



4^as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

A UTILIZAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS DE PROPAGAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA EM PROJECTOS DE ENGENHARIA

Tiago Oliveira, Pedro Figueira

WW - Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, S.A.
Av. Conselheiro Ferreira Lobo, 23 Laveiras, 2760-032 Caxias
ww.figueira@mail.telepac.pt, ww.cafonso@mail.telepac.pt

RESUMO

A modelação matemática tornou-se uma ferramenta fundamental para o apoio ao projecto de obras marítimas e portuárias. O desenvolvimento e a comercialização de modelos de fácil utilização, leva a que os utilizadores tenham cada vez menos dificuldades em obter resultados. Por outro lado, a aceitação dos resultados dos modelos, sem uma análise crítica com vista à sua validação, faz com que frequentemente sejam aceites como válidos resultados de modelos que, ou estão errados ou não representam as situações pretendidas.

Considerando que os modelos matemáticos resolvem correctamente as equações que representam os fenómenos a simular, os erros associados aos resultados da modelação são devidos a diversas causas da responsabilidade do utilizador do modelo. Esses erros podem ser devidos a má utilização dos modelos ou a uma incorrecta formulação das condições em que o modelo é utilizado.

Apresentam-se exemplos relativos à propagação da agitação marítima. Num dos exemplos exemplificam-se os erros que podem ser cometidos em sequência de uma má formulação das condições em que o modelo é utilizado, mostrando-se a necessidade de utilizar representações da batimetria adequadas às características da agitação ao largo.

Noutro exemplo mostra-se como uma incorrecta discretização do domínio pode provocar erros nos resultados da modelação. A análise dos resultados mostra que esses erros podem ser significativos e influenciar a solução adoptada no projecto.



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

1 Introdução

Os modelos matemáticos tornaram-se elementos fundamentais de apoio à elaboração de projectos de Engenharia Costeira. Modelos de propagação da agitação marítima do largo para a costa são usados correntemente para determinar as acções a que uma futura estrutura marítima estará sujeita. A utilização deste tipo de modelos pressupõe, entre outros, o conhecimento da agitação marítima ao largo, a utilizar como condição de fronteira, bem como da batimetria da zona em estudo.

No entanto, as cartas hidrográficas (de navegação) normalmente não representam os fundos com a resolução adequada à obtenção de resultados com a precisão necessária aos projectos de engenharia. Por outro lado os levantamentos hidrográficos realizados com escalas menores, podem ter uma resolução adequada, mas normalmente não atingem as profundidades necessárias à simulação correcta da agitação, principalmente para os períodos maiores. Em muitos casos não existem levantamentos com a resolução e/ou a extensão necessária à utilização correcta dos modelos de propagação, o que conduz à obtenção de resultados errados que podem induzir erros nos projectos.

No primeiro exemplo apresentado avalia-se a diferença entre os resultados de um estudo de propagação em que se utiliza uma batimetria limitada e uma batimetria que atinge as profundidades necessárias para a realização de cálculos correctos.

O estudo da distribuição de agitação marítima dentro de bacias portuárias é outra área de usual aplicação da modelação matemática, no apoio a projectos de engenharia portuária. A discretização do domínio de cálculo é um factor determinante na obtenção de resultados correctos. De facto, a malha de cálculo, que em grande parte dos modelos é rectangular, deve ter resolução suficiente para descrever a morfologia dos fundos, as fronteiras do domínio e os fenómenos a simular.

Admitindo que os fundos são regulares e que as fronteiras têm uma geometria simples, a discretização da geometria de uma onda implica um número mínimo de 8 pontos por comprimento de onda, para que a descrição tenha uma aproximação adequada. Por outro lado, a discretização no domínio temporal, implica a decomposição do período num número mínimo de 8 intervalos de tempo.

Nas aplicações 2DH utilizando o modelo de Boussinesq, é necessário estimar o menor comprimento de onda dentro da área do modelo de forma a estabelecer uma malha que resolva os fenómenos que se quer simular. Para as ondas de vento, com períodos que podem tipicamente ir de 4 a 20 segundos, os comprimentos de onda no interior de um porto podem ter poucas dezenas de metros. Em geral concluir-se-á que é necessário estabelecer malhas com dimensões entre 2 e 5 metros. A fixação do time-step tem que obedecer a critérios de estabilidade numérica ($\text{numero de Courant} < 1$) e de exactidão dos resultados, sendo normal que os seus valores tenham que ser inferiores a 0,5 segundos.

No segundo exemplo apresentado ilustra-se a influência da dimensão da malha de cálculo e do time-step na qualidade dos resultados de cálculos da propagação no interior de uma bacia portuária.

2 Exemplos

2.1 Propagação de agitação do largo até à costa

No exemplo que se apresenta utiliza-se uma configuração de fundos hipotética, na qual se estuda a propagação da agitação do largo para a costa. A batimetria está apresentada na (Figura 1).

Pretende-se demonstrar o erro que se pode cometer quando não se dispõe de batimetria que atinja a profundidade a partir da qual a propagação das ondas é influenciada pelos fundos, quer utilizando-se uma batimetria simplificada, quer simplesmente impondo na fronteira condições de agitação não perturbada em maiores profundidades.

A partir da batimetria representada prepararam-se três malhas de cálculo que diferem entre si na máxima profundidade que representam. A configuração dos fundos criada para este exemplo é caracterizada por apresentar linhas batimétricas paralelas à linha de costa até profundidades correspondentes a -50m (ZH). Entre as batimétricas -70m(ZH) e -150m(ZH) ocorre uma zona de forte curvatura, a qual diminui até à batimétrica -200m(ZH) que está no limite da área utilizada no exemplo.

As malhas que se utilizaram têm os limites -50m(ZH), -100m(ZH) e -200m(ZH).

Os cálculos foram realizados para as seguintes condições de agitação ao largo.

- $H=2\text{m}$
- $R_0= 180^\circ$ e 140°
- $T= 8, 12$ e 16 s

Os resultados apresentam-se ao longo de uma linha sobre a batimétrica -10m(ZH), (Alinhamento I).

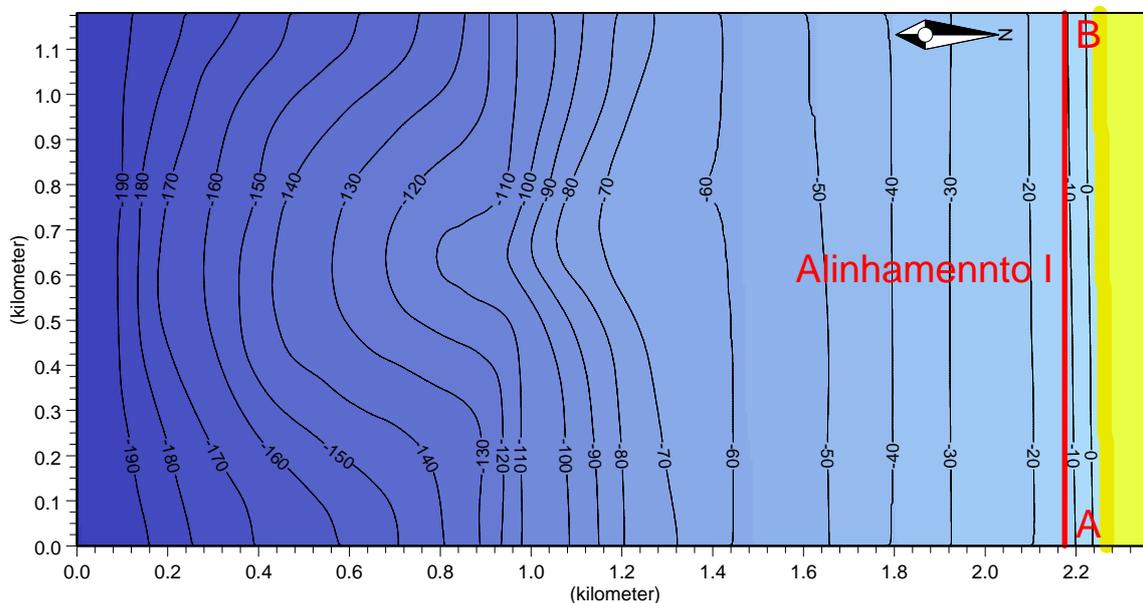


Figura 1 - Batimetria da zona em estudo

Nos cálculos foi utilizado o módulo NSW (Nearshore Spectral Waves) que integra do sistema de cálculo MIKE 21 desenvolvido pelo DHI (Water & Environment).

O MIKE21 NSW descreve a propagação, crescimento e decaimento de ondas de curto período em zonas costeiras. O modelo tem em consideração o efeito da refração e empolamento devido à variação de profundidade, efeito do vento e dissipação de energia por atrito no fundo e por rebentação. Pode também considerar-se o efeito das correntes.

As figuras 2 e 3 representam respectivamente as alturas e as direcções de onda ao longo do Alinhamento I para o Rumo ao largo 180°N obtido com as três malhas de cálculo diferentes.

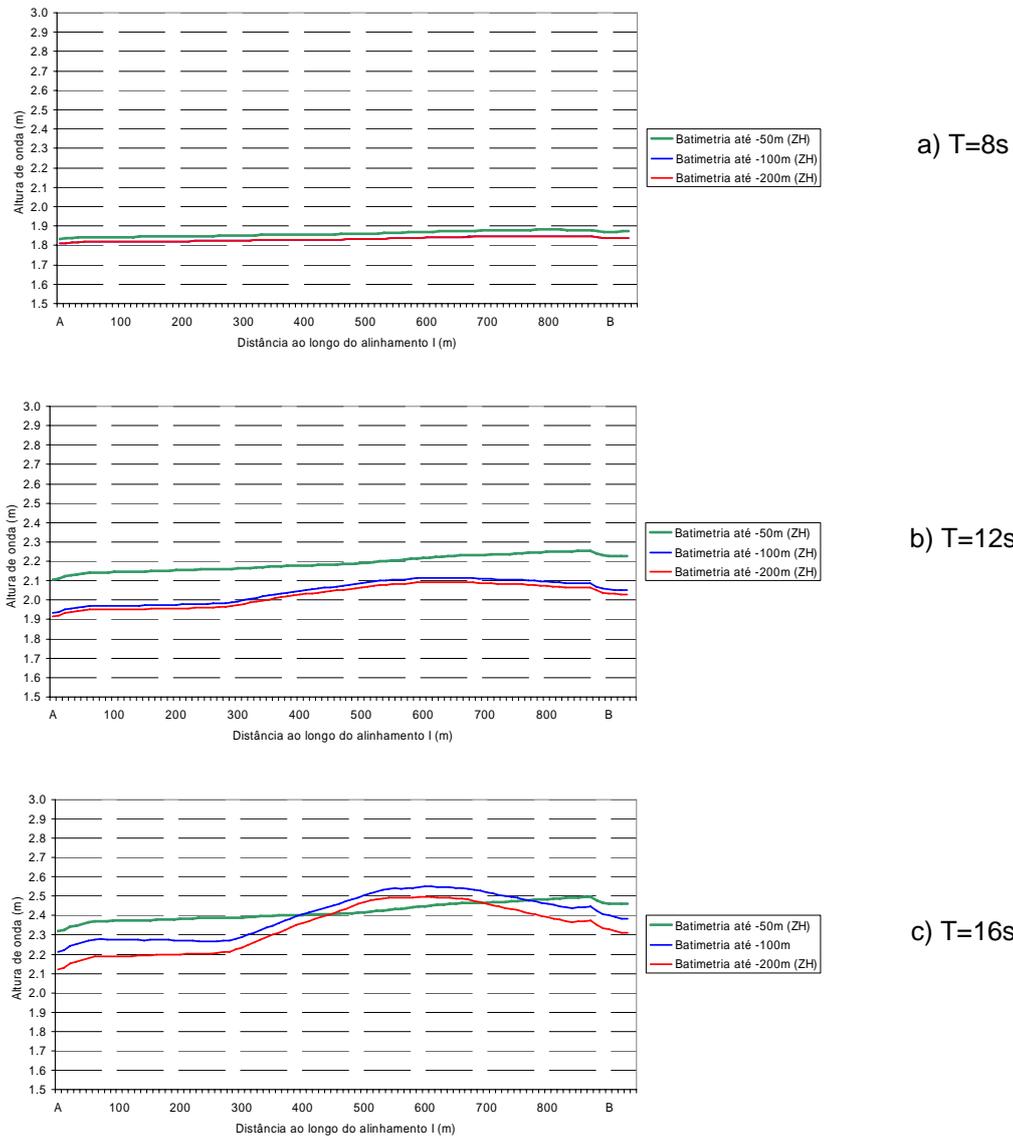
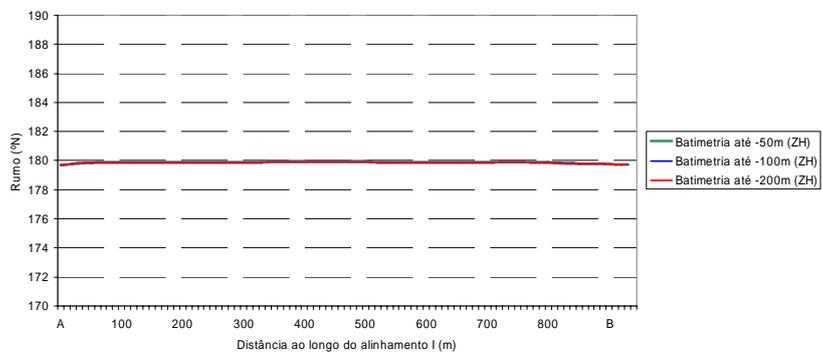
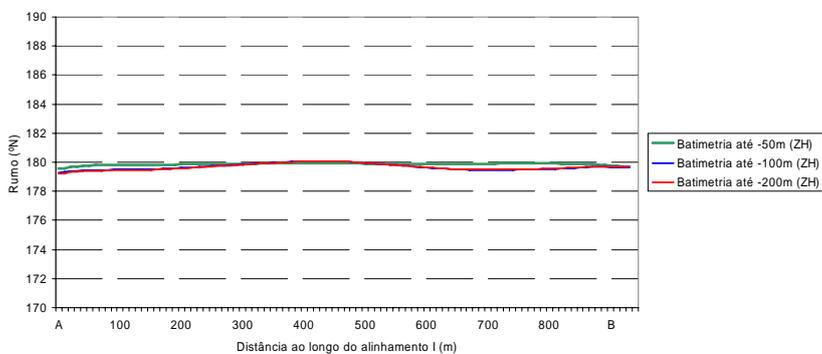


Figura 2 - Alturas de onda para o Rumo ao largo 180°N

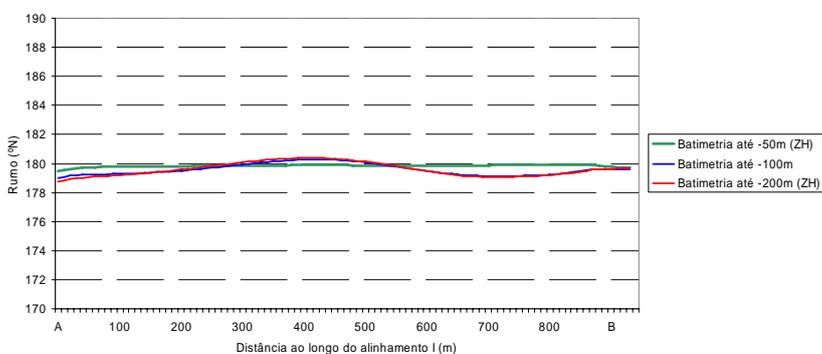
Da análise da figura 2 é possível ver que, como era de esperar, para o período de 8s as alturas de onda ao longo do alinhamento I são praticamente iguais nas 3 malhas. Para os períodos de 12 e 16 segundos o efeito da curvatura das batimétricas traduz-se numa redistribuição das alturas de onda ao longo do alinhamento.



a) T=8s



b) T=12s



c) T=16s

Figura 3 Direcções de onda para o Rumo ao largo 180°N

Em relação às direcções da onda no Alinhamento I, verifica-se a influência da curvatura das batimétricas para os períodos mais elevados.



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

Nas figuras 4 e 5 apresentam-se as alturas e as direcções ao longo do Alinhamento I para o Rumo ao largo 140°N, e para as mesmas alturas e períodos do caso anterior. As conclusões são semelhantes, apresentando no entanto diferenças mais significativas para as três malhas de cálculo.

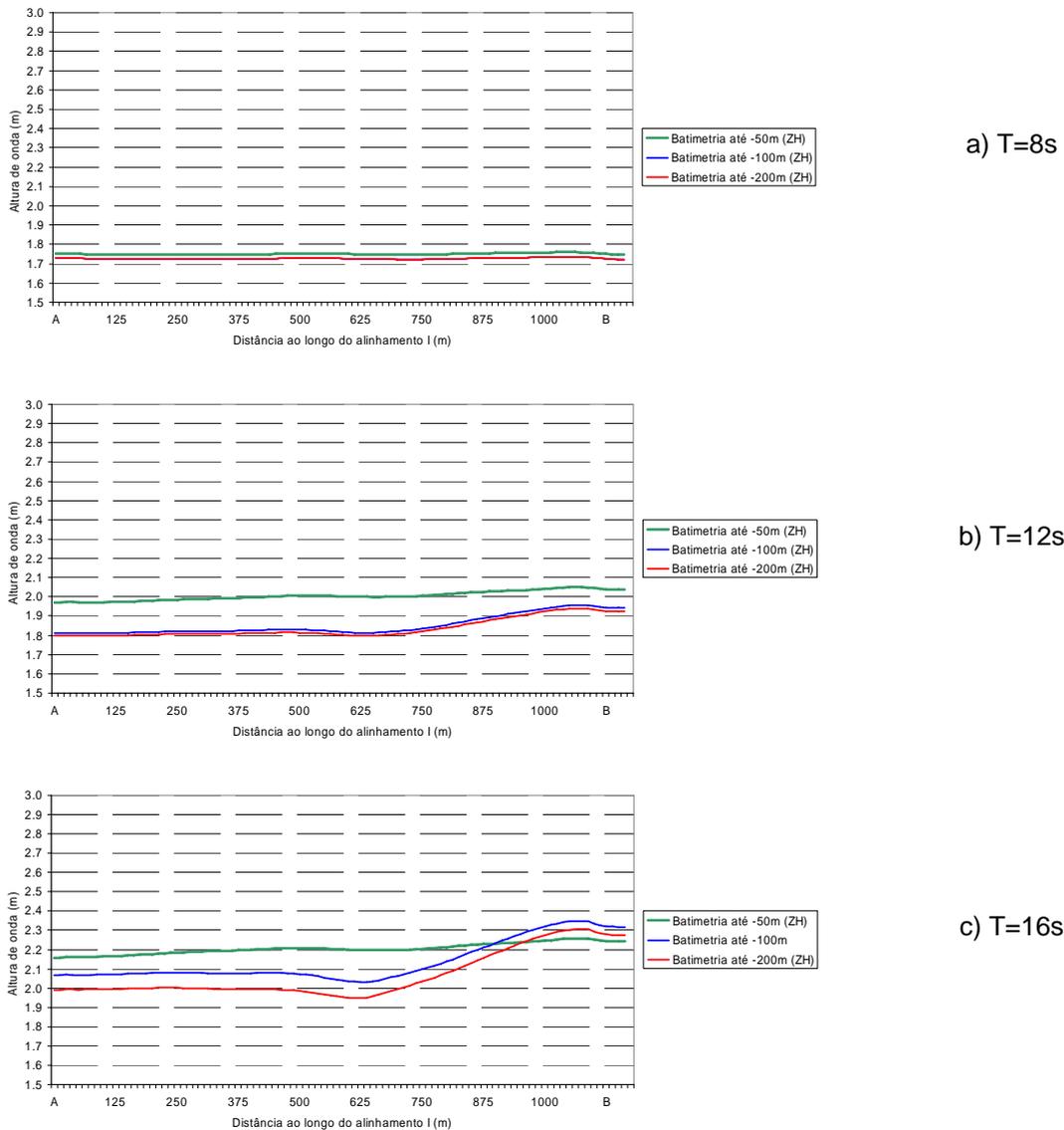


Figura 4 Alturas de onda para o Rumo ao largo 140°N



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

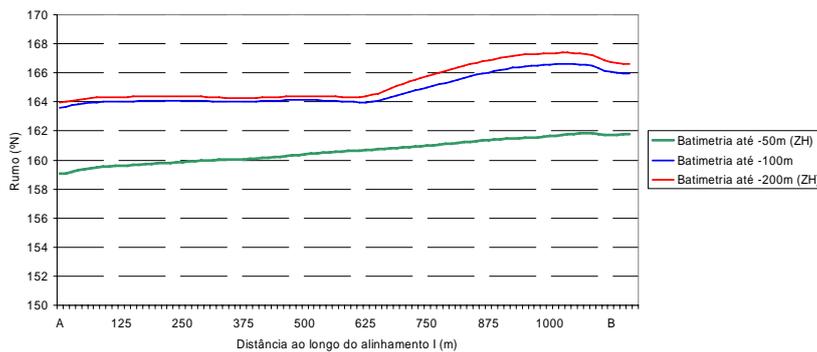
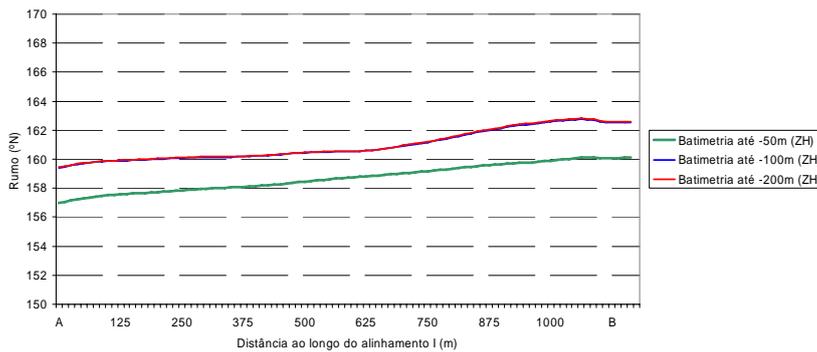
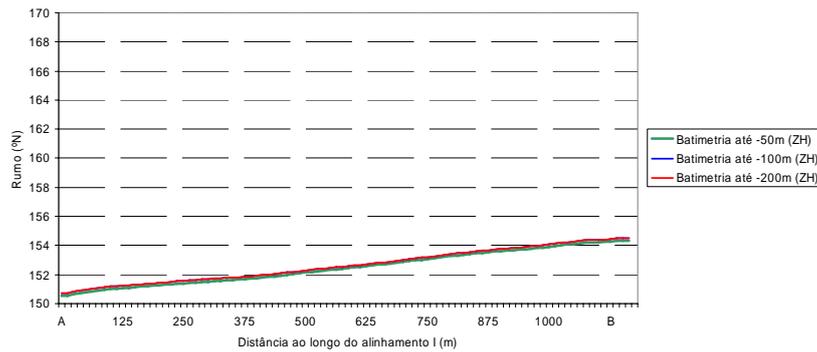


Figura 5 - Direcções da onda para o Rumo ao largo 140°N

Sendo comum não se dispor de levantamentos hidrográficos que atinjam as profundidades necessárias a um estudo de propagação da agitação correcto, ou dispor apenas de cartas hidrográficas de navegação, que não representam os detalhes da morfologia do fundo, os exemplos mostram que se podem cometer erros importantes na avaliação das características das ondas nas zonas próximas da linha de costa.

A origem destes erros está relacionada com a utilização de dados incorrectos e tem como consequência uma avaliação errada das acções a considerar nos estudos ou projectos.



4^as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

2.2 Estudo de distribuição de agitação no interior de um porto

O exemplo que se apresenta tem como objectivo estudar a influência da dimensão da malha de cálculo na distribuição da agitação marítima no interior de uma bacia portuária. Para tal foram criadas três malhas representativas das profundidades com dimensões diferentes, 10x10m, 5x5m e 2x2m. A escolha da dimensão da malha a utilizar nos modelos matemáticos deve ter em conta os fenómenos a estudar. Normalmente começa por se escolher a dimensão da malha, fixando-se em seguida a discretização temporal (time-step) tendo em conta os critérios de estabilidade numérica do modelo e a necessidade de descrever convenientemente a variação no tempo dos parâmetros característicos do fenómeno a simular.

Na entrada da bacia portuária, definida como fronteira aberta do modelo, foram geradas ondas de altura significativa 1m, períodos 6, 8 e 12s, utilizando-se em todos os casos o mesmo rumo. Cada onda foi gerada para dois Níveis de Maré: +0.5m (ZH) e +3.5m (ZH).

Os cálculos foram efectuados com o módulo BW (Boussinesq Waves) que integra o sistema de cálculo MIKE 21 desenvolvido pelo DHI. O módulo MIKE21 BW reproduz a maior parte dos fenómenos ligados à propagação das ondas em batimetrias complexas que interessam à Engenharia Costeira, nomeadamente o empolamento, a refacção, a difracção, a reflexão parcial de ondas regulares ou irregulares, a rebentação e o espraçamento.

Este modelo resolve as equações de Boussinesq de conservação da massa e da quantidade de movimento, integradas na vertical. As equações incluem não-linearidades, e incluem o efeito da aceleração vertical (ou da curvatura das linhas de corrente) na dispersão da pressão.

Na figura 6 estão representadas as três discretizações do domínio de cálculo. A entrada na bacia portuária corresponde ao canto superior esquerdo das figuras.

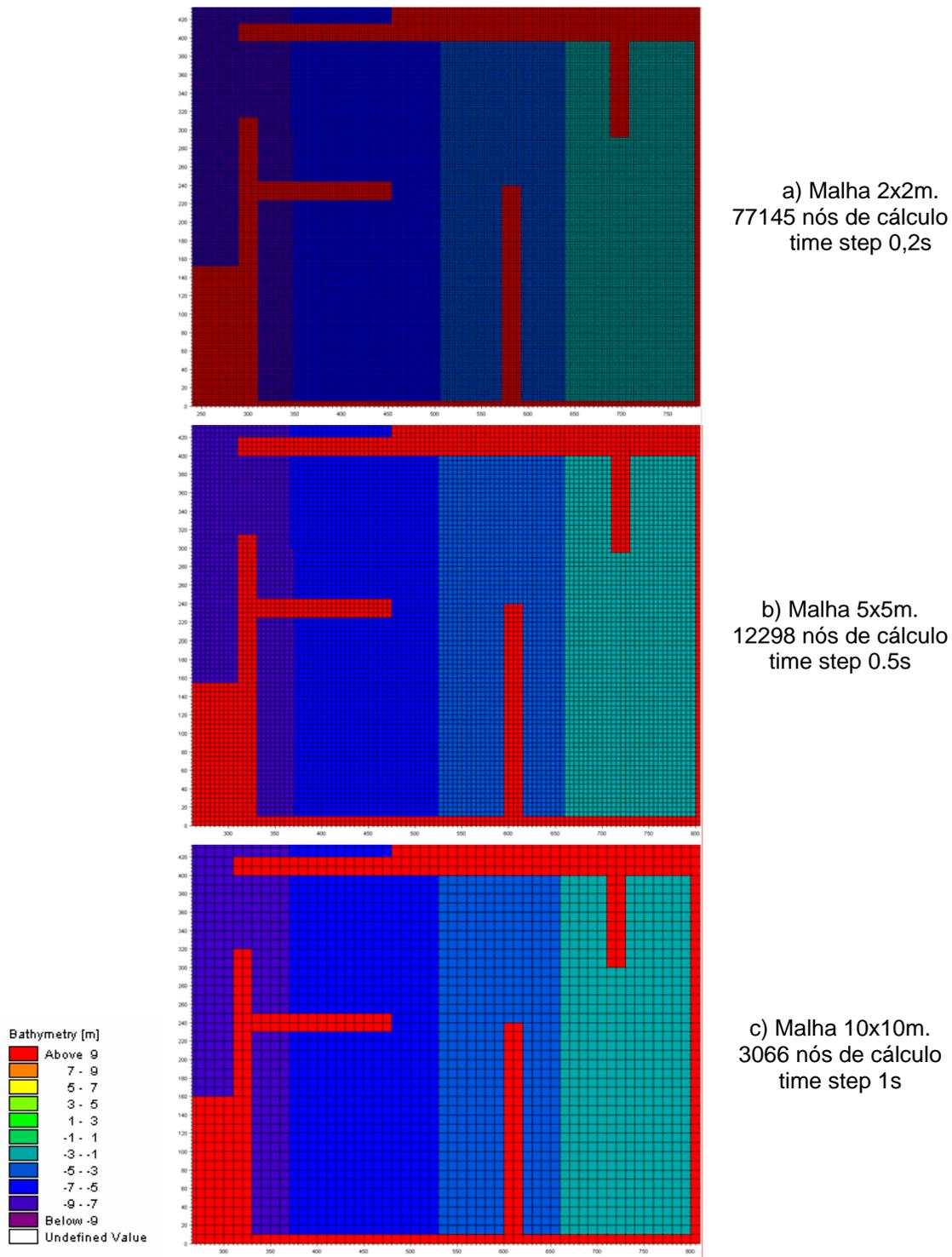
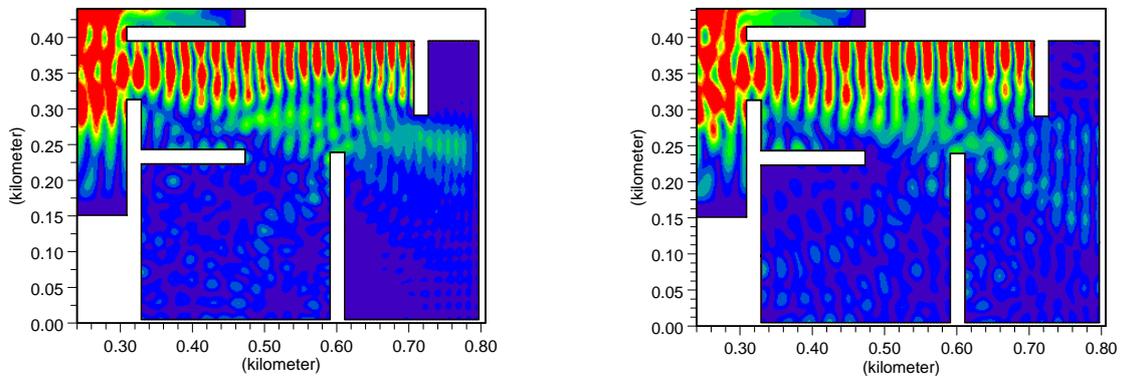


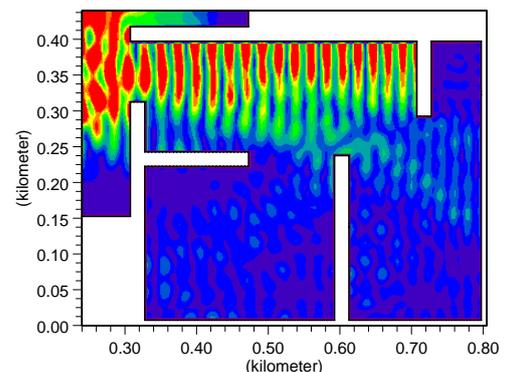
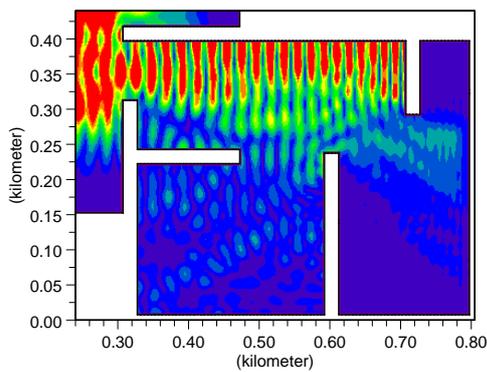
Figura 6 - Discretizações espaciais do domínio utilizadas nos cálculos

Na Figura 7 estão representados os resultados obtidos para as três malhas de cálculo para ondas de 6s e para as duas situações de Nível de Maré estudadas. Para a situação de Baixa-mar os resultados são significativamente diferentes para as três malhas de cálculo, sendo maior a diferença para a malha 10x10. Para a situação de Preia-mar os resultados são semelhantes para as malhas 2x2m e 5x5m, mas para a malha 10x10m os resultados apresentam diferenças significativas.



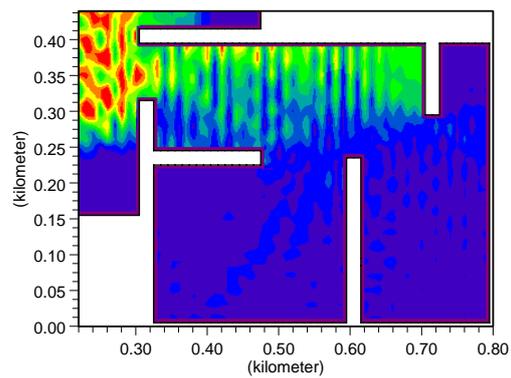
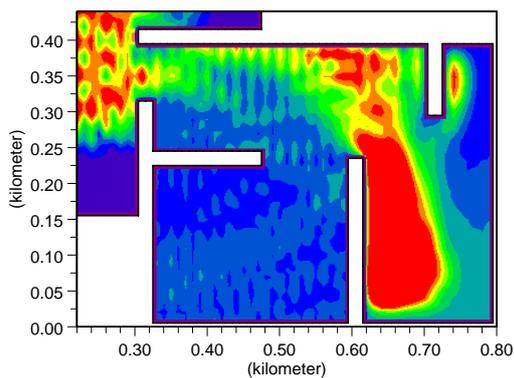
a) Malha 2x2; T=6s; BM

d) Malha 2x2; T=6s; PM



b) Malha 5x5; T=6s; BM

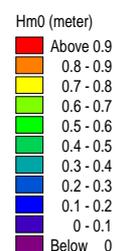
e) Malha 5x5; T=6s; PM



c) Malha 10x10; T=6s; BM

f) Malha 10x10; T=6s; PM

Figura 7 - Alturas de onda calculadas com o modelo de Boussinesq. T=6s



Na Figura 8 apresentam-se os resultados obtidos para as três malhas de cálculo, para ondas de 8s e para as duas situações de Nível de Maré estudadas.

Para as situações de Baixa-mar e de Preia-mar, notam-se as diferenças dos resultados para as três malhas, verificando-se que as maiores diferenças correspondem à malha 10x10m.

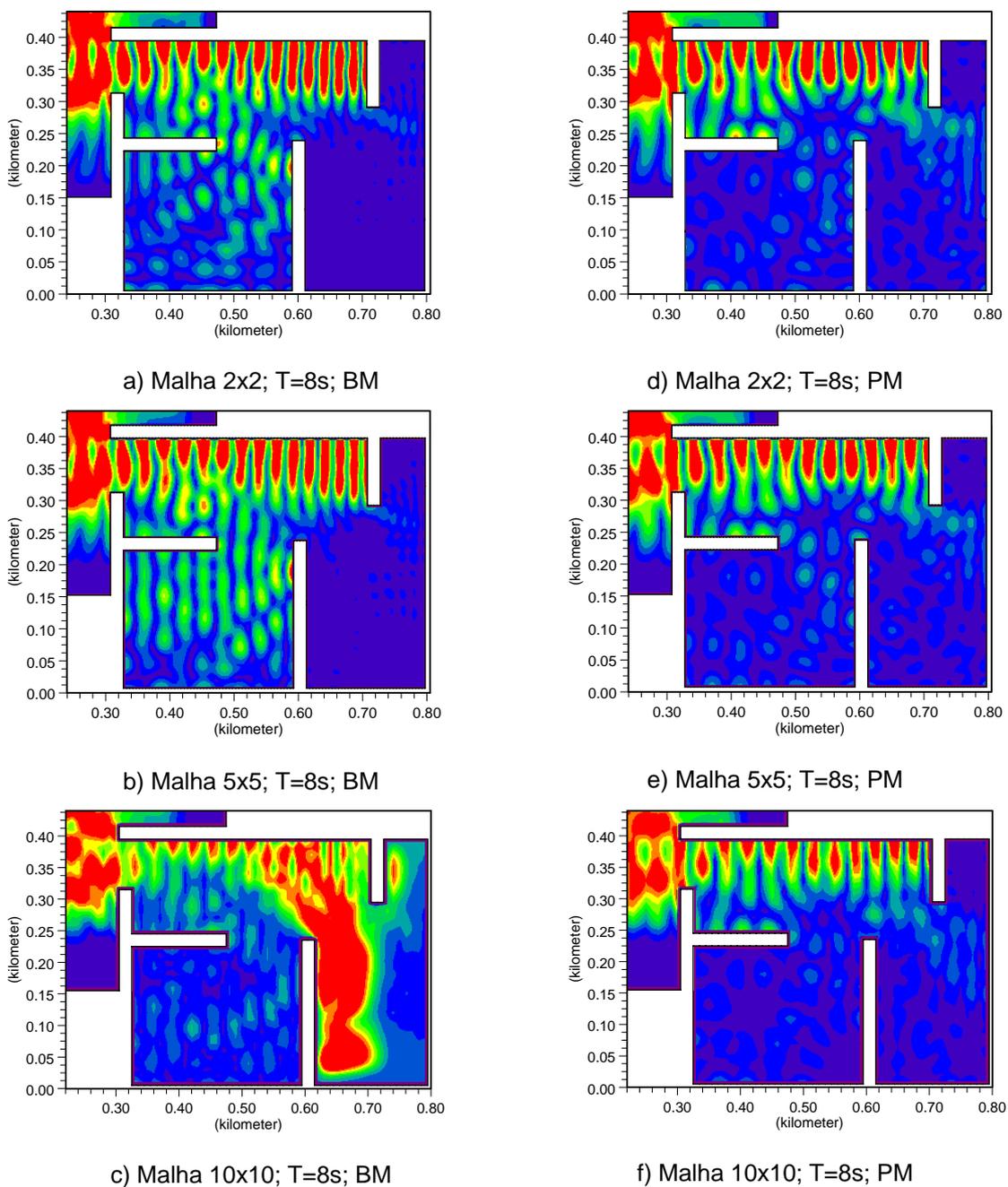
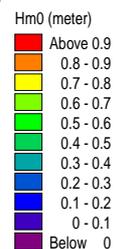


Figura 8 Alturas de onda calculadas com o modelo de Boussinesq. T=8s



Na Figura 9 estão representados os resultados obtidos para as três malhas de cálculo para ondas de 12s e para as duas situações de Nível de Maré estudadas. Utilizando as malhas 2x2m e 5x5m os resultados obtidos são idênticos. Os resultados obtidos com a malha 10x10m apresentam diferenças significativas, maiores para a situação de baixa-mar.

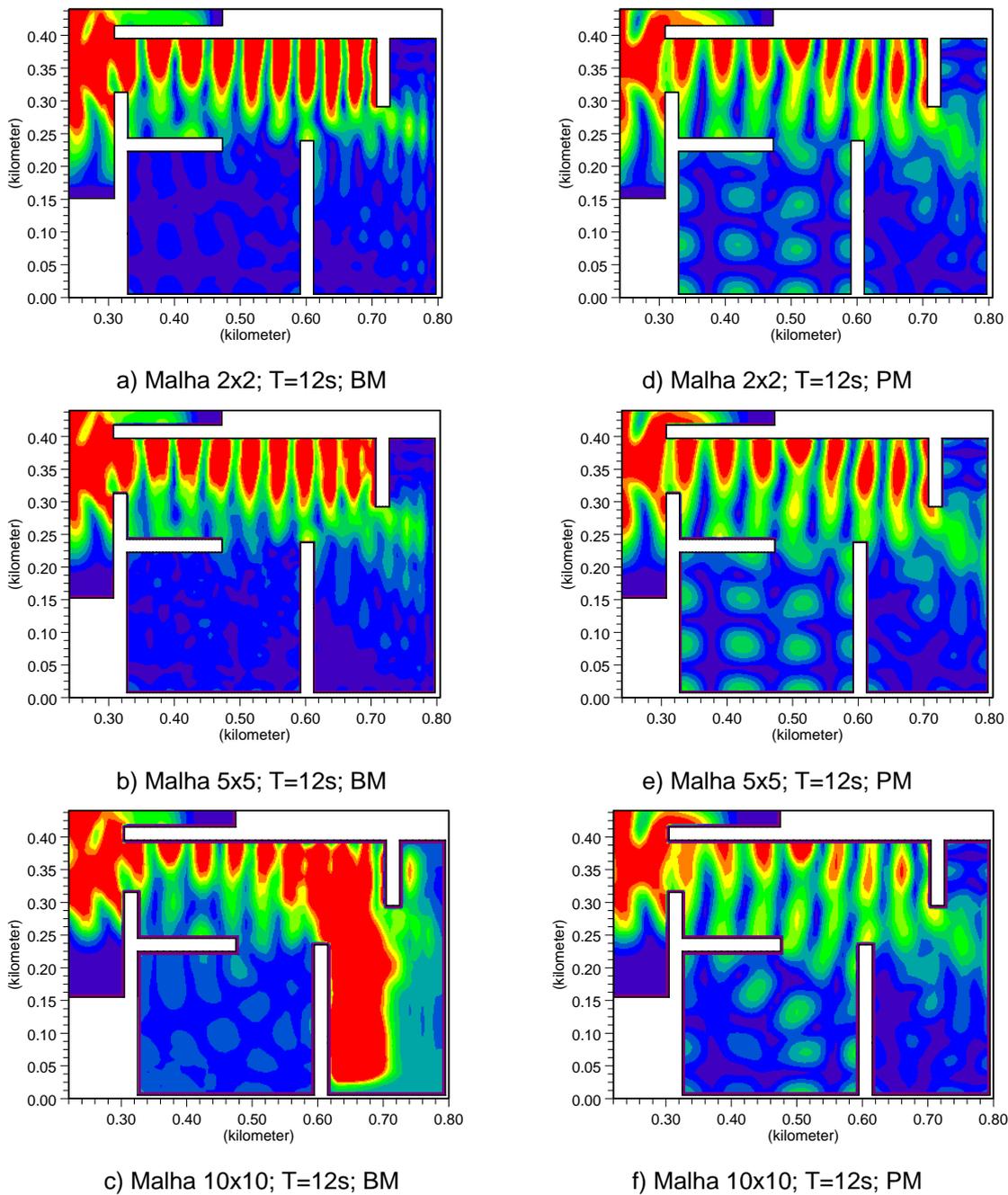
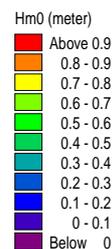


Figura 9 - Alturas de onda calculadas com o modelo de Boussinesq. T=12s





4^as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

Neste exemplo a batimetria considerada é muito simples pelo que qualquer das malhas a representa de forma adequada. A análise dos resultados mostra que se a malha não resolve convenientemente o fenómeno, isto é, se o número de pontos por comprimento de ondas ou o número de time-steps por período for insuficiente, se cometem erros grosseiros, os quais muitas vezes não são aparentes nos resultados.

3 Conclusões

Dos casos apresentados, pode concluir-se que a boa utilização da modelação matemática não depende apenas da qualidade dos modelos. As condições em que os modelos são utilizados podem conduzir a resultados que aparentemente são correctos, mas que sujeitos a uma análise crítica apresentam erros que podem ser grosseiros, e levar a cometer erros nas conclusões de estudos ou nas soluções dos projectos.

Nos exemplos apresentados ilustram-se duas situações distintas que podem provocar má utilização dos modelos matemáticos.

A primeira situação, bem conhecida dos projectistas, refere-se á falta de dados adequados, e está muitas vezes relacionada com a dificuldade de demonstrar ao dono da obra a necessidade de realizar levantamentos ou estudos de caracterização das condições naturais, para atingir as soluções correctas para os projectos.

No segundo exemplo, mostra-se o que pode acontecer quando os operadores e os utilizadores dos estudos de modelação, não têm formação que lhes permita criticar os resultados que obtêm com os modelos, não se apercebendo assim dos erros que podem estar a cometer. Neste caso os erros estão associados a uma deficiente discretização do domínio espacial e/ou temporal de cálculo.

As causas apresentadas não são as únicas responsáveis pela obtenção de resultados errados nos cálculos com modelos matemáticos. Essas causas podem estar relacionadas com a génese dos modelos, com erros de programação, com utilização dos modelos fora do seu âmbito de validade, etc. Deve pois concluir-se que a utilização dos modelos matemáticos deve ser feita por pessoas com formação adequada, que lhes permita analisar os resultados dos cálculos que efectuem de forma esclarecida, de forma a poder validá-los.