

# SIMULAÇÃO PRELIMINAR DA HIDRODINÂMICA E MORFODINÂMICA DO ESTUÁRIO DO RIO MINHO

## Hydrodynamic and Morphodynamic Preliminary Simulation of River Minho Estuary

ANTÓNIO DELGADO <sup>(1)</sup>, FRANCISCO TAVEIRA-PINTO <sup>(2)</sup> e RAQUEL SILVA <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Mestre em Engenharia Civil, FEUP  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200 - 465 Porto, Portugal, ec05040@fe.up.pt

<sup>(2)</sup> Professor Catedrático, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, fpinto@fe.up.pt

<sup>(3)</sup> Doutora, FEUP  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, rfsilva@fe.up.pt

### Resumo

Para uma possível minimização dos efeitos negativos, associados às operações de manutenção de canais de navegação em estuários, é necessário elaborar estudos de caracterização da dinâmica sedimentar e avaliar os potenciais impactos de determinados cenários. No estuário do rio Minho a deposição de sedimentos é elevada e as velocidades das correntes são baixas, dando origem a bancos de areia e ilhas. A simulação numérica, quando associada à adequada caracterização das linhas de água, do material de fundo e da carga sólida transportada por arrastamento e em suspensão pode auxiliar na realização destes estudos. Neste contexto, foi aplicado o modelo numérico TELEMAC (desenvolvido pelo Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement d'Électricité de France) no estuário do rio Minho. Os resultados das simulações, após calibração e validação, permitiram confirmar e complementar a informação previamente recolhida da caracterização hidro e morfodinâmica do estuário do rio Minho.

**Palavras-chave:** Canal de navegação, cenários, modelação numérica, TELEMAC.

### Abstract

The minimization of negative effects associated with the maintenance of navigation channels in estuaries, passes through the development of characterization studies of sediment dynamics and the evaluation of potential impacts of certain scenarios. In the Minho river estuary, sediment deposition is high and the currents are slow, giving rise to sand banks and islands. The numerical simulation, when combined with proper characterization of the water lines, bottom material, cargo transported by entrainment and suspension, may assist in these studies. In this context, the numerical system TELEMAC (developed by the Laboratoire National d'Environnement Hydraulique et d'Electricité de France) was applied to the river Minho estuary. The simulations results, after validation and validation, allowed to check and complete the information previously collected of hydro and morphodynamic characterization of the river Minho estuary.

**Keywords:** Channel navigation, scenarios, numerical modeling, TELEMAC.

### 1. Introdução

Os estuários, para além do interesse científico, têm uma importância histórica fundamental para o desenvolvimento da humanidade. Cerca de 60% das grandes cidades estão localizadas nas proximidades dos estuários, sendo, em proporção às suas dimensões, das mais valiosas regiões do nosso planeta (Miranda *et al.*, 2002).

Estes ambientes costeiros podem ser caracterizados pela sua morfologia e pelo padrão de estratificação. Vários fatores físicos, tais como, o caudal fluvial, as correntes e as alturas de maré, a composição dos sedimentos, a agitação marítima e o vento, contribuem para a complexidade destes ambientes, revelando a diversidade de fenómenos inerentes ao seu estudo.

Tendo em conta o aperfeiçoamento constante do hardware e de algoritmos, as simulações numéricas constituem, cada vez mais, uma ferramenta importante. Esta área, habitualmente designada de "Hidroinformática", com acentuado desenvolvimento nos últimos anos, simula os processos físicos que ocorrem em zonas costeiras e em estuários.

As simulações numéricas consistem no acoplamento de uma série de módulos, que representam fenómenos tais como propagação de ondas e correntes, transporte de sedimentos e desenvolvimento da morfologia do leito. Estes módulos, associados entre si, descrevem um grande número de processos e mecanismos que interagem num determinado espaço e ao longo do tempo.

Na atualidade, são poucos os projetos que podem ser executados sem o suporte destas tecnologias.

Com apenas um quarto do seu curso em Portugal, onde dá o nome à região do extremo litoral norte do país, o rio Minho separa Portugal e Espanha ao longo de 70 km, acabando por desaguar no oceano Atlântico em frente a Caminha e La Guardia. Embora seja um estuário não muito investigado, verifica-se um crescente interesse em relação à mitigação dos impactos causados pela acção antropogénica. Neste contexto, foi aplicado um modelo numérico de forma a avaliar as características hidrodinâmicas e sedimentares do estuário do rio Minho (Delgado, 2011).

## 2. O Estuário do Rio Minho

Embora o estuário do rio Minho (Figura 1) seja relativamente pouco estudado, a existência de alguma informação de base permite tirar conclusões consideravelmente úteis.

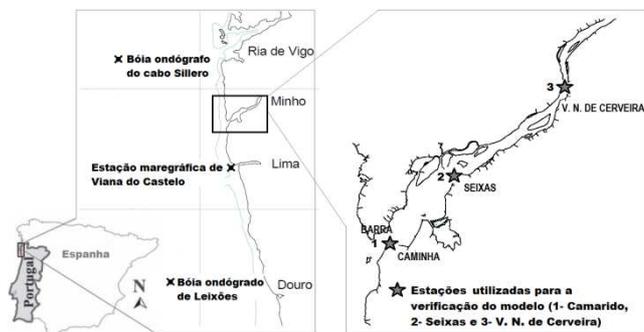


Figura 1. Zona de estudo (localização das bóias ondógrafo do cabo Sillero e de Leixões e das estações maregráficas de Viana do Castelo, Camarido, Seixas e V. N. de Cerveira).

Reis (2008) analisou a propagação da onda de maré, comparando as medições efectuadas na estação de observação em mar aberto de Viana do Castelo, com as efectuadas no interior do estuário. Verificou, como seria de esperar, que a maré apresenta uma maior amplitude em Viana do Castelo. À medida que se caminha para o interior do estuário a amplitude de maré vai diminuindo, de forma marcada desde a Barra até Vila Nova de Cerveira, porém de forma menos notória para montante desta localidade. O autor observou que a semi-amplitude correspondente à baixa-mar não se desenvolve completamente, principalmente para montante de Vila Nova de Cerveira. Na origem desta irregularidade da curva de maré podem estar os constrangimentos batimétricos existentes entre Vila Nova de Cerveira e a embocadura, que poderão fazer com que o escoamento seja lento em período de vazante, não permitindo que esta se realize completamente até à baixa-mar. Deste modo, as alturas de maré terão necessariamente que subir, em direcção a montante. Concluiu também que, igualmente relacionada com constrangimentos batimétricos e com o aumento da não-linearidade originado pela dissipação de energia devida ao atrito, está a distorção da maré entre a costa e o interior do estuário, verificando-se uma assimetria na curva de maré que se traduz numa diminuição do período de enchente e num aumento do período de vazante, relativamente a uma maré puramente sinusoidal.

As correntes de maré são as típicas de uma maré semi-diurna, em que a velocidade de vazante é superior à de enchente, a corrente é mais forte na embocadura do que no interior do estuário, bem como em períodos de marés vivas, comparativamente a períodos de marés mortas (LNEC, 2007).

A distribuição da salinidade apresenta uma variação semi-diurna em concordância com a variação da maré. De forma geral, a intrusão salina é menor em épocas de maior caudal fluvial e em período de marés mortas e é maior para caudais menores e em período de marés vivas (Zacarias, 2007).

Em termos de caudais médios anuais, verifica-se que os valores registados na estação hidrométrica da Foz do Mouro, para o período compreendido entre 1973/74 e 1996/97, variam entre 127,2 m<sup>3</sup>/s e 501,2 m<sup>3</sup>/s com um valor médio de 304,9 m<sup>3</sup>/s (Instituto da Água, 2000).

Próximo da zona em estudo, a sul, encontra-se a bóia ondógrafo de Leixões (operada pelo Instituto Hidrográfico) e do lado espanhol, a norte, próximo do cabo Sillero uma outra estação de observação (operada pelos Puertos del Estado). Os registos efetuados por ambas as estações apresentam a mesma tendência para o regime de agitação marítima, com uma direção predominante dos octantes WNW a NNW.

Nas zonas mais a jusante do estuário os parâmetros hidrológicos são dominados pela maré, enquanto nas zonas mais a montante são dominados pelo caudal fluvial. Nas zonas intermédias, estes parâmetros são dominados pela maré para caudais baixos. Já quando o caudal é elevado e as marés têm amplitudes pequenas, a força dominante é o caudal fluvial (Zacarias, 2007).

Em relação à dinâmica sedimentar) o estuário do rio Minho encontra-se num estado de preenchimento sedimentar relativamente avançado, traduzido pela elevada percentagem (cerca de 70%) da área situada acima do Zero Hidrográfico (ZH), desde a embocadura até Vila Nova de Cerveira, Portela (2011). Esta situação reflete um processo de assoreamento, determinado pela relativa estabilidade do nível médio da água do mar e pela deposição de materiais de origem fluvial nos últimos milhares de anos. Aliás, a zona entre Caminha e a embocadura está sujeita a um processo contínuo de evolução morfológica, eventualmente cíclica, ao longo de várias décadas.

Desde 1950 têm sido efectuadas diversas intervenções na bacia hidrográfica (construção de barragens, alterações na ocupação do solo) e no estuário (extração de inertes e dragagem de canais de navegação), com possíveis implicações na evolução morfológica do estuário e da zona costeira adjacente.

A bacia hidrográfica do rio Minho tem uma grande densidade de aproveitamentos hidroelétricos na parte espanhola, fazendo desta região, nos dias de hoje, uma das principais regiões produtoras de energia eléctrica em Espanha. Os 34 aproveitamentos hidroelétricos com capacidade de armazenamento superior a 1×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (LNEC, 2007), construídos entre 1950 e 1978, contribuíram significativamente para isso.

Admite-se que estes aproveitamentos possam ter causado uma diminuição dos picos de cheias e uma redução do fornecimento sedimentar na costa (fator de erosão).

### 3. Preparação do Modelo Numérico

#### 3.1. Modelo numérico TELEMAC

Entre os atuais sistemas de modelação numérica, o TELEMAC é uma ferramenta que inclui módulos para a modelação da hidrodinâmica da superfície livre, sedimentologia, qualidade da água, ondas e fluxo de águas subterrâneas. Foi inicialmente desenvolvido em França, pelo Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE), um departamento de pesquisa da companhia Electricité de France (EDF). Esta ferramenta é suportada por um documento de validação (Hervouet, 2000). A maioria dos grandes rios e estuários da Europa está a ser estudada com este modelo (Loire, Gironde, Tamisa, Severn e Elba, entre outros). O modelo é usado por mais de 170 organizações em todo o mundo.

Este modelo resolve as equações do escoamento a duas dimensões, através de poderosos algoritmos baseados em elementos finitos ou métodos de volumes finitos, sobre grelhas não-estruturadas completamente flexíveis de elementos triangulares. Pode concentrar um maior número de elementos nas regiões de grande interesse, possibilitando assim a discriminação adequada de geometrias complexas (aterros, leito de rios sinuosos, ilhas, estruturas, estradas, ruas, afluentes secundários, etc), e, por outro lado, diminuir a resolução nas regiões onde a morfologia é mais homogênea, permitindo a redução do tempo computacional. O vértice de cada triângulo é um local de cálculo caracterizado pelas referências planimétricas (X, Y) e altimétrica (Z), onde atua a gravidade, e por um coeficiente de rugosidade, que representa o estado local da superfície do terreno.

O TELEMAC-2D (módulo utilizado para as simulações hidrodinâmicas, EDF, 2010) resolve as equações de Saint-Venant, baseado na equação da continuidade e nas duas equações de conservação da quantidade de movimento, ambas integradas na vertical e derivadas da equação de Navier-Stokes. As variáveis de saída do modelo em cada nó são as componentes em x (u) e y (v) da velocidade e a profundidade da água em z. As velocidades verticais são consideradas desprezáveis e a superfície e o fundo são considerados impermeáveis. O atrito no fundo é parametrizado através da seleção de uma das leis habitualmente disponíveis, e o coeficiente de atrito é posteriormente prescrito pelo utilizador, sendo considerado constante no espaço e no tempo. As condições de fronteira em contornos fechados são de fluxo de água nulo através do fundo e de faces laterais e de livre deslizamento nas margens para todos os vetores tangentes a estas. O SISYPHE (módulo utilizado para as simulações morfodinâmicas, EDF, 2010b) apresenta diversos métodos para o cálculo do transporte de sedimentos.

Na Figura 2 apresenta-se a estrutura de implementação do sistema TELEMAC na sua aplicação ao estuário do rio Minho.

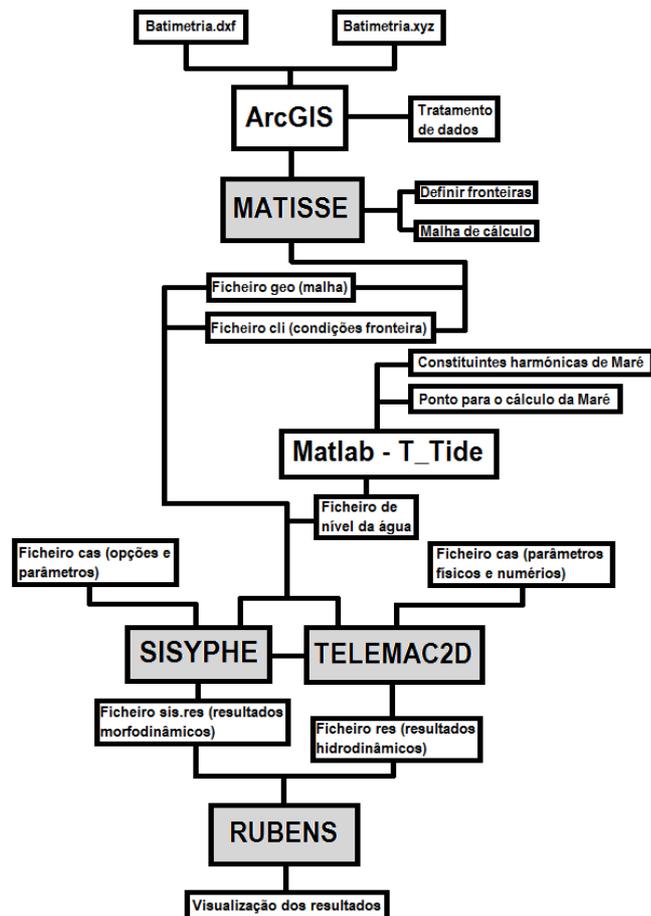


Figura 2. Estrutura de implementação do sistema TELEMAC na sua aplicação ao estuário do rio Minho (a cinzento encontram-se identificados os módulos do sistema utilizados).

A aplicação do sistema inicia-se com a geração da malha computacional não-estruturada e a definição das condições de fronteira a partir do módulo MATISSE (EDF, 2004) do sistema TELEMAC. Este módulo, a partir de ficheiros que contêm a informação topo-hidrográfica da área de estudo (.xyz) e eventuais isolinhas (.dxf), resultantes do tratamento da informação topo-hidrográfica de base utilizando o ArcGIS, permite a geração dos ficheiros que contêm a malha computacional não-estruturada (.geo) e os contornos sobre os quais estão definidas as condições de fronteira (.cli).

Para as fronteiras em que seria considerada a variação da elevação da superfície livre devida à maré foi necessária a utilização de uma série de rotinas de utilização livre, desenvolvidas em Matlab (T\_Tide, Pawlowicz *et al.*, 2002).

Esta ferramenta permitiu a obtenção de séries temporais de alturas de maré a partir de informação de base das constantes harmônicas conhecidas para a área de estudo. Uma parte importante do processo de aplicação do sistema consistiu na definição dos parâmetros físicos e numéricos, através do ficheiro (.cas).

É a partir da informação de entrada contida nos ficheiros referidos que o módulo TELEMAC-2D é executado, fornecendo os resultados das simulações hidrodinâmicas no ficheiro (.res) produzido.

As simulações morfodinâmicas são executadas paralelamente e trocando informação com o módulo TELEMAC-2D, pelo módulo SISYPHE. A execução deste último módulo é baseada na informação de entrada contida no ficheiro (sis\_cas), produzindo um ficheiro de resultados (sis.res). Para a visualização, análise e interpretação dos resultados das simulações utiliza-se o módulo RUBENS (EDF, sem data) do sistema TELEMAC.

### 3.2. Geração da malha computacional e definição das condições de fronteira

A informação topo-hidrográfica de base utilizada para a geração da malha computacional foi um levantamento topo-hidrográfico realizado pelo Instituto Hidrográfico, referente ao ano de 2006, facultado pelo INAG (Instituto da Água). Apesar de já ter 5 anos, este é o mais recente levantamento efetuado no estuário do rio Minho. Portanto, devido à contínua evolução morfológica, principalmente neste sector do estuário, a simulação pode não reflectir o seu verdadeiro comportamento actual.

O levantamento não abrange a totalidade do estuário, representando a topo-hidrografia entre a embocadura e uma secção a montante de Vila Nova de Cerveira, com cerca de 16 km de extensão e um intervalo entre fiadas de 25 m. Através do ArcGIS e utilizando uma técnica de interpolação, foi gerado um modelo digital do terreno regular com uma resolução espacial de 25 m.

Através do módulo MATISSE do sistema TELEMAC foi gerada a malha computacional não-estruturada, com 61391 elementos e 31855 nós.

Na Figura 3 apresenta-se a informação topo-hidrográfica contida na malha computacional, bem como um pormenor dos seus elementos constituintes.

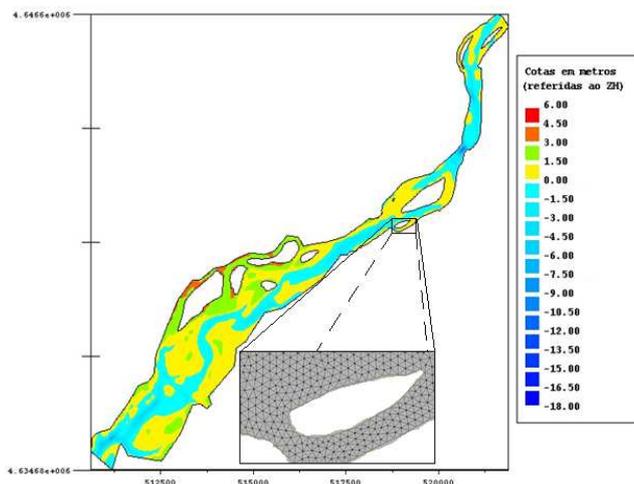


Figura 3. Representação da informação topo-hidrográfica contida na malha computacional não-estruturada e pormenor da sua estrutura.

O módulo MATISSE foi também utilizado para a definição das condições de fronteira sobre a malha computacional. Consideraram-se, obviamente, duas fronteiras abertas: a fronteira fluvial, a montante, onde se faz escoar o caudal fluvial e a fronteira oceânica a jusante, a qual é influenciada pela variação do nível de água devido à maré.

Por sua vez, as 10 ilhas e as margens do rio foram definidas como fechadas, isto é, não existe fluxo através destas fronteiras, apenas deslizamento ao longo delas.

### 3.3. Condições de simulação

A inicialização das simulações ocorreu até se atingir um estado de equilíbrio no domínio computacional. Nesta simulação inicial, as condições de fronteira baseavam-se num caudal constante na fronteira fluvial, a montante, e uma fronteira estática, a jusante.

Após ser atingido o equilíbrio, as condições de fronteira a jusante eram alteradas, introduzindo-se uma alteração da elevação da superfície livre, dada por uma série temporal de variação do nível do mar.

Esta série temporal foi definida através de três constituintes de maré semi-diurnas (M2, S2 e K2) e de duas constituintes diurnas (K1 e O1), obtidas com base na análise harmónica do marégrafo de Viana do Castelo (Zacarias, 2007).

A reconstituição do nível de maré para o período de interesse foi efectuada utilizando a ferramenta T\_Tide (Pawlowicz *et al.*, 2002).

A escolha dos caudais impostos na fronteira fluvial baseou-se nos dados apresentados por Zacarias (2007). De forma a representar condições típicas do estuário do rio Minho, foram seleccionados os caudais:

- Caudal de Verão (92 m<sup>3</sup>/s em Setembro/Outubro de 2005);
- Caudal de Inverno (583 m<sup>3</sup>/s em Fevereiro/Março de 2006);
- Caudal de Estiagem (60 m<sup>3</sup>/s em Setembro/Outubro de 2005);
- Caudal de Cheia (2500 m<sup>3</sup>/s em Janeiro de 2007).

Para cada um dos caudais seleccionados foram efectuadas duas simulações, uma em período de marés vivas e outra em período de marés mortas.

O tempo de simulação foi de aproximadamente 30 horas com um passo de tempo computacional de 12 s, o qual foi calculado com base no número de Courant.

Os parâmetros físicos e numéricos foram definidos conforme recomendado no manual de utilizador (EDF, 2010). No processo de calibração do modelo, o coeficiente de atrito no fundo (introduzido pela rugosidade de Manning), foi admitido igual a 0.045 m<sup>-1/3</sup>s para as simulações em período de maré viva e 0.070 m<sup>-1/3</sup>s para as simulações em período de maré morta, considerando-se constante ao longo do estuário.

Nas simulações morfodinâmicas foi utilizado o método de Engelund-Hansen alterado por Cholley e Cunge (EDF, 2010) o qual envolve a especificação do diâmetro característico dos sedimentos, d<sub>50</sub>, tendo sido adotado o valor de 0,5 mm. Optou-se por este método porque calcula o transporte de sedimentos por arrastamento e em suspensão, simultaneamente.

As variáveis de saída são as componentes em x (u) e y (v) do transporte de sedimentos.

### 3.4. Validação da aplicação do TELEMAC-2D ao estuário do rio Minho

A validação da aplicação do TELEMAC-2D ao estuário do rio Minho foi efetuada através da comparação dos valores do nível de água simulados, com os valores registados numa campanha de medição realizada em 1990 (Consulmar, 1990) e com os valores apresentados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, como resultantes da aplicação do modelo MOHID (LNEC, 2007b).

As comparações foram efetuadas em três posições no estuário, que correspondem à localização das três estações maregráficas (Camarido, Seixas e Vila Nova de Cerveira, Figura 1) onde foram efetuadas observações, e compreendem dois períodos de 13 horas, um em situação de maré viva (20 de Setembro de 1990) e outro em situação de maré morta (27 de Setembro de 1990).

Na Figura 4 representam-se os níveis de água em situação de maré viva. De uma forma geral, observa-se uma boa concordância entre os valores, podendo considerar-se que a aplicação do modelo ao estuário do rio Minho é satisfatória. No entanto, uma melhor validação requereria o acesso a dados de observações mais rigorosos e para períodos de tempo mais alargados. Para as simulações de transporte de sedimentos não-coesivos, não foi possível obter dados relativos a observações de transporte de sedimentos no estuário do rio Minho. Por isso, não foi possível efetuar a calibração e validação do módulo morfodinâmico.

### 4. Resultados das Simulações

São apresentados os resultados das simulações do caudal de verão ( $92 \text{ m}^3/\text{s}$ ), em situação de maré viva e em situação de maré morta e do caudal de cheia ( $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ ), apenas em situação de maré viva.

Para cada uma das simulações é apresentada a variação da maré imposta na fronteira marítima e em três pontos no interior do estuário (Camarido, Seixas e Vila Nova de Cerveira, Figura 3).

É também apresentada a elevação da superfície livre, a velocidade do escoamento e a capacidade de transporte, em dois instantes de simulação, um durante a enchente e outro durante a vazante.

Para as zonas do estuário em que se verifica uma maior intensidade da capacidade de transporte apresenta-se uma segunda figura mais detalhada.

Da Figura 5 à Figura 9 apresentam-se os resultados obtidos para o caudal de verão em situação de maré viva (Setembro de 2005).

Da Figura 10 à Figura 14 apresentam-se os resultados obtidos para o caudal de verão ( $92 \text{ m}^3/\text{s}$ ) em situação de maré morta (Setembro de 2005).

Da Figura 15 à Figura 19 apresentam-se os resultados obtidos para o caudal de cheia ( $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ ) em situação de maré viva (Setembro de 2005).

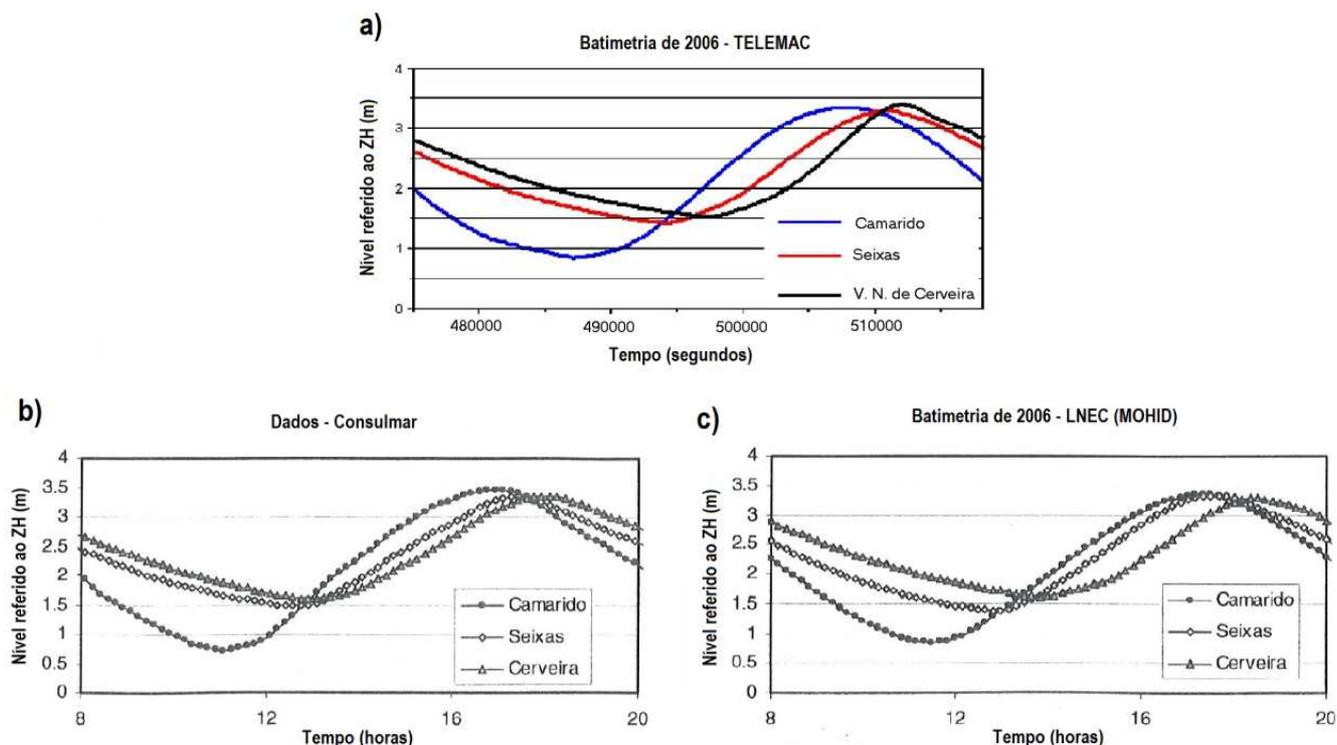


Figura 4. Comparação dos valores do nível da água em situação de maré viva (20 de Setembro de 1990): a) simulados pelo TELEMAC; b) observados nas estações maregráficas respetivas (Consulmar, 1990); c) simulados pelo MOHID (LNEC, 2007b).

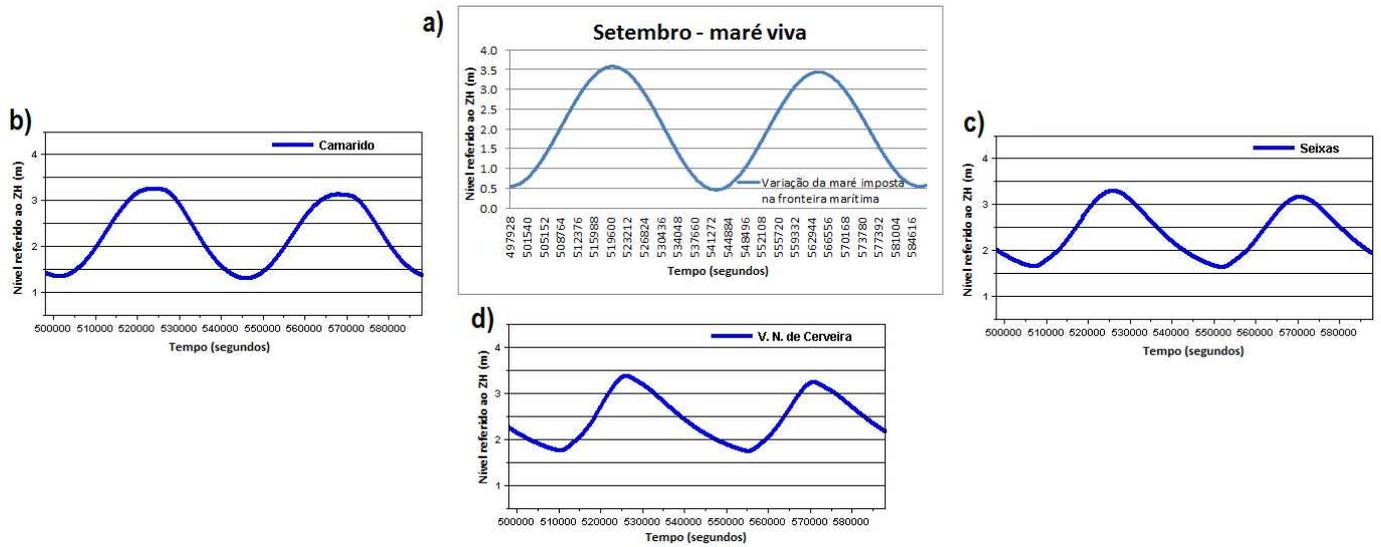


Figura 5. Nível de água: a) imposto na fronteira marítima; simulado em: b) Camarido, c) Seixas, d) Vila Nova de Cerveira (Setembro de 2005 em maré viva,  $Q = 92 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

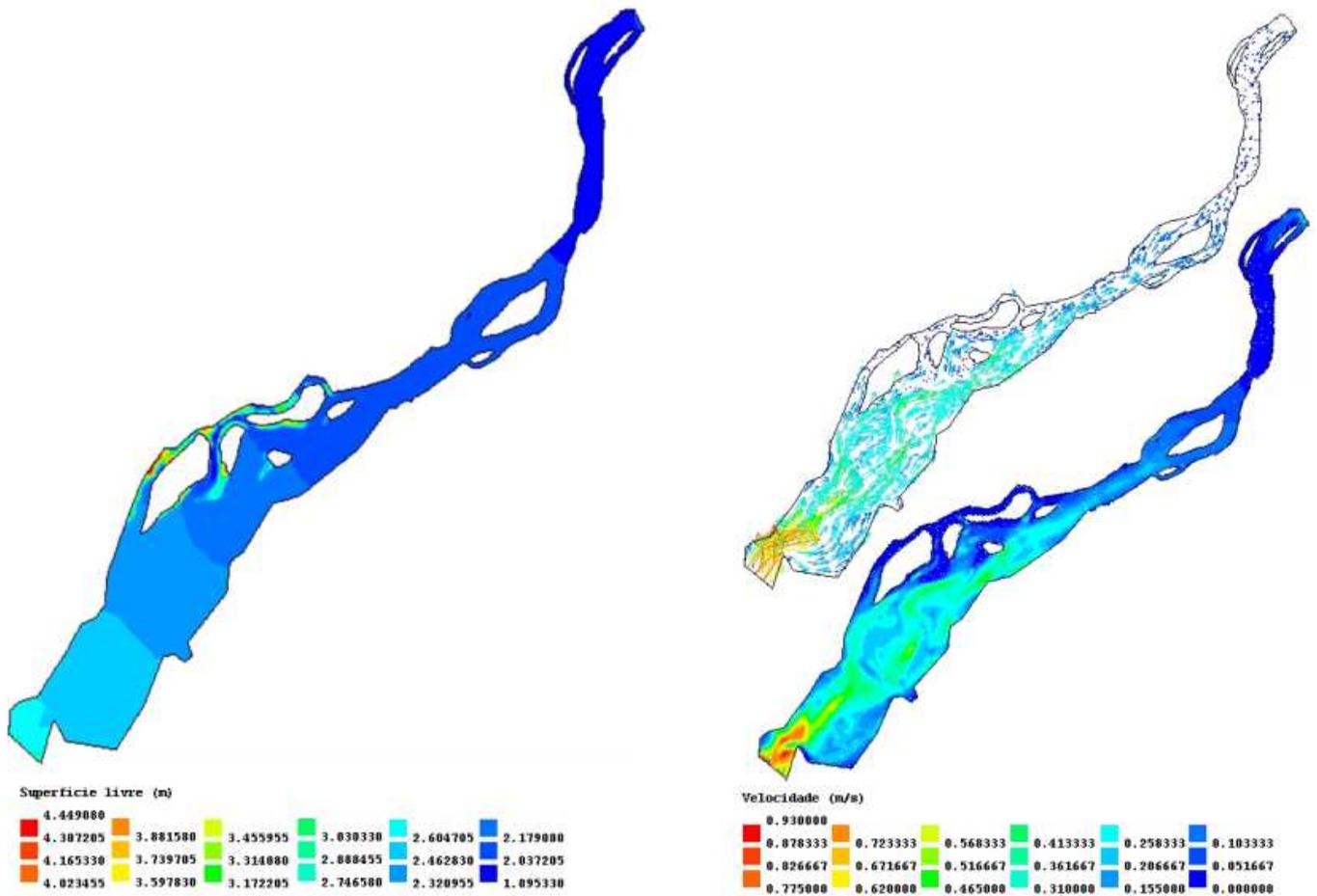


Figura 6. Superfície livre (esquerda) e campo de velocidades (direita) na enchente (Setembro de 2005 em maré viva,  $Q = 92 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

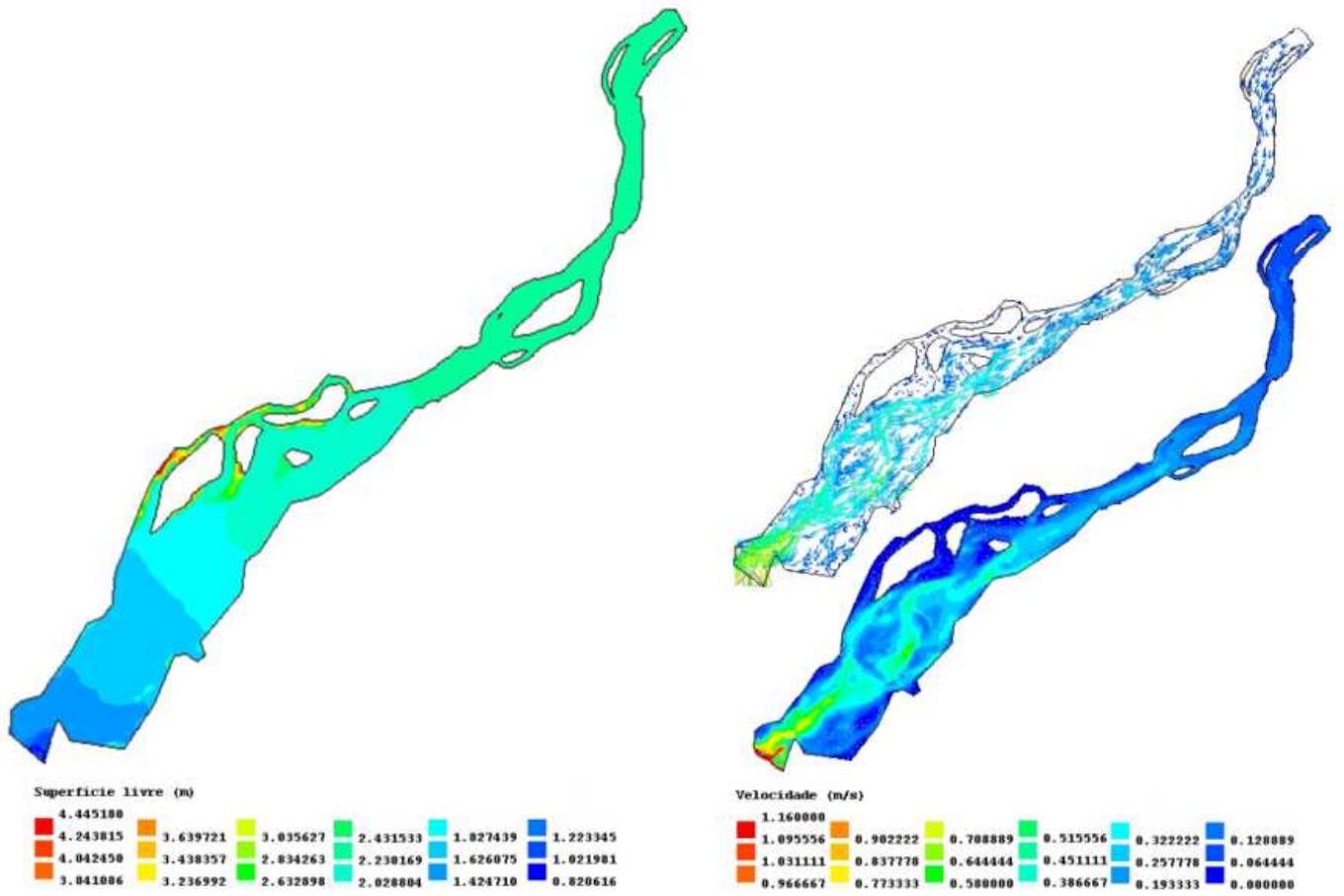


Figura 7. Superfície livre (esquerda) e campo de velocidades (direita) na vazante (Setembro de 2005 em maré viva,  $Q = 92 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

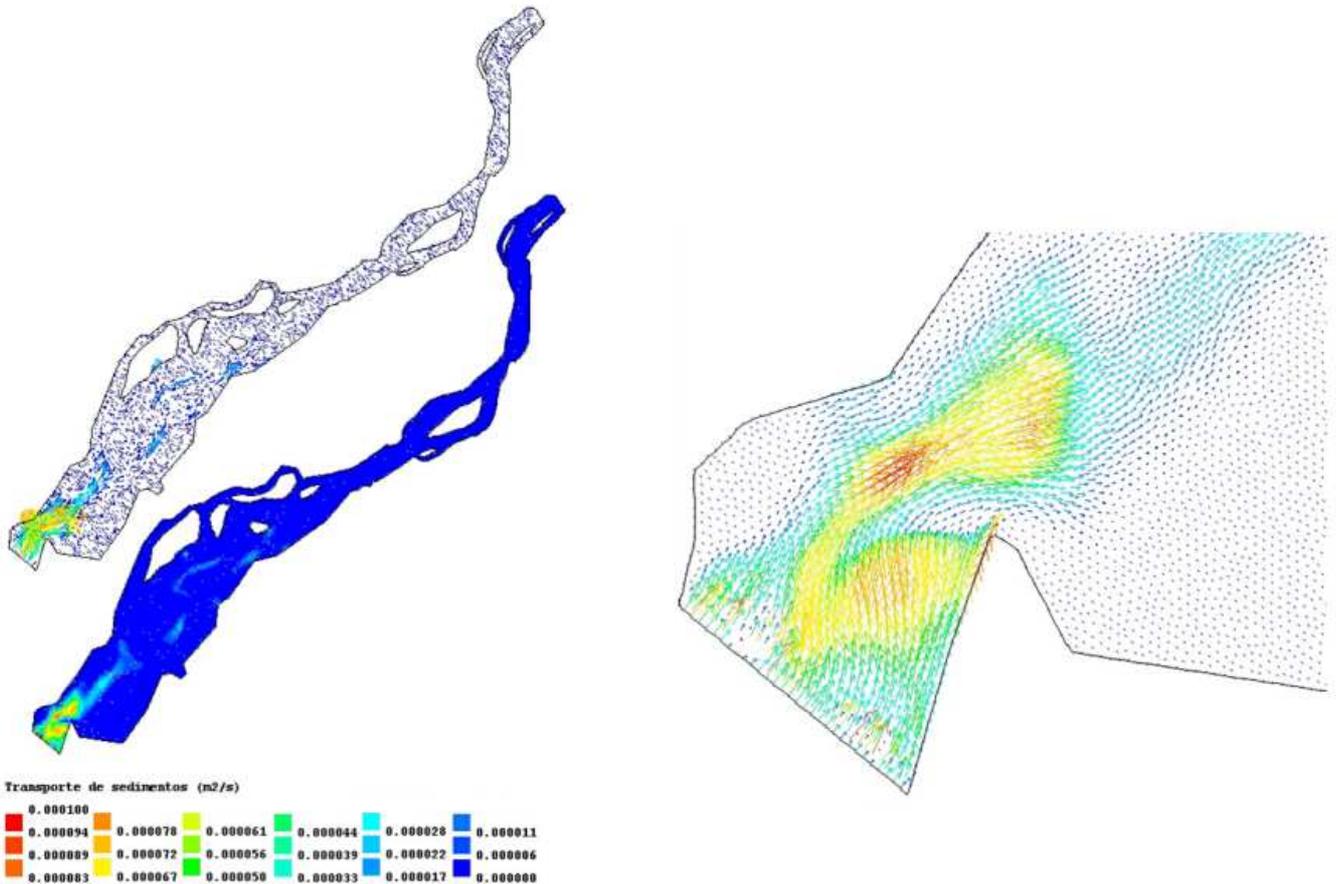


Figura 8. Transporte de sedimentos na enchente (esquerda), pormenor (direita) (Setembro de 2005 em maré viva,  $Q = 92 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

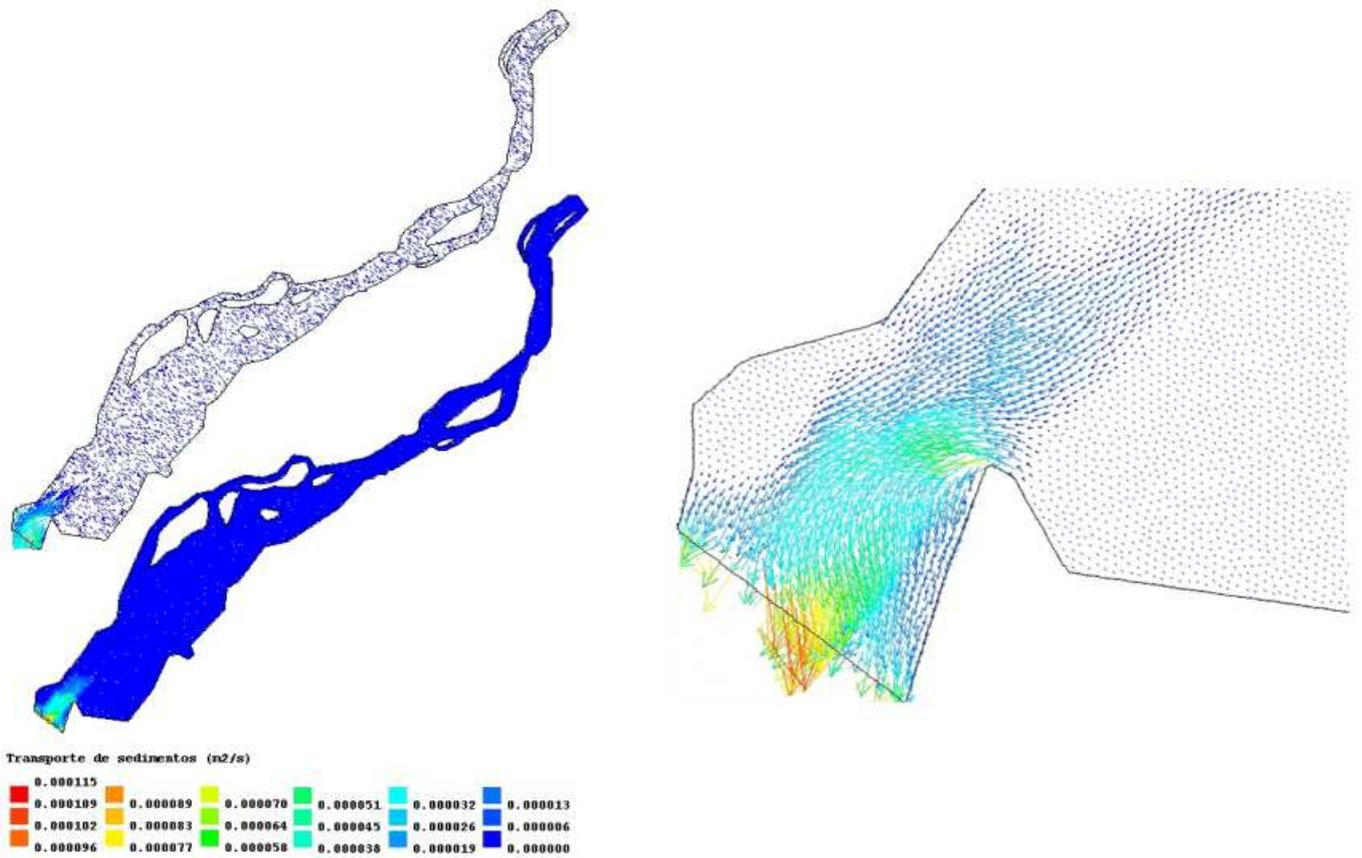


Figura 9. Transporte de sedimentos na vazante (esquerda), pormenor (direita) (Setembro de 2005 em maré viva,  $Q = 92 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

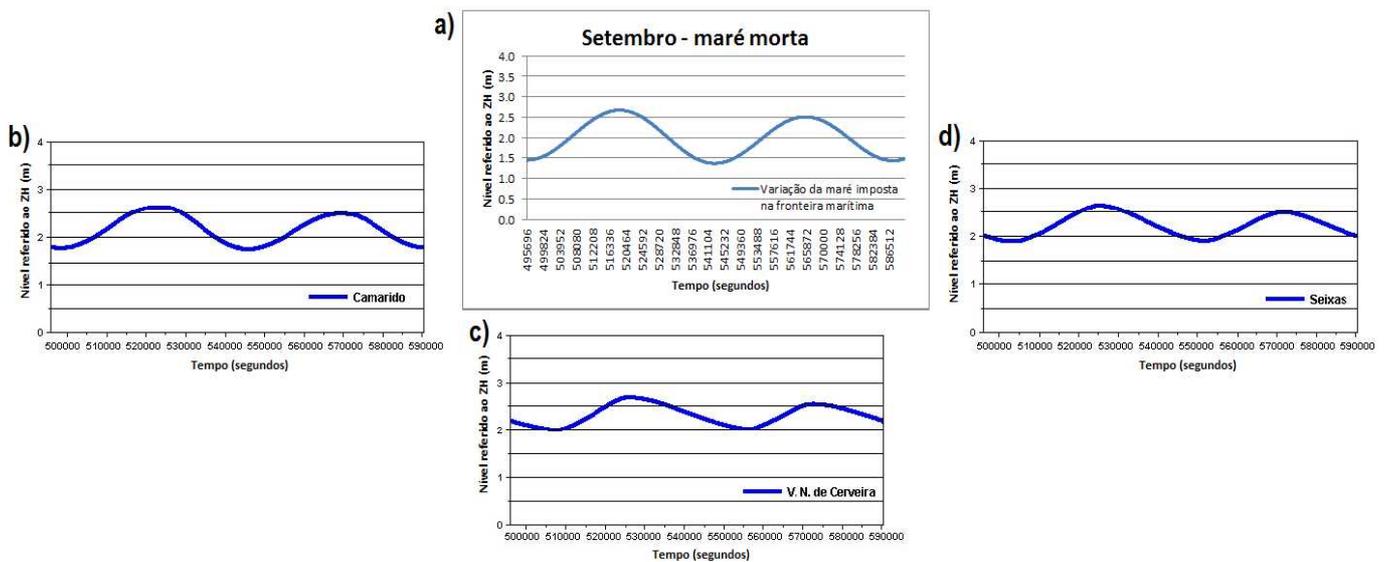


Figura 10. Nível de água: a) imposto na fronteira marítima; simulado em: b) Camarido, c) Seixas, d) Vila Nova de Cerveira (Setembro de 2005 em maré morta,  $Q = 92 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

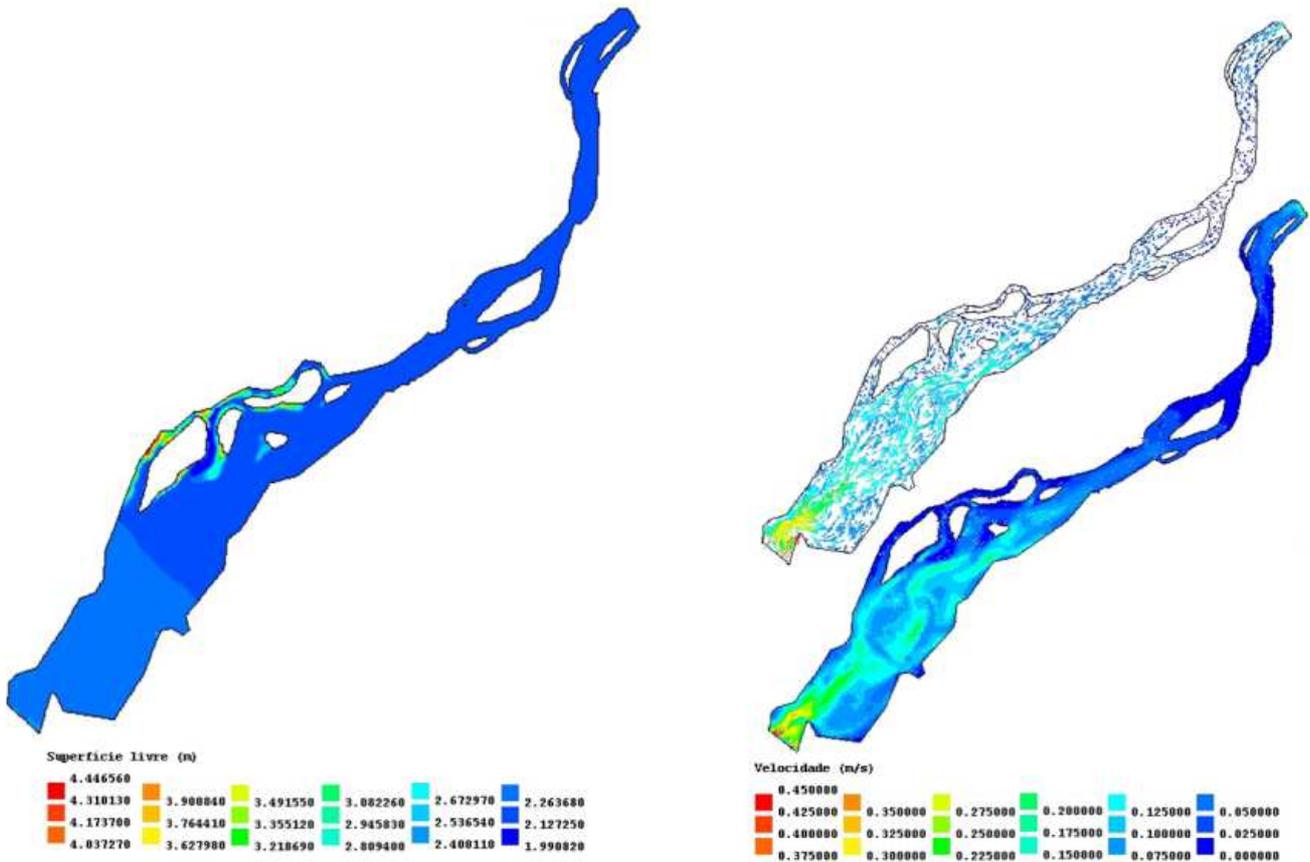


Figura 11. Superfície livre (esquerda) e campo de velocidades (direita) na enchente (Setembro de 2005 em maré morta,  $Q = 92 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

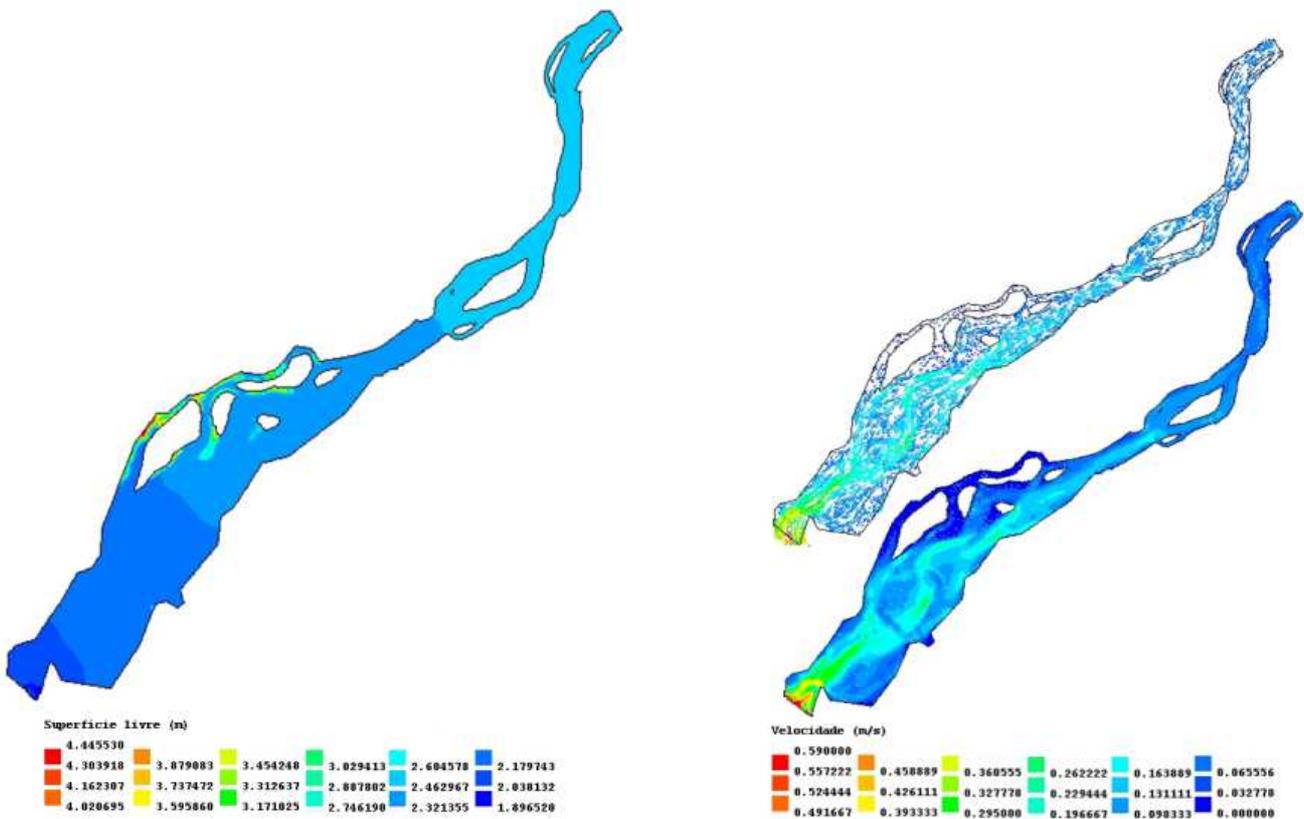


Figura 12. Superfície livre (esquerda) e campo de velocidades (direita) na vazante (Setembro de 2005 em maré morta,  $Q = 92 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

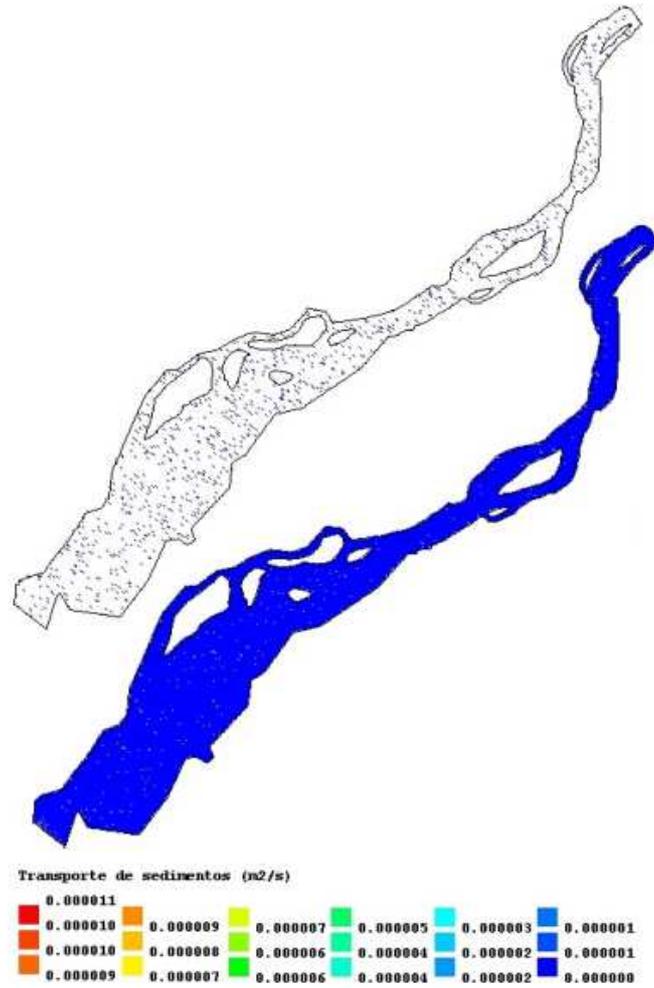


Figura 13. Transporte de sedimentos na enchente (Setembro de 2005 em maré morta,  $Q = 92 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

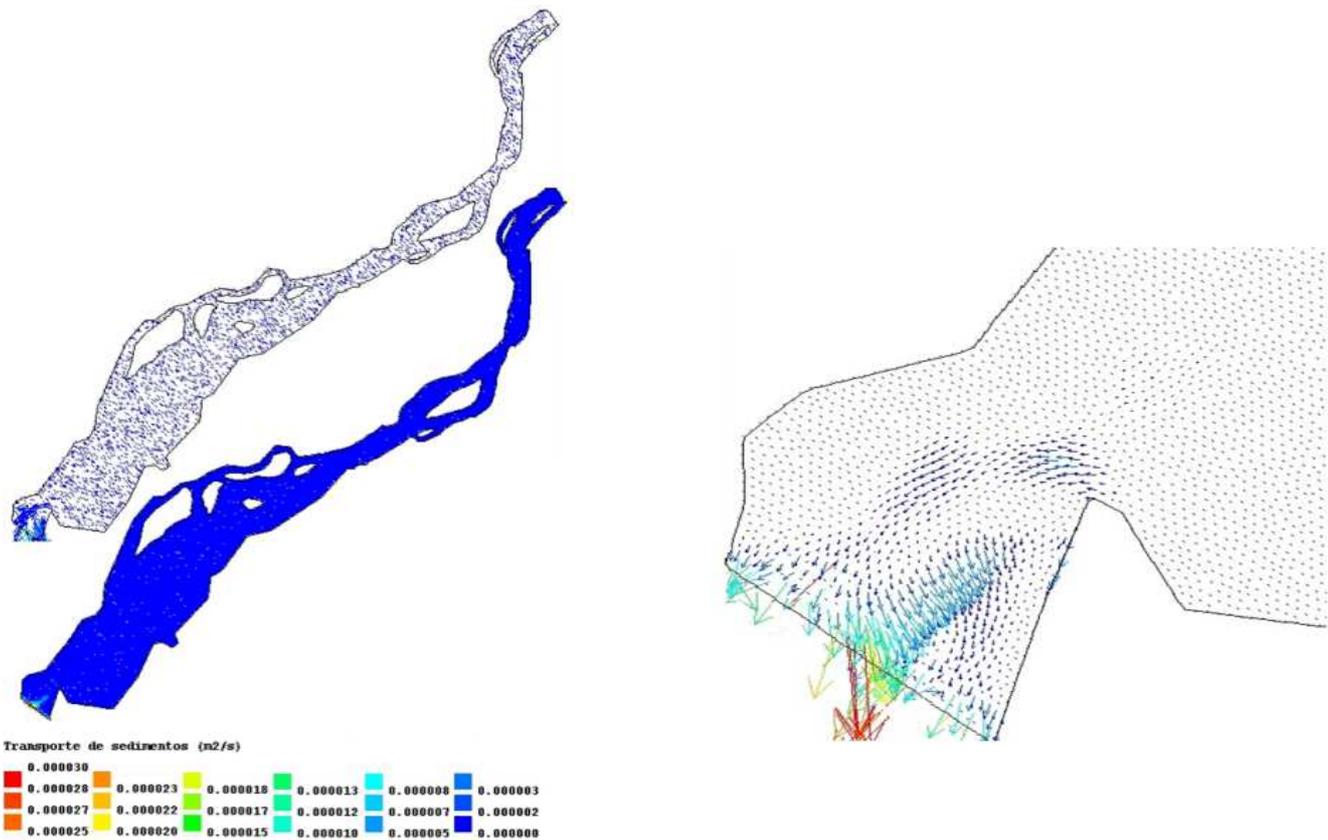


Figura 14. Transporte de sedimentos na vazante (esquerda), pormenor (direita) (Setembro de 2005 em maré morta,  $Q = 92 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

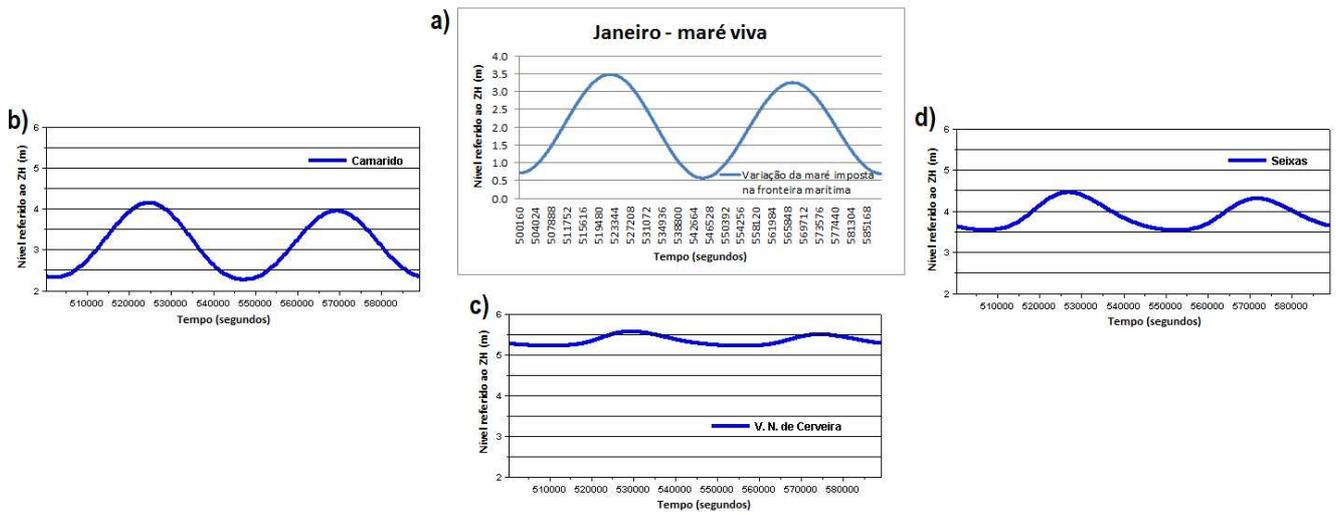


Figura 15. Nível de água: a) imposto na fronteira marítima; simulado em: b) Camarido, c) Seixas, d) Vila Nova de Cerveira (Janeiro de 2005,  $Q = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

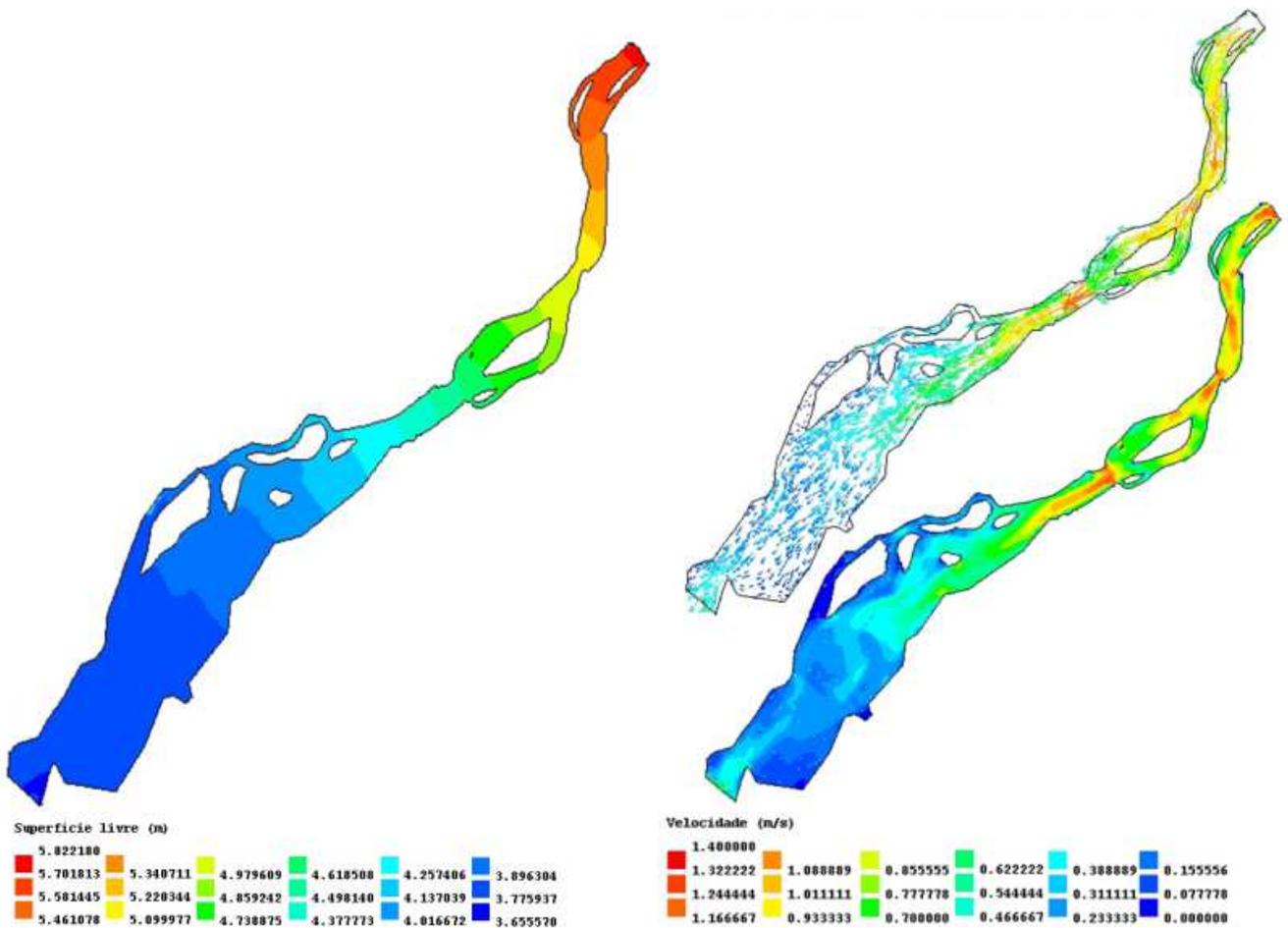


Figura 16. Superfície livre (esquerda) e campo de velocidades (direita) na enchente (Janeiro de 2005,  $Q = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

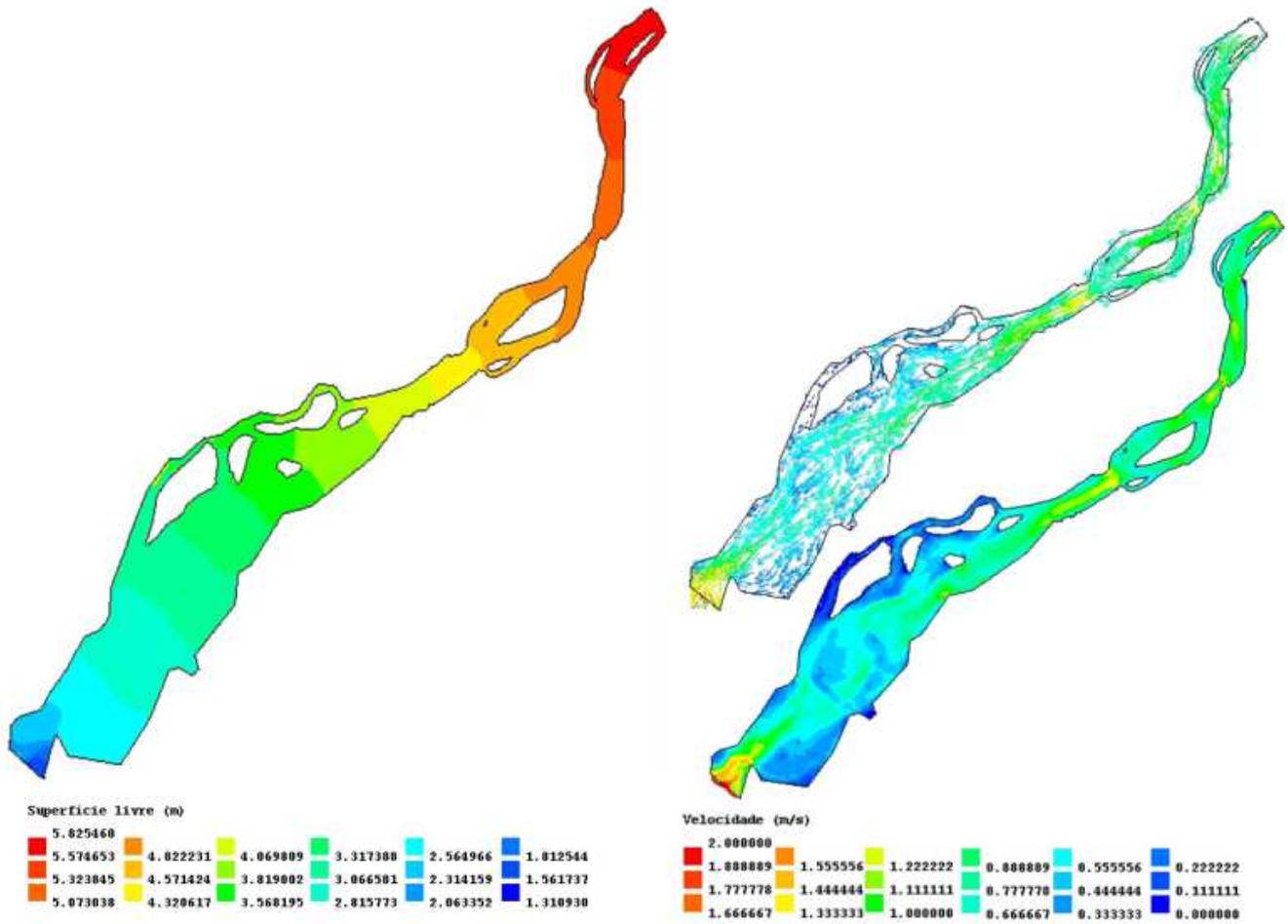


Figura 17. Superfície livre (esquerda) e campo de velocidades (direita) na vazante (Janeiro de 2005,  $Q = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ )

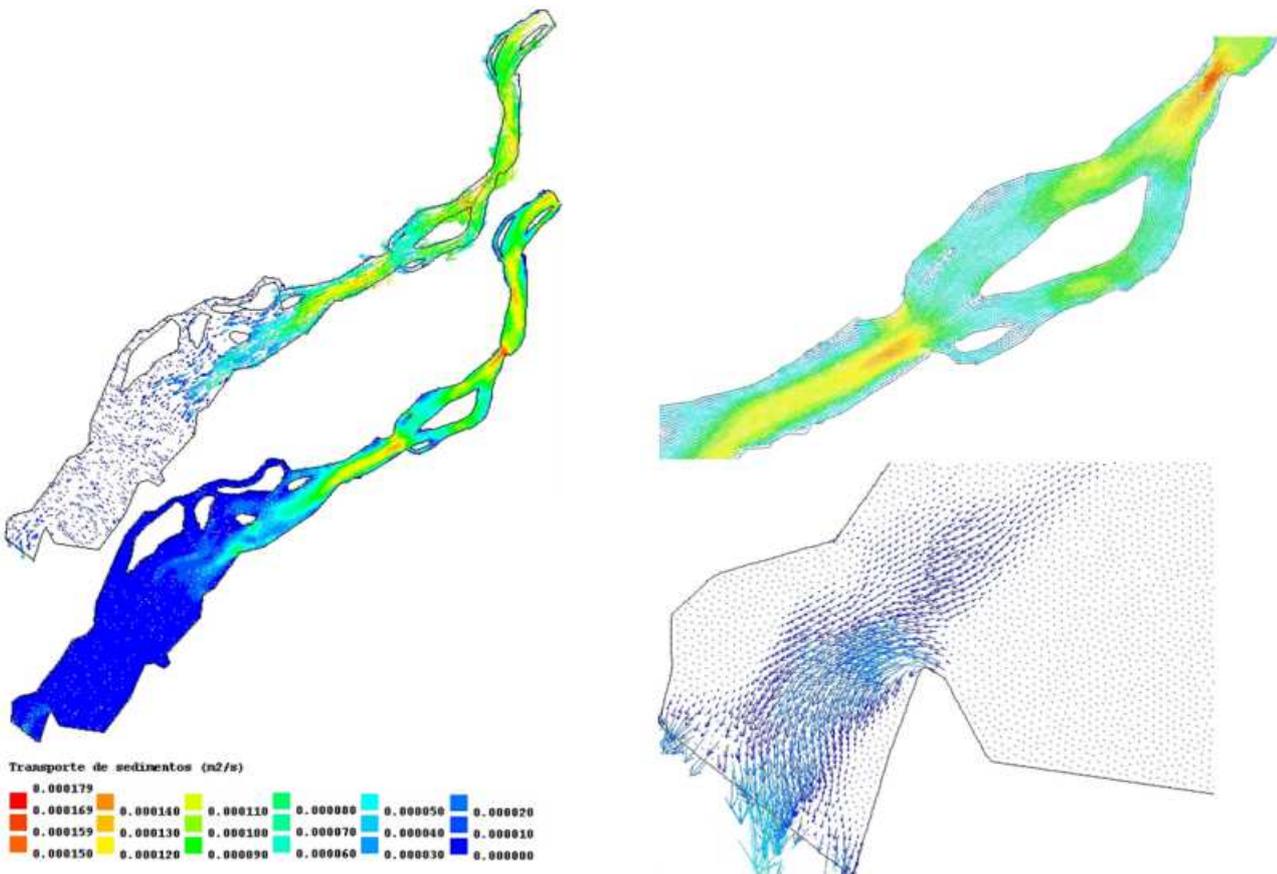


Figura 18. Transporte de sedimentos na enchente (esquerda), pormenor (direita) (Janeiro de 2005,  $Q = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

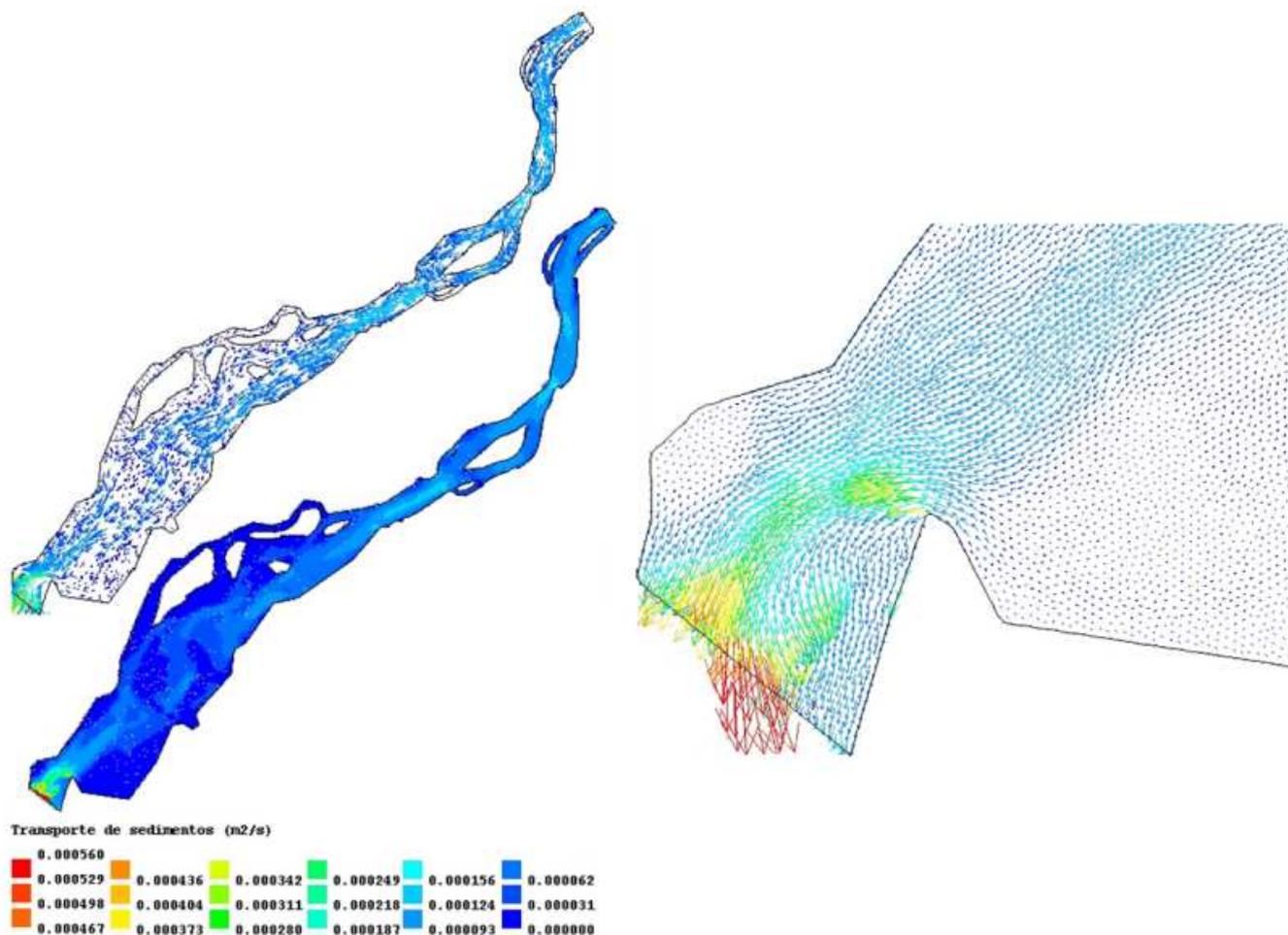


Figura 19. Transporte de sedimentos na vazante (esquerda), pormenor (direita) (Janeiro de 2005, Q = 2500 m<sup>3</sup>/s).

## 5. Discussão dos Resultados

Da análise dos resultados das velocidades relativos às simulações efetuadas conclui-se que de uma forma geral a velocidade da vazante é superior à da enchente, e que a duração da vazante é também superior à da enchente.

A corrente é mais forte na embocadura do que no interior do estuário como também é mais forte em marés vivas do que em marés mortas.

Relativamente aos parâmetros hidrológicos as zonas mais a jusante são dominadas pela maré e as zonas mais a montante são dominadas pelo caudal fluvial, enquanto nas zonas intermédias são dominados pela maré em baixos caudais.

No entanto, o modelo também revelou que com um caudal extremamente elevado (2500 m<sup>3</sup>/s) o estuário passa a ser todo ele dominado pelo caudal fluvial, inclusive a zona a jusante.

No caso do transporte de sedimentos, pode concluir-se que, de uma forma geral, o transporte de sedimentos é muito mais significativo em maré viva do que em maré morta, aumenta com o caudal fluvial e na zona da embocadura é onde se manifesta mais este fenómeno. Também é superior durante a vazante em comparação com a enchente.

Com um caudal extremo de 2500 m<sup>3</sup>/s constatou-se um grande volume de transporte de sedimentos, como seria de esperar, e sempre no sentido montante-jusante, inclusive na enchente.

Da comparação dos gráficos da propagação da maré conclui-se que à medida que se caminha para montante os valores do nível médio da superfície livre vão sendo maiores, levando a uma diminuição das amplitudes da maré no mesmo sentido. As curvas de maré apresentam também assimetria, quer relativamente ao nível médio, quer em relação à duração da enchente e da vazante, revelando essa diferença temporal que a duração da enchente aparenta ser mais reduzida relativamente à duração da vazante.

Por fim, observa-se um desfasamento temporal entre as curvas de maré nos vários locais apresentados, ou seja, os instantes de preia-mar e baixa-mar não são os mesmos, ocorrendo em primeiro lugar na entrada do estuário e só depois no Camarido, em Seixas e finalmente em Vila Nova de Cerveira. Curiosamente a variação da amplitude de maré, deixa praticamente de se fazer sentir em Vila Nova de Cerveira com um caudal de 583 m<sup>3</sup>/s em maré morta e para o caudal de 2500 m<sup>3</sup>/s em maré morta e maré viva.

Em relação à superfície livre, esta é sempre descendente no sentido da corrente.

## 6. Considerações Finais

A aplicação do TELEMAC revelou-se um processo moroso e delicado, especialmente na definição da malha topohidrográfica. Foram compilados diversos dados de base cedidos pelo INAG, desde a embocadura até sensivelmente 2 km a montante de Vila Nova de Cerveira.

Este processo é uma das etapas mais determinantes para o sucesso do modelo, pois a definição da malha topohidrográfica influencia diretamente a qualidade dos resultados obtidos.

O processo de calibração e validação do modelo foi realizado com sucesso e os resultados das simulações foram bastante satisfatórios.

As simulações confirmam e complementam a informação recolhida e apresentada de caracterização do estuário. Por exemplo, em relação à propagação da maré no interior do estuário, verifica-se a distorção da maré e as diferentes influências, desta e do caudal fluvial ao longo do estuário.

Verifica-se que o uso da modelação para a caracterização do estuário serve como complemento à informação recolhida, o que tem, aliás, a vantagem de simular o estuário em situações para as quais não existem medições efetuadas no local.

No entanto, uma das limitações está relacionada com a não disponibilidade de dados batimétricos da parte exterior do estuário, de forma a obterem-se melhores resultados na zona da embocadura. Além disso, para que os processos de validação e calibração do modelo possam ser mais rigorosos será necessário obter um conjunto de dados de campo como medições de velocidades, caudais e caudais sólidos.

## Agradecimentos

Agradece-se ao Instituto da Água a cedência da informação topo-hidrográfica, essencial para a realização deste trabalho.

## Referências

CONSULMAR (1990). *Terminal de ferry-boats em Caminha. Estudo localizado*. Volume 3 - Anexo II: Estudo de hidrodinâmica e sedimentologia. Estudo realizado para a Comissão de Coordenação da Região Norte (referido por LNEC, 2007).

Delgado, A.L.S.A.P. (2011). *Caracterização Hidrodinâmica e Sedimentar do Estuário do Rio Minho*. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

EDF (sem data). *User's Guide - RUBENS 4.1*, Departement Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement.

EDF (2004). *MATISSE Version 2.0 Principle Note and User Document*, Departement Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement. Groupe Hydraulique a Surface Libre Exploitation. June 2004.

EDF (2010). *TELEMAC Modelling System, 2D hydrodynamics TELEMAC-2D software Version 6.0 User Manual*, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement. October 2010.

EDF (2010b). *SISPHY 6.0 User Manual*, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement. Modelisation des Apports Hydriques et Transferts Hydro-Sedimentaires.

Hervouet, J.-M. (2000). *TELEMAC modelling system: an overview*. *Hydrological Processes*, 14: 2209-2210. doi: 10.1002/1099-1085(200009)14:13<2209::AID-HYP23>3.0.CO;2-6.

INSTITUTO DA ÁGUA (2000). "Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Minho". Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território.

LNEC (2007). *Estudo do Problemas de Assoreamento e Erosão no Estuário do Rio Minho*. Relatório 1: Informação de Base e Evolução Morfológica Recente, Relatório 59/07-NEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC (2007b). *Estudo do Problemas de Assoreamento e Erosão no Estuário do Rio Minho*. Relatório 2: Modelação da Hidrodinâmica, da Salinidade e da Dinâmica Sedimentar, Relatório 337/07-NEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Miranda, L.B.; Castro, B.M.; Kjerfve, B.(2002). *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. Editor da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S. (2002). *Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB T\_TIDE*, *Computers and Geosciences*, 28, pp. 929-937.

Portela, L.I. (2011). *Evolução Morfológica, Hidrodinâmica e Dinâmica Sedimentar do Estuário do rio Minho*. 3º Seminário sobre Gestão de Bacias Hidrográficas "Os Estuários", 2 e 3 de Junho 2011, Viana do Castelo, Núcleo Regional do Norte da Associação dos Recursos Hídricos.

Reis, J.L (2008). *Caracterização da Maré no Estuário do Minho*. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos, Instituto Superior Técnico.

Zacarias, N.G.R. (2007). *Influência da Batimetria e do Caudal Fluvial na Propagação da Maré no Estuário do rio Minho*. Licenciatura em Ciências do Ambiente Ramo Qualidade do Ambiente, Universidade de Évora.