

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/319939925>

MODELAÇÃO COMPUTACIONAL DO ESCOAMENTO DESLIZANTE SOBRE TURBILHÕES EM DESCARREGADORES EM DEGRAUS COM O MÉTODO SPH

Conference Paper · September 2017

CITATIONS

0

READS

160

4 authors:



Juliana Dorn Nóbrega
University of São Paulo

12 PUBLICATIONS 22 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Jorge Matos
Instituto Superior Técnico, University of Lisbon

54 PUBLICATIONS 519 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Harry Edmar Schulz
Hydro Engineering Solutions - Auburn - AL

271 PUBLICATIONS 635 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Ricardo Canelas
Bentley Systems

45 PUBLICATIONS 534 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Magnetohydrodynamics applied to a vehicle of unitary relative density [View project](#)



Smoothed Particle Hydrodynamics [View project](#)

SYSNO 3001600
PROD 22581

ACervo RESC

MODELAÇÃO COMPUTACIONAL DO ESCOAMENTO DESLIZANTE SOBRE TURBILHÕES EM DESCARREGADORES EM DEGRAUS COM O MÉTODO SPH

JULIANA DORN NÓBREGA¹; JORGE MATOS ²; HARRY EDMAR SCHULZ ³; RICADO BIRJUKOV'S CANELAS ⁴

¹ Doutoranda em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Av. Trabalhador São Carlense, 400, Centro, CEP 13566-590, Caixa Postal 359, São Carlos-SP, Brasil. Email: junobreg@gmail.com

² Professor, Secção de Hidráulica e Recursos Hídricos e Ambientais, Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal. Email: jorge.matos@tecnico.ulisboa.pt

³ Professor Titular, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Av. Trabalhador São Carlense, 400, Centro, CEP 13566-590, Caixa Postal 359, São Carlos-SP, Brasil. Email: harrieschulz@gmail.com

⁴ Investigador, CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal. Email: ricardo.canelas@tecnico.ulisboa.pt

Resumo

Neste estudo o método Hidrodinâmica Suavizada de Partículas (SPH) foi utilizado para simular o escoamento de água sobre um descarregador de cheias em degraus, com dimensões semelhantes a um modelo físico reduzido. O descarregador possui declividade típica de barragens de aterro (1V:2H), e opera sob regime de escoamento deslizante sobre turbilhões para os caudais estudados. Duas configurações geométricas foram consideradas, uma com paramento liso e outra em degraus de 2.5 cm de altura, utilizando caudais unitários iguais a 0.05 e 0.06 m²/s. Os resultados foram analisados em termos de alturas do escoamento e velocidades médias, através de comparações com medidas experimentais. Com relação às alturas do escoamento, observou-se que os resultados da simulação numérica são próximos dos valores experimentais tanto na soleira espessa quanto no canal descarregador, sendo os resultados numéricos obtidos para o descarregador de fundo liso sensivelmente melhores ao descarregador de fundo escalonado. No que diz respeito aos perfis de velocidade ao longo do descarregador, as velocidades experimentais foram melhor reproduzidas próximo à superfície livre, notadamente para o escoamento a montante do ponto de início de aeração, podendo o método auxiliar na previsão da secção de afloramento da camada limite turbulenta. No entanto, próximo à fronteira sólida, as diferenças podem ser significativas, principalmente no descarregador em degraus. Finalmente, o presente estudo foi importante para avaliar a aplicabilidade do método SPH a escoamentos com superfície livre, assim como avaliar as características do escoamento em descarregadores de declividade moderada.

Palavras-chave: Descarregadores em degraus, escoamento deslizante sobre turbilhões, método lagrangeano, Hidrodinâmica Suavizada de Partículas (SPH).

Tema: Investigação em Hidráulica e Recursos Hídricos.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas tem-se observado a utilização crescente de descarregadores de cheias com paramento em degraus, o que se deve, em grande parte, ao desenvolvimento de novas técnicas construtivas, nomeadamente o betão compactado por cilindros (BCC).

Os descarregadores de cheias em degraus, quando comparados com descarregadores com soleira convencional, permitem uma maior dissipação de energia, conduzindo a uma diminuição das dimensões da estrutura de dissipação de energia a jusante. Por outro lado, no âmbito da reabilitação de barragens de aterro com insuficiente capacidade de descarga, a construção de degraus em BCC tem sido considerada uma medida eficaz de proteção do paramento de jusante, em situações de cheia excepcional.

O objetivo do presente estudo foi simular numericamente o escoamento sobre um descarregador em degraus de declive moderado aplicando o método SPH (*"Smoothed Particle Hydrodynamics"* – traduzido como Hidrodinâmica Suavizada de Partículas), com uso do software DualSPHysics (Crespo *et al.* 2015), e comparar os resultados do modelo numérico com resultados experimentais. Para a geometria definida e os caudais unitários considerados, o descarregador opera sob regime de escoamento deslizante sobre turbilhões, regime este que ocorre para razões entre a altura crítica do escoamento e altura dos degraus (h_c/h_d) superiores a $h_c/h_d \sim 1$ (Matos e Meireles, 2014). Este regime caracteriza-se pelo preenchimento das cavidades dos degraus e pela formação de uma corrente principal acima da linha do fundo fictício (linha imaginária que liga as extremidades dos degraus).

Nos métodos sem malha, o domínio do fluido é representado por um conjunto de partículas que possuem propriedades como massa, volume, pressão e velocidade. Os métodos sem malha mais conhecidos são o SPH e MPS (em inglês *Moving Particle Semi-Implicit Method*), e são utilizados em diferentes áreas de estudo como astrofísica, mecânica dos sólidos e mecânica dos fluidos (Violeau, 2012; Gomez-Gesteira *et al.*, 2010; Fu e Jin, 2013). O SPH surgiu inicialmente para o tratamento de problemas em astrofísica (Gingold e Monaghan, 1977; Lucy, 1977; Monaghan, 1988), sendo posteriormente adaptado por Monaghan (1994) para a incorporação de fronteiras sólidas e simulação de escoamentos de superfície livre.

Alguns estudos que utilizaram os métodos SPH ou MPS em diferentes tipos de descarregadores (por exemplo, descarregador com paramento liso, descarregador em salto esqui, descarregador em poço), foram publicados por Saunders *et al.* (2014), Fadafan e Kermani (2015), Jafari-Nodoushan *et al.* (2016) e López *et al.* (2016). Em relação aos descarregadores em degraus em particular, pode-se mencionar o trabalho de López *et al.* (2011) que avaliou as características do escoamento em um descarregador com expansão lateral, e o trabalho de Husain *et al.* (2014) que investigou a distribuição das pressões nas faces dos degraus na região não-arejada.

Observa-se que o uso do método SPH para a simulação de escoamentos de superfície livre é relativamente recente e de certa forma limitado a alguns casos de estudo, apesar de apresentar vantagens para a simulação de fluidos com fragmentação da superfície livre e grandes deformações. Portanto, justifica-se o desenvolvimento de novos projetos de pesquisa nessa temática com o objetivo não somente de avaliar a aplicabilidade do método, mas também trazer contribuições para melhor quantificação das características do escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores de declividade moderada.

2. METODOLOGIA

1.1. Modelo experimental

O modelo numérico foi desenvolvido com base em um modelo físico de descarregador em degraus com ângulo de 26.6° com a horizontal (1V:2H), considerando um factor de escala de 10:1 e semelhança dinâmica de Froude entre modelo numérico e modelo físico. O mesmo factor de escala foi utilizado no trabalho de López *et al.* (2011), para satisfazer a condição de estabilidade de Courant-Friedrich-Levy (CFL) com intervalos de tempo computacionais maiores.

O modelo físico é constituído por um reservatório de alimentação, um compartimento de restituição, circuitos de alimentação e recirculação da água e por um canal de secção retangular, no qual se insere o descarregador. O canal possui 8.0 m de comprimento e 0.7 m de largura sendo limitado a montante por um reservatório de alimentação e a jusante por um compartimento de restituição onde se encontra uma comporta de charneira articulada na base, que permite regular a localização do ressalto hidráulico a jusante do descarregador. O descarregador em PVC de 0.50 m de altura é constituído por uma soleira espessa horizontal com 0.50 m de comprimento e por um canal descarregador, instalado a meio do canal, com paramento liso ou em degraus de altura “ h_d ” igual a 0.050 ou 0.025 m.

Os dados experimentais foram obtidos previamente por André e Ramos (2003) e Cabrita (2007). As alturas do escoamento na soleira espessa e no descarregador foram medidas com recurso a um hidrómetro e por leitura visual a partir de regras graduadas nas paredes laterais do canal. Os dados pontuais de velocidade do escoamento foram determinados para diferentes posições longitudinais ao longo do canal utilizando um tubo de Pitot.

1.2. Metodologia numérica

1.2.1. Método SPH

O método SPH é uma técnica de interpolação e representação discreta aplicável a domínios de meio contínuo com partículas que se movem com o fluido, e que possuem características físicas como massa, velocidade, energia, pressão e posição (Liu e Liu, 2003).

As equações de conservação de massa e quantidade de movimento para fluido incompressível na forma SPH são expressas pelas Equações 1 e 2. A pressão é calculada explicitamente pela equação de estado de Tait para fluido quase-compressível (Equação 3), a qual relaciona a pressão com a densidade do fluido.

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{\Gamma} + \mathbf{g} \quad (2)$$

$$p = \frac{\rho_0 c_0}{\gamma} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (3)$$

em que: ρ – massa específica do fluido; μ - viscosidade dinâmica do fluido; $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ – densidade de referência da água; \mathbf{u} - vetor velocidade; \mathbf{g} - aceleração da gravidade; p - pressão; $\mathbf{\Gamma}$ - termos dissipativos; c_0 - velocidade do som numérica ($\geq 10 \cdot U_{\max}$); $\gamma = 7$ - expoente da equação de Tait para a pressão.

A discretização numérica das equações governantes na forma não contínua envolve a aproximação dos valores de uma função F em uma partícula “a” pela interpolação com as informações nas partículas vizinhas “b” dentro de um domínio de influência, ponderadas por meio de uma função de suavização do tipo kernel – Equação 4 (Liu e Liu, 2003). A Equação 5 representa a função Kernel do tipo Wendland utilizada no presente estudo.

$$F(\mathbf{r}_a) \approx \sum_b F(\mathbf{r}_b) \frac{m_b}{\rho_b} W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h) \quad (4)$$

$$W(r, h) = \alpha_D \begin{cases} \left(1 - \frac{q}{2}\right)^4 (1 + 2q) & 0 \leq q \leq 2 \\ 0 & 2 < q \end{cases} \quad (5)$$

em que: m, ρ - a massa e a massa específica da partícula, respectivamente; \mathbf{r} – vetor posição da partícula “a” e “b”; h - comprimento da função kernel; $\alpha_D = 7/4\pi \cdot h^2$ em 2D e $\alpha_D = 21/16\pi \cdot h^3$ em 3D; $q = r/h$ - distância adimensional entre duas partículas, que relaciona a distância entre elas e o comprimento da função kernel.

As equações governantes do escoamento na forma SPH são representadas pelas Equações 6 a 8. A Equação 6 para a conservação de massa apresenta um termo adicional que reduz as flutuações de densidade do fluido, sendo conhecida como formulação Delta-SPH. A Equação 7 da quantidade de movimento foi desenvolvida por Gotoh *et al.* (2001) com base no modelo para escala de turbulência de sub-partícula (em inglês, SPS “sub-particle scale turbulence”), que considera o efeito de dissipação de energia por viscosidade laminar e por viscosidade turbulenta.

$$\frac{d\rho_a}{dt} = - \sum_b m_b \mathbf{u}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} + 2\delta h \sum_b m_b \bar{c}_{ab} \times \left(\frac{\rho_a}{\rho_b} - 1 \right) \frac{1}{\mathbf{r}_{ab}^2 + 0.01 h^2} \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{u}_a}{dt} = & - \sum_b m_b \left(\frac{p_a}{\rho_a^2} + \frac{p_b}{\rho_b^2} \right) \nabla_a W_{ab} + \mathbf{g} + \sum_b m_b \left(\frac{4\nu_0 \mathbf{r}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b)(\mathbf{r}_{ab}^2 + 0.01 h^2)} \right) \mathbf{u}_{ab} \\ & + \sum_b m_b \left(\frac{\bar{\tau}_{ij}^b}{\rho_b^2} + \frac{\bar{\tau}_{ij}^a}{\rho_a^2} \right) \nabla_a W_{ab} \end{aligned} \quad (7)$$

$$p_a = \frac{\rho_0 c_0^2}{\gamma} \left[\left(\frac{\rho_a}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (8)$$

em que: W_{ab} - função kernel de suavização; δ – coeficiente da função delta-SPH; $\nu_0 = \mu/\rho$ viscosidade cinemática da água; $\bar{\tau}_{ij}$ – componente do tensor de tensões; $\bar{c}_{ab} = (c_a + c_b)/2$ - velocidade média do som; $\mathbf{u}_{ab} = \mathbf{u}_a - \mathbf{u}_b$; $\mathbf{r}_{ab} = \mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b$.

As equações governantes são solucionadas a cada passo de tempo de simulação por um algoritmo de integração temporal, como o método Symplectic. O intervalo de tempo por sua vez deve satisfazer a condição de estabilidade de Courant-Friedrich-Levy (CFL), definida pelas Equações 9 a 11.

$$\Delta t = C \cdot \min(\Delta t_f, \Delta t_{cv}) \quad (9)$$

$$\Delta t_f = \min_a \left(\sqrt{h/|f_a|} \right) \quad (10)$$

$$\Delta t_{cv} = \min_a \frac{h}{c_s + \max_b \left| \frac{h \mathbf{u}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab}}{r_{ab}^2 + 0.01h^2} \right|} \quad (11)$$

em que: C - constante da Equação 9; $|f_a|$ - força por unidade de massa.

As posições das partículas são actualizadas pela integração das derivadas temporais de velocidade $\mathbf{u}_a = d\mathbf{r}_a/dt$. Os parâmetros que estão disponíveis no software, tais como velocidade do som, coeficiente CFL, tipo de kernel, algoritmo de integração temporal, entre outros parâmetros, foram adoptados inicialmente por meio de análise visual das simulações, observando-se o preenchimento dos degraus e a estabilidade do nível da água a montante do descarregador. O modelo de viscosidade que apresentou melhores resultados, no que diz respeito ao preenchimento dos degraus com as partículas de fluido, foi o modelo de viscosidade Laminar e turbulência SPS (*sub-particle scale*) apresentado inicialmente por Gotoh *et al.* (2001), em comparação com o modelo de viscosidade artificial. Em uma segunda etapa, os parâmetros foram calibrados mediante a comparação com os dados experimentais. Informações complementares a respeito do método podem ser encontradas por exemplo no trabalho de Crespo *et al.* (2015) que descreve a formulação implementada no código do software DualSPHysics.

1.2.2. Modelo numérico

A modelagem numérica foi desenvolvida para os caudais unitários iguais a 0.05 e 0.06 m²/s, para o descarregador em degraus com as dimensões previamente referidas e o mesmo descarregador com paramento liso. No software DualSPHysics não é possível definir um caudal constante no domínio de entrada. Dessa forma, definiu-se um volume inicial de partículas de fluido como mostra a Figura 1, com base nas alturas do escoamento experimentais no canal de aproximação, ao longo do descarregador e na altura supercrítica do ressalto na bacia de dissipação a jusante. As partículas que saem no domínio de saída retornam ao domínio de entrada por meio de uma condição de periodicidade, sendo o número de partículas constante ao longo da simulação. O número total de partículas depende da distância inicial entre as mesmas e da altura de água inicial de fluido, como apresentado na Figura 1.

A partir da condição estática inicial, a massa de fluido no descarregador é acelerada por gravidade, transmite quantidade de movimento para a massa de fluido da bacia de dissipação, iniciando a recirculação no canal. O escoamento não atinge regime permanente mesmo após um período completo de simulação computacional, pois a altura de água no reservatório de

entrada varia ao longo do tempo devido à recirculação do fluido, ressaltando-se aqui que esta variação é reduzida, com desvio-padrão dos valores instantâneos das alturas do escoamento aproximadamente inferior a 1.5% das alturas médias simuladas. Por essa razão, as medidas de velocidade e alturas do escoamento foram determinadas a partir da média temporal dos valores instantâneos, após certo tempo de simulação em que o escoamento atingiu condições praticamente permanentes no reservatório a montante. No total, foram consideradas 2000 iterações, com intervalo de saída dos resultados igual a 0.01 segundos (no total 20 segundos de simulação), sendo a média dos valores calculada para o intervalo entre 12 e 20 segundos. A Figura 2 apresenta um detalhe do campo de velocidades para a simulação com caudal de 42 L/s, no instante $t=20$ s. As simulações foram efetuadas utilizando uma placa GPU Tesla K20C, com 13 Multiprocessadores (2496 núcleos) e memória global de 5061 MB. O Quadro 1 apresenta as características dos casos estudados. O Quadro 2 apresenta o número de partículas de fluido " N_p " considerando uma distância inicial entre as mesmas " dp " igual 0.015 m (e " dp " igual 0.010 m no Teste 1.1.1), tempo de simulação e alturas iniciais de fluido (ver Figura 1). A razão entre a distância inicial entre partículas e a altura dos degraus " dp/h_d " foi igual a 1:16.7 e 1:25, para " dp " 0.015 e 0.010 m, respectivamente. O número de partículas da fronteira fixa " N_b " foi aproximadamente igual a 80 000 partículas em todas as simulações. A partir das simulações foram gerados perfis de velocidade e de alturas do escoamento ao longo da soleira espessa e descarregador, comparando-se com os dados experimentais obtidos por André e Ramos (2003) e Cabrita (2007). Os resultados também foram comparados com os resultados da modelação numérica desenvolvida por Lúcio (2015) com recurso ao software FLOW-3D®, para a região da soleira espessa.

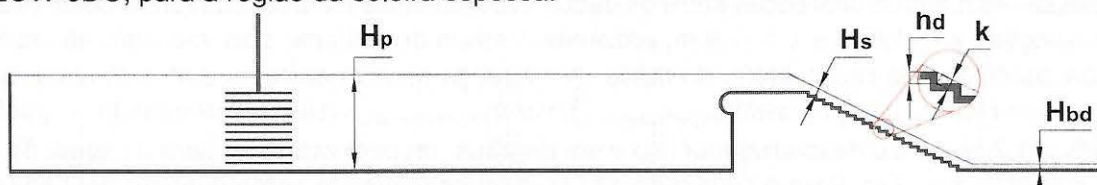


Figura 1. Alturas de água iniciais do modelo numérico.

Quadro 1. Configuração e caudais dos casos de estudo.

Configuração	Testes	dp (m)	Q (m ³ /s)	q (m ² /s)	h_c (m)
Liso	Teste 1.1	0.015	0.035	0.050	0.045
	Teste 1.1.1	0.010	0.035	0.050	0.045
	Teste 1.2	0.015	0.042	0.060	0.063
$h_d = 2.5$ cm	Teste 2.1	0.015	0.035	0.050	0.045
	Teste 2.2	0.015	0.042	0.060	0.063

dp é a distância inicial entre as partículas de fluido; q é o caudal unitário; d_c é a altura crítica do escoamento.

Quadro 2. Alturas de água iniciais, número de partículas e tempo de simulação.

Testes	N_p ($\times 10^6$)	T_s (h)	H_p (m)	H_s (m)	H_{bd} (m)
Teste 1.1	1.243	18.3	6.07	3.90	3.00
Teste 1.1.1	2.971	56.6			
Teste 1.2	1.248	18.1			
Teste 1.2	1.278	19.1			
Teste 2.2	1.284	18.8			

N_p – número de partículas de fluido; T_s - tempo de simulação.

As dimensões do modelo consideram factor de escala 10:1.

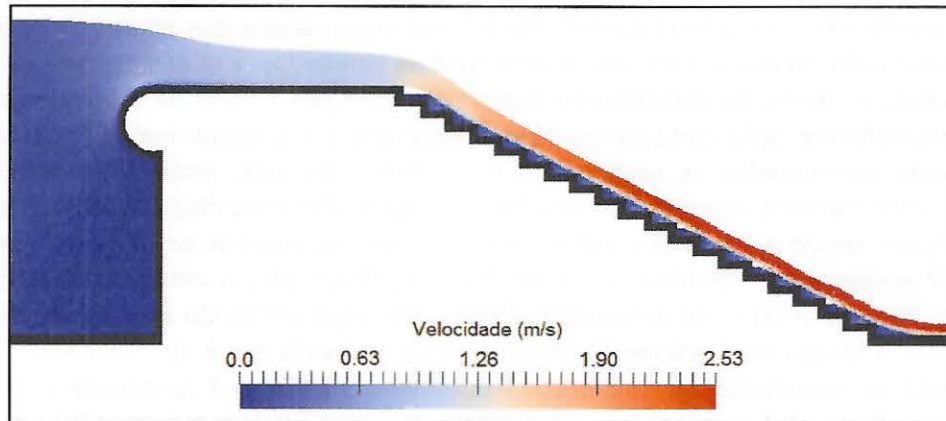


Figura 2. Campo de velocidades para o Teste 2.2: $Q = 42 \text{ L/s}$, $h_d = 2.5 \text{ cm}$, $t = 20 \text{ s}$.

3. RESULTADOS

3.1. Alturas de água ao longo do canal descarregador e na soleira espessa

A Figura 3 apresenta as alturas médias do escoamento em diferentes secções do reservatório a montante do descarregador, em relação à posição $x = 0$ que corresponde ao início da soleira espessa. As maiores diferenças entre os dados experimentais e numéricos foram observadas nas secções $x = -1.0 \text{ m}$ e $x = -2.0 \text{ m}$, próximas à grade de entrada, pois são mais afectadas pelas condições de recirculação do fluido. A diferença relativa entre os dados foi calculada como $\delta = (\text{valor}_{\text{numérico}} - \text{valor}_{\text{experimental}}) / \text{valor}_{\text{experimental}} \times 100\%$, fornecendo δ igual a 1.5 % e 1.2 % para o descarregador liso e em degraus, respectivamente, para o caudal de 35 L/s e secção $x = -2 \text{ m}$. Para o caudal de 42 L/s, a maior diferença percentual foi verificada na posição $x = -1.0 \text{ m}$, com δ igual a 1.4 % para o descarregador em degraus.

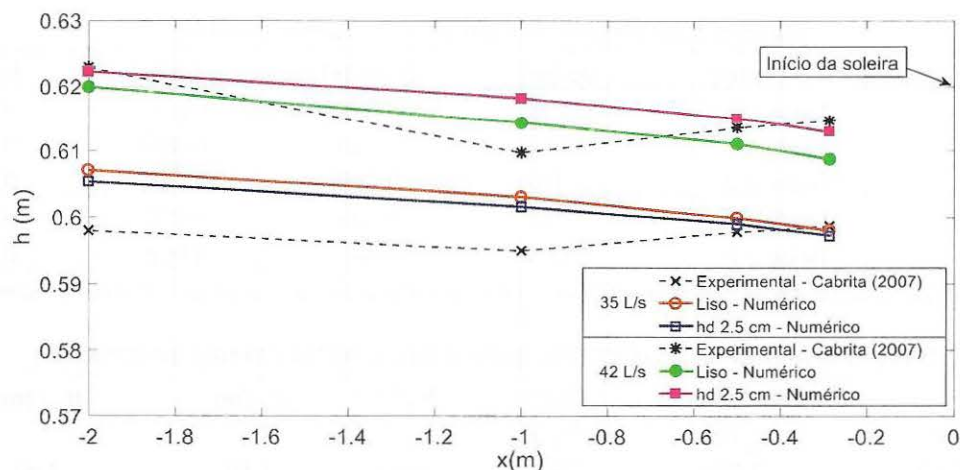


Figura 3. Alturas médias do escoamento no reservatório a montante do descarregador.

As alturas do escoamento numéricas ao longo da soleira espessa são apresentadas na Figura 4, sendo comparadas com os dados experimentais e com os dados numéricos de Lúcio (2015), que simulou o escoamento para as mesmas condições experimentais, porém para

degraus com 5 cm de altura. Os dados experimentais foram definidos em quatro secções ao longo do descarregador, distantes 0.125, 0.25, 0.375 e 0.476 m a partir do início da soleira espessa. Para o caudal de 35 L/s, os valores numéricos das alturas do escoamento foram aproximadamente iguais em todas as secções para a configuração do descarregador liso e em degraus. No entanto, para o caudal de 42 L/s, as alturas médias do escoamento para o paramento liso e em degraus apresentaram valores diferentes, principalmente nas secções mais a montante da soleira espessa. As diferenças relativas das alturas do escoamento foram maiores na secção 3 ($x = 0.375$ m), e estão limitadas a $\delta = 8\%$.

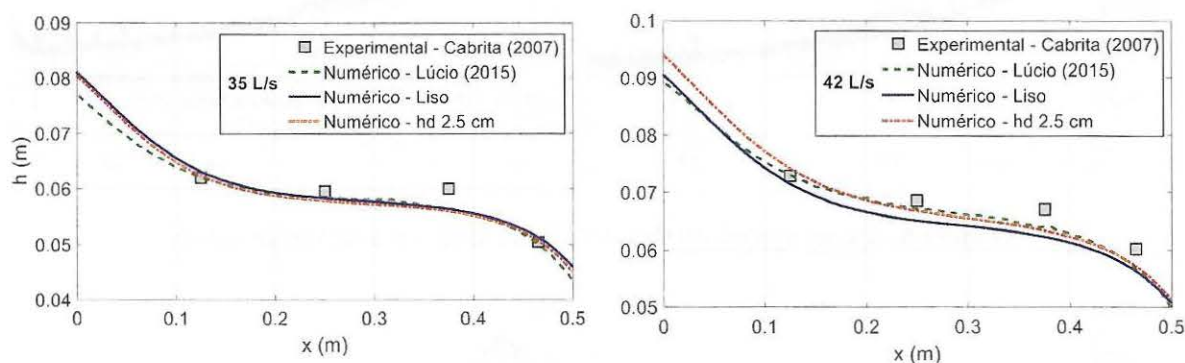


Figura 4. Alturas médias do escoamento ao longo da soleira espessa.

As alturas do escoamento ao longo do canal descarregador também foram determinadas para as diferentes simulações e são apresentadas nas Figuras 5 e 6 para o descarregador liso e em degraus, respectivamente. As alturas do escoamento foram definidas perpendicularmente ao fundo do canal, ou à linha de fundo fictício (para o descarregador em degraus).

As alturas do escoamento do descarregador liso são próximas dos valores experimentais, sendo as diferenças relativas inferiores para as leituras efectuadas no centro do canal, em comparação com os valores observados junto à parede esquerda (ver Figura 5). Para os valores referentes ao centro do canal, as diferenças relativas foram iguais a $\delta = 6.1\%$ e $\delta = 3.3\%$ (para “ dp ” 0.010 m) para os caudais de 35 L/s e 42 L/s, respectivamente. Na região compreendida entre as posições $x = 0.3$ e $x = 0.5$ m, as alturas do escoamento simuladas usando $dp = 0.015$ m apresentaram um comportamento anômalo, com um aumento das alturas do escoamento nesse intervalo. Para um teste realizado com distância $dp = 0.010$ m e caudal de 35 L/s, o mesmo comportamento não foi observado, inferindo-se que o aumento das alturas do escoamento ocorre devido à discretização do domínio do fluido em partículas com $dp = 0.015$ m, e que esta não é suficiente para representação satisfatória do perfil das alturas do escoamento. Em contrapartida, diminuindo “ dp ” exige-se maior tempo computacional e memória de armazenamento. Para “ dp ” 0.010 m (Teste 1.1.1), o tempo de simulação foi de 56.6 horas, 3 vezes superior ao tempo de simulação com “ dp ” 0.015 m (Teste 1.1).

Em relação ao descarregador em degraus (ver Figura 6), as alturas numéricas foram em geral subestimadas em comparação com os dados experimentais. Os resultados apresentaram maior concordância com as leituras experimentais realizadas na parede direita do canal, sendo as diferenças relativas iguais $\delta = 7.2\%$ e $\delta = 7.4\%$ para os caudais de 35 L/s e 42 L/s, respectivamente. Como as leituras experimentais foram realizadas na parede lateral do canal

onde há certo empolamento do fluido junto à parede, os dados experimentais das alturas do escoamento podem ser superiores em comparação com os que seriam obtidos no eixo do descarregador, o que pode justificar pelo menos em parte as alturas do escoamento que foram subestimadas, principalmente junto à parede esquerda.

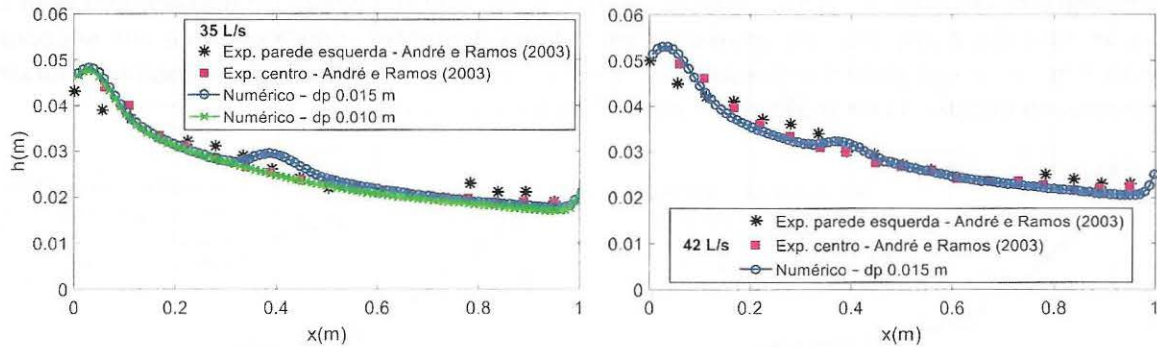


Figura 5. Alturas médias do escoamento ao longo do descarregador liso.

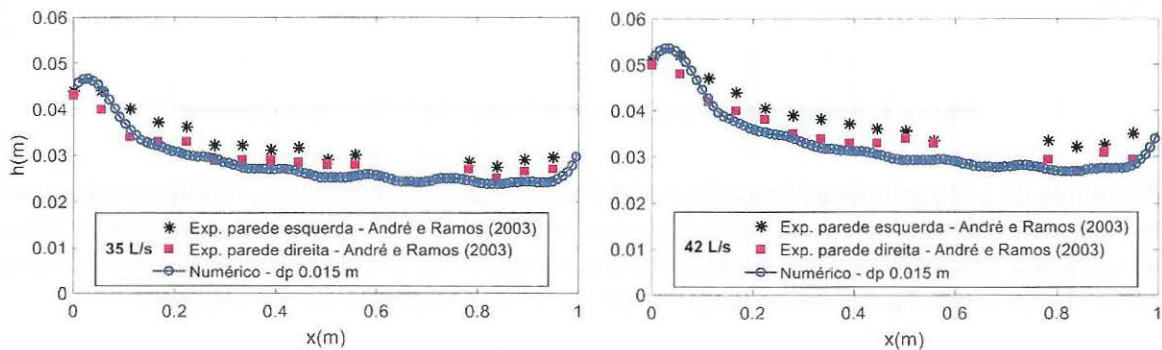


Figura 6. Alturas médias do escoamento ao longo do descarregador em degraus com 2.5 cm de altura.

3.2. Perfis de velocidade ao longo da soleira espessa e do canal descarregador

Os perfis de velocidade ao longo da soleira espessa foram determinados para as secções $x = 0; 0.125; 0.250$ e 0.464 m a partir do início da soleira. A Figura 7 apresenta a distribuição de velocidades numérica para o caudal de 35 L/s e descarregador liso, em conjunto com os dados experimentais de Cabrita (2007) e resultados numéricos de Lúcio (2015) com uso do FLOW-3D®. Os perfis obtidos com o SPH são relativamente próximos aos demais perfis apresentados, porém apresentam menores velocidades próximo à fronteira sólida, e as velocidades não são constantes externamente à camada limite turbulenta. As maiores velocidades para os maiores valores de " h " podem ser resultantes das condições de entrada no domínio, devido à recirculação do fluido.

A Figura 8 apresenta os perfis de velocidade ao longo do descarregador para algumas verticais perpendiculares ao fundo (ou fundo fictício), tanto para o descarregador liso e em degraus, e caudal de 35 L/s. De forma geral, observou-se que o método SPH é capaz de prever de forma satisfatória a distribuição de velocidades, principalmente próximo à superfície livre do escoamento. Para as posições verticais próximo à linha de fundo fictício, as diferenças são mais significativas e as velocidades são subestimadas. Comparando-se por exemplo os

resultados obtidos nos Testes 1.1 e 1.1.1, em que foram utilizadas duas resoluções de partículas “ dp ” iguais a 0.015 m e 0.010 m, pode-se observar que há melhor aproximação dos resultados simulados com os resultados experimentais à medida em que dp diminui. Resultados similares para os perfis de velocidade foram obtidos por Jafari-Nodoushan *et al.* (2016) com o uso do SPH em descarregadores de perfil liso. Como os valores de velocidade foram subestimados no estudo de Jafari-Nodoushan *et al.* (2016), os autores optaram por corrigir as velocidades pela utilização de uma lei logarítmica de parede para melhorar os resultados junto às fronteiras.

Para as primeiras verticais em ambos os descarregadores liso e em degraus (ver verticais 2 e 3 da Figura 8), as velocidades foram significativamente subestimadas no modelo numérico para menores valores de h (aproximadamente $h \sim 0.01$). No entanto, para as verticais mais a jusante, os perfis de velocidade do descarregador liso são mais próximas dos perfis experimentais, mesmo para menores “ h ”, enquanto que para os descarregadores em degraus, esse distanciamento se mantém ainda para secções mais distantes do início do descarregador.

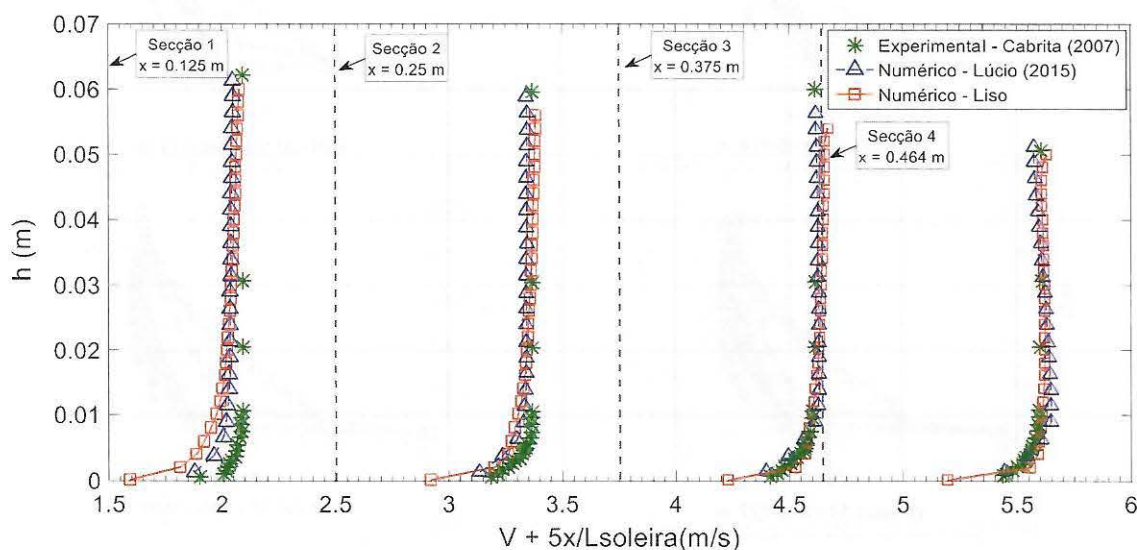


Figura 7. Velocidade ao longo da soleira espessa para o Teste 1.1: $Q = 35$ L/s, liso. $L_{soleira}$ é o comprimento da soleira igual 0.5 m.

Pela observação dos gráficos de velocidade da Figura 8 para o descarregador em degraus e caudal de 35 L/s, observa-se que a secção de afloramento da camada limite ocorre próximo à vertical 12, distante 0.690 m do início do descarregador (com origem no final da soleira espessa), o que está coerente com as observações experimentais. André e Ramos (2003) apresentaram valores de referência para a secção de afloramento da camada limite turbulenta por meio de observação visual nas paredes laterais do canal e frontal à superfície livre. Segundo os autores, para o caudal de 35 L/s, a posição de início de aeração varia entre o 11º e 15º degrau (dependendo da posição de referência da leitura visual – parede esquerda, direita e frontal), enquanto que para o caudal de 42 L/s, o afloramento da camada limite é observado entre o 14º e 17º degrau.

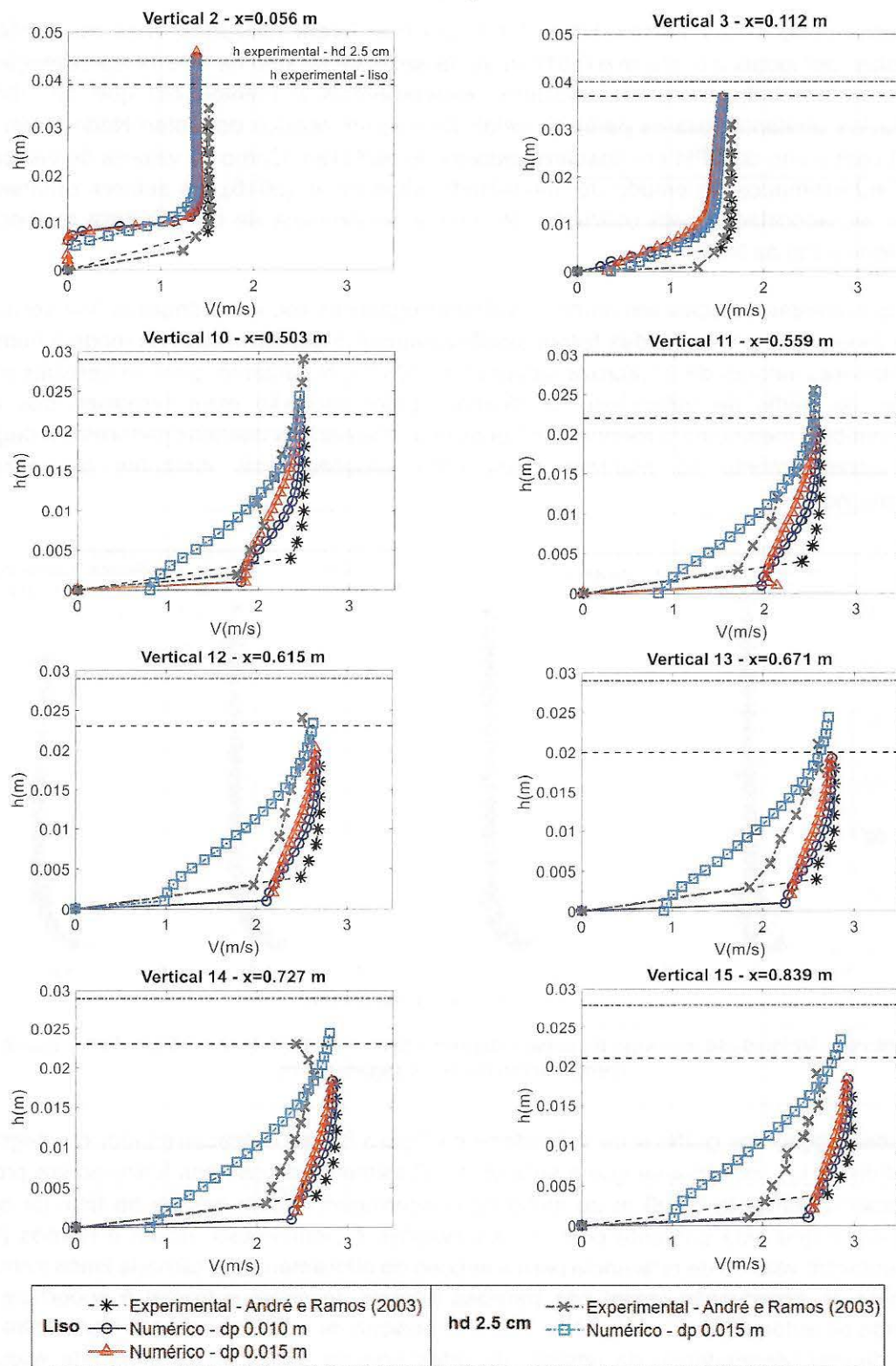


Figura 8. Perfis de velocidade para caudal de 35 L/s, e descarregador liso e em degraus.

As dificuldades de resolução poderão ser solucionadas com os novos desenvolvimentos na área de SPH, como o uso de partículas menores em regiões em que seja necessário mais refinamento das soluções. As dificuldades de estabilização das alturas do escoamento poderão ser minimizadas com a busca de novas formas de estabelecer contornos, como a definição de um caudal constante de entrada. Finalmente, a busca de uma formulação para escoamentos bifásicos deverá suprir as necessidades observadas no cálculo das alturas e velocidades do escoamento na região arejada.

Faz-se a ressalva de que o método SPH apresentou resultados comparáveis a outras ferramentas numéricas, mostrando-se satisfatórios para a simulação de escoamento em descarregadores em degressos sob regime deslizante sobre turbilhões, podendo ser um método promissor e uma ferramenta de auxílio em projectos de descarregadores de cheias de barragens.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Prof. Rui Ferreira do IST pelas facilidades concedidas na utilização do servidor para a realização das simulações computacionais, no âmbito do Projecto RECI/ECM-HID/0371/2012. A primeira autora agradece também o Dr. Athanasios Mokos, investigador associado da Universidade de Manchester, pela disponibilidade em esclarecer alguns questionamentos por meio de contacto eletrónico. O terceiro autor agradece à CAPES pelo processo BEX 5723/15-9 para o transporte de ar em descarregadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

André M., Ramos P. (2003). *Hidráulica de descarregadores de cheia em degressos. Aplicação a descarregadores com paredes convergentes*. Trabalho final de curso em Licenciatura em Engenharia do Ambiente. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Cabrita J. (2007). *Caracterização do escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores de cheias em degressos com paredes convergentes*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Crespo A.J.C., Domínguez J.M., Rogers B.D., Gómes-Gesteira M., Longshaw S., Canelas R., Vacondio R., Barreiro A., García-Feal O. (2015). DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). *Computer Physics Communications* 187, 204-216.

Fadafan M.A., Kermani M-R.H. (2015). Modeling of flow over an ogee spillway using moving particle semi-implicit method. In *Proceedings of the 36th IAHR World Congress*. The Hague, The Netherlands. 6 pp.

Gingold R.A., Monaghan J.J. (1977). Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 181, 375-389.

Gomez-Gesteira M., Rogers B.D., Dalrymple R.A., Crespo A.J.C. (2010). State-of-the-art of classical SPH for free-surface flows. *Journal of Hydraulic Research* 48(1), 6-27.

- Gotoh H., Shibihara T., Sakai, T. (2001). Sub-particle-scale model for the MPS method - Lagrangian flow model for hydraulic engineering. *Journal of Computational Fluid Dynamics* 9 (4), 339-347.
- Husain S.M., Muhammed J.R., Karunarathna H.U., Reeve D.E. (2014). Investigation of pressure variations over stepped spillways using smooth particle hydrodynamics. *Advances in Water Resources* 66, 52-69.
- Jafari-Nodoushan E., Hosseini K., Shakibaeinia A., Mousavi S-F. (2016). Meshless particle modelling of free surface flow over spillways. *Journal of Hydroinformatics* 18(2), 354-370.
- Liu G.R., Liu M.B. (2003). *Smoothed Particle Hydrodynamics. A Meshfree particle method*. World Scientific Publishing. Singapore.
- López D., Blas M., Marivela R., Rebollo J.J., Díaz R., Sánchez-Juny M., Estrella S. (2011). Estudio hidrodinámico de vertederos y rápidas escalonadas con modelo numérico tridimensional SPH. Proyecto ALIVESCA. In *II Jornadas de Ingeniería del Agua. Modelos Numéricos em Dinámica Fluvial*. Barcelona, Spain.
- López D., Díaz R., Rebollo J.J., Ramos T., Andrés F.R., Berga M.I. (2016). Aplicación del método SPH al estudio hidráulico de estructuras. Análisis hidrodinámico del aliviadero en pozo de la presa de Nagore (Navarra). *Revista Iberoamericana del Agua* 3, 1-7.
- Lúcio I. (2015). *Modelação numérica do escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores de cheias em degraus: aplicação a pequenas barragens de aterro*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Lucy L.B. (1977). A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *The Astronomical Journal* 82(12), 1013-1024.
- Matos J., Meireles I. (2014). Hydraulics of stepped weirs and dam spillways: engineering challenges, labyrinths of research, In *Hydraulic Structures and Society – Engineering Challenges and Extremes*, The University of Queensland, Brisbane, Australia, Proc. of the 5th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures (ISHS2014), Brisbane, Australia, H. Chanson and L. Toombes Editors, 30 pp.
- Meireles I., Matos J. (2009). Skimming flow in the nonaerated region of stepped spillways over embankment dams. *Journal of Hydraulic Engineering* 135(8), 685-689.
- Monaghan J.J. (1988). An introduction to SPH. *Computer Physics Communications* 48, 89-96.
- Monaghan J.J. (1994). Simulating free surface flows with SPH. *Journal of Computational Physics* 110, 399-406.
- Saunders K., Prakash M., Cleary P.W., Cordell M. (2014). Application of smoothed particle hydrodynamics for modelling gated spillway flows. *Applied Mathematical Modelling* 38, 4380-4322.
- Violeau D. (2012). *Fluid mechanics and the SPH Method. Theory and Applications*. 1st Ed. Oxford University Press. Oxford, United Kingdom.