

## **Análise do escoamento de fluido no problema de rompimento de barragem por uso do método *Smoothed Particle Hydrodynamics***

### **Fluid flow analysis at dam break problem using the Smoothed Particle Hydrodynamics method**

#### **RESUMO**

**Eliton Voronovcz**  
[elitonvoronovcz@alunos.utfpr.edu.br](mailto:elitonvoronovcz@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil

**Adilandri Mércio Lobeiro**  
[alobeiro@utfpr.edu.br](mailto:alobeiro@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil

**Eduardo Masaji Endo**  
[endo@alunos.utfpr.edu.br](mailto:endo@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil

O *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) ou Hidrodinâmica das Partículas Suavizadas é um método de natureza Lagrangiana baseado em partículas, sem necessidade do uso de malha que demonstra ser interessante para estudo de problemas da engenharia, tal como os casos de rompimento de barragens. No presente artigo, o comportamento da água de um reservatório após o rompimento de uma comporta da barragem foi analisado, assim como a interação entre fluido e estrutura de um corpo rígido submetido às ações do escoamento da água. Utilizando o conjunto de códigos do dualSPPhysics e o software Paraview é possível obter a simulação e visualização do problema em tempo real, além de também obter dados quantitativos de velocidade do fluido em qualquer ponto e a força exercida nos obstáculos do escoamento, possibilitando o dimensionamento dos corpos rígidos que poderiam estar submetidos à força do fluxo de água.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Fluidodinâmica computacional*. Solução numérica. Equações de Navier Stokes.

#### **ABSTRACT**

Smoothed Particle Hydrodynamics is a particle-based Lagrangian method without the need for mesh that proves to be interesting for studying engineering problems, such as dam failure. In the present article, the behavior of water from a reservoir after the rupture of a dam gate was analyzed, as well as the interaction between fluid and structure of a rigid body subjected to the actions of water flow. Using dualSPPhysics code set and Paraview software, it is possible to obtain real-time simulation and visualization of the problem, as well as to obtain quantitative fluid velocity data at any point and the force exerted on the flow obstacles, enabling the dimensioning of rigid bodies that could be subjected to the force of water flow.

**KEYWORDS:** Computational Fluid Dynamics. Numerical Solution. Navier Stokes Equations.

**Recebido:** 19 ago. 2019.

**Aprovado:** 01 out. 2019.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

O método *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) ou Hidrodinâmica das Partículas Suavizadas é um método numérico idealizado para estudos astrofísicos (LUCY, 1977), que se estendeu para o campo da hidrodinâmica e se destacou pela sua facilidade para resolução de problemas da área.

O SPH é um método que utiliza partículas de natureza Lagrangeana para a discretização do problema, sem necessidade do uso de malha numérica. As partículas são responsáveis por carregar as funções de campo do problema, tal como servir de instrumento para a integração numérica das equações governantes do escoamento de um fluido Newtoniano ou equações de Navier-Stokes.

Segundo Fernandes:

Problemas de Interação Fluido Estrutura (IFE) são muito comuns, se manifestando nas mais diversas áreas da engenharia. Na engenharia civil, por exemplo, tem-se a ação do vento sobre as estruturas, escoamento em canais e vertedores, a água interagindo com barragens e estruturas *off-shore* dentre outros.

Portanto, tendo em vista a problemática da quebra de barragens e necessidade de uma forma de estudo para o escoamento do fluido contido na estrutura, é de grande interesse o uso de um método numérico para a problemática. Deste modo, o presente estudo tem como objetivo, apresentar o SPH como uma poderosa ferramenta para simulações de escoamento de fluidos, com a vantagem do SPH ser um dos métodos que não necessitam de malha como outros antigos, sendo muito refinado ao longo dos anos, tornando-se uma boa opção para aplicação em problemas da engenharia.

## FUNCIONAMENTO DO MÉTODO SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMICS

O método SPH foi criado para a solução das equações governantes da hidrodinâmica, onde as variáveis de campo (velocidade, densidade e etc) estão na forma de equações diferenciais parciais (EDPs) cuja solução analítica ainda não é possível, assim, para a evolução do problema, pode-se seguir a série de etapas chave do SPH descritas por Liu e Liu (2003) para a solução de um problema:

- o domínio do problema (fluido e estrutura) é discretizado na forma de partículas;
- o método de representação integral é empregado para aproximação das funções de campo. Segundo Monaghan (1992), a seguinte equação serve como representação de qualquer função de campo:

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x')W(x-x')dx' \quad (1)$$

Onde  $W$  é a função de suavização, que é uma aproximação da função delta de Dirac;

- a aproximação pelo núcleo é discretizada, trocando a representação por integral por uma representação por somatória para as funções de campo;

$$f(x) = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W_{ij} \quad (2)$$

- d) as funções de campo são evoluídas a cada passo de tempo;
- e) as funções de campo que aparecem nas EDPs são substituídas pelos valores da aproximação por partículas, gerando um conjunto de equações diferenciais ordinárias (EDOs) com respeito apenas ao tempo;
- f) as EDOs são resolvidas com algum método numérico de integração temporal (Runge-Kutta, Euler, *leapfrog*, Verlet e etc), obtendo a velocidade e posição de cada partícula em cada instante de tempo.

As equações de Navier-Stokes possuem diversas formas de serem representadas no SPH, no presente artigo foram utilizadas as seguintes expressões para a equação da continuidade e a equação do momento, respectivamente:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b v_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (3)$$

$$\frac{dv_a}{dt} = - \sum_b m_b \left( \frac{p_b + p_a}{\rho_b \cdot \rho_a} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W_{ab} + g \quad (4)$$

O termo da viscosidade  $\Pi_{ab}$  é dado por:

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} \frac{-\alpha \bar{c}_{ab} \mu_{ab}}{\rho_{ab}} & v_{ab} \cdot r_{ab} < 0 \\ 0 & v_{ab} \cdot r_{ab} \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

onde  $r_{ab}$  e  $v_{ab}$  é a diferença entre as posições e velocidade das partículas, respectivamente.  $\mu_{ab} = h v_{ab} \cdot r_{ab} / (r_{ab}^2 + \eta^2)$ ,  $\bar{c}_{ab} = 0.5(c_a + c_b)$  é a velocidade do som no meio,  $\eta^2 = 0.01h^2$  e  $\alpha = 0.01$ .

Monaghan (1994) introduziu a seguinte equação de estado para a obtenção do termo de pressão:

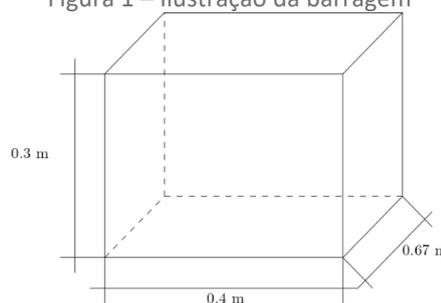
$$P = \frac{c_s^2 \rho_0}{\gamma} \left( \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right) \quad (6)$$

onde  $\rho_0$  é a massa específica do fluido e  $\gamma = 7$ .

## CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A barragem do reservatório de exemplo modelada no presente artigo possui o nível da água na cota de 0.3m, largura de 0.67m e comprimento de 0.4m, conforme ilustrado na Figura 1, enquanto o reservatório possui altura de 0.4m, comprimento de 1.6m e largura de 0.67m, sendo que apenas a barragem contém água.

Figura 1 – Ilustração da barragem



Fonte: autoria própria.

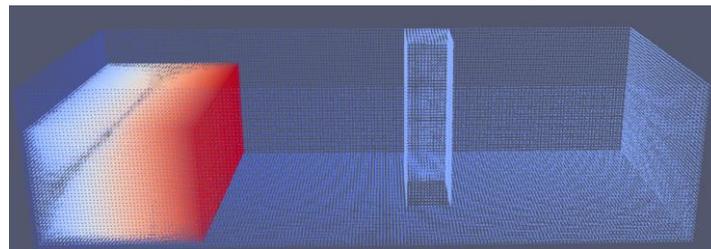
Neste problema, a comporta da barragem se rompe e o fluido contido nela começa a escoar devido a força gravitacional, nas proximidades da barragem existe uma estrutura rígida com altura de 0.45m, largura de 0.19m e comprimento de 0.12m, esta é situada a uma distância de 0.5m da comporta da barragem e 0,24m das laterais do reservatório.

O problema foi modelado utilizando o conjunto de códigos abertos em C++, Java e CUDA chamados dualSPHysics e onde o software de visualização dos resultados utilizado no artigo foi o Paraview.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A simulação do problema proposto representa uma barragem responsável por conter água se rompendo, bem como a forma como o fluido irá escoar nessa situação. Na Figura 2, é apresentada a simulação no instante de tempo  $t=0s$ , onde o fluido ainda se encontra contido pela barragem, porém com velocidade armazenada. Vale ressaltar que o campo em vermelho representa a velocidade que a partícula da simulação se encontra.

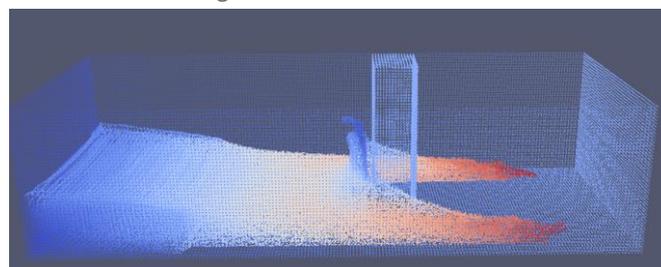
Figura 2 – Estado inicial da simulação



Fonte: Paraview.

Já a Figura 3 representa a simulação no instante de tempo  $t=0.5s$ , onde o fluido já está em movimento, inclusive atingindo o pilar da estrutura. Como neste caso o fluido já iniciou o processo de escoamento e perdeu velocidade durante este percurso, pode-se observar que a tonalidade da coloração em vermelho é menor que na Figura 2, sendo que em apenas alguns pontos que ainda contém alta velocidade.

Figura 3 – Instante  $t = 0.5s$

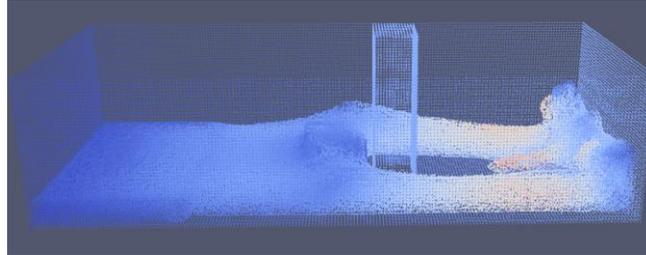


Fonte: Paraview.

Enquanto isso, a Figura 4 representa a simulação no instante de tempo  $t=1.0s$ , onde o fluido já está com baixa velocidade de movimentação. Pode-se observar que praticamente todas as partículas estão com tonalidade azul, indicando baixa

velocidade, sendo que apenas em alguns pontos possui uma coloração com tons em vermelho.

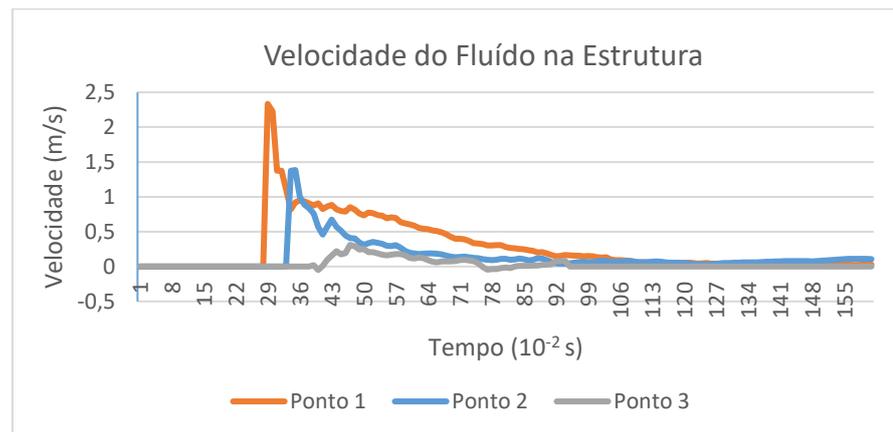
Figura 4 – Instante  $t = 1.0s$



Fonte: Paraview.

Utilizando o Excel, foram determinados três pontos diferentes para plotar os gráficos a velocidade do escoamento em m/s, sendo os pontos 1, 2 e 3 localizados a 0.05m da estrutura no centro da estrutura rígida, nas alturas 0.023, 0.073 e 0.123m de altura. Na Figura 5 é demonstrado o gráfico das velocidades pontuais citadas anteriormente.

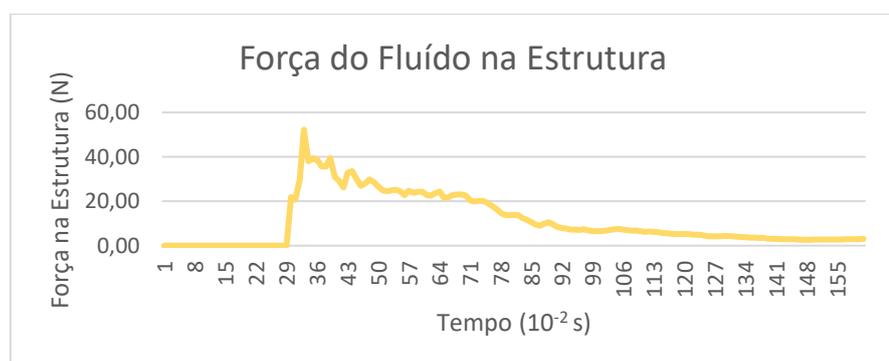
Figura 5 – Gráfico das velocidades pontuais



Fonte: dualSPHysics.

As forças atuantes na estrutura podem ser obtidas multiplicando a aceleração, da equação do momento pela massa do fluido, assim, as cargas atuantes em N a cada passo de tempo na estrutura rígida são demonstradas na Figura 6.

Figura 6 – Gráfico das cargas concentradas



Fonte: dualSPHysics.

A validação desse tipo de problema foi obtida por comparação com o artigo de Koshizuka e Oka (1996) pelos dados qualitativos entre a simulação e o experimento do artigo.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

A eficácia e conveniência do método SPH para solução de problemas da engenharia é algo que tem ganhado cada vez mais reconhecimento na comunidade acadêmica, assim como aprimoramentos na parte numérica, decorrida de estudos ao longo dos anos.

No problema estudado no artigo, os parâmetros podem ser alterados para se assemelhar mais a um caso real, assim como os dados quantitativos podem ser utilizados para dimensionamento das estruturas as cargas excepcionais decorridas do rompimento de uma barragem, possibilitando mais segurança nas estruturas, o que é um dos grandes objetivos da engenharia.

### AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR CM pela oportunidade em ser acadêmico nessa instituição e em desenvolver o projeto de pesquisa de iniciação científica, agradeço também à UTFPR CM pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do estudo.

### REFERÊNCIAS

LUCY, Leon B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. **The astronomical journal**, v. 82, p. 1013-1024, 1977.

FERNANDES, Jeferson Wilian Dossa. **Interação fluido-estrutura com escoamentos incompressíveis utilizando o método dos elementos finitos**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

LIU, Gui-Rong; LIU, Moubin B. **Smoothed particle hydrodynamics: a meshfree particle method**. World Scientific, 2003.

MONAGHAN, Joe J. Simulating free surface flows with SPH. **Journal of computational physics**, v. 110, n. 2, p. 399-406, 1994.

KOSHIZUKA, Seiichi; OKA, Yoshiaki. Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid. **Nuclear science and engineering**, v. 123, n. 3, p. 421-434, 1996.