

## MODELAÇÃO HIDRODINÂMICA DA SOBREELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR DE ORIGEM METEOROLÓGICA - VIANA DO CASTELO

Nuno Ricardo Costa Silva Marujo<sup>1,2</sup>

[nuno.marujo.silva@gmail.com](mailto:nuno.marujo.silva@gmail.com)

<sup>1</sup> CEHIDRO – Centro de Estudos de Hidrossistemas, Instituto Superior Técnico, Universidade  
Técnica de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa.

<sup>2</sup> WW – Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, S.A.

Rotunda Nuno Rodrigues dos Santos, 1B – 10<sup>o</sup>, 2685-223 Portela LRS

### Resumo

Neste trabalho o evento de sobrelevação do nível do mar de origem meteorológica, que atingiu a costa Portuguesa no período de 14 a 17 de Outubro de 1987, é simulado utilizando o modelo ADCIRC.

Para aquisição de dados batimétricos em falta necessários durante a modelação, efetuou-se um trabalho de campo, com recurso a equipamento GNSS, para criar um modelo local de ondulação do geóide (MLOG) e melhorar a informação batimétrica existente para o estuário do rio Lima. Os dados obtidos foram combinados com os existentes para criar um modelo digital do terreno (MDT) para este estuário.

Posteriormente procedeu-se à calibração do modelo com base no forçamento astronómico e alterando os dados de entrada do modelo considerados mais importantes. Seguidamente procedeu-se à validação do modelo de diferentes formas.

Os resultados obtidos mostram a importância do coeficiente de atrito em relação aos outros parâmetros de calibração e de considerar um fator de Coriolis variável em domínios extensos em latitude. Observou-se transferência de energia entre o forçamento astronómico, meteorológico e o caudal fluvial.

# 1 Introdução

A Diretiva Europeia 2007/60/CE refere a necessidade de avaliar e controlar o risco de inundações e cheias, assim como a necessidade de criar cartas de risco aplicáveis na gestão da orla costeira. Em zonas costeiras e estuarinas, a sobre-elevação do nível do mar de origem meteorológica contribui para o agravamento de cheias e inundações. Estas inundações são não raras vezes provocadas e/ou agravadas pela diminuição da carga hidráulica disponível nos sistemas de drenagem. Esta dependendo do nível da superfície da água é afetada em áreas estuarinas pelo caudal fluvial e a maré (componente astronómica + componente meteorológica). A maré meteorológica é frequentemente designada por sobre-elevação do nível do mar de origem meteorológica que, na sua forma mais geral, deve-se ao efeito combinado do empilhamento devido ao vento e à diminuição da pressão atmosférica. Efeitos locais que contribuem para o agravamento deste fenómeno são, por exemplo, a existência de caudais fluviais e a sobre-elevação induzida pela rebentação.

(Araújo, Mazzolari, and Trigo-Teixeira 2011) simularam uma tempestade que atingiu a costa portuguesa no período de 14 a 17 de Outubro de 1987 considerando um domínio oceânico que apesar de incluir Viana do Castelo, exclui a costa oeste portuguesa a sul de Peniche e o interior do estuário do rio Lima. Desta forma, no presente estudo consideram-se dois domínios: um oceânico e outro estuarino que colmatam aspetos deixados em aberto por (Araújo, Mazzolari, and Trigo-Teixeira 2011). O domínio oceânico foi definido de forma a incluir toda a costa oeste portuguesa e o domínio estuarino com o objetivo de modelar o estuário do rio Lima em diferentes condições de forçamento.

Previamente à modelação numérica do fenómeno procedeu-se ao levantamento da informação disponível: informação topo-batimétrica, registos maregráficos, componentes harmónicas constantes em tabelas de maré, dados meteorológicos (velocidade do vento e pressão atmosférica) e informação de medições de velocidades e níveis da água no interior do estuário do Lima. Tendo-se verificado a ausência de informação topo-batimétrica na zona entre marés efetuou-se um trabalho de campo com recurso a equipamento Global Navigation Satellite System (GNSS) para colmatar estas lacunas. Foi necessário estabelecer um Modelo Local de Ondulação do Geóide (MLOG) para converter as altitudes elipsoidais registadas pelo equipamento em altitudes ortométricas que são as utilizadas no modelo. A informação topo-batimétrica adquirida foi combinada com a existente e utilizada para criar o Modelo Digital do Terreno, sendo essencial para o estabelecimento de condições fronteira físicas do modelo.

Com vista ao estudo deste fenómeno utilizou-se o modelo hidrodinâmico ADCIRC seguindo a metodologia considerada por (Marujo-Silva 2011). No presente estudo simulou-se a tempestade que atingiu a costa portuguesa no período de 14 a 17 de Outubro de 1987. O modelo foi calibrado utilizando o forçamento astronómico. Este foi determinado com base na análise harmónica dos registos do marégrafo de Viana do Castelo tendo-se identificado os componentes harmónicas de maré mais energéticos e separado o sinal de maré astronómico dos resíduos – maré meteorológica e outros fenómenos locais.

## **2 Metodologia**

### **2.1 Dados prévios**

#### **2.1.1 Dados batimétricos**

Na definição de qualquer modelo hidrodinâmico é necessário estabelecer as condições fronteira. Entre estas condições encontra-se a batimetria da zona em estudo. A área estudada inclui parte do Oceano Atlântico Norte e o estuário do rio Lima. Pela dimensão da área estudada foi necessário recorrer a diferentes fontes topo-batimétricas com resoluções e âmbitos espaciais distintos.

Para o domínio oceânico recorreu-se às seguintes fontes:

- Junto à costa portuguesa utilizaram-se cartas batimétricas Portuguesas às escalas 1:150 000 e 1:1 000 000. Estas cartas foram digitalizadas e incluem informação até uma profundidade de 4 000 m.
- Para as áreas mais afastadas da costa portuguesa e mais profundas utilizou-se a base de dados global do “Institute of Geophysics and Planetary Physics” com uma resolução de 1’ (Smith and Sandwell 1997).

Para o domínio estuarino considerou-se o modelo digital do terreno (MDT) resultante das seguintes fontes:

- Carta Militar do Instituto Geográfico do Exército (IGEOE) à escala 1:25 000 de 1997, representada no sistema Hayford-Gauss Datum Lisboa Militar com equidistância entre curvas de nível de 10 m.
- Levantamento “Lima” efetuado pela empresa Hidrodata em 2006 com uma resolução espacial de 20 m por 10 m que cobre o rio Lima a montante do estuário.
- Levantamento “Eiffel” efetuado pela empresa Hidrodata em 2006 com uma resolução espacial de 2 m por 2 m junto à ponte Eiffel.
- Levantamento “Estuário” efetuado pela empresa Hidrodata em 2006 com uma resolução espacial de 5 m por 5 m com o âmbito espacial do estuário.
- Levantamento “IST/LNEC” no período 8-10 de Setembro de 2010 por Ana Paula Falcão, Alexandre Gonçalves, Nádia Braz e Nuno Marujo (Falcão et al. 2011) com densidade variável nas zonas identificadas como não possuindo informação topo-batimétrica satisfatória. Este levantamento e o estabelecimento do MDT para o estuário do rio Lima são descritos na secção 2.2.

#### **2.1.2 Dados meteorológicos e climáticos**

No estabelecimento de um modelo hidrodinâmico do tipo Advanced Circulation Model (ADCIRC) é necessário estabelecer além das condições fronteira o forçamento do modelo. Num modelo de simulação de cheias em zonas estuarinas devido ao efeito combinado da sobre-elevação de origem meteorológica (vento, pressão atmosférica) e caudal fluvial deve-se considerar o valor destas variáveis na área estudada e ao longo do período simulado.

Desta forma como dados de forçamento do modelo considerou-se:

- Componentes harmónicos da maré – amplitude e fase - provenientes da base de dados global de Le Provost's obtidos a partir de informação altimétrica de satélites (Le Provost et al. 1994);
- Pressão atmosférica obtida a partir do U.S. National Center for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research reanalysis (Kalnay et al. 1996) no website da National Oceanic and Atmospheric Administration. Os valores estão disponíveis de 6 em 6 h numa grelha global de  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  (144  $\times$  73 Células);
- Intensidade e sentido do vento obtidos a partir do U.S. National Center for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research reanalysis (Kalnay et al. 1996) no website da National Oceanic and Atmospheric Administration. Os valores estão disponíveis de 6 em 6 h numa grelha global de  $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$  (192  $\times$  97 Células);
- Caudal médio diário no rio Lima obtido junto do INAG, I.P. (<http://snirh.pt>) para a estação hidrométrica de Forno da Cal. Esta estação encontra-se localizada aproximadamente 27 km a montante da entrada do estuário do rio Lima.

Para a calibração do modelo consideraram-se adicionalmente os seguintes dados:

- Componente de maré astronómica obtida a partir dos níveis medidos pelo marégrafo de Viana do Castelo após separação nas suas componentes harmónicas e residuais no *software* T\_Tide (Pawlowicz, Beardsley, and Lentz 2002);
- Níveis da superfície da água registados pela empresa Hidrodata em 2006 para 3 pontos no interior do estuário do Lima;
- Magnitude e sentido da corrente registados pela empresa Hidrodata no período 5-12 de Outubro de 2006 para 3 pontos no interior do estuário do Lima.

A validação dos modelos foi feita de acordo com os seguintes dados:

- Nível do mar registado pelo marégrafo de Viana para ambos os Modelos - Domínios;
- Componente de resíduos obtida a partir dos níveis medidos pelo marégrafo de Viana do Castelo após separação nas suas componentes harmónicas e residuais no *software* T\_Tide (Pawlowicz, Beardsley, and Lentz 2002) para ambos os Modelos - Domínios;
- Comparação das componentes harmónicas obtidas com o modelo versus as componentes harmónicas presentes em tabelas de maré para os portos de Viana do Castelo, Leixões, Aveiro, Figueira da Foz, Peniche, Cascais, Sines e Lagos com a localização representada na Figura 3 para o Modelo - Domínio Oceânico;
- Análise de sensibilidade à consideração de um factor de Coriolis variável para o Modelo - Domínio Oceânico;
- Estudo de convergência da malha utilizada no modelo através do refinamento desta malha e diminuição do passo de cálculo para o Modelo - Domínio Oceânico.

## 2.2 Aquisição de dados topo-batimétricos no estuário do rio Lima

A informação topo-batimétrica existente até 2009 no domínio estudado foi agregada e compatibilizada de forma a ficar referenciada face a um sistema de coordenadas e datum vertical únicos. Após esta fase analisou-se a informação existente e verificou-se a ausência de informação em diversos locais. Esta ausência encontrava-se concentrada em zonas entre marés que pelos métodos topográficos e hidrográficos convencionais são mais complexas na aquisição de dados.

Uma vez identificadas estas áreas procedeu-se à análise das técnicas disponíveis para aquisição de dados e à sua relação custo/ benefício. Tendo-se concluído que existia disponibilidade de equipamento GNSS de diferentes características optou-se por aplicar uma técnica em que se considerou a aquisição de dados através de um recetor GNSS que era estacionado num ponto, as medições efetuadas durante 5 min e a desta forma a informação topo-batimétrica era adquirida.



Figura 1 – Equipamento GNSS utilizado na aquisição de informação topo-batimétrica (esquerda) e equipamento utilizado para aquisição de informação de elevada precisão para correção diferencial e estabelecimento do MLOG (direita).

Considerando o facto deste tipo de equipamento adquirir altitudes elipsoidais ( $h$ ) foi necessário transformar estas altitudes em altitudes ortométricas ( $H$ ). Esta transformação pode ser feita considerando a ondulação do geóide ( $N$ ) segundo a expressão seguinte (Falcão 2010)

$$H(P) \approx h(P) + N(P) \quad (1)$$

Onde,

$H(P)$  – Altitude Ortométrica do ponto  $P$  (m)

$h(P)$  - Altitude Ortométrica do ponto  $P$  (m)

$N(P)$  – Ondulação do geóide do ponto  $P$  (m)

O MLOG definido foi utilizado para converter as altitudes elipsoidais dos pontos medidos após correção diferencial. As altitudes ortométricas assim determinadas foram combinadas com as existentes anteriormente e o modelo digital do terreno para o estuário do rio Lima e área envolvente definido. Este modelo é apresentado na Figura 2.

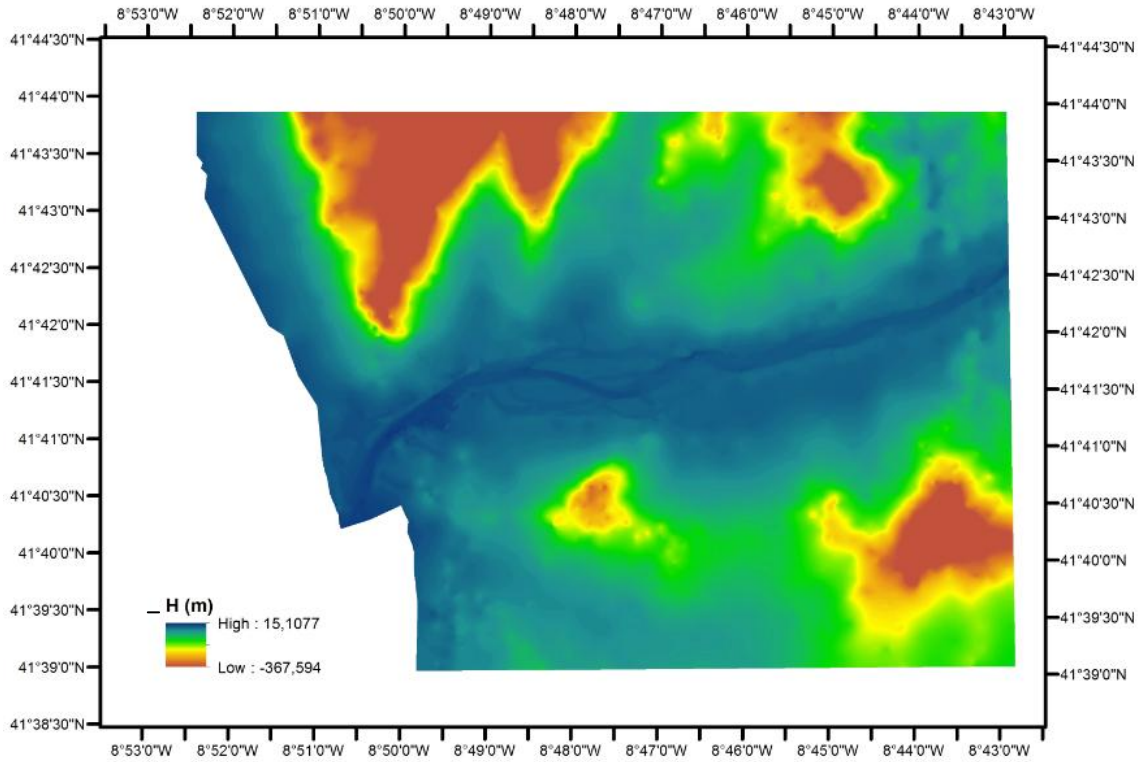


Figura 2 – Modelo Digital do Terreno para o estuário do rio Lima. Altitudes ortométricas com sinal invertido - adaptado de (Marujo-Silva 2011).

### 2.3 Descrição do Modelo ADCIRC

O modelo Advanced Circulation Model (ADCIRC) (Luettich et. al, 1992, Luettich and Westerink 2004) possibilita a modelação hidrodinâmica de ondas de período longo em superfície livre e efeitos meteorológicos como o vento, pressão atmosférica, tensões de radiação e escoamentos em 2D ou 3D.

Este modelo resolve as equações da continuidade e da quantidade de movimento nas suas versões integradas na vertical. Estas equações foram estabelecidas com as seguintes aproximações: Boussinesq, incompressibilidade e pressão hidrostática. Estas equações são reproduzidas nas equações (2), (3) e (4) (Luettich and Westerink 2004)

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial(UH)}{\partial \lambda} + \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial(VH \cos \varphi)}{\partial \varphi} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \varphi} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial U}{\partial \varphi} - fV - \frac{UV \sin \varphi}{R \cos \varphi} = -\frac{g}{R \cos \varphi} \frac{\partial(\zeta + P_s/g\rho_0 - \alpha\eta)}{\partial \lambda} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H} \quad (3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \varphi} \frac{\partial V}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial V}{\partial \varphi} + fU - \frac{UV \sin \varphi}{R \cos \varphi} = -\frac{g}{R} \frac{\partial(\zeta + P_s/g\rho_0 - \alpha\eta)}{\partial \varphi} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0 H} \quad (4)$$

onde,

$t$  – Tempo (s);

$\lambda$  e  $\varphi$  - Longitude positiva a Este de Greenwich e Latitude positiva a Norte do Equador (graus);

$\zeta$  – Nível da superfície da água (m);

$U, V$  – Velocidades horizontais integradas na vertical respetivamente segundo x e y (m/s);

$H = \zeta + h$  – Altura Total da coluna de água (m);

$h$  – Profundidade Batimétrica (m);

$f$  – Fator de Coriolis;

$R$  – Raio da Terra;

$\rho_0$  – Densidade de Referência;

$g$  – Aceleração Gravítica ( $m/s^2$ );

$\alpha$  - Fator de Elasticidade da Terra;

$\eta$  – Potencial da Maré Newtoniano de Equilíbrio (ver Equação (5));

$P_s$  – Pressão atmosférica ao nível médio do mar;

$\tau_{sx}, \tau_{sy}$  – Tensões superficiais forçadas segundo as direções x e y, respetivamente

$\tau_{bx}, \tau_{by}$  – Tensões de atrito de fundo segundo as direções x e y, respetivamente.

Segundo (Reid 1990) o Potencial da Maré Newtoniano de Equilíbrio é apresentado na equação (5).

$$\eta(\lambda, \varphi, t) = \sum_{n,j} C_{jn} f_{jn}(t_0) L_j(\varphi) \cos \left[ \frac{2\pi(t - t_0)}{T_{jn}} + j\lambda + v_{jn}(t_0) \right] \quad (5)$$

onde,

$C_{jn}$  – constante que caracteriza a amplitude do componente harmónico n do tipo j;

$f_{jn}$  – fator nodal dependente do tempo;

$v_{jn}$  – parâmetro astronómico dependente do tempo;

$j=0, 1, 2$  tipo de componente ( $j=0$  - declinacional;  $j=1$  - diurno;  $j=2$  - semidiurno);

$L_0 = 3\sin^2(\varphi) - 1$ ;

$L_1 = \sin(2\varphi)$ ;

$L_2 = \cos^2(\varphi)$ ;

$t$  – Tempo;

$t_0$  – tempo de referência;

$T_{jn}$  – período do componente harmónico n do tipo j.

Para a modelação dos processos hidrodinâmicos e resolução das equações (2), (3) e (4) é adotada a discretização espacial pelo Método dos Elementos Finitos e a discretização temporal utilizando o Método das Diferenças Finitas. Este método implica a definição de uma malha irregular de elementos finitos e o estabelecimento de um passo de cálculo. Uma malha satisfatória deverá permitir preservar as características essenciais da realidade, isto é, conservar a forma e localização das curvas de nível, permitir a reprodução dos principais canais e estruturas topológicas do relevo ser estável para um passo de cálculo que não implique um esforço computacional acima do possível, desejável e justificado. O passo de cálculo poderá ser selecionado com base na expressão: *min{ mínimo do espaçamento temporal entre resultados pretendidos , máximo tempo de cálculo permitido pela condição de estabilidade numérica - condição de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL)}*.

Atendendo aos objetivos específicos e condições acima, para a modelação dos fenómenos físicos consideraram-se dois domínios: um oceânico (Modelo – Domínio Oceânico) e outro estuarino (Modelo – Domínio Estuarino) que são descritos nas secções 2.4 e 2.5 respetivamente.

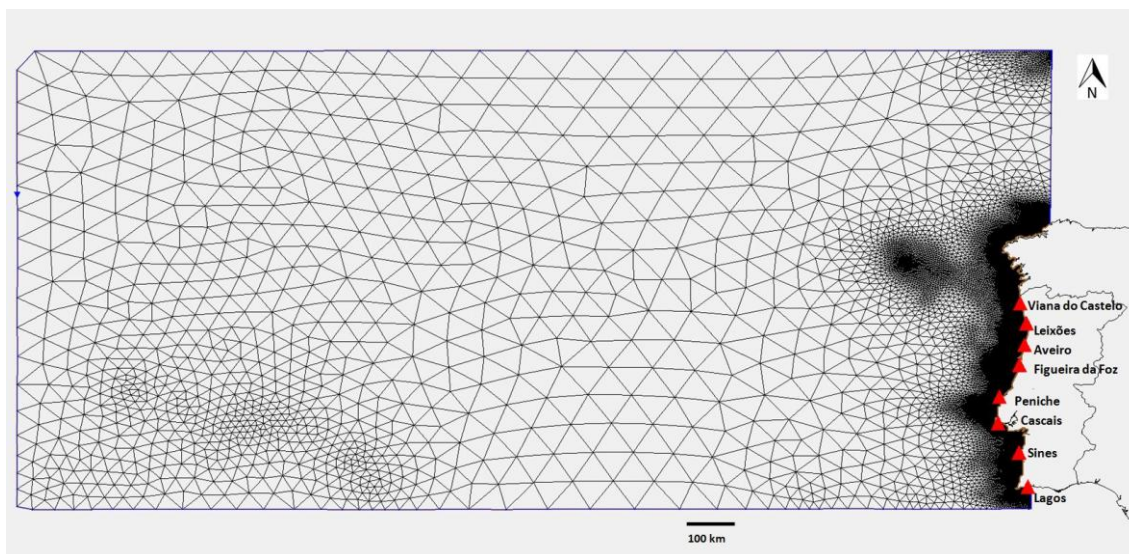
## **2.4 Modelo Oceânico – Estabelecimento do modelo**

O Modelo – Domínio Oceânico é apresentado na Figura 3. Este Modelo foi estabelecido com o objetivo de estudar a propagação da maré ao longo da costa portuguesa; estudar a evolução da sobrelevação de origem meteorológica ao longo da costa Portuguesa e em especial à embocadura do estuário do rio Lima; analisar a influência de cada um dos parâmetros de calibração do modelo e analisar a influência de considerar um fator de Coriolis variável face a um fator de Coriolis ajustado ao local de estudo (Viana do Castelo – latitude ~41.7°N).

O domínio considerado estende-se entre os meridianos 34°W e 8°W intersetado com a batimétrica dos 4 m (Zero Hidrográfico (ZH)) junto à linha de costa portuguesa. Em Latitude o domínio encontra-se limitado a Norte pelo paralelo 48°N e a Sul pela Latitude 36.5°N. A fronteira oceânica estabeleceu-se conforme a Figura 3 - linha a azul - e a fronteira terrestre coincidente com a batimétrica dos 4 m (ZH) - linha a castanho. Esta batimétrica assegura que face às variações do nível do mar devido à maré não existe molhagem/ secagem de elementos. A malha de elementos finitos apresenta-se na Figura 3. Esta malha possui 118656 elementos e 60766 nós. Neste modelo colocou-se um local de registo de níveis da superfície do mar no nó da malha mais próximo do marégrafo de Viana do Castelo – ponto 1 na Figura 4.

## **2.5 Modelo Estuarino – Estabelecimento do modelo**

O Modelo - Domínio Estuarino é apresentado na Figura 4. Este domínio foi estabelecido com os objetivos de estudar a propagação da maré no interior do estuário, analisar a capacidade do modelo de considerar caudal fluvial sobreposto ao efeito da pressão atmosférica, vento e maré astronómica e estudar a evolução da sobrelevação de origem meteorológica no interior do estuário do rio Lima.



**Figura 3 – Modelo - Domínio Oceânico considerado e malha associada. Representação dos 8 portos com componentes harmónicas publicadas em Tabela de Marés do Instituto Hidrográfico.**

A fronteira oceânica deste domínio foi estabelecida como sendo um arco de circunferência com um raio aproximado de 8 km centrado no ponto central do estuário do rio Lima e o domínio prolongado até aproximadamente 10 km a montante da embocadura do estuário, na situação representada na Figura 4, e 24 km na situação representada na Figura 5. Cada um destes domínios foi utilizado com objetivos distintos: o primeiro para calibração pela sua menor dimensão e o segundo para validação do modelo representado na Figura 4. A malha utilizada no domínio da Figura 5 é resultante da malha utilizada no domínio menor agregada com uma malha gerada para montante até Ponte de Lima para assegurar que a propagação da maré fica contida no domínio computacional. A malha associada ao domínio estuarino foi definida de forma a que os principais canais de vazante e cheia sejam considerados conforme pode ser verificado pela análise da dimensão dos elementos nos canais da Figura 4.

### **3 Resultados obtidos**

#### **3.1 Calibração dos modelos**

A calibração de um modelo desta natureza é essencial para assegurar que o modelo providencia resultados o mais próximo possível da realidade. Durante a calibração faz-se variar o valor de parâmetros do modelo sendo no caso presente o coeficiente de atrito, a continuidade da onda, a viscosidade lateral e o tipo de condição fronteira. Considerou-se ainda a hipótese de um parâmetro de Coriolis variável e um número diferente de componentes de maré.

Deve-se referir que o processo de calibração do modelo foi feito de duas forma conforme as especificidades e estabilidade das condições impostas ao modelo e o forçamento considerado. O domínio oceânico, por não possuir zonas em que ocorre o fenómeno de molhagem/secagem não possui a mesma exigência do domínio estuarino.

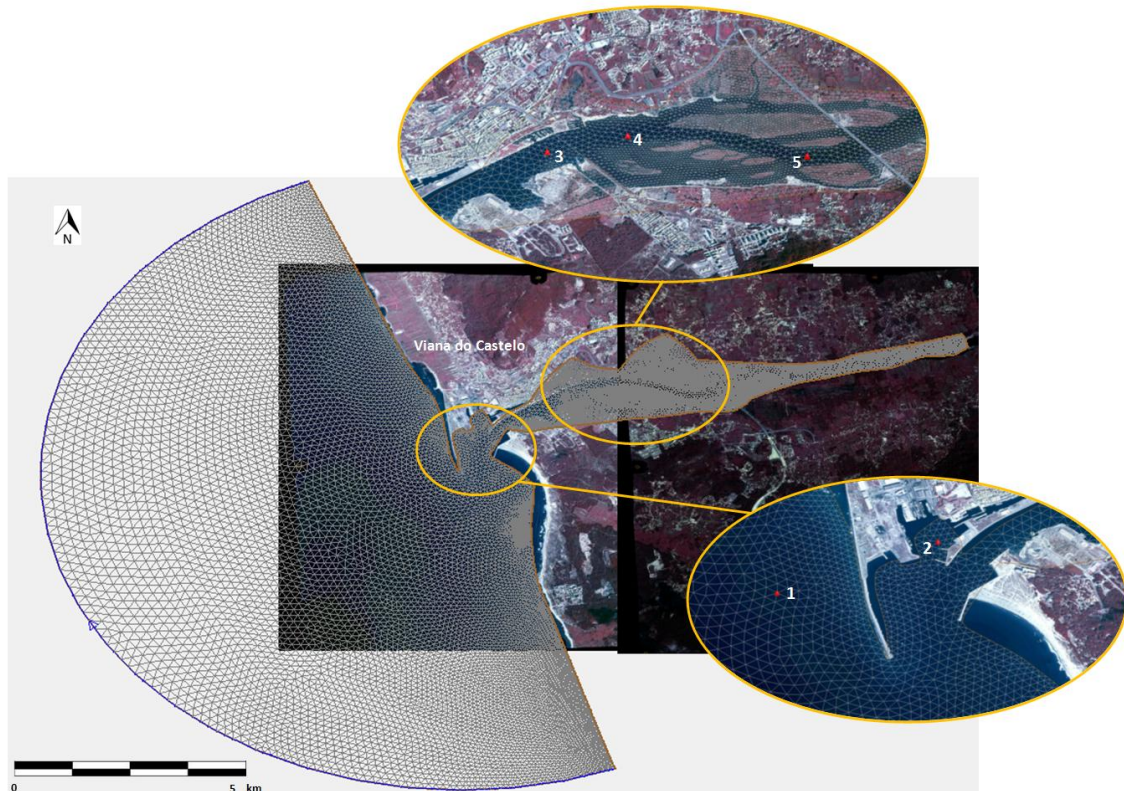


Figura 4 – Modelo - Domínio Estuarino considerado e malha associada utilizada na fase de calibração. Representação dos 5 pontos utilizados para análise da propagação dos resíduos para o interior do estuário.

### 3.1.1 Modelo - Domínio Oceânico

O modelo correspondente ao domínio oceânico foi calibrado considerando o forçamento astronómico com os componentes harmónicos provenientes da base de dados de Le Provost. Os resultados obtidos foram comparados com os níveis da maré astronómica obtidos pela análise harmónica dos registos do marégrafo de Viana do Castelo utilizando o software T\_Tide (Pawlowicz, Beardsley, and Lentz 2002) entre 12 e 20 de Outubro de 1987. Durante a calibração considerou-se o coeficiente de atrito a variar entre 0.005 e 0.300, a continuidade de onda entre 0.0000 e 0.0015, a viscosidade lateral entre 10 e 30, o tipo de condição fronteira – Natural, Essencial e Essencial sem deslizamento - e o número de componentes harmónicos da base de dados de Le Provost igual a 6,10 e 13.

De entre as várias combinações testadas concluiu-se que para este domínio os melhores resultados foram obtidos para um coeficiente de atrito de 0.300, para um valor da continuidade de onda igual a 0.0010, para uma viscosidade lateral igual a 20, que o tipo de condição fronteira não teve efeito nos resultados obtidos (profundidade elevada pelo que velocidades reduzidas) e o número de componentes harmónicos da base de dados de Le Provost igual a 10. Na Tabela 1 apresenta-se a comparação entre a pior e a melhor combinação de parâmetros.

Verifica-se com base nestes resultados que a calibração deste modelo é particularmente importante. Deve-se referir que o coeficiente de atrito considerado apesar de elevado pode ser utilizado, sem prejuízo da reprodução física do fenómeno, uma vez que as velocidades integradas na vertical são bastante reduzidas neste domínio.

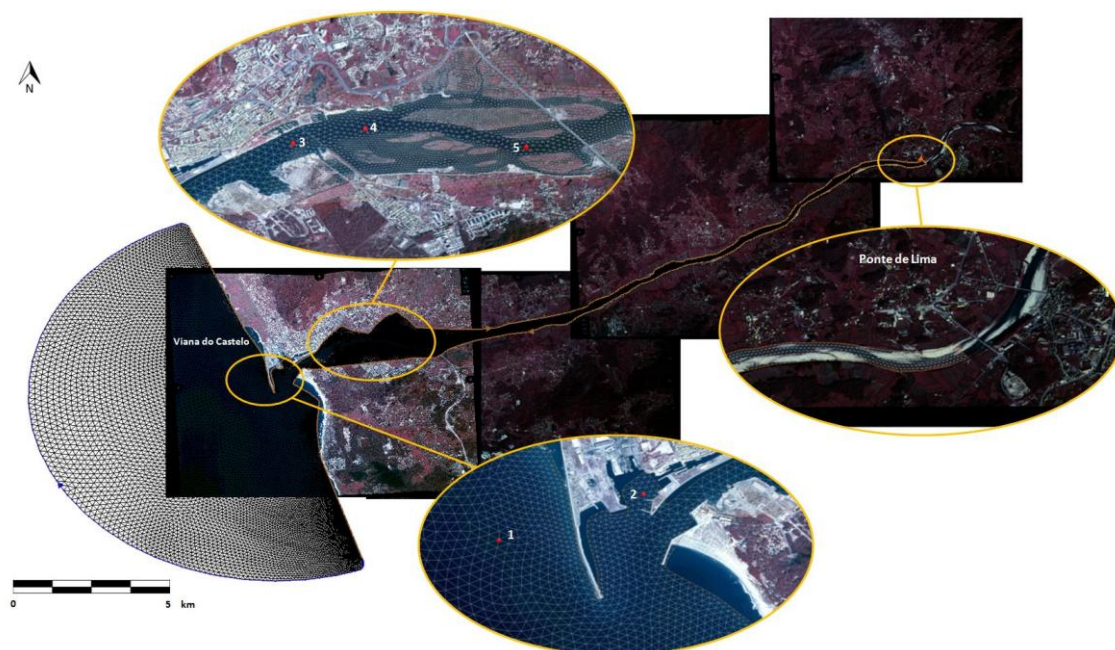


Figura 5 – Modelo - Domínio Estuarino definido até ao limite da propagação da maré considerado para validação e malha considerada (Marujo et al. 2013).

### 3.1.2 Modelo - Domínio Estuarino

O modelo correspondente ao domínio estuarino foi calibrado considerando o forçamento astronómico com os componentes harmónicos provenientes da base de dados de Le Provost. Os resultados obtidos foram comparados com os níveis da maré astronómica obtidos pela análise harmónica dos registos do marégrafo de Viana do Castelo utilizando o software T\_Tide (Pawlowicz, Beardsley, and Lentz 2002) entre 12 e 18 de Outubro de 1987 e com os níveis e dados de corrente medidos pela empresa Hidrodata entre 11 e 13 de Outubro de 2006.

Durante a calibração considerou-se o coeficiente de atrito a variar entre 0.0025 e 0.300, a continuidade de onda a variar entre 0.0010 e 0.1000 e a viscosidade lateral a variar entre 10 e 30. Os valores obtidos para o nível da maré astronómica com qualquer um destes parâmetros são da mesma ordem de grandeza para qualquer uma das combinações consideradas. No entanto, os valores das componentes da velocidade da corrente são claramente distintos (Marujo-Silva 2011; Marujo et al. 2013). Desta forma este foi o objeto de calibração preferido. Os melhores resultados foram obtidos para um coeficiente de atrito de 0.0025, a continuidade de onda igual a 0.0400 e viscosidade lateral igual a 30. As velocidades simuladas são comparadas com as observadas na Figura 6.

Este modelo é particularmente sensível ao coeficiente de atrito pois as reduzidas profundidades implicam velocidades elevadas que são afetadas de forma apreciável por variações no coeficiente de atrito. Neste tipo de modelo valores elevados só são admissíveis e passíveis de recomendação quando a estabilidade do modelo assim o implicar e o objetivo do estudo seja a reprodução somente dos níveis excluindo a reprodução das velocidades.

**Tabela 1 – Parâmetros estatísticos obtidos para o modelo do domínio oceânico e para o modelo do domínio estuarino.**

Parâmetro	Domínio Oceânico			Domínio Estuarino		
	Inicial	Final	Diferença (%)	Inicial	Final	Diferença (%)
Erro médio (cm)	-0.02	0.07	n.a.	-7.61	-6.61	13.2
Erro médio absoluto	2.54	1.71	24.4	9.86	8.24	16.4
Skill	0.9956	0.9981	-0.2	0.9748	0.9841	-1
Desvio máximo (cm)	6.48	4.30	33.7	12.21	9.48	22.4
Desvio mínimo (cm)	-7.47	-4.58	38.7	-35.57	-20.22	43.2
Raiz Erro Quadrático Médio (cm)	3.10	2.22	28.3	12.19	9.67	20.7

n.a. – não aplicável

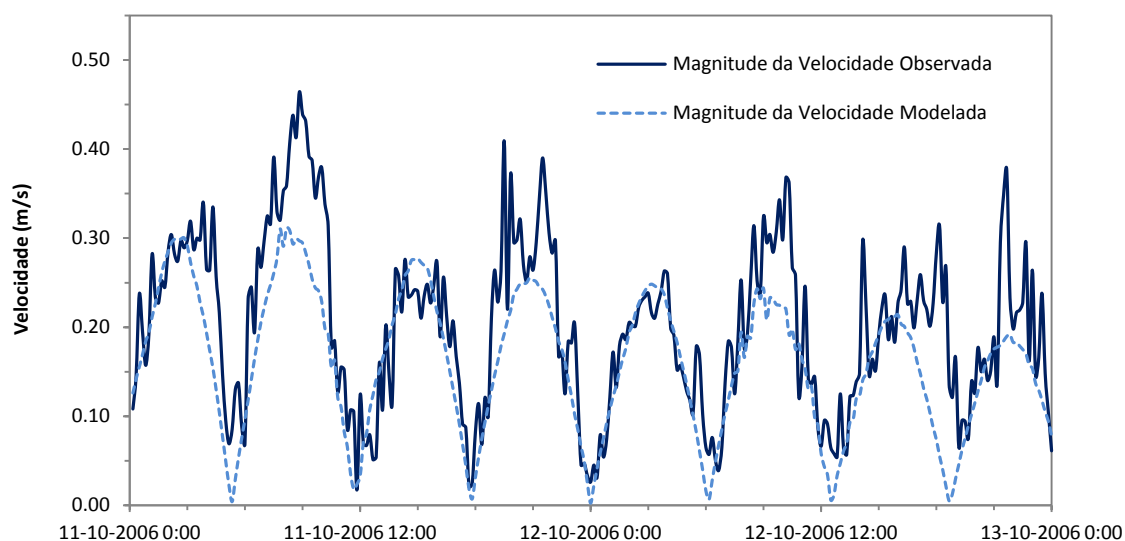
## 3.2 Validação dos modelos

A validação do modelo considerado constitui um passo crítico na adoção da configuração do modelo como instrumento para análise de eventos de cheia no estuário do Lima. Esta validação deve ser feita em relação a dados não utilizados na calibração do modelo de forma a assegurar a independência entre estes. O processo de validação de cada um dos modelos considerados é descrito de forma detalhada nas secções seguintes.

### 3.2.1 Modelo - Domínio Oceânico

O modelo correspondente ao domínio oceânico foi validado da seguinte forma:

- Estudo de convergência do modelo utilizado por refinamento da malha de cálculo utilizada e diminuição do passo de cálculo;
- Comparação das componentes harmónicas obtidas com o modelo versus as componentes harmónicas presentes em tabelas de maré para os portos de Viana do Castelo, Leixões, Aveiro, Figueira da Foz, Peniche, Cascais, Sines e Lagos com a localização representada na Figura 3, incluindo análise de sensibilidade à consideração de um fator de Coriolis variável;
- Comparação do nível do mar registado pelo marégrafo de Viana, nível modelado para o forçamento conjunto componentes harmónicas e forçamento meteorológico (vento e pressão) e nível modelado separando o forçamento astronómico do meteorológico e adicionando-os.



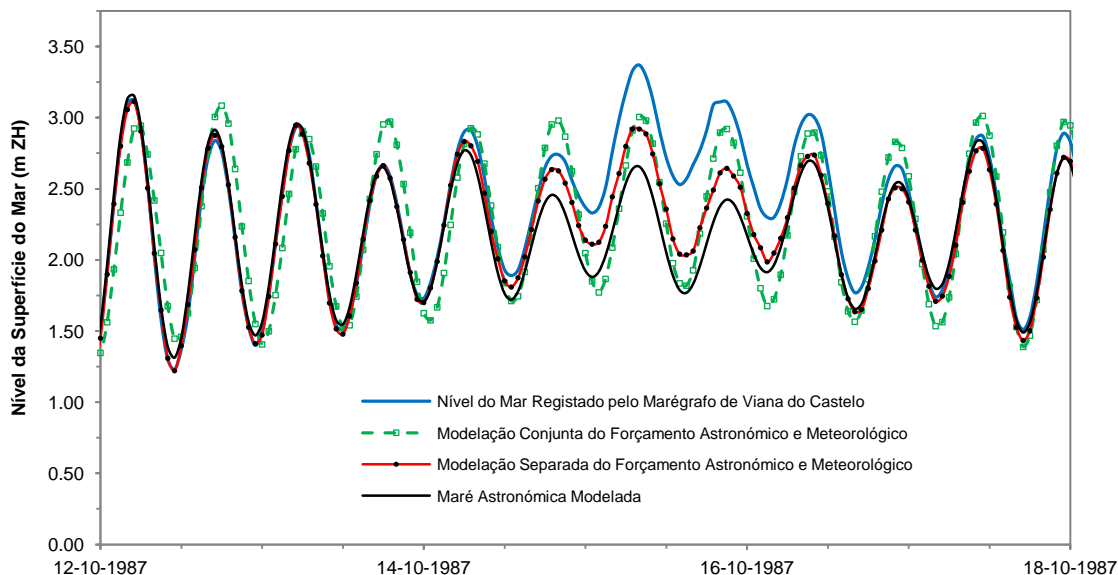
**Figura 6 – Comparação entre a magnitude da velocidade observada e modelada no Ponto 3 representado na Figura 5 - adaptado de (Marujo et al. 2013).**

Para o estudo da convergência da malha considerada e do Modelo – Domínio Oceânico considerou-se um refinamento homogêneo reduzindo para  $\frac{1}{4}$  a dimensão de cada elemento. Esta redução implicou o aumento do número de elementos da malha de 118656 para 474624 e do número de nós de 60766 para 240187. Este aumento aliado a uma redução do passo de cálculo de 30 segundos para 15 segundos para cumprir a condição de CFL implicou o aumento do tempo computacional para mais do quádruplo tendo-se verificado que as diferenças máximas entre as duas malhas de resolução diferente são na ordem de 1 cm, o valor médio é inferior a 1 mm e o desvio padrão é aproximadamente 0.6 cm. Este facto permite afirmar que a malha e passos de cálculo utilizados são equilibrados e os resultados obtidos com a malha de menor resolução não são passíveis de alterações significativas.

No estudo da propagação da maré ao longo da costa considerou-se a análise harmónica das componentes de maré astronómica nos portos identificados na Figura 3. Estas foram obtidas de 4 formas distintas: Tabelas de Maré do Instituto Hidrográfico (IH), análise harmónica dos registos do marégrafo de Viana do Castelo, análise harmónica através de ferramentas do ADCIRC com base em duas simulações do ADCIRC com a duração de 90 dias considerando respetivamente um fator de Coriolis de 0.0001 e variável. Com base nesta análise obtiveram-se variações máximas da ordem dos milímetros nas amplitudes e de até  $5^\circ$  nas fases. Os melhores resultados foram obtidos para um fator de Coriolis variável, em especial, para os locais mais distantes de Viana do Castelo.

Na Figura 7 apresentam-se os resultados obtidos para a modelação do evento de sobrelevação de origem meteorológica que atingiu a costa portuguesa entre 14 e 17 de Outubro de 1987. Analisando os resultados pode-se considerar uma consistência qualitativa entre todos os resultados obtidos devendo-se destacar a sobrestimação dos níveis de preia-mar e subestimação dos níveis de baixa-mar obtidos quando utilizado o forçamento conjunto

astronomia e meteorologia. Estas variações devem-se a interações não lineares entre a astronomia e a meteorologia excessivas no modelo. Verifica-se que aplicando o forçamento astronómico e meteorológico separadamente os níveis são subestimados de forma sistemática.



**Figura 7 – Comparação dos resultados obtidos para os diferentes tipos de forçamento considerados no modelo – domínio oceânico.**

Na aplicação a um caso em que seja necessário dimensionar um sistema de drenagem urbana recomenda-se que se tenham estes factos em atenção. Uma abordagem diferente da considerada durante a realização deste trabalho poderá passar por efetuar a calibração do modelo com base num subconjunto dos eventos extremos que atingiram a costa portuguesa. Neste caso a validação poderia ser face a outros dados não considerados durante a calibração, como por exemplo, medições noutras locais ou face a eventos não considerados durante a calibração.

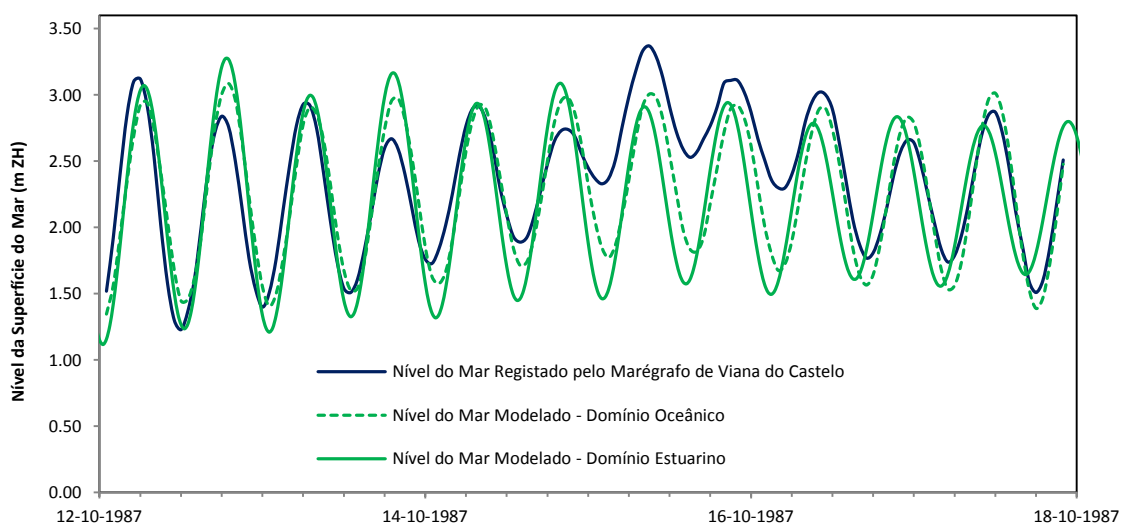
### 3.2.2 Modelo - Domínio Estuarino

O modelo correspondente ao domínio estuarino foi validado da seguinte forma:

- Extensão do período utilizado para calibração (de 11 - 13 de Outubro de 2006 para 4 - 18 de Outubro de 2006 incluindo o período 6 - 14 de Outubro de 2006 em que existem dados recolhidos pela empresa Hidrodata);
- Comparação dos resultados obtidos com os resultantes da análise harmónica dos registos do marégrafo de Viana do Castelo e obtidos para o modelo associado ao domínio oceânico;
- Comparação do nível do mar registado pelo marégrafo de Viana para o forçamento conjunto componentes harmónicas, forçamento meteorológico (vento e pressão) e caudal fluvial.

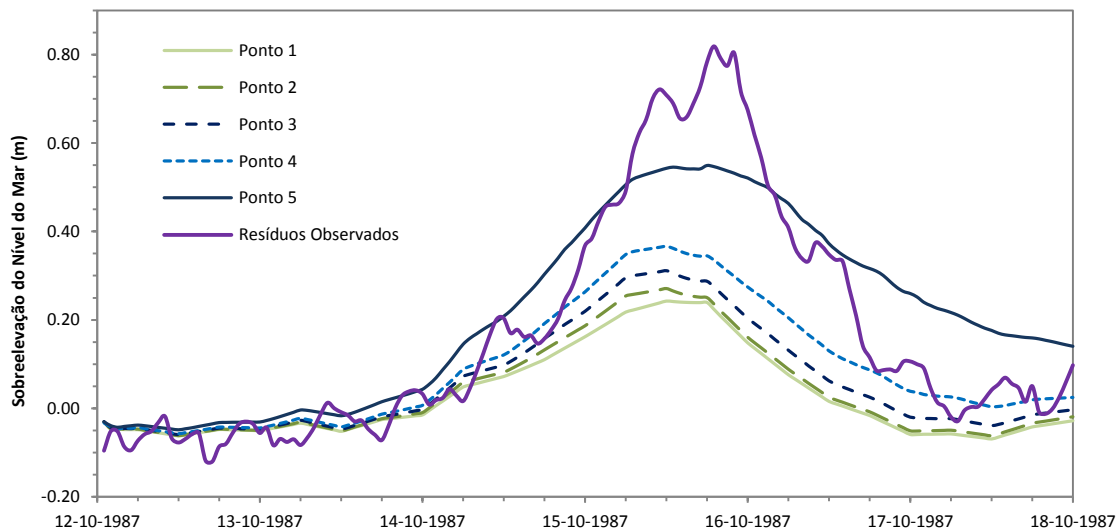
Na validação do Modelo – Domínio Estuarino efetuou-se a análise da qualidade da modelação do nível de maré entre 4 e 18 de Outubro de 2006 para que incluía um ciclo de marés de águas vivas e marés de águas mortas. Verifica-se que o modelo é estável para este período. Considerando a existência de dados medidos pela empresa Hidrodata entre 6 e 14 de Outubro de 2006 efetuou-se a validação por comparação com os níveis registados nessa campanha de medições. Verificou-se que o ajuste era da mesma ordem de grandeza do obtido na calibração.

Também como validação do modelo considerou-se a comparação dos resultados obtidos para este domínio com os obtidos para o domínio oceânico, tendo-se verificado que as diferenças são da mesma ordem de grandeza para o forçamento astronómico. No entanto como se pode verificar na Figura 8 esta afirmação não é válida para a simulação considerando forçamentos conjuntos. Estas diferenças são explicadas considerando as interações não lineares entre o forçamento meteorológico, astronómico e no caso do domínio estuarino também o caudal fluvial.



**Figura 8 – Comparação entre os níveis do mar observados e registados considerando forçamento astronómico e meteorológico (vento + pressão atmosférica) para o Modelo - Domínio Oceânico e forçamento astronómico, meteorológico e caudal fluvial para o Modelo - Domínio Estuarino.**

A comparação dos resíduos modelados ao longo do estuário do rio Lima é apresentada na Figura 9. Estes resíduos foram obtidos com base nas diferenças entre o forçamento astronómico e o forçamento conjunto (astronomia, meteorologia e caudal fluvial) em cada um dos pontos identificados na Figura 5. Verifica-se um aumento gradual das diferenças que pode ser explicada pela combinação de dois fatores: interação entre a propagação da onda de maré composta (astronomia + meteorologia) e o caudal fluvial, e ainda pela perda de carga hidráulica que afeta o caudal fluvial de forma mais significativa que a propagação da onda de maré.



**Figura 9 – Propagação da onda de cheia para montante da embocadura do estuário modelado considerando os 5 pontos representados na Figura 4.**

Na Figura 10 apresentam-se os níveis e as velocidades obtidos para o Modelo - Domínio Estuarino considerando o forçamento astronómico, meteorológico e o caudal fluvial a 17 Outubro 1987 01:00UTM durante a vazante. É visível a diferença entre as velocidades a montante e a jusante do estuário assim como os níveis associados. Este facto é sintomático do elevado coeficiente de atrito considerado de forma à estabilidade da simulação e manutenção da propagação em fase da maré.

## 4 Conclusões

No presente trabalho descrevem-se alguns processos necessários à elaboração de cartas de risco de cheias em áreas estuarinas. Entre os diferentes requisitos focou-se a importância de existência de informação topo-batimétrica coerente e suficiente - essenciais para o estabelecimento de condições fronteira de modelos hidrodinâmicos, a definição de diferentes áreas de análise de acordo com o propósito do estudo, que no presente caso foram o domínio oceânico e estuarino e a validação da configuração do Modelo – malha, parâmetros numéricos configuráveis pelo utilizador e dados de entrada.

Previamente à modelação do fenómeno analisou-se a informação existente. A ausência de informação suficiente pode condicionar a validade dos resultados obtidos. Para o presente estudo considera-se que a informação existente (após levantamento de Setembro de 2010) é suficiente para os propósitos considerados. No entanto, no caso de se pretender analisar a ocorrência de cheias na parte urbana de Viana do Castelo, deverá existir informação histórica dos níveis verificados. Recomenda-se ainda que para estas zonas seja recolhida informação altimétrica de maior resolução que a existente e presente nas cartas militares.



Figura 10 – Níveis e campo de velocidades obtidos para a simulação com forçamento astronómico, meteorológico e caudal fluvial em 17 Outubro 1987 01:00UTM.

Relativamente à calibração do modelo verificou-se que o coeficiente de atrito é o mais importante a par dos dados de entrada/ forçamento do modelo. Este coeficiente pode ser considerado no domínio oceânico, locais em que a profundidade seja elevada ou o fluido possua velocidades reduzidas. No entanto no interior do estuário deverá ser especialmente tido em atenção para que a velocidade nos canais seja mais próxima da realidade assim como o regolfo do rio.

Tendo estes aspetos sido atendidos durante o processo, verificou-se os resultados obtidos se encontram em concordância com os valores medidos. A qualidade dos resultados obtidos é indiscutível para a propagação da maré em ambos os domínios, comprovado pela concordância dos níveis da superfície da água registados em ambos os domínios e em diferentes períodos.

Os níveis obtidos pelo modelo não possibilitaram a reprodução exata dos registados pelo marégrafo de Viana do Castelo. Este facto é explicado além das interações não lineares claras no modelo, pelo facto de os resíduos obtidos por análise da componentes harmónicas não se deverem apenas à sobre-elevação de origem meteorológica e ao caudal fluvial. É provável que escoamentos subterrâneos e superficiais também influenciem os níveis registados numa altura de forte temporal. Um aspeto que também deve ser referido é o número limitado de componentes harmónicas consideradas na propagação da maré. Este número é suficiente para modelar a componente astronómica da maré mas pela interação de outras componentes com o fenómeno da sobre-elevação de origem meteorológica não é possível capturar todos os aspetos em áreas estuarinas. A consideração das tensões de radiação devido à agitação incidente devem ser consideradas quando o objetivo do estudo seja modelar o fenómeno em zonas costeiras e não estuários protegidos na sua entrada por molhes.

Uma metodologia possível para a fase seguinte do processo de modelação de cheias é calibrar o modelo com base num conjunto de  $n$  eventos de cheias/ sobrelevação de origem meteorológica com base nos níveis registados por um marégrafo ao invés de calibrar o modelo para a propagação da maré. Esta abordagem possibilita que os resultados obtidos sejam ainda melhores que os aqui apresentados para este fenómeno.

Como nota final, as considerações tecidas após o presente trabalho podem constituir informação valiosa para utilizadores deste modelo e constituir um ponto de partida para a criação de “surrogate models” para avaliação do risco de cheias face a cenários diversos em tempo útil. Poderá ainda ser estendida a outros estuários e lagoas existentes ao longo da costa Oeste Portuguesa.

## Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer ao Prof. Trigo Teixeira e à Dra. Amélia Araújo pela orientação durante o período de realização do trabalho que deu origem à presente publicação e conhecimento transmitido. Gostaria de agradecer ao Andrea Mazzolari pela ajuda na resolução de algumas das dúvidas e aspetos relacionados com a utilização do modelo ADCIRC.

À Prof<sup>a</sup>. Ana Paula Falcão por toda a informação transmitida relativa a Modelos Digitais do Terreno, aquisição de dados utilizando equipamento GNSS e ainda por ter sido um agente essencial para o sucesso do trabalho de campo em Setembro de 2010. Gostaria ainda de agradecer ao Prof. Alexandre Gonçalves por ter participado no trabalho de campo.

Finalmente um especial agradecimento à Eng.<sup>a</sup> Nádia Braz como representante do LNEC e responsável pelo empréstimo a este trabalho de um recetor GNSS de elevada precisão sem o qual o Modelo Local de Ondulação do Geóide e os dados topo-batimétricos adquiridos não teriam a qualidade obtida.

## Referências

- Araújo, M A V C, A Mazzolari, and António Trigo-Teixeira. 2011. “Wave Set-up in the Modeling of Storm Surge at Viana Do Castelo (Portugal).” *Journal of Coastal Research* SI 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium): 971–975.
- Falcão, Ana Paula Martins Flor. 2010. “A Transformação de Altitudes Geométricas GNSS Em Altitudes Gravíticas No Contexto Dos Trabalhos Topográficos”. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa.
- Falcão, Ana Paula Martins Flor, Alexandre Bacelar Gonçalves, Nuno Ricardo Costa Marujo-Silva, Nádia Micaela Saraiva Braz, João Nuno Lima, Maria Amélia Vieira da Costa Araújo, and António Alexandre Trigo Teixeira. 2011. “A Construção de Um Modelo Altimétrico Para a Avaliação Da Frequência de Inundação Estuarina: Exemplo Do Rio Lima.” In *VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia (2011)*.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, and L. Gandin. 1996. “The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project.” *Bulletin of the American Meteorological Society* 77 (3): 437–471.
- Le Provost, C., M. L. Genco, F. Lyard, P. Vincent, and P. Canceil. 1994. “Spectroscopy of the World Ocean Tides from a Finite Element Hydrodynamic Model.” *Journal of Geophysical Research* 99 (C12): 24777–24797. doi:10.1029/94JC01381. <http://doi.wiley.com/10.1029/94JC01381>.

- Luettich, R.A., J.J. Westerink, and N.W. Schefmer 1992. "ADCIRC: An advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries. Report 1: Theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL". Technical Report DRP-92-6, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Luettich, Rick, and Joannes J. Westerink. 2004. "Formulation and Numerical Implementation of the 2D / 3D ADCIRC Finite Element Model Version 44 . XX."
- Marujo, Nuno Ricardo Costa Silva, Maria Amélia Vieira Costa Araújo, António Trigo-Teixeira, Ana P. Falcão, and Andrea Mazzolari. 2013. "Storm-Surge Hindcast at Viana Do Castelo : an Oceanic and Estuarine Domain Approach." *Journal of Coastal Research* In press. doi:10.2112/JCOASTRES-D-12-00200.1.
- Marujo-Silva, Nuno Ricardo Costa. 2011. "Storm Surge Hydrodynamic Modelling". Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa. <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/1066510/1/dissertacao.pdf>.
- Pawlowicz, Rich, Bob Beardsley, and Steve Lentz. 2002. "Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB Using T\_TIDE." *Computers & Geosciences* 28 (8) (October): 929–937. doi:10.1016/S0098-3004(02)00013-4. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098300402000134>.
- Reid, R. O. 1990. "Tides and Storm Surges." In *Handbook of Coastal and Ocean Engineering, Volume 1 - Wave Phenomena and Coastal Structures*, edited by J. B. Herbich, 533–590. Houston, Texas: Gulf Publishing Company.
- Smith, Walter H. F., and David T. Sandwell. 1997. "Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings." *Science* 277 (5334): 1957–1962. <http://topex.ucsd.edu/sandwell/publications/74.pdf>.