

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

DISTRIBUIÇÃO DE VAZÃO EM DESCARGAS DE FUNDO TIPO TUBO RANHURADO

*Felipe Azevedo Paulo¹; Lohan Henrique Parma¹, Aloysio Portugal Maia Saliba² & Eder Daniel
Teixeira¹*

Palavras-Chave – Descarga de fundo, Simulação numérica.

INTRODUÇÃO

Reservatórios propiciam proteção contra cheias e secas além de benefícios relacionados a navegação, geração de energia, recreação. Contudo, sua capacidade de fornecer esses serviços ao longo do tempo tende a diminuir em função da deposição de sedimentos transportados pelos rios que formam os reservatórios. Valores médios de 1% de perda anual de volume de armazenamento em todo mundo, variando entre países e diferentes regiões, têm sido apresentados por diversos autores (Mahmood, 1987; Shen, 1999). Assim sendo, a sedimentação em reservatórios é um dos maiores desafios enfrentados durante a operação de empreendimentos que envolvam a construção de barragens e um dos fatores limitantes de sua vida útil (Schleiss *et al.*, 2016).

Apesar de seus impactos negativos, os reservatórios possuem inegável relevância socioeconômica que faz com que o problema da sedimentação se torne uma preocupação global (Kondolf *et al.*, 2014; Schleiss *et al.*, 2016), especialmente quando se tem em conta o aumento populacional e a crescente demanda por água e energia. Por conseguinte, o uso de reservatórios é inevitável e sua vida útil deve ser maximizada a fim de diminuir a necessidade de novos empreendimentos dado que sua construção é onerosa, ocasiona diversos impactos ambientais e depende da existência de locais adequados para sua implantação – os quais tendem a ser cada vez mais escassos (Shen, 1999). Atingir este objetivo passa por minimizar e mitigar os efeitos da sedimentação visto que ela é um dos limitantes, se não o principal, da vida útil dos reservatórios.

Descargas de fundo se apresentam como uma importante ferramenta de remoção de sedimentos depositados junto ao barramento visto que outras medidas mitigadoras apresentam desvantagens relativas: dragagens possuem altos custos, planos de prevenção de erosão nas bacias hidrográficas dependem da complicada coordenação entre vários setores da sociedade, estruturas de by-pass não são comuns (Shen, 1999). A bibliografia referente à remoção de sedimentos por descargas de fundo demonstra teórica e experimentalmente e através de medições em campo que seu efeito é limitado a uma região próxima da descarga de fundo quando a operação se dá sem rebaixamento do nível do reservatório (Emamgholizadeh *et al.*, 2006; Sawadogo *et al.*, 2019; White e Bettess, 1984), de forma que tomadas de água têm de ser posicionadas próximas às descargas de fundo para que seu desassoreamento possa acontecer.

1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, felipe.azevedo.paulo@gmail.com

2) Universidade Federal de Minas Gerais, aloysiosaliba@gmail.com

Diversos estudos já foram conduzidos no sentido de compreender as variáveis envolvidas no fenômeno de remoção por descargas de fundo, de caracterizar o campo de velocidades a montante de descargas de fundo, de buscar a forma ótima da seção transversal do conduto e de modelar numericamente o fenômeno para as descargas de fundo tradicionais (orifício no paramento de montante da barragem). Pesquisas recentes têm sido orientadas ao desenvolvimento de novas estruturas que proporcionem maior eficiência e remoção de sedimentos (Haghjoui *et al.*, 2021; Madadi *et al.*, 2016, 2017).

Neste sentido, Paulo *et al.* (2021) propuseram, em base a estudos realizados em modelo físico, uma nova estrutura (chamada descarga de fundo tipo tubo ranhurado) que permite aumentar a remoção de sedimentos no sentido paralelo ao barramento (Figura 1), propiciando maior liberdade no posicionamento de tomadas de água. Com o intuito de avançar o conhecimento a respeito dessa estrutura, este trabalho se propõe a simular numericamente o escoamento através da descarga de fundo tipo tubo ranhurado utilizando o *software* FLOW-3D HYDRO com o objetivo de caracterizar o padrão de escoamento ao longo do conduto.

Figura 1 – Modelo físico da descarga de fundo tipo tubo ranhurado (adaptado de Abreu *et al.*, 2018).



MATERIAIS E MÉTODOS

Modelo numérico e recurso computacional

O modelo numérico empregado foi o FLOW-3D HYDRO v1.0, que é um software comercial de dinâmica dos fluidos computacional capaz de modelar escoamentos com diversos fenômenos físicos envolvidos. O programa emprega o método dos volumes finitos para discretizar o domínio computacional e resolver as equações médias de Navier-Stokes (RANS ou Reynolds Averaged Navier-Stokes em inglês), obtendo soluções transientes e tridimensionais. A malha empregada é cartesiana e de arranjo descontraído (todas as variáveis são calculadas no centro do volume de controle, exceto pelas velocidades, que são calculadas nas faces do volume de controle). A maioria dos termos das equações são obtidos de forma explícita, mas diversos métodos implícitos podem ser utilizados. O acoplamento pressão-velocidade é feito através de métodos implícitos. A modelagem da superfície livre é feita com o método Volume of Fluid (VOF) (FLOW SCIENCE, 2018).

Os principais modelos escolhidos para este trabalho foram: VOF padrão, esquema explícito de segunda ordem com preservação de monotonicidade para a equação da quantidade de movimento, método GMRES (Generalized Minimal Residual) para o acoplamento implícito pressão-velocidade, e o modelo de turbulência k-w. O fluido considerado foi água a 20°C padrão (massa específica de 998,2 kg/m³ e viscosidade cinemática de 0,001 kg/m/s).

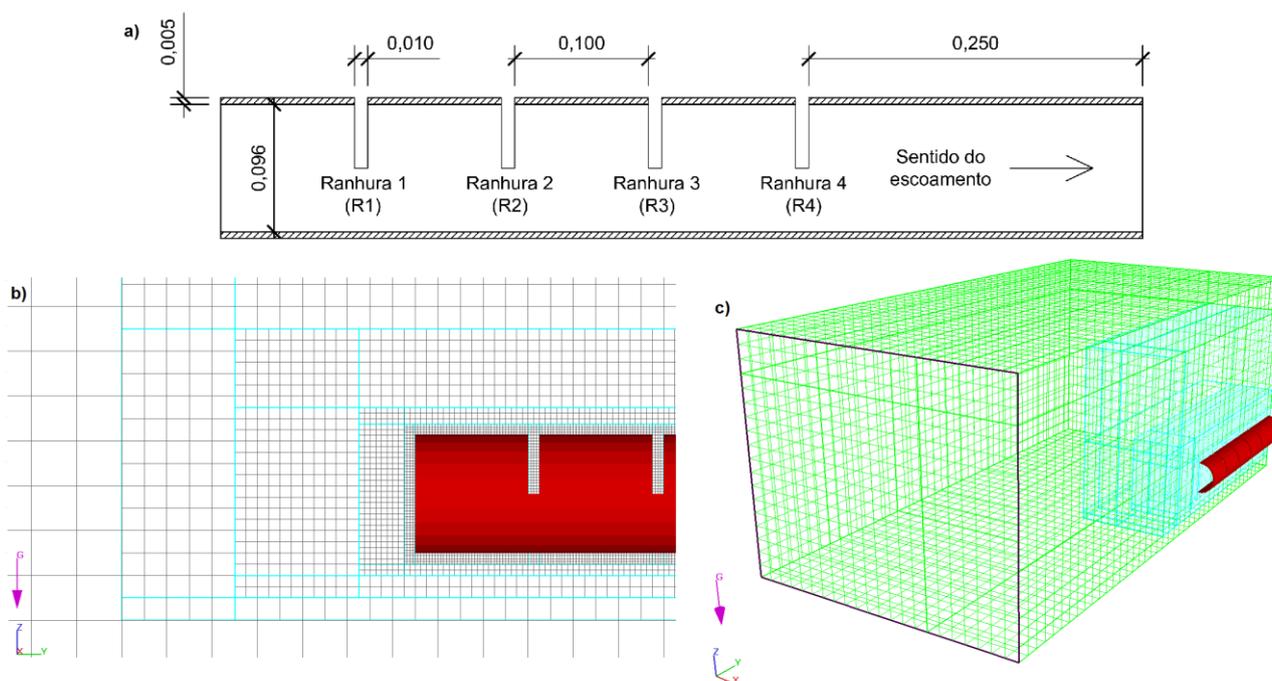
A máquina utilizada possui um sistema operacional de 64 bits, 24 GB de memória RAM, um processador Intel Core i7-9700 de 3 GHz, e uma placa de vídeo GeForce RTX 2070 Super de 8 GB de memória dedicada. As simulações duraram 4 h em média.

Simulações realizadas

A geometria simulada foi do mesmo tipo estudado em modelo físico por Paulo *et al.* (2021). Contudo, não foi realizada calibração do modelo numérico em função dos dados obtidos em modelo físico. Devido ao caráter preliminar da modelagem numérica neste trabalho, não se considerou a presença do depósito de sedimentos. O objetivo principal foi caracterizar o padrão de escoamento através da estrutura e não sua capacidade de remover sedimentos depositados. Foram simulados a descarga de fundo e o reservatório a montante.

Considerando que há simetria axial em relação a seu eixo longitudinal, somente metade da estrutura foi simulada a fim de diminuir o custo computacional das simulações. A malha de cálculo utilizada é retangular e estruturada. O tamanho das células varia ao longo do domínio, sendo mínimo ao redor da estrutura (cubos de lado 0,25 cm) para representar satisfatoriamente a geometria e crescendo progressivamente até atingir cubos de lado 4 cm em regiões afastadas da descarga de fundo (Figura 2).

Figura 2 – Corte longitudinal da descarga de fundo simulada (a), variação de tamanho da malha de cálculo (b) e domínio simulado considerando metade da descarga de fundo (c). Dimensões em metros.



As condições de contorno foram definidas no maior bloco de malha que compõe o reservatório e no bloco a jusante da saída da descarga de fundo. As condições de montante foram definidas como pressão (nível de água) no bloco maior e as condições de jusante foram definidas como saída livre ou *outflow* (derivadas nulas através da fronteira) a fim de simular um jato livre. A condição inicial considerou fluido ocupando todo o domínio dentro do reservatório no mesmo nível que a condição de contorno de montante.

Foram realizadas três simulações considerando diferentes níveis de água no reservatório. Paulo *et al.* (2021) executaram ensaios em modelos físicos com a relação entre nível de água acima do eixo da descarga de fundo (H) e diâmetro interno da descarga de fundo (D_{int}) variando entre 3,12 e 13,79. Os níveis simulados neste trabalho dizem respeito a esses dois limites e a um valor intermediário de 8,45. A Tabela 1 apresenta um resumo dos parâmetros das simulações realizadas.

Tabela 1 – Parâmetros das simulações.

Malha		Descarga de fundo	
Tipo de malha	Estruturada	Coordenada Z do eixo	0,05 m
Forma das células	Retangular cúbica	Coordenada X do eixo	0,055 m
Tamanho das células	0,25 cm a 4,00 cm	Coordenada Y do eixo	Paralelo ao eixo Y
Número de células	565.868	D _{int}	0,096 m
Extensão na direção X	-0,825 m a 0,055 m	Espessura das paredes	5 mm
Extensão na direção Y	-0,91 m a 0,81 m	Rugosidade absoluta	1,5x10 ⁻³ mm (PVC)
Extensão direção Z	-0,1 m a 1,42 m		
Condições de contorno			
Simulação	S1	S2	S3
H (montante)	0,300 m	0,515 m	1,300 m

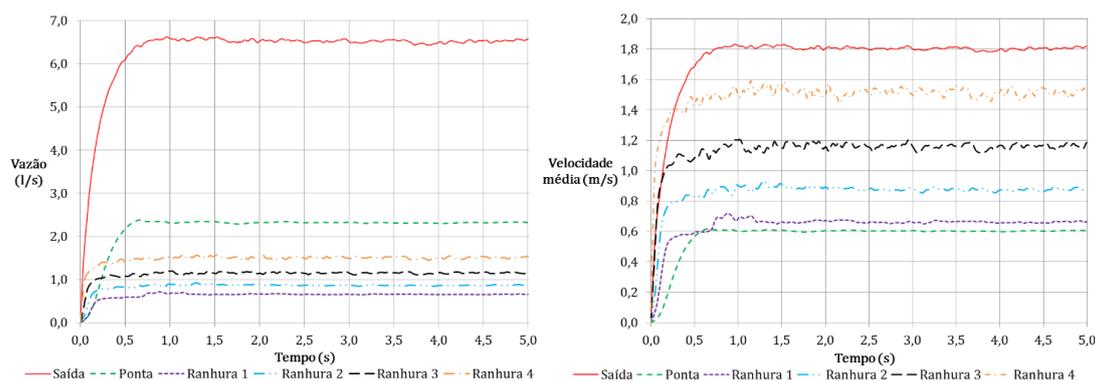
Análise dos dados

As variáveis escolhidas para caracterizar o escoamento quantitativamente foram as vazões e as velocidades médias através das ranhuras e da ponta ou entrada do conduto (Figura 2-a). Para medir a vazão e a velocidade nesses locais, foram definidas superfícies de medição de fluxo nos extremos de montante (ponta) e de jusante (saída) da estrutura (superfície plana paralela à seção transversal) e em cada ranhura (superfície cilíndrica com o raio interno e a largura das ranhuras). Os resultados apresentados se referem a médias temporais das vazões e velocidades médias obtidas com os valores medidos após o escoamento entrar em regime permanente. Também são apresentadas análises qualitativas de outras variáveis como a pressão e as linhas de corrente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

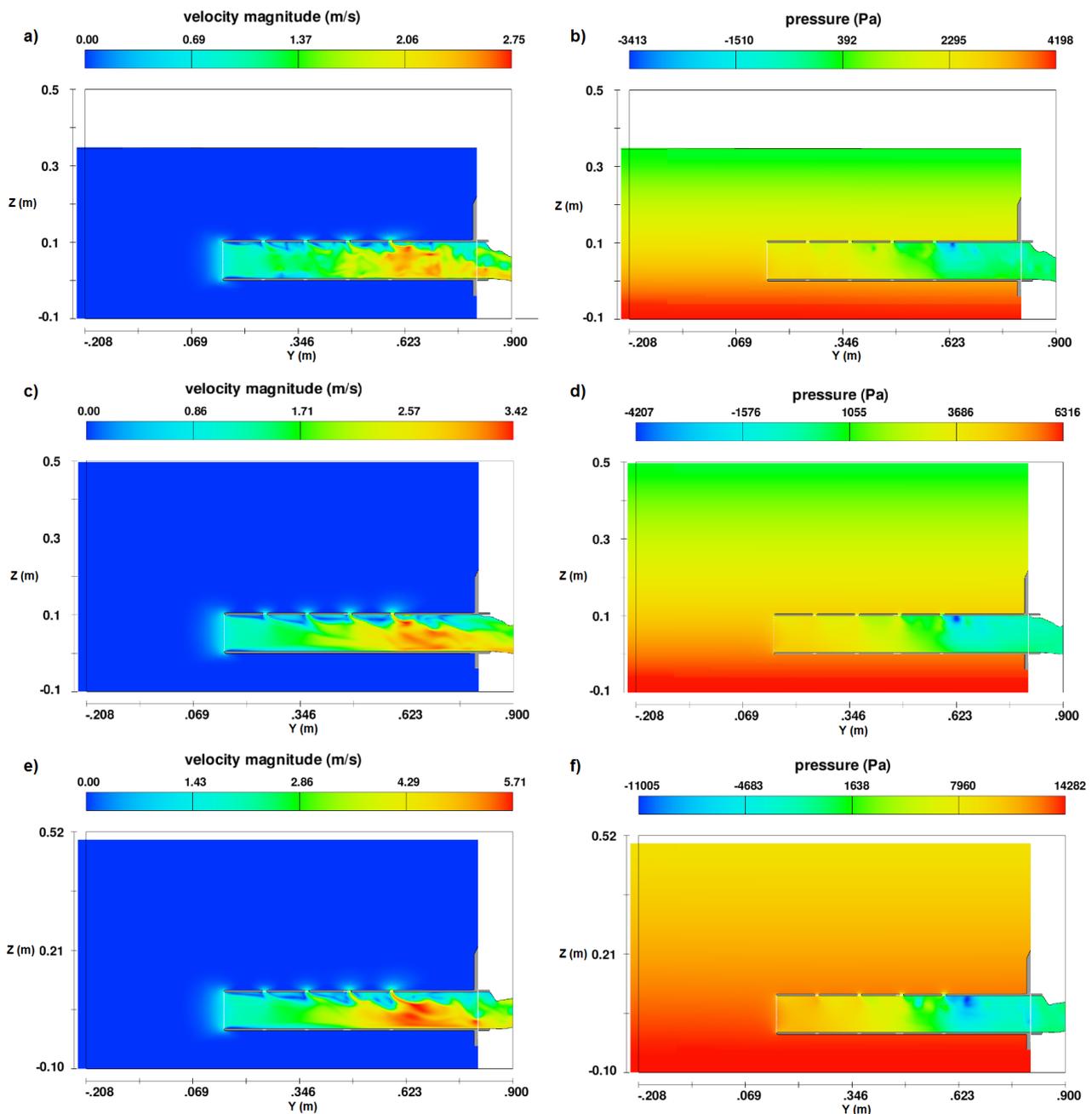
Verificou-se, em uma simulação preliminar, que o escoamento entra em regime permanente (as médias das vazões e das velocidades não variam com o tempo) a partir de aproximadamente 1 s de simulação (Figura 3). Todas as simulações posteriores tiveram 5 s de duração e os resultados apresentados a seguir se referem a valores médios calculados a partir dos resultados obtidos entre os tempos 1,5 s e 5 s em todos os casos.

Figura 3 – Comportamento geral de todas as simulações: regime permanente a partir de aproximadamente 1s.



Os resultados das simulações mostram que a velocidade do escoamento na seção das ranhuras aumenta de montante para jusante, que se formam zonas de recirculação a jusante das ranhuras na parte superior do conduto e que as maiores velocidades ocorrem a jusante de R4 (Figura 4 e Tabela 2). Nota-se que esse padrão se repete para as três simulações mesmo com uma variação significativa da carga hidráulica.

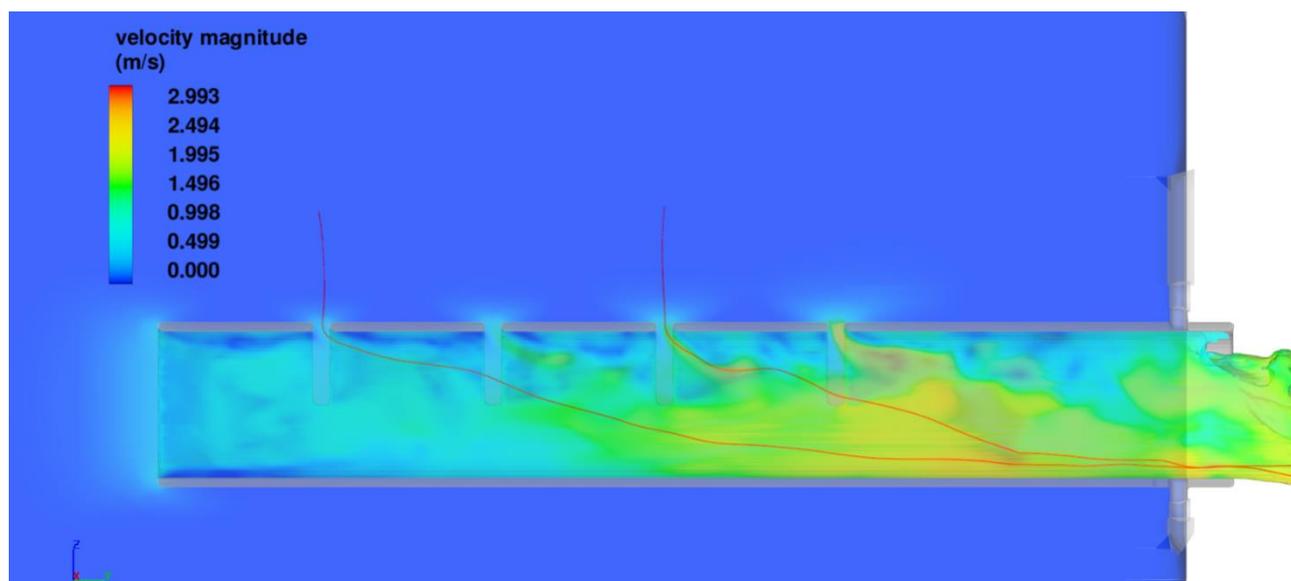
Figura 4 – Distribuições de velocidade e pressão para as simulações S1 (a e b), S2 (c e d) e S3 (e e f).



Todas as pressões apresentadas estão em escala relativa, sendo nula a pressão atmosférica. A maior variação da pressão ocorre em R4 e está de acordo com o maior aumento de velocidade observado nessa região. A variação da pressão através das aberturas do tudo ranhurado diminui em direção a montante da mesma forma que a velocidade. Essa variação das velocidades e pressões pode ser entendida ao considerarmos dois pontos no fluido em uma cota tal que as velocidades

sejam iguais e estejam exatamente acima de duas ranhuras. As linhas de corrente que partem desses pontos e chegam a pontos próximos na saída do conduto experimentam uma mesma perda de carga (pois partem de mesmas energias de posição, pressão e velocidade nos pontos iniciais e chegam a um mesmo ponto na saída), mas o fazem através de caminhos de comprimentos diferentes. Por exemplo, a linha de corrente que inicia sobre R3 percorre um caminho menor que a linha de corrente que se inicia sobre R1 (Figura 5), gerando um gradiente de energia maior que leva às maiores velocidade e variação da pressão observadas na Figura 4 e apresentadas na Tabela 2.

Figura5 – Linhas de corrente sobre R1 e R3 para a simulação S1.



Os valores mínimos de pressão ocorrem na zona de descolamento a jusante de R4, próximos à parede na parte superior do conduto, e a uma distância de até aproximadamente um diâmetro interno.

A Tabela 2 indica que mais de um terço da vazão total ingressa pela ponta do tubo e que a vazão e a velocidade média através de uma ranhura são, em média, 1,31 vezes superiores à vazão e à velocidade média da ranhura que está imediatamente a montante. A velocidade média na seção da ponta é menor que a menor velocidade observada nas ranhuras. Contudo, devido à sua maior área, a vazão é superior às das ranhuras. Este padrão se repete nas três simulações e confirma a suposição de Paulo *et al.* (2021) de que a vazão na extremidade da descarga de fundo tipo tubo ranhurado é superior à vazão de uma ranhura e do conjunto de ranhuras ao menos para o caso em que a área total das ranhuras é inferior ao da área da ponta do tubo (a área da ponta do tubo é igual a 4,8 vezes a área das ranhuras em todas as simulações deste trabalho). Entretanto, indica que está equivocada a suposição dos mesmos autores de que a vazão é aproximadamente igual em todas as ranhuras. Essa suposição se baseou no fato de o alcance de remoção de sedimentos ao longo da estrutura se manter praticamente constante para todas as ranhuras. Provavelmente a remoção foi constante porque as vazões ensaiadas não foram suficientes para promover um ângulo de talude inferior ao ângulo de repouso submerso do sedimento, de forma que a inclinação do talude formado na fossa de erosão foi igual ao ângulo de repouso submerso do sedimento em todas as ranhuras.

Tabela 2 – Vazões e velocidades médias nas seções medidas.

Local de medição	Ponta	Ranhura 1	Ranhura 2	Ranhura 3	Ranhura 4	Saída
S1						
Vazão (l/s)	2,231	0,617	0,807	1,050	1,362	6,066
% da vazão na saída	36,772	10,179	13,295	17,307	22,448	–
Velocidade média na seção (m/s)	0,579	0,633	0,809	1,055	1,379	1,705
% da velocidade na saída	33,971	37,143	47,448	61,905	80,895	–
H (m)	0,300					
S2						
Vazão (l/s)	2,920	0,828	1,099	1,450	1,860	8,158
% da vazão na saída	35,794	10,153	13,472	17,777	22,804	–
Velocidade média na seção (m/s)	0,758	0,835	1,108	1,462	1,875	2,274
% da velocidade na saída	33,321	36,724	48,726	64,300	82,476	–
H (m)	0,515					
S3						
Vazão (l/s)	4,935	1,412	1,870	2,422	3,135	13,774
% da vazão na saída	35,830	10,252	13,574	17,583	22,761	–
Velocidade média na seção (m/s)	1,278	1,422	1,882	2,441	3,164	3,820
% da velocidade na saída	33,459	37,218	49,258	63,903	82,833	–
H (m)	1,330					

CONCLUSÃO

A sedimentação é um dos maiores desafios enfrentados durante a operação de reservatórios. A deposição de sedimentos diminui o volume disponível no reservatório e pode ameaçar o funcionamento de tomadas de água e turbinas. A operação de descargas de fundo é uma medida mitigadora da sedimentação que ocorre junto ao barramento. Descargas de fundo tipo tubo ranhurado são um tipo novo de descarga de fundo que permite remover sedimentos no sentido paralelo ao barramento, permitindo maior liberdade no posicionamento de tomadas de água. Empregamos modelagem numérica para aprofundar o conhecimento desta estrutura, caracterizando o padrão de escoamento através dela. Mostramos que as vazões e velocidades estão relacionadas com o gradiente de energia através dessas aberturas e que o padrão de escoamento é fortemente influenciado pela geometria da estrutura, o que se evidencia pela formação de zonas de recirculação a jusante das ranhuras. Confirmamos a suposição de Paulo *et al.*(2021) de que a vazão na ponta do tubo é superior à das ranhuras e mostramos que não está correta a suposição de uniformidade de vazão de velocidade em todas as ranhuras. Isso que sugere que a constância do alcance de remoção na região das ranhuras deve estar mais relacionada ao ângulo de repouso do sedimento que às características do escoamento nos ensaios realizados por esses autores.

Em todas as simulações, é possível observar a *venacontracta* que se forma a jusante da ponta do tubo. Este fenômeno é amplamente conhecido e observado em entradas de tubulações. Além disso, também observamos que a velocidade do escoamento cai rapidamente em direção a montante da ponta do tubo e das ranhuras. Este comportamento do campo de velocidades a montante de orifícios e entradas de tubulação é também largamente documentado (Powell e Khan, 2015;

Shammaa *et al.*, 2005; White e Bettess, 1984). Logo, apesar de o modelo não ter sido calibrado, estes resultados indicam que há uma representação minimamente coerente do escoamento real que se formaria nesta estrutura. Ou seja, embora os valores possam diferir dos resultados obtidos de um modelo calibrado, o padrão de escoamento deve ser semelhante. Isso demonstra o potencial dos modelos numéricos na obtenção de dados cuja medição é mais complicada em modelos físicos (medição local de vazão e velocidade). Os próximos passos em nossa pesquisa devem ser a calibração do modelo e a busca da geometria ótima da estrutura no sentido de minimizar a perda de carga e maximizar a remoção de sedimentos.

AGRADECIMENTOS

À FLOW Science por fornecer a licença de uso do FLOW-3D HYDRO, ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo uso de suas instalações e à CAPES por financiar parcialmente este trabalho.

REFERÊNCIAS

ABREU, A.S.; DE OLIVEIRA, V.L.; RAMOS CUNICO, P.G.; BERNARDI DE CAMARGO, P.L.; FERLA, R.; BARREIRA MARTINEZ, C.; ... MARQUES, M.G. (2018). "Análise preliminar do alcance de remoção de sedimentos por descarregadores de fundo em pequenas barragens" in XXVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica TRABAJOS COMPLETOS, Buenos Aires, Argentina, 2018, pp. 2788-2797.

EMAMGHOLIZADEH, S.; BINA, M.; FATHI MOGHADAM, M.; GHOMEYSHI, M. (2006). "Investigation and evaluation of the pressure flushing through storage reservoir". ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences 1(4), pp. 7-16.

FLOW SCIENCE, I. (2018). *FLOW-3D® Version 12.0 Users Manual*. In FLOW-3D [Computer software].

HAGHJOUEI, H.; RAHIMPOUR, M.; QADERI, K.; KANTOUSH, S. A. (2021). "Experimental study on the effect of bottomless structure in front of a bottom outlet on a sediment flushing cone". International Journal of Sediment Research. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2020.11.002>

KONDOLF, G. M.; GAO, Y.; ANNANDALE, G. W.; MORRIS, G. L.; JIANG, E.; ZHANG, J.; ... YANG, C.T. (2014). "Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents". *Earth's Future* 2(5), pp. 256-280. <https://doi.org/10.1002/2013EF000184>

MADADI, M. R.; RAHIMPOUR, M.; QADERI, K. (2016). "Sediment flushing upstream of large orifices: An experimental study". *Flow Measurement and Instrumentation*. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.10.007>

MAMADI, M. R.; RAHIMPOUR, M.; QADERI, K. (2017). "Improving pressurized flushing efficiency in reservoirs: an experimental study". *Water Resources Management* 31, pp. 4633-4647. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1770-y>

MAHMOOD, K. (1987). "Reservoirs sedimentation - Impact, extent and mitigation". World Bank Technical Report, Washington, DC, 1987.

PAULO, F. A.; ABREU, A. S.; DAÍ PRÁ, M.; ENDRES, L. A. M.; FERLA, R.; TEIXEIRA, E. D. (2021). "Experimental study of pressure flushing of non-cohesive sediment through slotted pipe bottom outlet". *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 26(01). <https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120200076>

POWELL, D. K.; KHAN, A. A. (2015). "*Flow field upstream of an orifice under fixed bed and equilibrium scour conditions*". Journal of Hydraulic Engineering. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000960](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000960)

SAWADOGO, O.; BASSON, G. R.; SCHNEIDERBAUER, S. (2019). "*Physical and coupled fullu three-dimensional numerical modeling of pressurized bottom outlet flushing processes in reservoirs*". International Journal of Sediment Research 34, pp. 461-474. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2019.02.001>

SCHLEISS, A. J.; FRANCA, M. J.; JUEZ, C.; DE CESARE, G. (2016). "*Reservoir sedimentation*". Journal of Hydraulic Research 54(6), pp. 595-614. <https://doi.org/10.1080/00221686.2016.1225320>

SHAMMAA, Y.; ZHU, D. Z.; RAJARATNAM, N. (2005). "*Flow upstream of orifices and sluice gates*". Journal of Hydraulic Engineering. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2005\)131:2\(127\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2005)131:2(127))

WEN SHEN, H. (1999). "*Flushing sediment through reservoirs*". Journal of Hydraulic Research 37(6), pp. 743-757. <https://doi.org/10.1080/00221689909498509>

WHITE, W. R.; BETTESS, R. (1984). "*The feasibility of flushing sediments through reservoirs*". International Association of Hydrological Sciences.