SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTOS PROVOCADOS POR QUEBRA DE BARRAGEM PELAS ABORDAGENS HIDROSTÁTICA E NÃO-HIDROSTÁTICA

Leonardo Romero Monteiro y Edith Beatriz Camaño Schettini

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
E-mail: leonardoromeromonteiro@gmail, bcamano@iph.ufrgs.br

Introdução

Modelos baseados no equacionamento de águas rasas (*Shallow Water Equation - SWE*) têm sido utilizados há décadas em temas relacionados a recursos hídricos. O seu equacionamento, também é denominado de "Saint-Venant bidimensional", considera uma configuração 2D horizontal, em que a componente vertical da velocidade não é considerada. Diversos autores utilizam esta metodologia para estudos hidráulicos, como HEC-RAS (US Army Cops of Engineers, 2014), Delestre et al. 2014, Mungkasi e Roberts, 2014 e Reas e Deproost, 2003.

A grande maioria dos modelos de *SWE* utiliza a hipótese que a pressão total possui unicamente a parcela hidrostática, desconsiderado a pressão não hidrostática, proveniente das variações de velocidades. Alguns autores utilizam estes modelos para representar escoamentos provenientes de quebra de barragem (Xiong, 2011; Butt et al. 2013; Özdemir et al. 2013, US Army Cops of Engineers, 2014). Esta prática pode levar a resultados incoerentes, visto que o escoamento provocado por quebra de barragens é possui fortes gradientes verticais.

No presente artigo será realizada uma comparação entre os resultados de um código baseado em *SWE* com os resultados provenientes de um código baseado nas equações completas de Navier-Stokes. Para isso, será apresentado o código SuLi-LS, baseado nas equações de Navier-Stokes e da continuidade, em conjunto com o Método Level Set (Osher e Sethian, 1988). Os resultados do código SuLi-LS são comparados com os resultados do código HEC-RAS 5.0.3, para um caso de quebra de barragem que possui dados experimentais (Martin e Moyce, 1952), com o intuito realizar uma validação da metodologia baseada em *SWE* para representar este tipo de fenômeno.

Metodologia matemática

As equações da Navier-Stokes e da continuidade são consideradas por

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] + g_i \quad [1]$$

e

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0\ , \quad [2]$$

em que u_i são as componentes da velocidade, t é o tempo, x_i são as coordenadas espaciais, p é a pressão total, μ é a viscosidade dinâmica, g_i é a aceleração da gravidade e ρ é a massa específica.

O código SuLi-LS utiliza o método de captura de interface, em que o ar e a água são representados no domínio computacional, necessitando-se representar a interface entre os dois fluidos. O movimento da interface é calculado pelo Método *Level Set* (Osher e Sethian, 1988) a partir de uma equação de advecção:

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} + u_i\frac{\partial\phi}{\partial x_i} = 0\ , \quad [3]$$

em que ϕ é a função distância com sinal, para o qual $\phi = 0$ representa a interface, $\phi < 0$ representa a presença de ar e $\phi > 0$ representa a presença de água. Para efetivar a variação das propriedades físicas e manter a imiscibilidade dos fluidos, o método utiliza uma função Heaviside (I):

$$I(\phi) = \begin{cases} 0 & \text{se } \phi < -\delta\Delta_g, \\ \frac{1}{2}\left[1 + \frac{\phi}{\delta\Delta_g} + \frac{1}{\pi}\sin\left(\frac{\pi\phi}{\delta\Delta_g}\right)\right] & \text{se } |\phi| \leq -\delta\Delta_g, \\ 1 & \text{se } \phi > \delta\Delta_g. \end{cases} \quad [4]$$

em que Δ_g é a discretização numérica característica da malha (neste caso, $\Delta_g = (\Delta x + \Delta y + \Delta z)/3$) e δ é a metade do número de células utilizadas para representar a variação suave da interface (δ =1,5 é utilizado). A função Heaviside é utilizada para calcular a variação das propriedades físicas da forma

$$\rho = (1 - I)\rho_1 + I\,\rho_2 \quad \text{e} \quad \mu = (1 - I)\mu_1 + I\,\mu_2, \quad [5]$$

onde ρ_1, μ_1, ρ_2 e μ_2 são as propriedades físicas do ar e da água respectivamente. Ainda, na metodologia *Level Set* são utilizadas equações de reinicialização (Sussman et al., 1994) e uma modificação da equação de correção de volume, proposta por Son (2001), como

$$\frac{\partial\phi}{\partial\chi} + sgn(\phi_0)\,(|\nabla\phi| - 1) = 0, \quad [6]$$

e

$$\frac{\partial\phi}{\partial\chi} = \left(\frac{V_v - V_{v0}}{V_{v0}}\right)|\nabla\phi|, \quad [7]$$

em que χ é uma discretização espacial fictícia ($\chi = 0{,}1\Delta_g$), ϕ_0 é a função distância com sinal não reinicializada, V_{v0} é o volume inicial que respeita a conservação de massa e V_v é o volume no tempo *n+1*, ainda não corrigido.

Método numérico

O domínio computacional possui malha deslocada, em que a pressão, a viscosidade, a massa específica e as variáveis do método Level Set são posicionadas no centro da célula, enquanto que as velocidades são posicionadas no centro das faces da célula. O Método da Projeção (Chorin, 1968) é utilizado para o cálculo da equação de Navier-Stokes [1] e da continuidade [2].

O esquema numérico utilizado, para resolver as equações [1] e [2], é o *upwind* de segunda ordem. Nas células do contorno, utilizam-se esquemas centrados de segunda ordem em conjunto com células de contorno fantasmas (Watanabe e Mori, 2013). O avanço no tempo é calculado com o esquema Adams-Bashforth de segunda ordem, sendo que para o primeiro passo de tempo se utiliza o esquema de Euler explícito.

A equação de Poisson, obtida com o método da Projeção, é

$$\nabla\left(\frac{1}{\rho}\nabla p\right) = \frac{1}{\Delta t}\nabla\cdot\tilde{u}, \quad [8]$$

em que $\tilde{u}$ é a velocidade não corrigida (calculada pelo método da Projeção). Esta equação é calculada pelo Método do Gradiente Conjugado Pré-condicionado (Hestenes, Stiefel, 1952).

As derivadas espaciais do método Level Set são calculadas utilizando um esquema *weighted essentially non-oscillatory* WENO de quinta ordem de precisão (Liu et al., 1994). A integração no tempo é calculada pelo método Time Variation Diminishing Runge-Kutta de terceira ordem (TVD RK3) (Gottlieb et al. 1998).

Validação e resultado

Martin et al. (1952) descreveram um experimento do escoamento provocado por quebra de barragem que é amplamente utilizado para validar códigos que utilizam o método de captura da interface (Jahanbakhsh et al., 2007; Rezende et al, 2015). Em um primeiro momento, o código SuLi-LS será validado com o experimento. Não é possível validar os resultados do HEC-RAS diretamente com o experimento, porque a escala é muito pequena e não é possível utilizar o programa, devido a uma limitação no $\boldsymbol{\Delta t}$ mínimo ($\boldsymbol{\Delta t_{mínimo} = 0,1s}$).

O domínio computacional proposto para representar o experimento possui $\boldsymbol{L_x = 5a}$, $\boldsymbol{L_y = a}$ e $\boldsymbol{L_z = 1,25a}$, em que *a=0.05715 m*. O volume de água que representa a barragem está no lado esquerdo do domínio e possui dimensão a³ e é liberado instantaneamente provocando o escoamento. A discretização numérica utilizada é $\boldsymbol{\Delta x = \Delta y = \Delta z = a/20}$ e $\boldsymbol{\Delta t = 10^{-5} s}$.

Os resultados do código SuLi-LS, representam adequadamente a variação e tendência do posicionamento da frente do escoamento (**Figura 1**), podendo ser considerado como um código válido para representar este tipo de fenômeno. Outras características do escoamentos também foram validados.

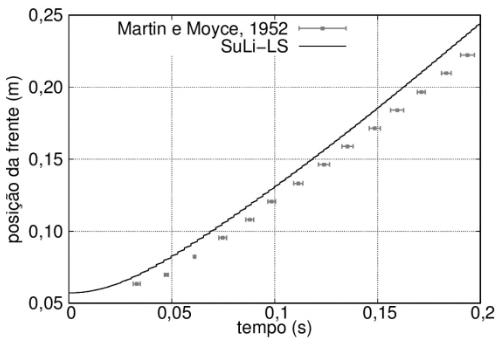

Figura 1.- Comparação entre posição da frente para o código SuLi-LS e o caso experimental (Martin e Moyce, 1952).

Desta forma, realizou-se uma simulação para o mesmo fenômeno, agora com *a=5,715m*, dimensão já possível de ser simulada sem instabilidades numéricas pelo HEC-RAS. Utilizando-se o módulo 2D do programa HEC-RAS, criou-se uma malha com $\Delta x = \Delta y = a/20m$ e $\Delta t = 10^{-1} s$. A barragem foi representada por uma área de armazenamento (*storage area*), e utilizou-se a ferramenta de conexão entre áreas para se unir a área de armazenamento com o domínio com malha, onde é aplicou-se a *SWE*.

Para o código SuLi-LS manteve-se a mesma discretização espacial ($a/20$m), porém com $\Delta t = 10^{-3}$s. Uma importante defasagem entre o código SuLi-LS e o modelo HEC-RAS foi observada que aumenta com o tempo (**Figura 2**).

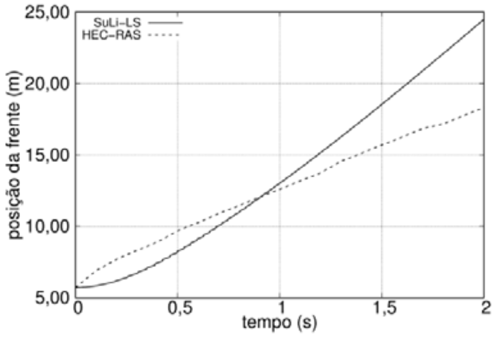

Figura 2.- Comparação entre posição da frente para o código SuLi-LS e o HEC-RAS para o caso ampliado.

Outras diferenças também foram observadas entre os dos modelos, mostrando que os códigos baseados em SWE devem ser utilizados com precaução ao serem utilizados para representar o fenômeno de escoamentos provocados por quebra de barragens, pois estes subestimam as velocidades máximas e a posição da frente da corrente.

Referências bibliográficas

Butt, M. J., M. Umar and R. Qamar (2013). “Landslide dam and subsequent dam-break flood estimation using HEC-RAS model in northern pakistan”. *Natural hazards*, Vol. 65 No. 1 pp. 241-254.

Chorin, A. J. (1968). “Numerical solution of the Navier-Stokes equations”. *Mathematics of computation*, Vol. 22, No. 104, pp. 745-762.

Delestre, O., S. Cordier, F. Darboux, M. Du, F. James, C. Laguerre, C. Lucas and O. Planchon (2014). “Fullswof: A software for overland flow simulation”. *Proceedings of the Advances in Hydroinformatics*, Springer, pp. 221-231.

Gottlieb, S. and C.-W, Shu (1998). “*Total variation diminishing Runge-Kutta schemes*”. Mathematics of computation of the American Mathematical Society, Vol. 67, No. 221, pp. 73-85.

Hestenes, M. R., and E. Stiefel. (1952). Methods of conjugate gradients for solving linear systems (Vol. 49, No. 1). Washington, DC: NBS.

Jahanbakhsh, E., R. Panahi and M. Seif (2007). “Numerical simulation of threedimensional interfacial flows”. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, Vol. 17 No. 4, pp. 384-404.

Liu, X.-D., S. Osher and T. Chan (1994). “Weighted essentially non-oscillatory schemes”. *Journal of computational physics*, Vol. 115, No. 1, pp. 200-212.

Martin, J. and W. Moyce (1952). “Part v. an experimental study of the collapse of fluid columns on a rigid horizontal plane, in a medium of lower, but comparable, density”. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 244, No. 882, pp. 325-334.

Mungkasi, S. and S. Roberts (2013). “Validation of ANUGA hydraulic model using exact solutions to shallow water wave problems”, *Proceedings of the Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 423, IOP Publishing, pp. 012-029.

Osher, S. and J. Sethian (1988). “Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on hamilton-jacobi formulations”. *Journal of Computational Physics*, Vol.79, pp. 12-49.

Özdemir, H. J., Neal, P. Bates and F. Döker (2013). “1-D and 2-D urban dam-break flood modeling in Istanbul, Turkey”. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 16.

Raes, D. and P. Deproost (2003). “Model to assess water movement from a shallow water table to the root zone”. *Agricultural Water Management*, Vol. 62 No. 2 pp. 79-91.

Rezende, R. V., R. A. Almeida, A. A. U. de Souza and S. M. G. U. Souza (2015). “A two-fluid model with a tensor closure model approach for free surface flow simulations”. *Chemical Engineering Science*, Vol. 122, pp. 596-613.

Son, G. (2001). “A numerical method for bubble motion with phase change”. *Numerical Heat Transfer: Part B: Fundamentals*, Vol. 39, No. 5, pp. 509-523.

Sussman, M., P. Smereka and S. Osher (1994). “A Level Set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow”. *Communications in Computational Physics*, Vol. 114, pp. 146-159.

US Army Corps of Engineers (2016). *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual*. Hydrologic Engineering Center. University of Bristol, California, EUA.

Watanabe, Y. and N. Mori (2013). *Computational Wave Dynamics*, World Scientic Publishing Co Inc, Ch. Fundamental Computational Methods, pp. 45-73.

Xiong, Y. (2011). “A dam break analysis using HEC-RAS”, Journal of Water Resource and Protection, Vol. 3 No. 06, p. 370.