

UTILIZAÇÃO DO MÉTODO SPH PARA ESTUDO DE ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOUROS EM DEGRAUS: A ENGENHARIA SIMULADA

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2023.4144

Flávia Aparecida Reitz Cardoso - flaviareitz@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Eduardo Masaji Endo - reitz@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Eudes José Arantes - eudesarantes@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Resumo: Os vertedouros são estruturas utilizadas com diversas funções, desde medição de vazão e controle e descarga do excesso de água a jusante, até os anexos a barragens, que devem ser devidamente dimensionados para não comprometer a estrutura. Os métodos numéricos têm sido cada vez mais estudados como ferramentas de pré-projeto e o método SPH é uma ferramenta promissora para o estudo da dinâmica dos fluidos. No presente trabalho, o software DualSPHysics foi utilizado para analisar o escoamento de água sobre um vertedouro em degraus com configuração 1 V: 0,75 H (53,13o), que é pouco reproduzido com o método, comparando os resultados experimentais e numéricos obtidos por outros autores. Assim, foram analisados critérios de convergência para o modelo, com base em verificações qualitativas para definir as constantes, parâmetros e especificações da simulação, para então comparar os perfis de velocidade e pressão de diferentes testes com diferentes dados de entrada da simulação no futuro. A detecção de superfície livre ao longo da calha e a evolução temporal dos ensaios também foram apresentadas. Tratamentos especiais foram utilizados para obter melhores resultados, que por sua vez se mostraram satisfatórios quando comparados dados de diferenças médias percentuais.

Palavras-chave: vertedor em degraus, vertedor de alta declividade, CFD, SPH.

UTILIZAÇÃO DO MÉTODO SPH PARA ESTUDO DE ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOUROS EM DEGRAUS: A ENGENHARIA SIMULADA

1 INTRODUÇÃO

Métodos numéricos têm se popularizado na engenharia com a emergência de processadores mais potentes, resultando na possibilidade de estudar problemas mais complexos e realistas, que não são de fácil execução para estudo experimental nem simplificados suficiente para uso da abordagem teórica (CHANSON, 2000).

O Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) ou hidrodinâmica das partículas suavizadas é um método numérico idealizado para problemas astrofísicos, que teve aplicação estendida para o uso no campo de dinâmica computacional dos fluidos (CFD) devido as particularidades da abordagem sem malha ou *meshfree* (CRESPO, 2007; DALRYMPLE; KNIO, 2001).

O uso de malha numérica para discretização de problemas da engenharia é de grande recorrência devido à necessidade desta para interpolações em métodos numéricos mais populares, tal como o Método dos Elementos Finitos (MEF), Diferenças Finitas (MDF) e Volumes Finitos (MVF). Malhas numéricas são formadas de pontos (ou nós) conectados por linhas (ou arestas), de forma que o conjunto represente o domínio do problema de forma discreta, podendo seguir a abordagem lagrangeana ou euleriana (ERIKSSON, 2018).

Problemas que tratam de escoamento em superfície livre são ideais para o SPH pois o rastreamento da interface entre diferentes fluidos (como água e ar) é algo intrínseco do método, uma vez que as partículas representam o escoamento do fluido. Tendo isso em vista, problemas como o comportamento da água em descarregadores em degraus mostram-se interessantes para o estudo em abordagem numérica com o SPH, complementando e confirmando os resultados de modelos físicos (CRESPO, 2007; DALRYMPLE; KNIO, 2001).

Vertedores em degraus são estruturas anexadas a barragens ou outros dispositivos de transporte de fluido, que tem diversos propósitos, como medição e controle de vazão e diminuir a energia cinética do escoamento ocasionado da transferência de água para jusante em períodos de cheia, impedindo a erosão do talude de jusante da barragem, o que comprometeria a estabilidade da estrutura (GOTOH et al., 2005).

Devido a importância destas estruturas, é interessante a análise de diferentes alternativas para meios de transferência de água para o leito natural do rio, sendo o SPH uma das ferramentas que podem ser usadas no pré-projeto devido a flexibilidade em testar diferentes geometrias para os vertedores visando a maximização da perda de energia do escoamento, além de seus resultados confiáveis para este tipo de problema, tal como demonstrado no trabalho de Nóbrega (2018).

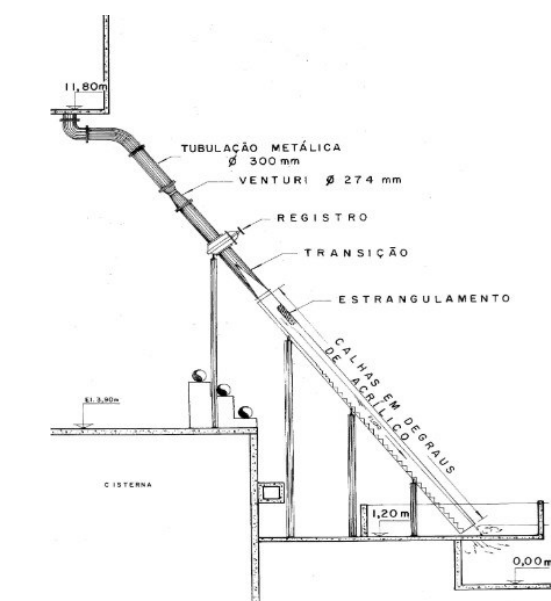
Face a estas considerações, este trabalho simulou o escoamento de fluido sobre um vertedouro em degraus com o método SPH e comparar as informações obtidas com outros métodos de análise simulado e prático.

2 METODOLOGIA

2.1 Experimento de estudo

Para comparação de resultados entre diferentes abordagens, utilizou-se a geometria das Figuras 1(a) e 1(b), esquematizada na Figura 2. Esta foi estudada experimentalmente por Olinger (2000), que foi posteriormente comparada numericamente com o *software* Ansys CFX (MVF), por Arantes (2007).

Figura 1 - Experimento realizado por Olinger (2000)



(a) Características gerais do modelo experimental.



(b) Vista geral do modelo em operação.

Fonte: OLINGER (2000).

Esta geometria apresenta degraus em proporção 1 V : 0,75 H (53,13º), seguidos de um trecho liso de 0,98 m. Neste experimento foram obtidos dados de pressão em um degrau instrumentado com piezômetros, indicado pela Figura 2 e obtido o perfil de velocidades na quina superior para diferentes dados de entrada de fluido.

Este experimento foi escolhido para simulação com SPH pois vertedouros em degraus com alta declividade da calha apresentam difícil reprodução e são de pouca recorrência na literatura. Outro fator importante é a não necessidade de reservatório a montante para reproduzir o escoamento sobre a soleira espessa, uma vez que para isso seria necessário aumentar a quantidade de partículas na simulação, encarecendo o custo computacional e aumentando o tempo de processamento (CRESPO, 2007; DALRYMPLE; KNIO, 2001).

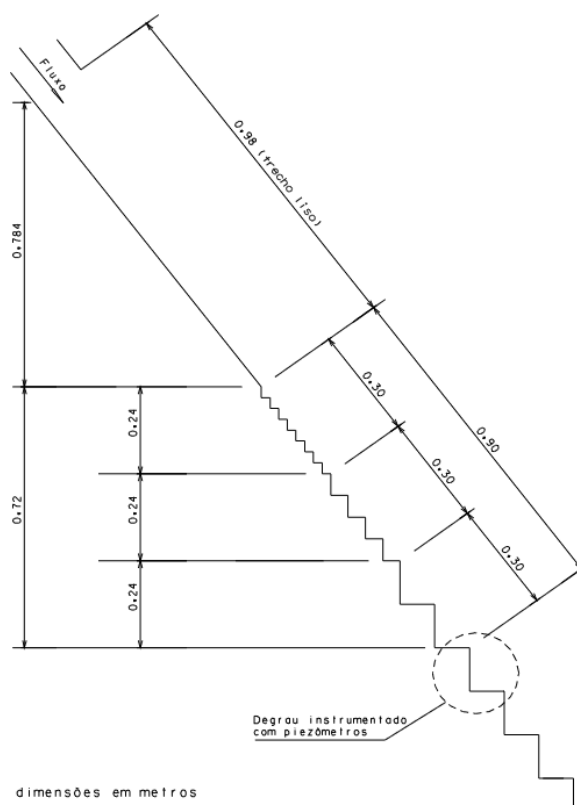
Foram estudados quatro ensaios de vazões diferentes para o experimento, que são os mesmos utilizados por Arantes (2007). Os dados de entrada com relação à altura da lâmina d'água y_0 e velocidade de entrada V são definidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores iniciais para y_0 e V para as quatro simulações

Ensaio	y_0 (cm)	V (m/s)
1	15	8,0
2		10,7
3	20	8,0
4		9,84

Fonte: Adaptado de Arantes (2007).

Figura 2 - Configuração de calha estudada por Olinger (2000) com degraus $0,12\text{m} \times 0,09\text{m}$



Fonte: OLINGER (2000).

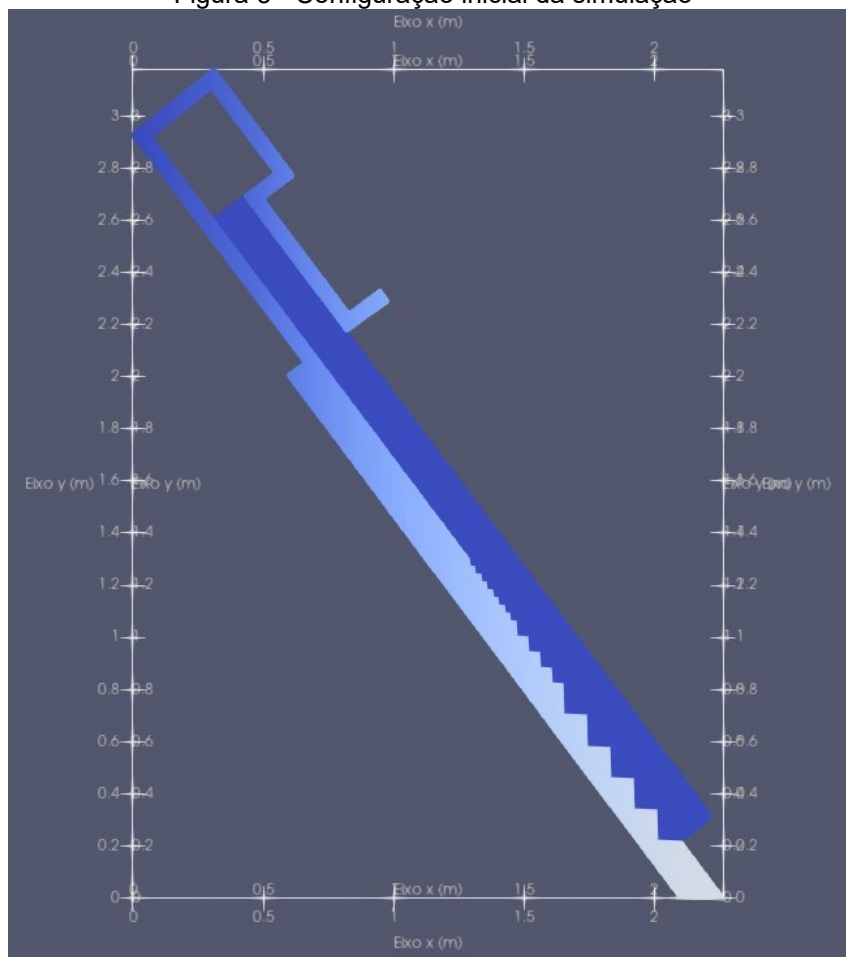
Para diminuir o tempo necessário de simulação, foi configurada uma camada de fluido altura de lâmina d'água y_0 e velocidade 0 sobre os degraus, afim de obter um melhor preenchimento destes. A configuração é ilustrada na Figura 3, onde a entrada de novas partículas de fluido é dada no início da seção de estrangulamento.

2.2 Utilização do DualSPHysics

As modelagens dos experimentos da literatura foram realizados com o *software* de código aberto DualSPHysics, que permite a leitura dos documentos com extensão ".xml", que funciona como um bloco de notas para salvar todas as informações necessárias para a simulação (parâmetros, constantes, geometria, tempo, etc.), que por sua vez são recebidas por um script ".bat" que gera a simulação com base nos diferentes códigos encontrados no diretório do programa, resultando em um conjunto de arquivos ".vtk" que representam a geometria e a evolução do escoamento, bem como os dados quantitativos do fluido uma vez que especificados (ERIKSSON, 2018).

O DualSPPhysics permite a leitura de dados geométricos no formato ".stl" ou desenhados com funções e coordenadas dentro do editor ".xml", para os desenhos de estrutura e estado inicial do fluido foi optado utilizar o software Autocad e exportar no formato referente, devido às facilidade de desenhar em CAD. O procedimento de desenho em texto e a ilustração do mesmo é dada pelas Figuras 4 (a) e 4 (b), respectivamente.

Figura 3 - Configuração inicial da simulação



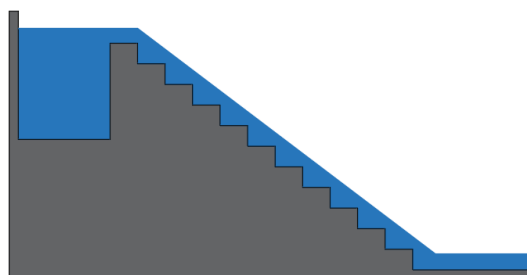
3 RESULTADOS

Para a análise de convergência da simulação foram utilizados critérios qualitativos feitos tomando como referência a evolução da simulação e levando em conta o preenchimento e recirculação de água nos degraus, bem como formato coerente da lâmina de água sobre a calha, característicos de um escoamento em regime do tipo *skimming*.

As diferentes configurações de maior importância utilizadas para os parâmetros que foram calibrados estão na Tabela 2, onde c_s é a velocidade do som, d_p a distância entre partículas, DDT termo de difusão de densidade, t_s tempo da simulação e t_p tempo de processamento. Configurações com diferentes valores para constante CFL e coeficiente do comprimento de suavização foram testadas, mas não demonstraram grande impacto na simulação.

Figura 4 - Desenho de uma geometria em ".xml"

```
<mainlist>
  <setshapemode>actual | bound</setshapemode>
  <setdrawmode mode="full" />
  <setmkbound mk="0" />
  <drawbeach mask="1|2">
    <point x="-0.01" y="1" z="0.3" />
    <point x="0" y="1" z="0.3" />
    <point x="0" y="1" z="0" />
    <point x="1.15" y="1" z="0" />
    <point x="1.15" y="1" z="-0.01" />
    <point x="-0.01" y="1" z="-0.01" />
  </drawbeach>
  <drawbeach mask="1|2">
    <point x="0.25" y="1" z="0.24" />
    <point x="0.35" y="1" z="0.24" />
    <point x="0.35" y="1" z="0.21" />
    <point x="0.45" y="1" z="0.21" />
    <point x="0.45" y="1" z="0.18" />
    <point x="0.55" y="1" z="0.18" />
    <point x="0.55" y="1" z="0.15" />
    <point x="0.65" y="1" z="0.15" />
    <point x="0.65" y="1" z="0.12" />
    <point x="0.75" y="1" z="0.12" />
    <point x="0.75" y="1" z="0.09" />
    <point x="0.85" y="1" z="0.09" />
    <point x="0.85" y="1" z="0.06" />
    <point x="0.95" y="1" z="0.06" />
    <point x="0.95" y="1" z="0.03" />
    <point x="1.05" y="1" z="0.03" />
    <point x="1.05" y="1" z="0.00" />
    <point x="0.25" y="1" z="0.00" />
  </drawbeach>
  <setmkbound mk="1" />
  <fillvoidpoint x="0.01" y="0" z="-0.005" />
  <fillvoidpoint x="0.26" y="0" z="0.02" />
</mainlist>
```



(a) desenho em comandos e coordenadas.

(b) geometria resultante.

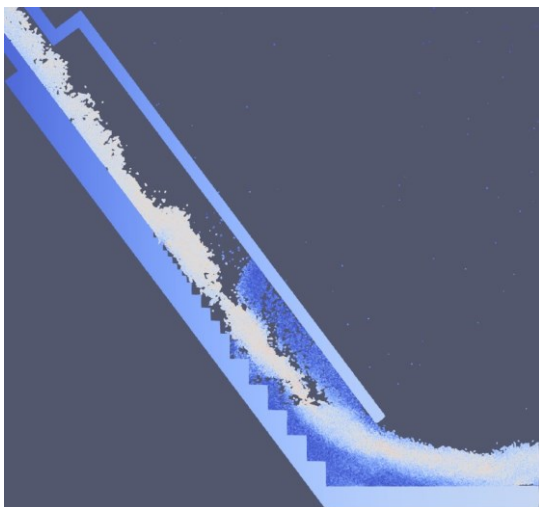
Tabela 2 - Diferentes configurações de parâmetros

Configuração	c_s (m/s)	d_p (m)	Tratamento da viscosidade	DDT	t_s (s)	t_p (h)
1	$10U_{max}$	0,0030	Laminar+SPS	-	1	1,44
2	$10U_{max}$	0,0020	Laminar+SPS	-	3	13,02
3	$10U_{max}$	0,0030	Artificial	-	1	0,96
4	$10U_{max}$	0,0015	Laminar+SPS	-	2	16,48
5	$10U_{max}$	0,0030	Laminar+SPS	Fourtakas (full)	2	2,89
6	$10U_{max}$	0,0015	Laminar+SPS	Fourtakas (full)	2	10,77
7	$10U_{max}$	0,0015	Laminar+SPS	Fourtakas	2	11,08
8	$10U_{max}$	0,0015	Laminar+SPS	Fourtakas (full)	2	4,08

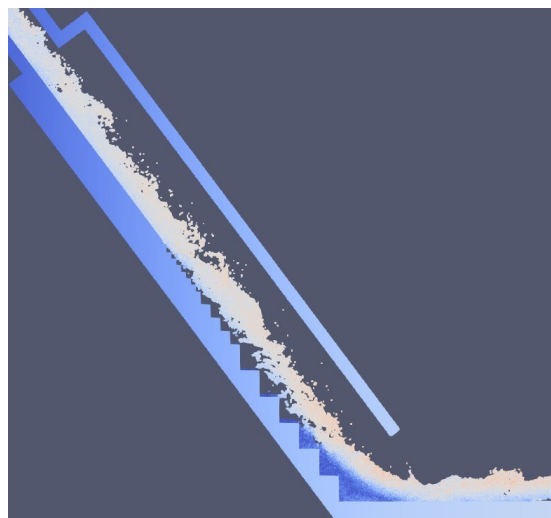
As figuras a seguir representam o escoamento do fluido em $t = t_s$, com partículas coloridas com relação à velocidade, cores mais avermelhadas representam velocidades maiores. Para as simulações das Figuras 5 (a), 5 (b) e 5 (c), considerou-se um limite sólido paralelo à calha, tal como no experimento de Olinger (2000).

Posteriormente este limite foi desconsiderado para diminuir o tempo de simulação necessário para escoar toda a camada de fluido inicial para fora do domínio. O limite horizontal também foi desconsiderado na Figura 5 (d) para que a carga hidráulica à jusante não afete os resultados do degrau de análise, uma vez que ambos se encontram próximos.

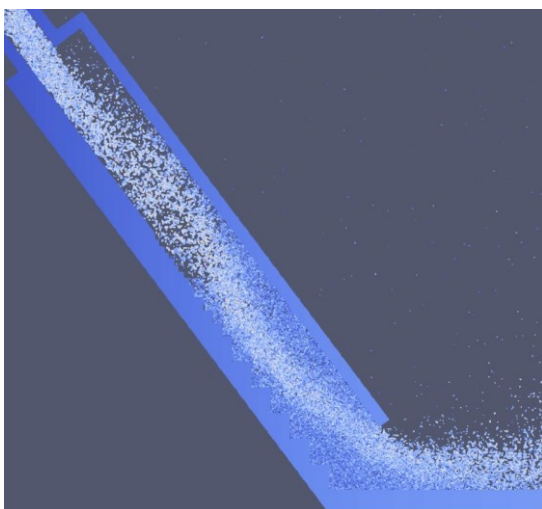
Figura 5 - escoamento das configurações 1 a 4 em $t = t_s$



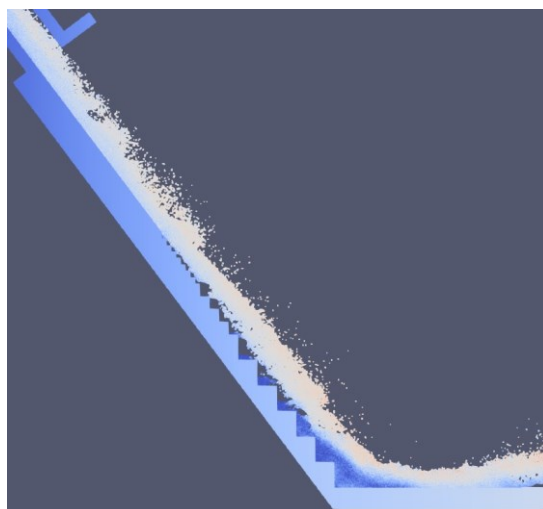
(a) escoamento da configuração 1 em $t = 1s$.



(b) escoamento da configuração 2 em $t = 3s$.

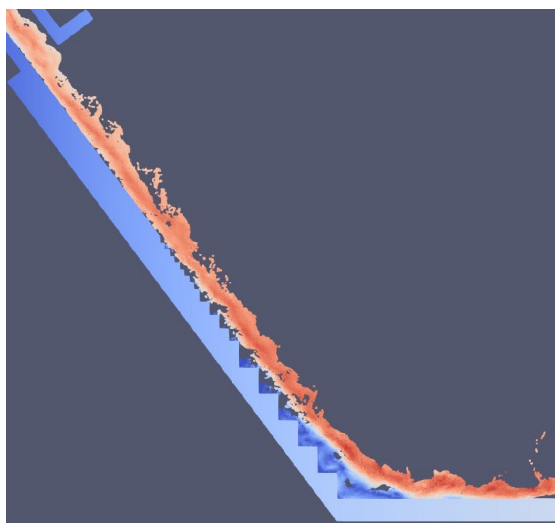


(c) escoamento da configuração 3 em $t = 1s$.

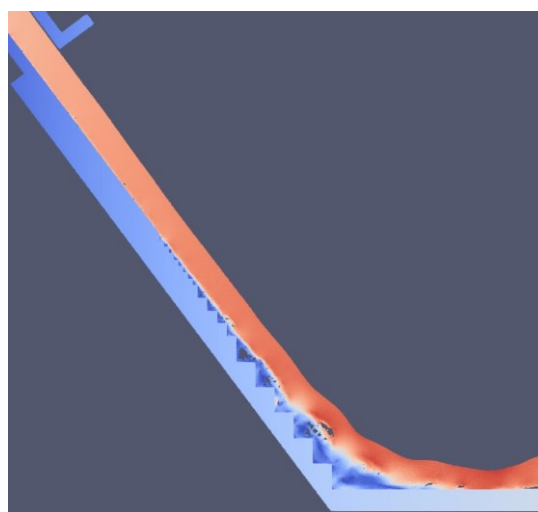


(d) escoamento da configuração 4 em $t = 2s$.

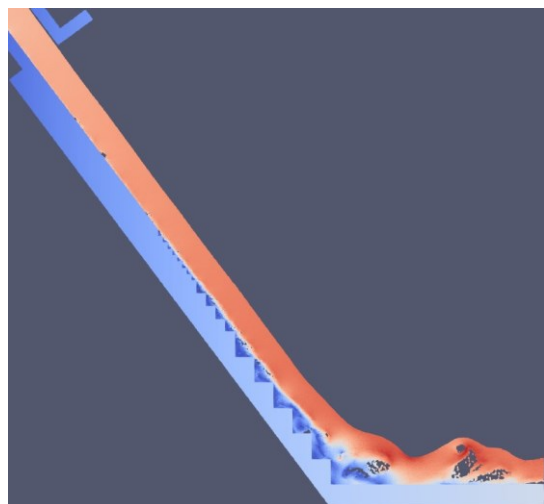
Figura 6 - escoamento das configurações 5 a 8 em $t = t_s$.



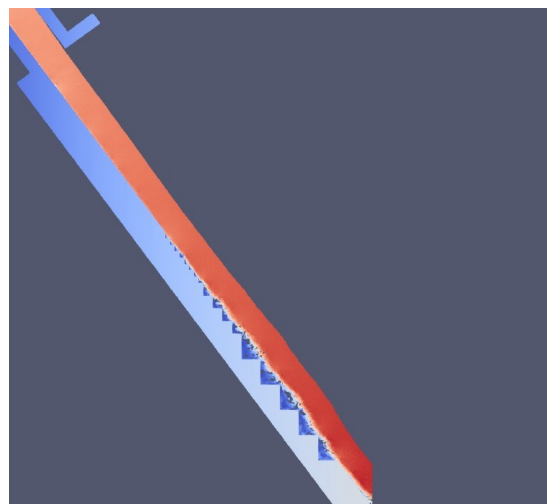
(a) escoamento da configuração 5 em $t = 2s$.



(b) escoamento da configuração 6 em $t = 2s$.



(c) escoamento da configuração 7 em $t = 2s$.



(d) escoamento da configuração 8 em $t = 2s$.

Até a simulação da configuração 5, considerou-se a entrada do fluido no ponto mais recuado da estrutura (ver Figura 3), com $y_0 = 20\text{cm}$. Posteriormente a entrada de fluido foi definida com relação ao começo do trecho de estrangulamento, afim de suspender o efeito de recirculação que ocorria na primeira situação, quando parte do escoamento encostava na superfície à perpendicular.

Com base nos diferentes resultados das simulações, pode-se observar que:

- a distância entre partículas influencia de forma exponencial no tempo de processamento;
- o tratamento artificial para viscosidade não fornece forças de coesão suficientes ao escoamento, porém foi testado apenas considerando coeficiente de viscosidade artificial de 10^{-6} . Este é um coeficiente empírico que requer testes para calibração do mesmo, portanto utilizou-se o esquema laminar + SPS que é mais recorrente em problemas de escoamento sobre vertedouros em degraus;
- o comportamento do escoamento e o devido preenchimento de todos os degraus só começaram a ser válidos considerando um termo de difusão de densidade (DDT).

Devido à alta velocidade, grande inclinação e pequeno trecho, o fluido em estado inicial deixa completamente o domínio (desconsiderando os que ficam em recirculação nos degraus) de forma relativamente rápida, sendo que para a última configuração pode-se perceber o fenômeno ocorrendo em $t = 0,64s$.

4 CONCLUSÃO

O SPH é um método numérico poderoso e eficiente para o estudo de escoamentos, porém a calibração é uma etapa importante e que deve ser feita com cuidado ao explorar novas geometrias (HUSAIN et al., 2017).

A configuração da calha 1 V : 0,75 H (53,13o) foi utilizada como geometria de estudo por ser pouco reproduzida com o SPH. Em especial, utilizou-se o experimento de Olinger (2000) para comparação de resultados, visto que seria também possível fazê-lo com os resultados numéricos de Arantes (2007), que utilizou o software CFX para simulação. Este experimento também é apropriado para análise, devido ao fato que à montante, o fluido é injetado sem passar por soleira espessa, assim não é necessário modelar um reservatório para reprodução do escoamento sobre o perfil, uma vez que este fenômeno encareceria o custo computacional que é de grande importância para a viabilidade deste estudo (GU et al., 2017).

Para a análise de convergência, percebeu-se que para o vertedor de alta declividade foi necessário utilizar uma resolução de partículas bem menor que aqueles usados por outros autores em vertedores de baixas e médias declividades, além disso, o custo está diretamente relacionado à distância entre partículas, que menores distâncias aumentam exponencialmente o tempo de processamento. Além disso, só foi possível obter um escoamento realista, com características visuais de *skimming flow*, por conta do termo de difusão de densidade proposto por Fourtakas et al. (2019), adicionado na mais recente versão do DualSPHysics 5.0 em julho de 2020.

Os resultados obtidos com o SPH em geral foram bem satisfatórios, podendo competir com *softwares* comerciais como o CFX, nesse campo de estudo, entretanto, simulações realistas com vertedouros de longas dimensões e reservatório anexado possuem demanda computacional considerável, quando necessário resoluções de partículas semelhantes ao usado neste trabalho. Nestes casos, pode-se considerar usar a paralelização de computadores, que é otimizada para os códigos do *software* parallelSPHysics, que é a versão paralelizada do SPHysics (semelhante do DualSPHysics escrita em FORTRAN) (GU et al., 2017).

Quanto aos desafios deste estudo e sugestões futuras, pode-se considerar a reprodução de vertedouros com mesmas inclinações, porém com resultados de medições experimentais ao longo de toda a calha para um vertedouro real. Isso pode ser possível utilizando os mesmos parâmetros de simulação, porém seria necessário maior poder de processamento para viabilização do trabalho, para isso pode ser interessante o uso de paralelização de computadores afim de reduzir o tempo de processamento necessário.

REFERÊNCIAS

ARANTES, E. J. **Caracterização do escoamento sobre vertedouros em degraus via CFD**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, 2007.

CHANSON, H. Historical development of stepped cascades for the dissipation of hydraulic energy. **Transactions of the Newcomen Society**, v. 72, p.295-318, 2000.

CRESPO, A. et al. How to numerically compute free surface elevation, velocity, pressure, forces. [S.l.], 2018.

CRESPO, A. et al. **Boundary conditions generated by dynamic particles in SPH methods**. EUA: Tech Science Press, 2007. 173 p.

DALRYMPLE, R. A.; KNIO, O. SPH modelling of water waves. *In*: Fourth Conference on Coastal Dynamics, p. 779-787, 2001.

ERIKSSON, J. **Evaluation of SPH for hydrodynamic modeling, using DualSPHysics**. Thesis (Doctoral) - UPPSALA Universitet, 2018.

FOURTAKAS, G. et al. Local uniform stencil (LUST) boundary condition for arbitrary 3-D boundaries in parallel smoothed particle hydrodynamics (SPH) models. **Computer & Fluids**, v. 19, p. 346-361, 2019.

GOTOH, H. et al. Lagrangian particle method for simulation of wave overtopping on a vertical seawall. **Coastal Engineering Journal**, v. 47, n. 2, p. 157-181, 2005.

GU, S. et al. SPHysics simulation of experimental spillway hydraulics. **Water**, v. 9, n. 12, p. 973, 2017.

HUSAIN, S. M. et al. Investigation of pressure variations over stepped spillways using smooth particle hydrodynamics. **Advances in Water Resources**, v. 16, 52-69, 2014.

OLINGER, J. C. **Contribuição ao estudo da distribuição de pressões nos vertedouros em degraus**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, 2000.

USE OF THE SPH METHOD TO STUDY THE FLOW ON STEPPED SPILLWAYS: SIMULATED ENGINEERING

Abstract: *Spillways are structures used with various functions, such as flow measurement and control and discharge of excess water downstream, to those attached to dams, which must be properly designed to avoid compromising the structure. Numerical methods have been increasingly studied as pre-design tools and the SPH method is a promising tool for the study of fluid dynamics. In the present work, the DualSPHysics software was used to analyze the flow of water over a spillway in steps with configuration 1 V: 0.75 H (53.13°), which is little reproduced with the method, comparing the experimental and numerical results obtained by other authors. Thus, convergence criteria for the model were analyzed, based on qualitative verifications in order to define the constants, parameters and specifications of the simulation, in order to then compare the velocity and pressure profiles of different tests with different simulation input data in the future. The free surface detection along the gutter and the temporal evolution of the tests were also presented. Special treatments were used to obtain better results, which in turn proved to be satisfactory when comparing data of mean percentage differences.*

Keywords: *stepped spillway, high grade spillway, CFD, SPH.*