

AVANÇOS NA MODELAÇÃO MATEMÁTICA DA PROPAGAÇÃO DE CHEIAS E TSUNAMIS EM ZONAS COM EDIFICADO

Daniel CONDE², Rui M.L. FERREIRA²

1. CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa; Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal
ruinferreira@tecnico.ulisboa.pt

2. CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa; Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal e ETH Zurich, Switzerland
daniel.conde@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

Um novo modelo hidrodinâmico para cheias e inundações (incluindo tsunamis) em ambientes naturais e construídos, implementado atendendo ao paradigma HPC (High Performance Computing) – o HiSTAV, desenvolvido no CERIS, – é, neste trabalho, avaliado e validado com aqueles testes padronizados de propagação de tsunamis. O HiSTAV tem uma inovadora implementação computacional que compreende uma estrutura de computação distribuída e heterogênea para equações diferenciais parciais hiperbólicas. Em cada teste, o modelo é avaliado em termos de desempenho computacional, usando sistemas com múltiplas arquiteturas (CPU ou GPU) e um número variável de dispositivos paralelos. Os ganhos computacionais no HiSTAV permitem a simulação rápida e robusta de cheias e inundações em ambientes naturais e construídos. As soluções numéricas obtidas com o HiSTAV mostraram um erro relativo menor que 5% para ondas simples (sem rebentamento), enquanto erros médios na faixa de 7% a 9% foram obtidos para casos com ondas mais complexas, incluindo rebentação e formação de choques. Este trabalho mostra que o HiSTAV é uma ferramenta confiável e rápida para previsões de tsunamis de alta resolução espacial e aplicável em tempo real.

Palavras-Chave: cheias; tsunamis; modelação matemática HPC; Edificado

1. INTRODUÇÃO

A previsão dos impactes de cheias fluviais e inundações, incluindo tsunamis, é realizada com base em modelos matemáticos de solução numérica. Estes baseiam-se em aproximações das equações de conservação fundamentais da quantidade de movimento (Navier-Stokes) e da massa. Para escalas espaciais maiores que as necessárias para resolver os detalhes de uma edifício, os modelos bidimensionais em planta (2DH) são os que apresentam melhor compromisso entre detalhe fenomenológico e tempo de computação. A validação destes modelos, que não são fechados, no sentido de necessitarem equações *ad hoc* para fenómenos como a resistência ao escoamento ou a mobilidade de sedimentos, é um aspecto crítico do seu desenvolvimento. Em geral, a validação consiste na comparação com soluções analíticas e com registos de testes padronizados e casos de estudo obtidos em condições controladas.

Neste trabalho procede-se à validação do núcleo homogêneo de um novo modelo hidrodinâmico e morfodinâmico (embora este aspecto não seja aqui validado) – o HiSTAV (Conde, 2018). Foi desenvolvido no CERIS, Instituto Superior Técnico, e implementado atendendo ao paradigma HPC (High Performance Computing).

A validação centra-se em testes padronizados que visam avaliar o comportamento hiperbólico das soluções e não os elementos que forcem o escoamento (precipitação, hidrogramas em secções de entrada, movimentos de vertente, movimento de placas tectónicas, etc).

O programa norte-americano National Tsunami Hazard Mitigation Program Committee (NTHMPC) em articulação com a agência National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) elaboraram um conjunto de testes padronizados para aferir a qualidade das soluções numéricas de propagação de escoamentos pouco profundos, modelados com equações diferenciais de natureza hiperbólica, e com evidentes aplicações à propagação de tsunamis.

2. 2.1 MODELO CONCEPTUAL

O HiSTAV é um modelo matemático bidimensional no plano horizontal, cujas equações hidrodinâmicas provêm da integração na coluna de água das equações de Navier-Stokes modificadas para a inclusão do transporte de material em suspensão e por arrastamento (Figura 1). Estas equações são complementadas com as que expressam a conservação da massa de material sólido, na coluna de água e no leito.

O sistema hiperbólico, não homogéneo, de leis de conservação pode escrever-se

$$\partial_t h + \partial_x (hu) + \partial_y (hv) = -\partial_t Z_b \quad (1)$$

$$\partial_t (uh) + \partial_x \left(u^2 h + \frac{1}{2} gh^2 \right) + \partial_y (uvh) = -gh\partial_x Z_b - \frac{1}{\rho_m} \partial_x h T_{xx} - \frac{1}{\rho_m} \partial_y h T_{xy} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho_m} \quad (2)$$

$$\partial_t (vh) + \partial_x (uvh) + \partial_y \left(v^2 h + \frac{1}{2} gh^2 \right) = -gh\partial_y Z_b - \frac{1}{\rho_m} \partial_x h T_{xy} - \frac{1}{\rho_m} \partial_y h T_{yy} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho_m} \quad (3)$$

$$\partial_t (C_m h) + \partial_x (C_m hu) + \partial_y (C_m hv) = -(1-p)\partial_t Z_b \quad (4)$$

$$(1-p)\partial_t Z_b = (q_s - q_s^*) / \Lambda \quad (5)$$

em que t denota o tempo, x e y são das coordenadas espaciais (referencial ortonormado); h é a profundidade do escoamento; u e v são as componentes horizontais do vector velocidade média na coluna de água (nas direcções x e y , respectivamente), Z_b é a cota do fundo, ρ_m e C são a massa volúmica e a concentração médias de material sólido na coluna de água; T_{ij} é o tensor das tensões médio na coluna de água, τ_b é a tensão de arrastamento junto ao fundo, q_s é o caudal sólido e q_s^* é o seu valor de equilíbrio. A diferença entre o caudal sólido e o seu valor de equilíbrio é proporcional ao fluxo de material sólido na direcção vertical (em volume por unidade de área, na equação 5) em que o inverso comprimento de adaptação Λ é a constante de proporcionalidade. As equações de fecho que expressam o transporte sólido em equilíbrio, a resistência ao escoamento e as tensões turbulentas podem ser consultadas em Ferreira et al. (2009).

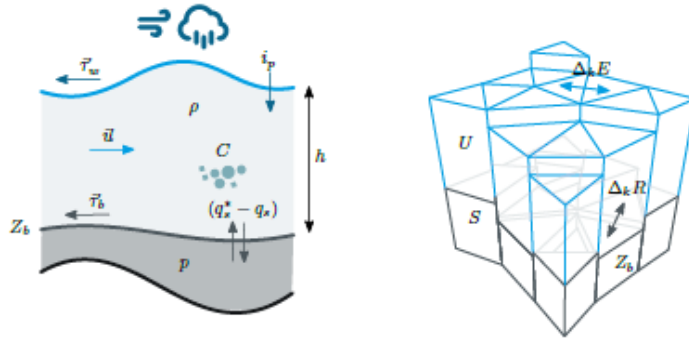


Fig. 1: Modelo conceptual (esquerda) e esquema de discretização por volumes finitos (direita).

O esquema de discretização é de primeira ordem, classificável como Godunov Volumes Finitos, em que o sistema de equações (1) a (5) é integrado numa malha irregular de células de dimensão variável e em que os fluxos entre células são calculados de acordo com uma versão alterada de Roe Riemann Solver (Figura 1). Para mais informação sobre o esquema de discretização utilizado no HiSTAV, pode consultar-se em Conde et al. (2013) ou Conde et al. (2015).

3. TESTES DE VALIDAÇÃO

No primeiro teste de validação impõe-se uma onda solitária num plano inclinado. A solução analítica para a série temporal das alturas do escoamento η acima do nível médio inicial d ($\eta = h - d$) no vértice formado pelo plano e pelo plano horizontal pode consultar-se na Figura 2.

14.º SILUSBA

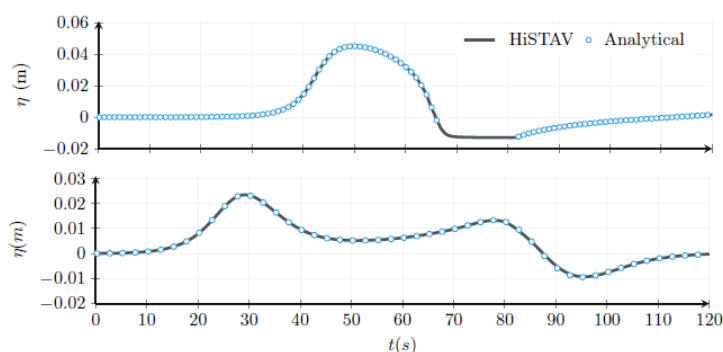


Fig. 2: Onda solitária numa declive uniforme. Série temporal de valores de η .

A solução numérica apresenta um erro quadrático médio normalizado (EQMN) menor que 1% e um coeficiente de correlação médio (R) de 0.999. A validação do modelo pela NOAA obriga a que EQMN <10% e R > 0.95%.

O segundo teste compreende a propagação de uma inundação sobre uma superfície complexa em frente à qual se situa uma ilha cónica. Os resultados mostram a altura da inundação e a vorticidade do escoamento.

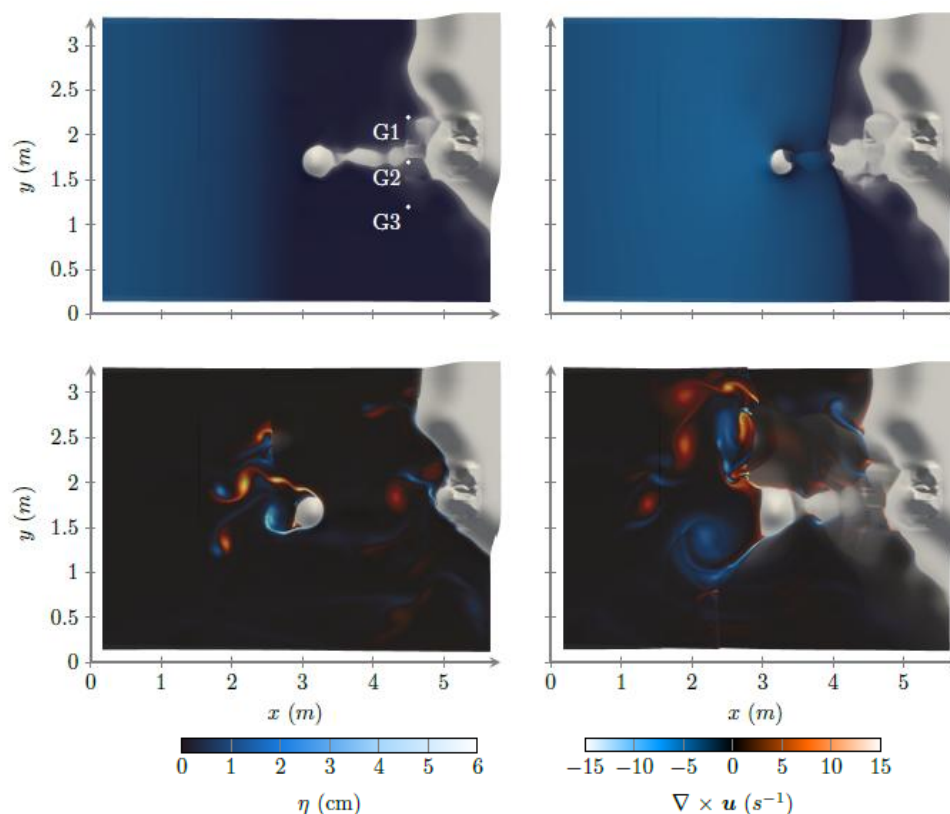


Fig. 3: Inundação de ilha cónica e superfície complexa. Topo: alturas do escoamento. Fundo: vorticidade.

O terceiro caso de estudo compreende a inundação de um modelo de cidade (Seaside, Oregon) por uma onda longa. Os resultados podem ser observados na Figura 4, respectivamente a altura de inundação relativa ao nível inicial (esquerda) e a vorticidade gerada pela interacção com os edifícios.

O mapa de vorticidade mostra a complexidade do escoamento resultante da interacção com o edificado, a qual induz uma importante resistência ao escoamento e é responsável por um substancial atraso da propagação da inundação relativamente ao caso de declive uniforme.

14.º SILUSBA

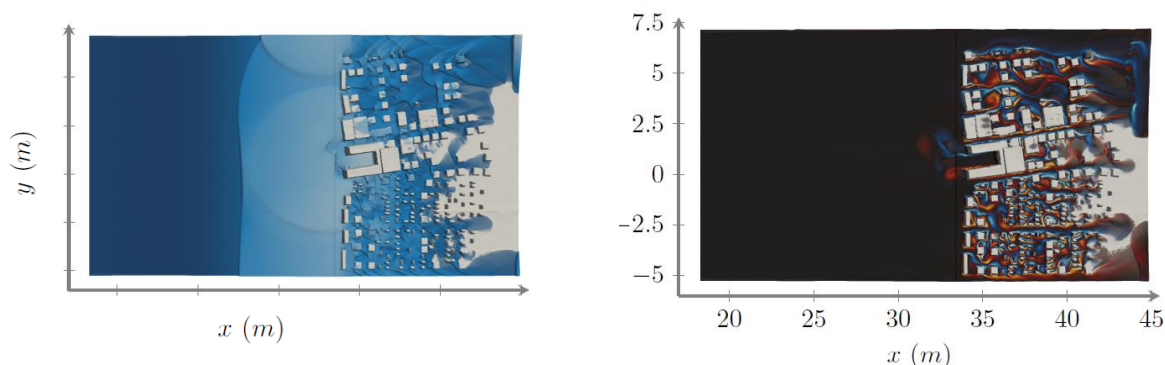


Fig. 4: Inundação no modelo da cidade de Seaside, Oregon (14 min após o início da inundação). Esquerda: mapa de η . Direita: mapa de vorticidade.

A solução compreende um erro quadrático médio normalizado de 8% e um coeficiente de correlação médio de 0.959, ambos dentro do intervalo aceitável para validação do modelo.

4. CONCLUSÃO

Uma das principais novidades do HiSTAV consiste na sua implementação computacional, nomeadamente a sua estrutura de computação distribuída e heterogênea para equações diferenciais parciais hiperbólicas. Em cada teste o modelo foi avaliado em termos de desempenho computacional, usando sistemas com múltiplas arquiteturas (CPU ou GPU) e um número variável de dispositivos paralelos.

As soluções numéricas obtidas com o HiSTAV mostraram um erro relativo menor que 5% para ondas simples (sem rebentamento), enquanto erros médios na faixa de 7% a 9% foram obtidos para casos com ondas mais complexas, incluindo rebentação e formação de choques. A verificação com soluções analíticas apresentou a maior correlação, com erro médio de 1%.

Em geral, os coeficientes de correlação estavam acima de 0,95 para comparações laboratoriais e analíticas controladas, confirmando o HiSTAV como uma ferramenta confiável e rápida para previsões de tsunamis de alta resolução espacial e aplicável em tempo real.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo FEDER e por fundos nacionais no âmbito do projecto RiverCure PTDC/CTA-OHR/29360/2017, acompanhado pela FCT por delegação de competências da CD do PORL.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Conde, D.A.S. (2019). Mathematical Modelling of Tsunami Impacts on Built Environments. PhD Thesis, Instituto Superior Técnico July 2018.
- Conde, D.A.S.; Baptista M.A.V.; Sousa Oliveira C. & Ferreira R.M.L. (2013) A shallow-flow model for the propagation of tsunamis over complex geometries and mobile beds. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 13(10):2533–2542.
- Conde, D.; Telhado, M. J.; Baptista, M. A. V. & Ferreira, R. M. L. (2015). Severity and exposure associated with tsunami actions in urban waterfronts: the case of Lisbon, Portugal. *Natural Hazards*, 79(3), 2125-2144..
- Ferreira, R.M.L.; Franca, M.J.; Leal, J.G. & Cardoso, .A.H (2009) Mathematical modelling of shallow flows: closure models drawn from grain-scale mechanics of sediment transport and flow hydrodynamics. *Can J Civ Eng* 36:1604–1621.