LNEC, em colaboração com o Dr. Keming Hu (Royal Haskoning, UK), tem vindo a desenvolver o modelo de forma a permitir simular 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 no que se refere a resultados de galgamento.

O desenvolvimento da nova versão do modelo inclui a introdução de uma camada porosa única com a porosidade constante. Assim, estruturas com mais de uma camada porosa e/ou com um núcleo com diferentes características são representadas 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):

$$\text{Equação de Darcy: } I = u / K \quad (2)$$

$$\text{Equação de Forchheimer: } I = au + bu|u| \quad (3)$$

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 considerados constantes no tempo e no espaço. Existem na literatura diversas expressões de cálculo para estes coeficientes (*e.g.*, García, 2007). No AMAZON, adoptaram-se as expressões indicadas em CIRIA/CUR/CETMEF (2007):

$$\begin{aligned} a &= \alpha \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{\nu}{gD^2} \\ b &= \beta \frac{1-n}{n^3} \frac{1}{gD} \end{aligned} \quad (4)$$

em que D é o diâmetro nominal do material constituinte do manto, ν é a viscosidade cinemática da água, n é a porosidade da camada porosa e α e β são os coeficientes de fricção linear e não linear, respectivamente, que dependem da forma da curva granulométrica do material da camada e dos números de Reynolds e de Keulegan-Carpenter. AMAZON utiliza valores constantes de α e β .

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 preenchida 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 preenchida e a pressão da água na camada porosa for superior à da camada superficial, há transferência de água da célula porosa para a célula superficial correspondente, limitada pelo valor de IP (Figura 1b).

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. No entanto,

alguns autores (e.g. Van Gent, 1994; Clarke *et al.*, 2004) consideram que o valor de I na interface entre as duas camadas é inferior a 1, o que corresponde a considerar $IP \leq K$ na equação de Darcy.

O AMAZON foi desenvolvido na linguagem de programação C++ e tem uma interface bastante agradável, eficiente e fácil de usar. Como dados de entrada, o modelo necessita dos seguintes elementos:

- perfil da estrutura impermeável;
- batimetria dos fundos adjacentes;
- características da camada porosa: geometria, porosidade, diâmetro nominal do material constituinte e coeficientes de fricção;
- parâmetro de atrito de fundo (pode variar ao longo da estrutura e da batimetria);
- nível de água, que pode variar se se adoptar uma curva sinusoidal de maré;
- agitação incidente: o modelo permite a escolha de ondas sinusoidais ou ondas irregulares definidas por um espectro empírico (e.g., JONSWAP), por um espectro definido pelo utilizador ou ainda a introdução de uma série incidente proveniente, por exemplo, de ensaios em modelo físico reduzido;
- malha (uniforme/não uniforme, discretização);
- outros parâmetros (e.g., altura de água mínima em cada célula da malha).

AMAZON pode ser aplicado quer à escala de modelo, quer à escala de protótipo, sendo necessário

para isso apenas escalar adequadamente os dados inseridos e alguns parâmetros utilizados no modelo numérico.

Como resultados, o modelo permite obter séries temporais da superfície livre em diversos pontos do domínio, velocidades integradas na vertical e, através destas, a série temporal de caudais instantâneos, o caudal médio e o caudal de pico em vários pontos da estrutura galgada.

A grande vantagem de modelos deste tipo no cálculo do galgamento é que permitem simular rapidamente 1000 (ou mais) ondas, tornando a sua aplicação viável, quer em dimensionamento de estruturas galgáveis, quer em estudos de previsão de inundação. Foi já validado em diferentes casos de estudo com bons resultados (Hu *et al.*, 2000) e foi também validado e extensivamente utilizado no estudo do galgamento de estruturas impermeáveis (e.g., Neves *et al.*, 2010).

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

3.1 Caso de Estudo

O enraizamento do molhe Sul do porto de pesca da Póvoa de Varzim (Figura 2), protege directamente o edifício do Clube Náutico Povoense. Assim, é sobre este trecho que recai a maior exigência de eficácia relativamente aos galgamentos. O caso de estudo que

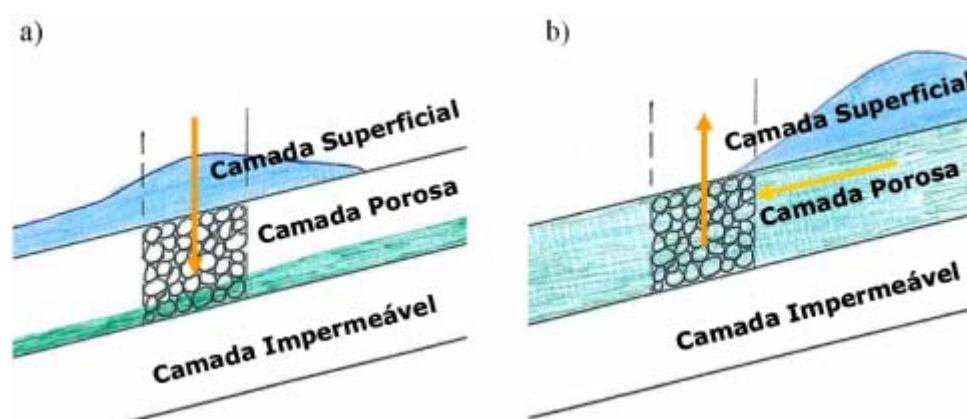


Figura 1 - Representação esquemática da transferência de água entre a camada porosa e a camada superficial no modelo AMAZON.

Figure 1 - Sketch of the water exchange between the porous and the free-flow (surface) layers of AMAZON.



Figura 2 - Porto de pesca da Póvoa de Varzim: localização, vista aérea, galgamentos ocorridos no molhe Sul em Março de 2006 e aspecto da reabilitação que estava a ser efectuada ao molhe em Junho de 2009.

Figure 2 - Port of Póvoa de Varzim: location, aerial view, overtopping observed in the South breakwater in March 2006 and aspect of the rehabilitation carried out in June 2009.

aqui se apresenta correspondente a uma das várias soluções alternativas propostas para a reabilitação do enraizamento deste molhe. A solução estudada visa reduzir os galgamentos a valores aceitáveis, mesmo nas condições mais adversas de agitação e de níveis oceânicos.

O perfil-tipo proposto consiste num quebra-mar de estrutura mista, composto por um talude reperfilado com a inclinação de 2:1, rematado superiormente por uma banqueteta com 15 m de largura à cota + 5,25 m (ZH) (Figura 3). 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. O edifício do Clube Náutico localiza-se a cerca de 10 m do paramento vertical interior do molhe.

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, tendo sido utilizada a escala geométrica de 1:50 (Figura 4). Estes ensaios encontram-se descritos em Lemos *et al.* (2006) e Reis *et al.* (2008c).

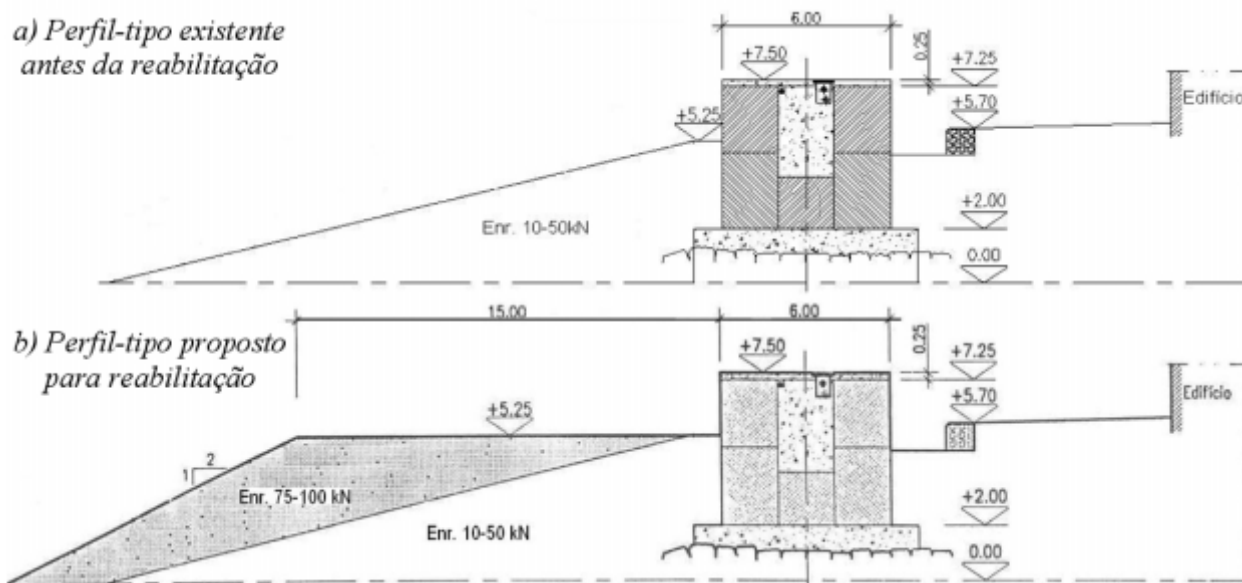


Figura 3 - Perfis-tipo do enraizamento do molhe Sul do Porto da Póvoa de Varzim: a) existente antes da reabilitação; b) proposto para reabilitação e considerado neste estudo (os valores apresentados são valores de protótipo e as cotas são relativas ao ZH).

Figure 3 - Cross-sections of the root of the South breakwater of the Port of Póvoa de Varzim: a) prior to rehabilitation; b) proposed for rehabilitation (values shown are for the prototype, with levels relative to datum, ZH).



Figura 4 - Modelo físico da solução proposta para a reparação do molhe Sul do Porto da Póvoa de Varzim. Aspecto dos galgamentos observados.

Figure 4 - Physical model of the alternative cross-section proposed for the rehabilitation of the south breakwater root of the Port of Póvoa de Varzim. Overtopping observed during physical model tests.

Para cada condição nominal de ensaio, foi estudada a variabilidade do volume de água que transpunha o paramento vertical do molhe em função da duração do ensaio e da série incidente considerada (Reis *et al.*, 2008c), o que permitiu definir uma gama de variação

dos valores medidos do caudal médio de galgamentos por metro linear de estrutura, q_{MF} .

Na Tabela 1 apresentam-se os valores de q_{MF} para os quatro ensaios analisados neste artigo, bem como a correspondente gama de variação de q_{MF} . Estes

ensaios tiveram uma duração de 270 s e foram realizados com o nível de maré de + 4,5 m (ZH) (0,39 m de profundidade junto ao gerador de ondas), correspondente a preia-mar com sobrelevação meteorológica. Nesta tabela, os valores apresentados correspondem a valores do modelo, onde H_s e T_p são valores incidentes da altura de onda significativa e do período de pico do espectro de JONSWAP obtidos em frente à estrutura.

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 as 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 nova versão do AMAZON ao cálculo do galgamento de estruturas marítimas porosas com manto de enrocamento, esta versão foi aplicada, à escala do modelo, aos quatro 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. Foi utilizada neste estudo a localização da fronteira de entrada recomendada por Hu & Meyer (2005) (ver ponto 2) que coincide com um ponto de medição da superfície livre nos ensaios em modelo físico (Reis *et al.*, 2008c). Assim, na fronteira de entrada do modelo, aplicou-se a série incidente obtida dos ensaios por aplicação do método

de Mansard & Funke (1980) aos dados de superfície livre medidos em três sondas colocadas em frente à estrutura.

Tal como mencionado anteriormente, séries incidentes distintas (mas com a mesma configuração espectral empírica) 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 resultados do modelo físico obtidos tendo em conta esta variabilidade, i.e. o resultado do AMAZON para cada um dos quatro ensaios foi comparado com a correspondente gama de variação de q_{MF} (última coluna da Tabela 1), em vez de ser comparado simplesmente com o resultado do ensaio em modelo físico correspondente (penúltima coluna da Tabela 1).

Para os quatro 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 do modelo e L_{op} é o comprimento de onda junto ao gerador de ondas, calculado segundo a teoria linear da onda através de $L_{op} = g T_{op}^2 / 2\pi$. 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 teoria da onda em condições de água pouco profunda (Pullen & 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

Tabela 1 - Valores medidos do caudal médio de galgamentos por metro linear de estrutura, q_{MF} , para os quatro ensaios considerados neste estudo e gama de variação de q_{MF} .
Table 1 - Mean overtopping discharges per meter length of structure, q_{MF} , obtained for each one of the four physical model tests considered in this study and range of q_{MF} obtained for the whole set of tests.

Ensaio	H_s (m)	T_p (s)	q_{MF} ($10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$)	Gama de variação de q_{MF} ($10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$)
1	0,07	1,75	0,17	0,09 a 0,28
2	0,07	2,24	0,27	0,27 a 0,84
3	0,08	2,33	1,65	1,15 a 2,02
4	0,09	2,93	4,44	3,43 a 4,69

zona a sotamar da estrutura; 4 mm na zona junto ao pé da estrutura; e 2 mm na zona do molhe. Esta discretização baseia-se na experiência adquirida em estudos prévios de convergência do modelo para o cálculo do galgamento. 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 33,2 mm (como no modelo físico). Na Figura 5 apresenta-se um aspecto da superfície livre em dois instantes de cálculo, onde se vê o escoamento no interior da camada permeável e o início do galgamento, com a camada permeável já saturada.

O efeito da permeabilidade do manto superior de enrocamento foi tido 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 33,2 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 , variou-se K entre 0,05 m/s e 0,15 m/s e IP 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 simulações de 270 s.

3.4 Resultados

A Figura 6 mostra a variação de q_{AM}/q_{MF} para os ensaios 1 a 4, quer em função de K , quer em função de IP . 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 6a pela linha vertical. A Figura 6a indica que a variação de K não tem um efeito significativo nos resultados, qualquer que seja o ensaio analisado. Tal como seria de esperar, este resultado sugere que, como a modelação numérica foi feita à escala do modelo físico (1:50), o efeito da turbulência no escoamento não é relevante e a equação de Darcy é uma aproximação satisfatória para simular o escoamento na camada de enrocamento.

A Figura 6a mostra também que, ao contrário de K , o impacto de IP nos resultados é significativo e depende do ensaio considerado: o impacto reduz-se para ensaios com maior galgamento (i.e., ensaios 3 e 4). Este andamento observa-se mais

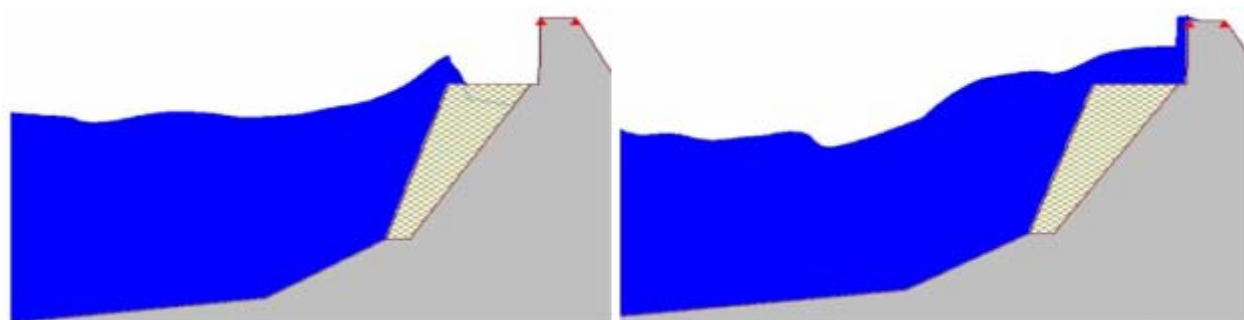


Figura 5 - Aplicação do AMAZON ao molhe Sul do Porto da Póvoa de Varzim. Aspecto da superfície livre em dois instantes de cálculo.

Figure 5 - AMAZON application to the South breakwater of the Port of Póvoa de Varzim. Surface elevation at two different instants.

claramente na Figura 6b, em que os resultados foram obtidos considerando $K=IP$. A Figura 6b sugere ainda que os resultados do AMAZON que melhor se ajustam aos dados do modelo físico são obtidos para o valor de IP de aproximadamente 0,125 m/s. A Figura 7 mostra que para este valor de IP, os resultados do AMAZON para os quatro ensaios analisados se encontram dentro das gamas de caudais médios obtidas nos ensaios e $0,89 \leq q_{AM}/$

$q_{MF} \leq 1,38$. 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 $IP=K=0,1$ m/s, valor recomendado na literatura, são bastante satisfatórios ($0,99 \leq q_{AM}/q_{MF} \leq 1,96$), apesar de para os ensaios 1 e 3 serem ligeiramente superiores (i.e. do lado da segurança) às correspondentes gamas de caudais médios obtidas nos ensaios.

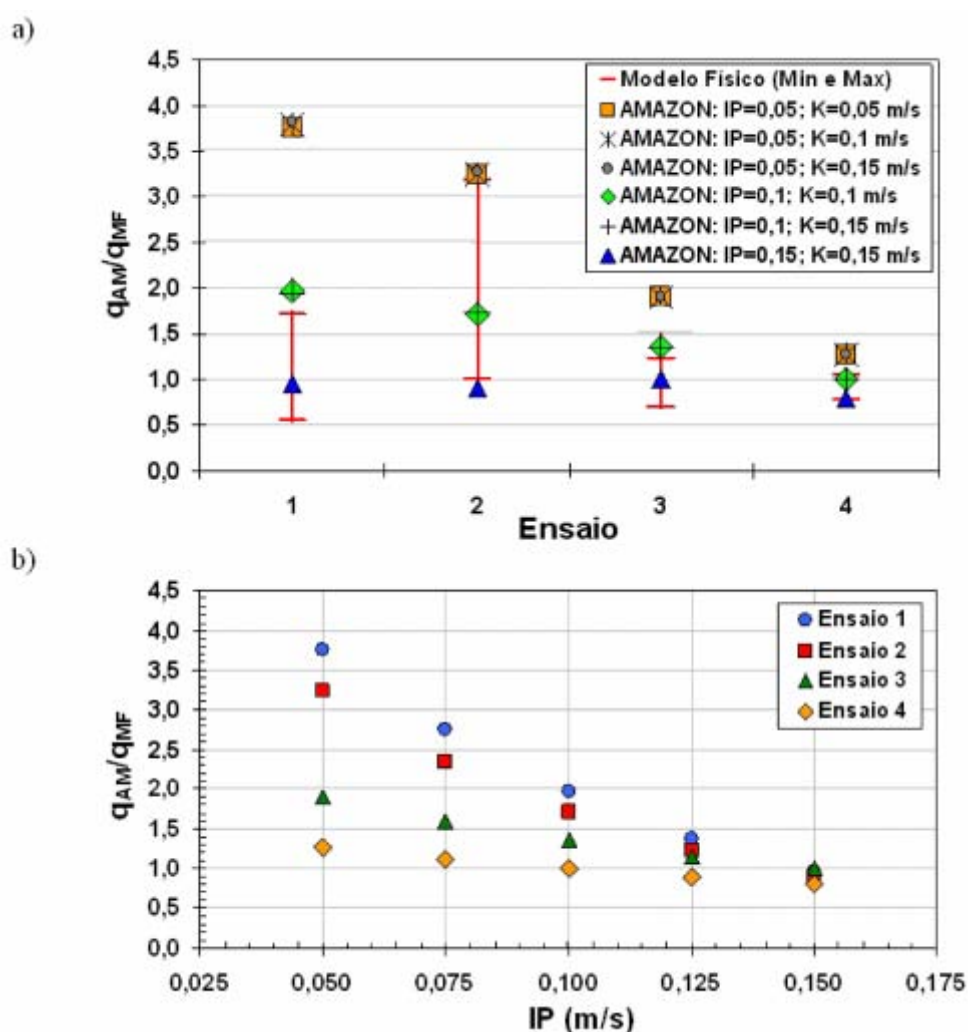


Figura 6 - Resultados do AMAZON obtidos para os ensaios 1 a 4 através da aplicação da equação de Darcy: a) variação de q_{AM}/q_{MF} com K e com IP; b) variação de q_{AM}/q_{MF} com IP ($K=IP$).

Figure 6 - AMAZON results obtained for tests 1 to 4 using the Darcy equation: a) variation of q_{AM}/q_{MF} with K and with IP; b) variation of q_{AM}/q_{MF} with IP ($K=IP$).

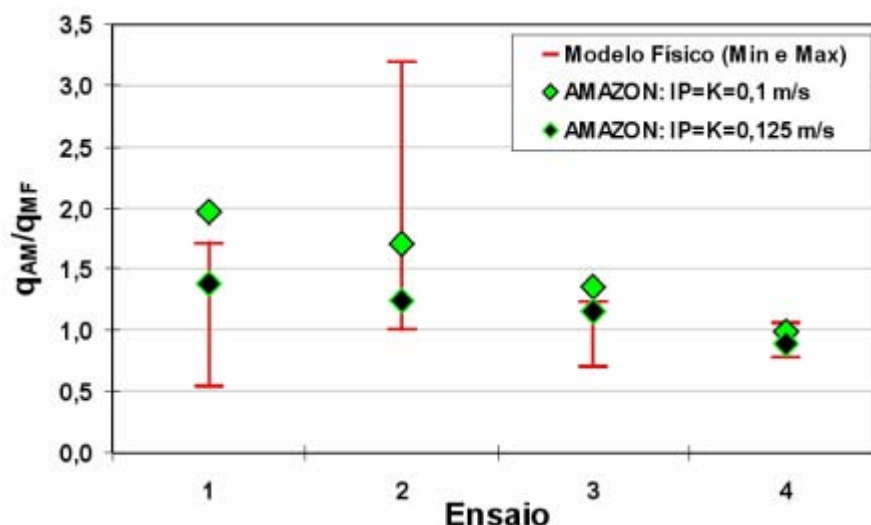


Figura 7 - Resultados do AMAZON obtidos para os ensaios 1 a 4 através da aplicação da equação de Darcy: resultados com melhor ajuste aos dados ($IP=0,125$ m/s) e resultados obtidos para o valor de IP recomendado na literatura ($IP=0,1$ m/s).

Figure 7 - AMAZON results obtained for tests 1 to 4 using the Darcy equation: results showing a better agreement with the data ($IP=0,125$ m/s) and results obtained with the value of IP recommended in the literature ($IP=0,1$ m/s).

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

4.1 Caso de Estudo

O Porto de Sines, localizado na costa sudoeste de Portugal continental, é uma das principais entradas comerciais e económicas da Península Ibérica, considerando-se um porto de extrema importância geográfica e estratégica para Portugal e Espanha (Figura 8). É protegido por dois molhes: Oeste (molhe principal) e Este.

A construção do molhe Oeste decorreu entre 1973 e 1978. Em 1978/79, na sequência de várias tempestades, o molhe sofreu estragos muito avultados, originando, em 1980, trabalhos de reparação de emergência. Entre 1980 e 1992 analisaram-se e realizaram-se vários trabalhos de reabilitação em praticamente toda a sua extensão, excepto na parte final do molhe original, cujos destroços ainda hoje se podem observar (Figura 8). Assim, dos três postos de acostagem existentes no molhe Oeste, apenas dois se encontram em funcionamento: os postos 2 e 3.

Actualmente, encontra-se em estudo a reabilitação

final do molhe, que visa 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).

Neste caso de estudo analisa-se a aplicabilidade do modelo AMAZON a duas das várias soluções alternativas propostas para a reabilitação final do molhe: Solução 1 e Solução 2 (Figura 9).

O perfil-tipo proposto para a Solução 1 consiste num quebra-mar de taludes, com um manto exterior de cubos Antifer de 900 kN, colocados irregularmente em duas camadas ($0,09$ un/m²) abaixo do ZH e regularmente numa camada ($0,0625$ un/m²) acima do ZH. O coroamento é composto por uma banquetta à cota + 13,2 m (ZH), não protegida contra o galgamento. O perfil-tipo proposto para a Solução 2 difere do da Solução 1 essencialmente no coroamento, composto por uma banquetta 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 8 - Porto de Sines: localização, configuração actual (incluindo os destroços do molhe Oeste original) e aspecto dos estragos ocorridos em 1978/79 no molhe Oeste.

Figure 8 - Port of Sines: location, current layout (including remains of the original West breakwater) and damage occurred in 1978/79 to the West breakwater.

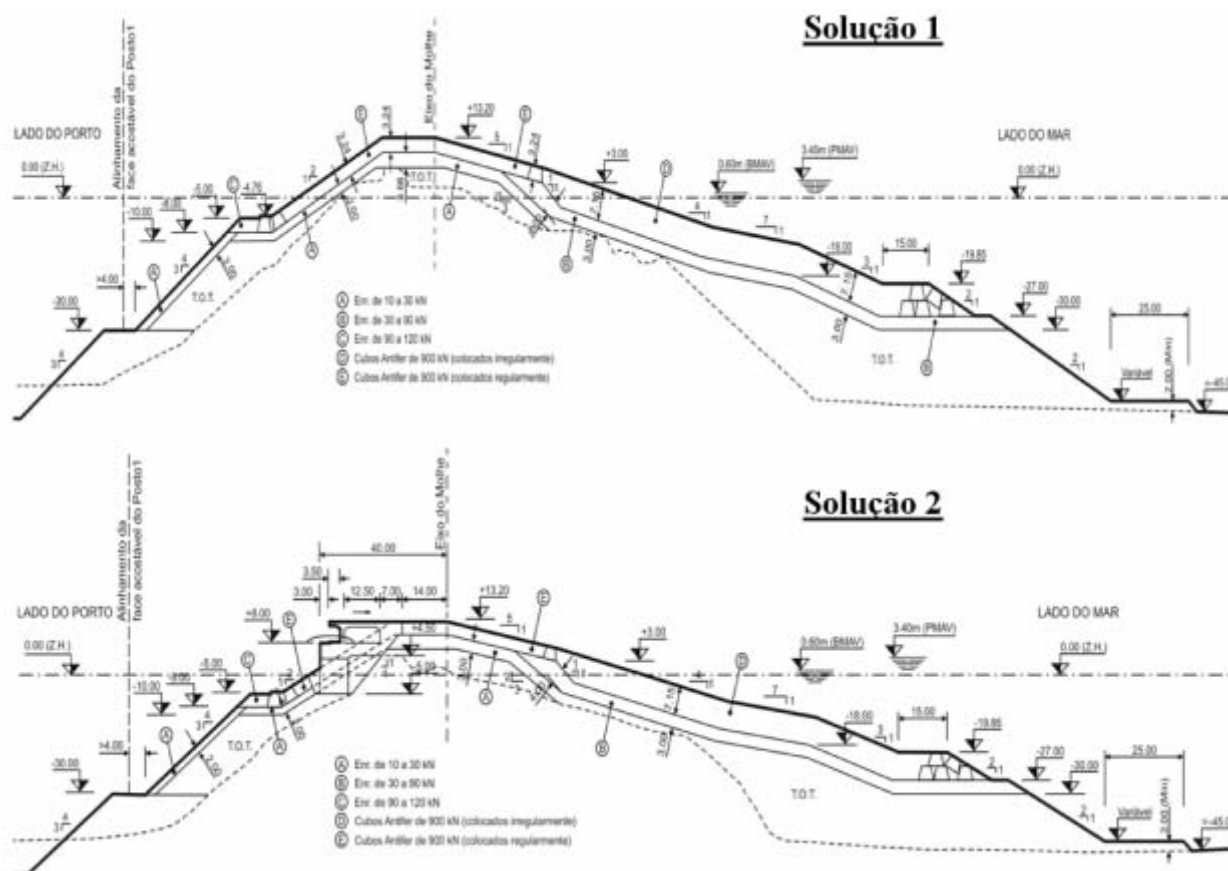


Figura 9 - Perfis-tipo para a reabilitação final do molhe Oeste do Porto de Sines utilizados neste estudo (os valores apresentados são valores de protótipo).

Figure 9 - Proposed cross-sections for the final rehabilitation of the West breakwater of the Port of Sines (values shown are for the prototype).

4.2 Ensaios em Modelo Físico

Para verificar a eficácia dos perfis-tipo propostos no que respeita à estabilidade e aos galgamentos, foram realizados no LNEC ensaios em modelo físico bidimensional, tendo sido utilizada a escala geométrica de 1:60. Estes ensaios encontram-se descritos detalhadamente em Lemos & Silva (2008).

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 m³ no protótipo). A porosidade do enrocamento utilizado era de aproximadamente 43%.

Na Tabela 2 apresentam-se os valores médios de volumes galgados por metro linear de estrutura, q_{MF} ,

para as duas soluções consideradas e para os doze ensaios analisados neste artigo. Estes ensaios tiveram uma duração que variou entre 1380 s e 2760 s (1000 ondas aproximadamente) e foram realizados com os níveis de maré de + 0,0 m (ZH) (d=0,83 m de profundidade em frente à estrutura) e de + 4,0 m (ZH) (d=0,90 m de profundidade em frente à estrutura). Nesta tabela, os valores apresentados correspondem a valores do modelo, onde T_p e H_s representam valores do período de pico do espectro de JONSWAP e da altura de onda significativa medidos numa sonda colocada em frente à estrutura, à profundidade d.

Tabela 2 - Valores medidos do caudal médio de galgamentos por metro linear de estrutura, q_{MF} , obtidos para as Soluções 1 e 2 para os doze ensaios considerados neste estudo.

Table 2 - Mean overtopping discharges per meter length of structure, q_{MF} , obtained for Solutions 1 and 2 for each one of the twelve physical model tests considered in this study.

Ensaio	d (m)	T_p (s)	H_s (m)	q_{MF} (10^{-3} m ³ /s/m)	
				Solução 1	Solução 2
1	0,83	1,29	0,10	0,00	0,00
2		1,81	0,15	0,00	0,00
3		2,32	0,19	0,05	0,05
4		2,07	0,20	0,03	0,03
5		2,58	0,22	0,31	0,34
6		2,58	0,23	0,36	0,42
7	0,90	1,29	0,10	0,00	0,00
8		1,81	0,15	0,01	0,01
9		2,32	0,19	0,46	0,53
10		2,07	0,20	0,31	0,34
11		2,58	0,22	1,30	1,40
12		2,58	0,23	1,90	2,00

4.3 Aplicação do Modelo AMAZON

Para ilustrar a aplicabilidade da nova 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 doze ensaios acima apresentados para as Soluções 1 e 2.

A fronteira de saída do modelo é uma fronteira de absorção total e foi colocada a 0,5 m a jusante do coroamento do molhe. A fronteira de entrada foi colocada em frente à estrutura, à profundidade d , numa posição que coincide com um ponto de medição da superfície livre nos ensaios em modelo físico, e aplicou-se, nesta fronteira, a série da superfície livre aí medida.

Para os doze 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 exceção 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 & Allsop, 2003).

Para a Solução 1, o domínio de cálculo utilizado foi de 6,5 m de comprimento e o número total de células foi de 1287; para a Solução 2, estes valores foram 6,1 m e 1254, respectivamente. 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). Esta discretização baseia-se na experiência adquirida em estudos prévios de convergência do modelo para o cálculo do galgamento. 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 tido 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 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 de forma a que $IP \leq K$ e n 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 48h, aproximadamente, para simulações de 1380 s e 2760 s, respectivamente.

4.4 Resultados

A Figura 10 mostra, a título de exemplo, a variação de q_{AM}/q_{MF} para a Solução 1, quer com K , quer com IP , para os ensaios 4, 6, 8 e 11 (ver Tabela 2), considerando $n=0,47$. Estes ensaios foram escolhidos para ilustrar esta variação por corresponderem a uma ampla gama de valores medidos de volume galgado e por os resultados para os restantes oito ensaios permitirem retirar

conclusões semelhantes às retiradas com base nestes quatro ensaios. 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. Assim, e tal como seria de esperar, este resultado sugere que, como a modelação numérica foi feita à escala do modelo físico (1:60), o efeito da turbulência no escoamento não é relevante e a equação de Darcy é uma aproximação satisfatória para simular o escoamento na camada porosa (neste caso de blocos Antifer e de enrocamento). Ao contrário de K , o impacto de IP nos resultados é significativo.

A Figura 11 mostra a variação de q_{AM}/q_{MF} em função de IP e de n para os ensaios 4, 6, 8 e 11 da Solução 1. Estes resultados foram obtidos considerando $K=IP$ e, assim como a Figura 10, sugerem que o impacto de IP nos resultados depende do ensaio considerado: o impacto reduz-se 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.

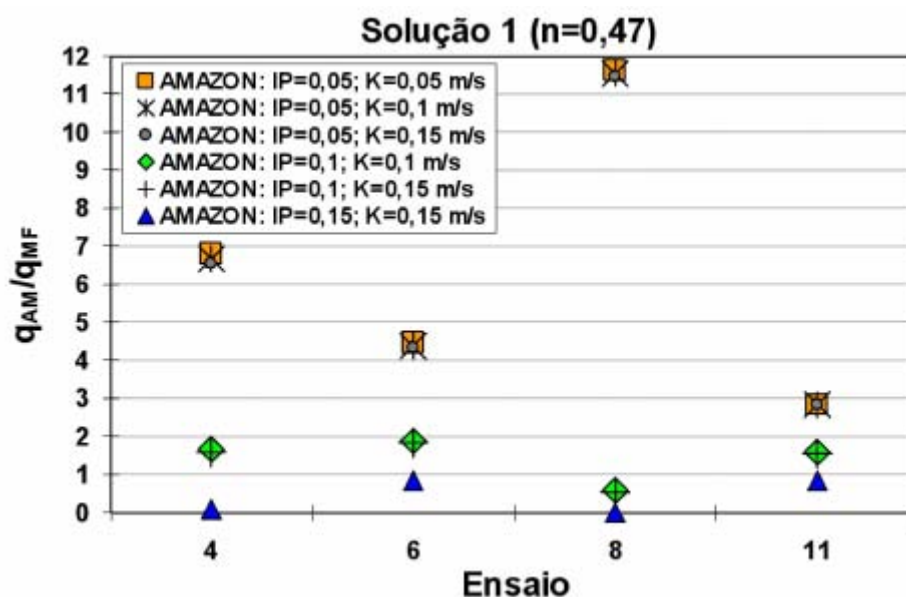


Figura 10 - Resultados do AMAZON para a Solução 1 obtidos através da aplicação da equação de Darcy: variação de q_{AM}/q_{MF} com K e com IP para os ensaios 4, 6, 8 e 11 ($n=0,47$).

Figure 10 - AMAZON results for Solution 1 obtained using the Darcy equation: variation of q_{AM}/q_{MF} with K and with IP for tests 4, 6, 8 and 11 ($n=0,47$).

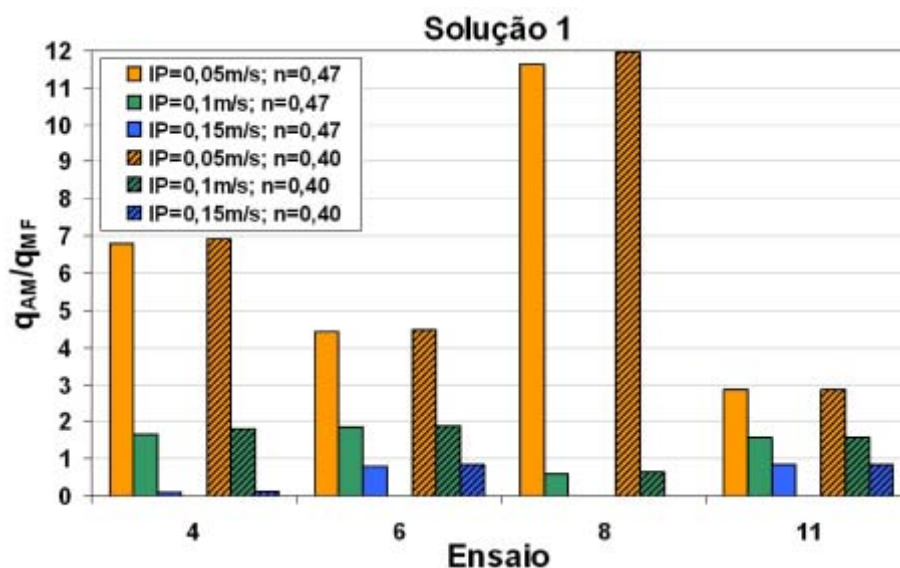


Figura 11 - Resultados do AMAZON para a Solução 1 obtidos através da aplicação da equação de Darcy: variação de q_{AM}/q_{MF} com IP e com n para os ensaios 4, 6, 8 e 11.

Figure 11 - AMAZON results for Solution 1 obtained using the Darcy equation: variation of q_{AM}/q_{MF} with IP and with n for tests 4, 6, 8 and 11.

A Figura 12 (bem com as Figuras 10 e 11) sugere ainda que os resultados do AMAZON para a Solução 1 que melhor se ajustam aos dados destes ensaios foram obtidos para valores de IP de aproximadamente

0,125 m/s, à exceção do ensaio 8. Note-se que também se obtêm resultados bastante satisfatórios para IP=0,1 m/s, valor recomendado na literatura.

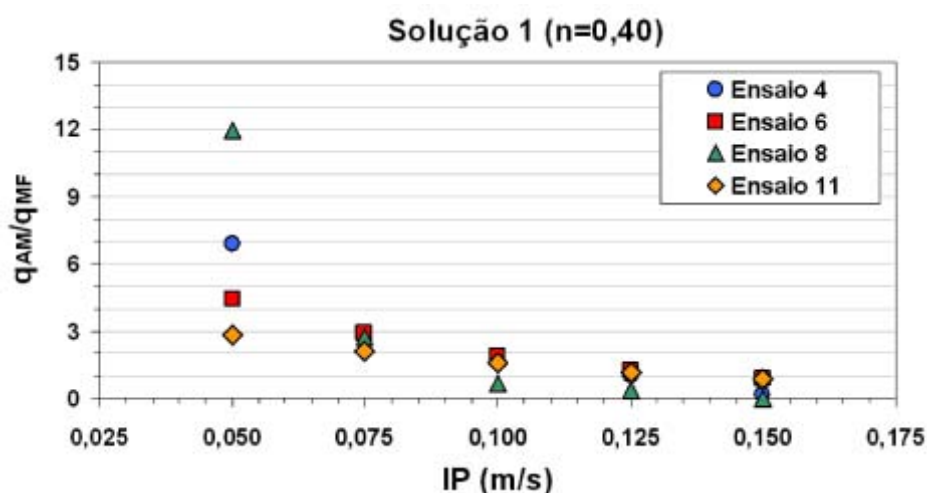


Figura 12 - Resultados do AMAZON para a Solução 1 obtidos através da aplicação da equação de Darcy: variação de q_{AM}/q_{MF} com IP para os ensaios 4, 6, 8 e 11 ($n=0,40$).

Figure 12 - AMAZON results for Solution 1 obtained using the Darcy equation: variation of q_{AM}/q_{MF} with IP for tests 4, 6, 8 and 11 ($n=0,40$).

Para a Solução 2, a análise de sensibilidade dos resultados do AMAZON aos valores de K, IP e n permitiu retirar conclusões semelhantes às obtidas para a Solução 1 (Reis *et al.*, 2009b). Assim, aplicou-se o AMAZON às Soluções 1 e 2, aos doze ensaios apresentados na Tabela 2, para $IP=0,1$ m/s e $IP=0,125$ m/s, considerando $n=0,40$ (Figura 13). A Figura 13 mostra que, para os doze ensaios analisados, a maioria dos pontos se situa entre $1 \leq q_{AM}/q_{MF} \leq 2$ para os dois valores de IP considerados. A figura confirma ainda que, de um modo geral, os melhores resultados do AMAZON para as Soluções 1 e 2 foram obtidos para $IP=0,125$ m/s: para este valor de IP, todos os pontos da Figura 13, à excepção de um ponto referente à Solução 1 - ensaio 8, estão entre as linhas $q_{AM}/q_{MF}=1$ e $q_{AM}/q_{MF}=2$ ($1,00 \leq q_{AM}/q_{MF} \leq 1,76$), ou seja, o AMAZON apresenta uma tendência para prever os caudais médios por excesso, especialmente para a Solução 2. Para $IP=0,1$ m/s, valor recomendado na literatura, esta tendência acentua-se

ligeiramente, apesar dos resultados obtidos serem ainda bastante satisfatórios (para 18 ensaios $1,00 \leq q_{AM}/q_{MF} \leq 1,88$, para 5 ensaios $2,16 \leq q_{AM}/q_{MF} \leq 3,79$ e para 1 ensaio $q_{AM}/q_{MF}=0,64$) tendo em conta o fenómeno em análise, ao qual está normalmente associada uma gama de variação em ensaios muito considerável (de que é exemplo o caso que se apresenta na Tabela 1). O ajuste dos resultados do AMAZON aos dados dos ensaios é idêntico para toda a gama de caudais medidos ($0 \leq q_{MF} \leq 2,0E-3$ m³/s/m).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

As normas para o projecto, construção e manutenção de estruturas, bem como a sociedade em geral, exigem, cada vez mais, uma quantificação dos riscos e um aumento da fiabilidade de estruturas de engenharia, nas quais se podem incluir as estruturas marítimas. Assim, é fundamental a existência de ferramentas precisas e eficientes para o estudo do

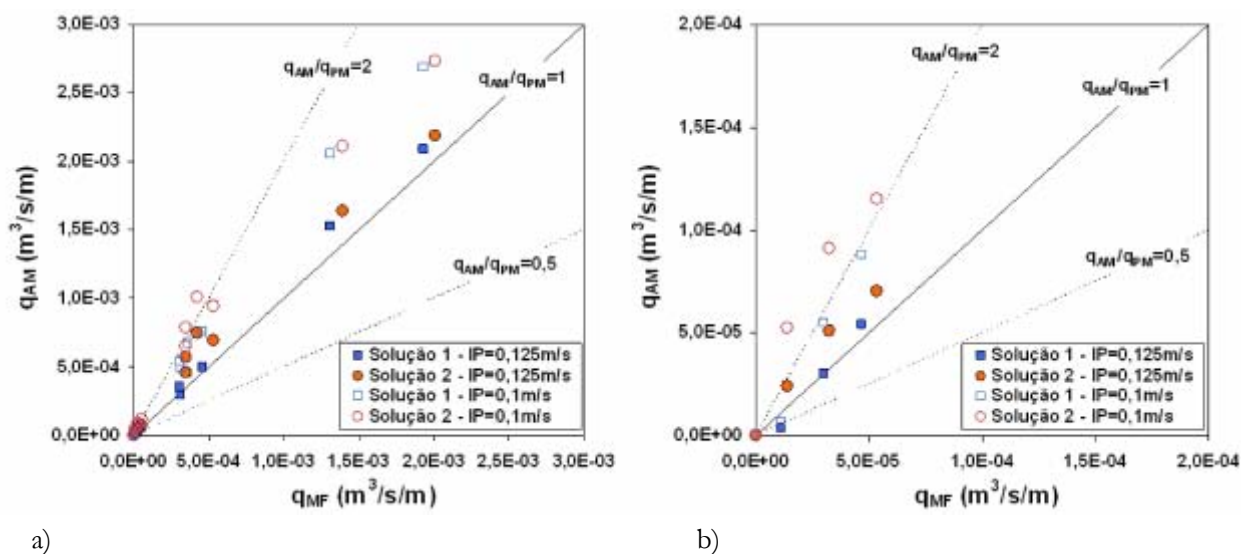


Figura 13 - Comparação entre os valores médios de volumes galgados por metro linear de estrutura obtidos no modelo físico, q_{MF} , e através do AMAZON, q_{AM} , aplicando a equação de Darcy para as Soluções 1 e 2, $n=0,4$ e valores de IP de $0,1$ m/s e $0,125$ m/s: a) todos os resultados; b) resultados para caudais inferiores a $2,0E-4$ m³/s/m.
 Figure 13 - Comparison between the AMAZON, q_{AM} and the physical model, q_{MF} , mean overtopping discharges obtained for Solutions 1 and 2 using the Darcy equation with $n=0,4$ and $IP=0,1$ m/s and $0,125$ m/s: a) all results; b) results for discharges less than $2,0E-4$ m³/s/m.

galgamento de estruturas marítimas, fenómeno responsável por grande parte das inundações costeiras e portuárias. De entre essas ferramentas, os modelos numéricos, de que é exemplo o modelo AMAZON, têm vindo a ser cada dia mais utilizados.

Neste artigo, apresentam-se as principais características do modelo numérico AMAZON, baseado na teoria da onda em condições de água pouco profunda. Descrevem-se também 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, 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 (que, na sua maioria, envolvem o escoamento em meios porosos). Na sua versão original, o AMAZON 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. Dadas as características dos ensaios a simular com o modelo, aplicou-se a 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 mais acentuada para prever por excesso os caudais médios obtidos nos ensaios. Os resultados são bastante promissores, dadas as várias aproximações feitas para modelar a estrutura porosa (tais como o uso de apenas uma camada porosa para representar estruturas com várias camadas porosas e o uso da equação de Darcy em vez da equação de Forchheimer) e as limitações inerentes ao AMAZON (essencialmente relacionadas com as equações de base).

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 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, pois até à data, foram apenas feitos alguns testes em que foi utilizada esta equação à escala do modelo (Reis *et al.*, 2009a). Comparação com dados à escala do protótipo ou com dados de ensaios realizados a grandes escalas serão também fundamentais para comparar as vantagens e os inconvenientes da aplicação de cada uma das duas equações implementadas no AMAZON para simular o escoamento em meio poroso. 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, e proceder à paralelização do código. Estes desenvolvimentos permitem assim estender de forma eficiente a sua aplicação à maior parte dos casos de estruturas reais.

O objectivo final é desenvolver um modelo numérico que seja de fácil utilização por consultores em casos práticos de engenharia que envolvam a determinação do galgamento de estruturas marítimas 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.

BIBLIOGRAFIA

- Besley, P. (1999) - *Overtopping of Seawalls: Design and Assessment Manual*. 130p., Environment Agency, R&D Technical Report W178, Bristol, UK Reino Unido. (ISBN: 1-85705-069-X).
- CIRIA/CUR/CETMEF (2007) - *The Rock Manual: The Use of Rock in Hydraulic Engineering (2nd edition)*. 1304p., CIRIA C683, Londres, Reino Unido. (ISBN: 978-0-86017-683-1)
- 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. (ISSN: 0733-950X). [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2004\)130:5\(223\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2004)130:5(223))
- CONSULMAR (2008) - *Reconstrução e Ativação do Posto 1 do Porto de Sines. Reabilitação do Molhe Oeste. Projecto de Execução*. 124p., Lisboa, Portugal. (não publicado).
- CONSULMAR (2006) - *Reconstrução e Ativação do Posto 1 do Molhe Oeste do Porto de Sines. Estudo Prévio*. 86p., Lisboa, Portugal. (não publicado)
- Dalrymple, R.A.; Rogers, B.D. (2006) - Numerical modeling of water waves with the SPH method. *Coastal Engineering*, 53(2-3): 141-147. (ISSN: 0378-3839). <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.10.004>
- Didier, E.; Neves, M.G. (2009) - Wave overtopping of a typical coastal structure of the Portuguese coast using a SPH model. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 56:496-500. (ISSN: 0749-0208)
- Dodd, N. (1998) - Numerical model of wave run-up, overtopping and regeneration. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 124(2):73-81. (ISSN: 0733-950X). [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1998\)124:2\(73\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1998)124:2(73))
- García, R.G. (2007) - *Análisis de la Funcionalidad y Estabilidad de Obras Marítimas Mediante un Modelo Numérico Basado en las Ecuaciones de Reynolds*. 266p., Ph.D. thesis, University of Cantabria, Espanha.
- Harten, A.; Lax, P.D.; Van Leer, B. (1983) - On upstream differencing and Godunov type schemes for hyperbolic conservation laws. *SIAM Review*, 25(1):35-61. (ISSN: 0036-1445). <http://dx.doi.org/10.1137/1025002>
- Hu, K. (2000) - *Hgh-Resolution Finite Volume Methods for Hydraulic Flow Modelling*. 194p., PhD Thesis, Centre for Mathematical Modelling and Flow Analysis, Manchester Metropolitan University, Manchester, Reino Unido.
- 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*, 195-206, Thomas Telford, Londres, Reino Unido.
- 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. (ISSN: 0378-3839). [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839\(00\)00040-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00040-5)
- Ingram, D.; Causon, D.; Mingham, C.; Zhou, J.G. (2002) - Numerical simulation of violent wave overtopping. In: J.M. Smith (ed.), *Proc. 28th International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*, 2286-2298, World Scientific, Singapore.
- 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*. 53p., CLASH WP5 Report, Manchester Metropolitan University and University of Gent, Manchester, Reino Unido. <http://www.clash.ugent.be/results/D27numericalmodelling.pdf>
- 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*. 70p., Relatório 05/06-NPE, LNEC, Lisboa, Portugal. (não publicado)
- Lemos, R.; Silva, L.G. (2008) - *Ensaio em Modelo Reduzido da Reconstrução do Molhe Oeste do Porto de Sines*. 91p., Relatório 141/2008-NPE, LNEC, Lisboa, Portugal. (não publicado)
- Lin, P.; Liu, P.L.-F. (1998) - A numerical study of breaking waves in the surf zone. *Journal of Fluid Mechanics*, 359:239-264. (ISSN: 0022-1120). <http://dx.doi.org/10.1017/S002211209700846X>
- Losada, I.J.; Lara, J.L.; Guanche, R.; Gonzalez-Ondina, J.M. (2008) - Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering*, 55(1):47-62. (ISSN: 0378-3839). <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.06.003>
- Mansard, E.P.D.; Funke, E.R. (1980) - The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. In: B.L. Edge (ed.), *Proc. 17th International Conference on Coastal*

- Engineering (ICCE)*, 154-172, ASCE, Nova Iorque, Estados Unidos da América. 1981
- Neves, M.G.; Reis, M.T.; Didier, E. (2010) - Comparisons of wave overtopping at coastal structures calculated with AMAZON, COBRAS-UC and SPHYSICS. *Proc. ECCOMAS CFD 2010, V European Conference on Computational Fluid Dynamics*, 14 a 17 de Junho, LNEC, Lisboa, Portugal. (CD-Rom).
- 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. (ISSN: 0733-950X). [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2008\)134:4\(226\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2008)134:4(226))
- 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/num_model_guidance.pdf.
- Reis, M.T.; Hu, K.; Hedges, T.S.; Mase, H. (2008a) - A comparison of empirical, semi-empirical and numerical wave overtopping models. *Journal of Coastal Research*, 24(2B):250-262. (ISSN: 0749-0208). <http://dx.doi.org/10.2112/05-0592.1>
- 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)*, 3097-3109, World Scientific, Singapore.
- 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. (ISSN: 0578-5634). <http://dx.doi.org/10.1142/S057856340800182X>
- 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. (ISSN: 0749-0208)
- 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. In: W. Allsop (ed.), *Proc. ICE Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2009*, 636-647, Thomas Telford, Londres, Reino Unido. (ISBN: 978-0-7277-4131-8)
- Van Albada, G.D., Van Leer, B. & Roberts, W.W. Jr. (1982) - A comparative study of computational methods in cosmic gas dynamics. *Astronomy and Astrophysics*, 108:76-84. (ISSN: 0004-6361).
- Van Gent, M.R.A. (1994) - The modelling of wave action on and in coastal structures. *Coastal Engineering*, 22:311-339. (ISSN: 0378-3839) [http://dx.doi.org/10.1016/0378-3839\(94\)90041-8](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3839(94)90041-8)
- Van Gent, M.R.A. (1996) - Numerical modeling of wave interaction with dynamically stable structures. *Proc. 25th International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*, 1930-1943, Orlando, Florida, Estados Unidos da América.
- Van Gent, M.R.A.; Pozueta, B.; Van den Boogaard, H.F.P.; Medina, J.R. (2005) - *D42 Final Report on Generic Prediction Method*. 33p., CLASH WP8 Report. Delft, Holanda. <http://www.clash.ugent.be/results/D42finalreportgenericpredictionmethod.pdf>
- Van Leer, B. (1979) - Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second order sequel to Godunov's method. *Journal of Computational Physics*, 32(1):101-136. (ISSN: 0021-9991). [http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991\(79\)90145-1](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991(79)90145-1)