



## PREVISÃO DO ALCANCE DA REMOÇÃO DE SEDIMENTOS POR DESCARGA DE FUNDO DE PEQUENAS BARRAGENS

Lorena Silva, SARAIVA<sup>1</sup>; Aline Saupe, ABREU<sup>2</sup>; Diego Santos da, SILVEIRA<sup>3</sup>; Fabrício Prates, DESESSARDS<sup>4</sup>; Rute, FERLA<sup>5</sup>; Roberta Ferrão, HAMPE<sup>6</sup>; Mauricio, DAI PRÁ<sup>7</sup>; Eder Daniel, TEIXEIRA<sup>8</sup>; Luiz Augusto Magalhães, ENDRES<sup>9</sup>; Marcelo Giulian, MARQUES<sup>10</sup>

<sup>1</sup> Engenheira Civil, lorenassaraiva@gmail.com

<sup>2</sup> Mestranda em Recursos Hídricos, CDTec/UFPEL, alsaupe@gmail.com

<sup>3</sup> Graduando em Engenharia Civil, UFRGS, diegosantodasilveira@gmail.com

<sup>4</sup> Graduando em Engenharia Civil, UFRGS, fabricio.desessards@hotmail.com

<sup>5</sup> Mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH/UFRGS, ruteferla@hotmail.com

<sup>6</sup> Mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH/UFRGS, roberta\_hampe@hotmail.com

<sup>7</sup> Docente, CDTec/UFPEL, mdaipra@gmail.com

<sup>8</sup> Docente, IPH/UFRGS, eder.teixeira@ufrgs.br

<sup>9</sup> Docente, IPH/UFRGS, endres@ufrgs.br

<sup>10</sup> Docente, IPH/UFRGS, mmarques@iph.ufrgs.br

### Resumo

Este trabalho contempla parte dos estudos que vêm sendo realizados no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do IPH/UFRGS visando o entendimento dos mecanismos de funcionamento de descarregadores de fundo a serem instalados em pequenas barragens (com alturas inferiores a 15 m). É apresentada, de forma preliminar, a identificação do alcance da remoção de sedimentos no reservatório quando do acionamento da descarga de fundo no modelo físico, bem como, uma comparação destes resultados com diferentes equações de previsão presentes na bibliografia. A partir dos resultados preliminares constata-se que as equações que consideram a massa específica do material a ser removido e/ou a velocidade do escoamento no interior da descarga de fundo são mais consistentes.

**Palavras-chave:** Descarga de fundo, remoção de sedimentos.

**Tema:** Água, Energia e Segurança de Barragens.

## 1. INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas essenciais para a utilização dos recursos hídricos nas áreas referentes a abastecimento humano, irrigação, energia elétrica, entre outras. O assoreamento de reservatórios, processo gradativo e inevitável a estes aproveitamentos, é responsável pela redução da capacidade de armazenamento de água, o que afeta, diretamente, o rendimento e a vida útil de tais empreendimentos.

O fenômeno de assoreamento nos reservatórios de barragens é função da quantidade de sedimentos produzidos na bacia hidrográfica a montante do empreendimento, desde sua concepção, ao longo dos anos de operação. Mahmood (1987) indica que, em média, os reservatórios instalados em regiões com baixa produção de sedimentos têm redução de 0,3% da capacidade de armazenamento ao ano. Segundo o mesmo autor, para o caso de reservatórios de regiões onde a produção de sedimentos a montante é considerada elevada, a média de redução da capacidade pode atingir valores da ordem de 1,5% a 1,7% ao ano. Bатуca e Jordaan Jr. (2000), analisando dados de 127 reservatórios, onde o processo de assoreamento ocorreu entre o 2º e o 74º anos após a construção do empreendimento, indicam que a redução da capacidade de volume útil variou entre 0,3% e 100%.

Atualmente, uma das metodologias mais utilizadas na remoção de sedimentos retidos em reservatórios de pequenas barragens é a utilização de descarregadores de fundo incorporados ao paramento e instalados na porção inferior do volume útil do reservatório, conforme pode ser observado na Figura 1. O funcionamento dos descarregadores de fundo se dá através da remoção do sedimento por meio da capacidade de arraste do escoamento. Entretanto, uma vez que a eficiência destes dispositivos é localizada, é necessário conhecer o alcance da remoção de sedimentos de forma precisa, de maneira a auxiliar na definição da sua posição e das suas dimensões com relação ao posicionamento da tomada de água na estrutura.

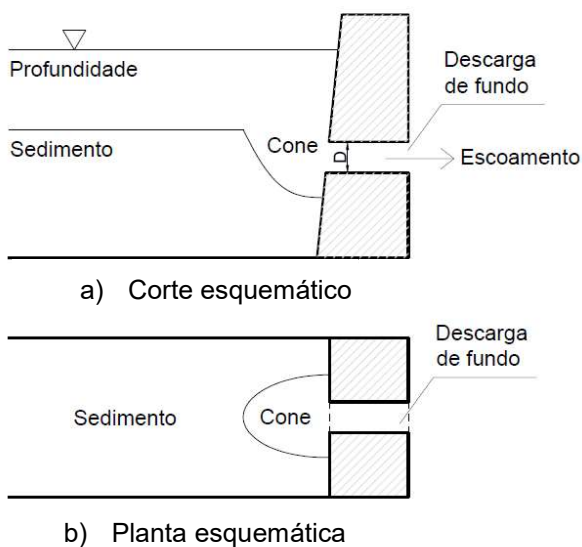
O presente trabalho visa apresentar os resultados preliminares que estão sendo obtidos a partir dos estudos experimentais desenvolvidos no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), visando identificar o alcance da remoção de sedimentos por meio de dispositivos descarregadores de fundo de pequenas barragens, em reservatório com nível d'água constante, através de modelo experimental. O objetivo é a definição de critérios para determinação do posicionamento e da forma de operação do dispositivo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

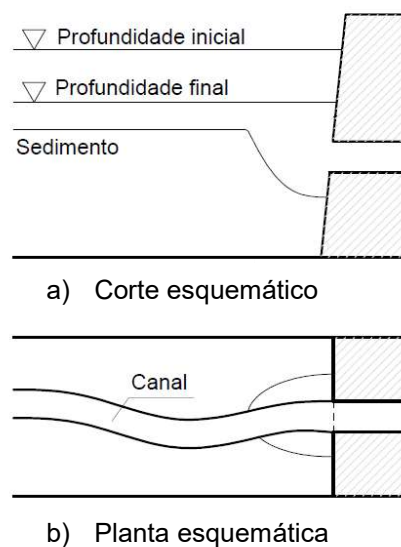
Alguns critérios de utilização dos descarregadores de fundo, além dos processos de formação dos depósitos de sedimentos em reservatórios, podem ser vistos em CBDB (1996), Oliveira et al. (2000) e CBDB (2003). O volume removido na operação de tais estruturas pode ser estimado através dos trabalhos de Emamgholizadeh et al. (2006), Shahmirzadi et al. (2010) e Emamgholizadeh e Fathi-Moghadam (2014), que abordam este assunto através de modelagem experimental. Os trabalhos de Lai e Shen (1996) e Meshkati et al. (2009), também baseados em análises experimentais, fornecem a estimativa das características da forma assumida nos sedimentos de fundo após a formação dos cones (ou cones de depressão, conforme pode ser observado na Figura 1), correlacionando o tempo de amostragem de sedimentos com a profundidade final do cone.

A remoção do material proveniente do assoreamento em reservatórios através de escoamento gerado pela operação dos descarregadores de fundo pode ser classificada, conforme Fruchard e Camenen (2012), em dois grandes grupos, sendo eles:

- a) Sem rebaixamento do nível do reservatório, ou a escoamento uniforme (“Pressure Flushing”), que ocorre quando a abertura do descarregador de fundo é aliada a uma vazão de saída constante, resultando em remoção cônica do sedimento de fundo próximo à estrutura, conforme indicado na Figura 1 e conforme pode ser verificado nos trabalhos de Meshkati et al. (2009), Emamgholizadeh e Fathi-Moghadam (2014), entre outros.
- b) Com rebaixamento do escoamento (“Drawdown Flushing”), que corresponde à retirada de sedimentos através dos descarregadores de fundo conjuntamente com a redução constante do nível d’água do reservatório, resultando na formação de um canal preferencial de remoção do material, de acordo com o apresentado na Figura 2. Este caso pode ser visto nos trabalhos de Hsieh (1999), Shoaib et al. (2014), Talebbeydokhti e Naghshineh (2004), entre outros.



**Figura 1.** Operação sem rebaixamento do nível do reservatório com formação de cone (“Pressure Flushing”).



**Figura 2.** Operação com rebaixamento do escoamento e formação canal preferencial de remoção do material (“Drawdown Flushing”).

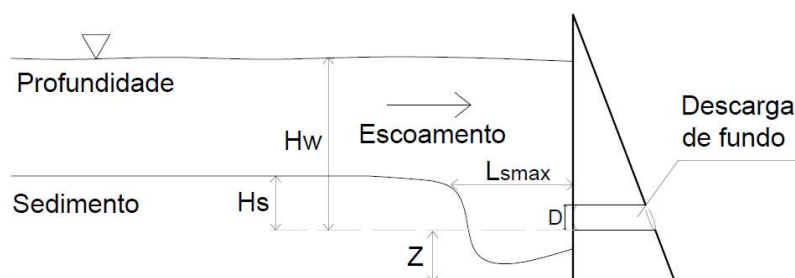
A maior parte dos autores apresenta a remoção do sedimento, considerando a operação em escoamento uniforme, em volume removido, podendo-se citar Emamgholizadeh et al. (2006), Shahmirzadi et al. (2010), Meshkati et al. (2009) e Emamgholizadeh e Fathi-Moghadam (2014). Entretanto, é reduzido o número de trabalhos que apresenta a distância máxima de remoção dos sedimentos, ou seja, o comprimento máximo do cone para montante ( $L_{smax}$ ), conforme apresentado na Figura 3.

Na Tabela 1 são apresentadas algumas das equações encontradas na literatura para previsão do comprimento máximo de remoção dos sedimentos no sentido do escoamento, ou comprimento do cone para montante ( $L_{smax}$ ).

**Tabela 1.** Equações encontradas na literatura para previsão do comprimento máximo de remoção do sedimento ( $L_{smáx}$ ).

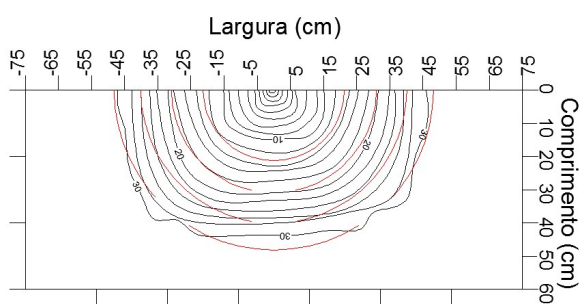
Autor	Equação	Observação
Meshkati et al. (2009)	$\frac{L_{smáx}}{H_w \text{Meshkati}} = 0,031 F_r^{0,104} \left( \frac{H_s \text{Meshkati}}{H_w \text{Meshkati}} \right)^{0,733} \left( \frac{A_D}{H_w^2} \right)^{0,146}$	Q = 0,15 a 14 L/s <hr/> H <sub>w</sub> = 36, 66 e 96 cm <hr/> H <sub>s</sub> = 36, 66 e 96 cm <hr/> D = 1", 2" e 3" <hr/> d <sub>s</sub> = 1 mm <hr/> ρ <sub>s</sub> = 1800 kg/m <sup>3</sup> (sílica)
Meshkati et al. (2010) em Emamgholizadeh et al. (2013)	$\frac{L_{smáx}}{H_w \text{Meshkati}} = 1,98 \left( \frac{H_s \text{Meshkati}}{H_w \text{Meshkati}} \right)^{0,895} \left( \frac{D}{(g H_w \text{Meshkati})^{0,5}} \right)^{0,143}$	Caract. não informadas
Fathi-Moghadam et al. (2010)	$\frac{L_{smáx}}{D} = 8,19 \left( \frac{H_s}{H_w} \right)^{-0,033} \left( \frac{u}{\sqrt{g \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) d_s}} \right)^{0,10}$	Q = 1 a 8 L/s <hr/> H <sub>w</sub> = 52, 90, 1,20 cm <hr/> H <sub>s</sub> = 42 cm <hr/> D = 1", 2" e 3" <hr/> d <sub>s</sub> = 0,27; 0,42 e 1,2 mm <hr/> ρ <sub>s</sub> = 2.650 kg/m <sup>3</sup>
Emamgholizadeh e Fathi-Moghadam (2014)	$\frac{L_{smáx}}{D} = 0,33 \left( \frac{H_s}{H_w} \right)^{0,40} \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right)^{-1,44}$	Q = 1 a 8 L/s <hr/> H <sub>w</sub> = 52, 90, 1,20 cm <hr/> H <sub>s</sub> = 42 cm <hr/> D = 1", 2" e 3" <hr/> d <sub>s</sub> = 0,007 mm <hr/> ρ <sub>s</sub> = 1230 a 1405 kg/m <sup>3</sup>

Sendo, para a Tabela 1 e para a Figura 3:  $Q$  vazão de saída pela descarga ( $m^3/s$ );  $A_D$  área do orifício da descarga de fundo ( $m^2$ );  $H_W$  altura da lâmina d'água acima do depósito de sedimentos ( $m$ );  $H_{WMeshkati} = H_W - \frac{D}{2}$ ;  $H_S$  altura do depósito de sedimentos ( $m$ );  $H_{SMeshkati} = H_S - \frac{D}{2}$ ;  $d_s$  diâmetro médio da partícula ( $m$ );  $\rho_s$  massa específica dos sedimentos ( $kg/m^3$ );  $\rho_w$  massa específica da água ( $kg/m^3$ );  $g$  aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );  $D$  diâmetro do orifício da descarga de fundo ( $m$ );  $u$  velocidade média do escoamento no orifício ( $m/s$ );  $\mu$  viscosidade cinemática ( $m^2/s$ );  $Fr_d$  número de Froude (adm) considerando o parâmetro  $D$ ;  $Fr_w$  número de Froude (adm) a montante de descarga de fundo considerando o parâmetro  $H_W$  e  $u$ ;  $Z$  altura de sedimento abaixo da geratriz inferior da descarga de fundo ( $m$ );  $L_{smax}$  comprimento máximo de remoção do sedimento ( $m$ ).



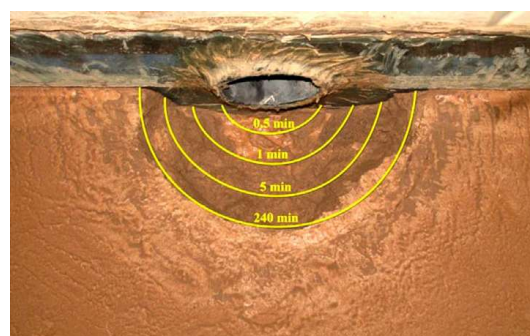
**Figura 3.** Esquema dos elementos, ver também Tabela 1.

Analisando os resultados de Emamgholizadeh e Fathi-Moghadam (2014) constata-se que a geometria da parte superior do cone de remoção de sedimentos, conforme Figura 4 e Figura 5, é praticamente semicircular, podendo ser representada por um semicírculo de raio equivalente ao comprimento máximo de remoção do sedimento ( $L_{smax}$ ).



Linhas em preto conforme Emamgholizadeh et al (2006).  
Linhas em vermelho concêntricas com o orifício de descarga.

**Figura 4.** Cone de remoção (adaptado de Emamgholizadeh et al., 2006).



**Figura 5.** Cone de remoção (Madadi et al., 2016).

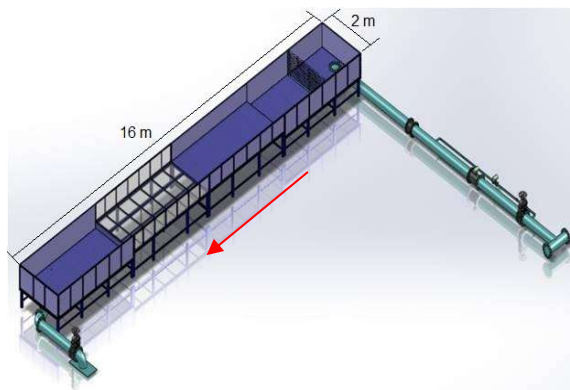
### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O canal metálico de ensaios possui 16 m de comprimento, 2 m de largura e 0,80 m de altura

(nos 8 m centrais ao longo do canal), de acordo com a Figura 6 e Figura 7, sendo que o dispositivo de descarga de fundo foi colocado acima do fundo, utilizando tubos de PVC. As características dos ensaios estão apresentadas na Tabela 2.



**Figura 6.** Vista lateral do modelo com descarga de fundo aberta na posição 12.



**Figura 7.** Representação das dimensões do modelo experimental utilizado, onde a seta indica o sentido do escoamento.

**Tabela 2.** Características dos ensaios.

Diâmetro externo	cm	De	3,30	5,00	7,50	10,0
Diâmetro interno	cm	Di	2,80	4,40	6,30	9,40
Vazão	m <sup>3</sup> /s	Q	0,0014	0,003	0,00648	0,01261
Velocidade na tubulação de descarga	m/s	$u$	2,274	1,973	1,894	1,817
Altura do depósito de sedimentos	m	$H_s$	~0,125	0,124	0,122	0,127
Altura de água	m	$H_w$	0,331	0,287	0,2403	0,211
Froude considerando o parâmetro $D$ e $u$	-	$Fr_d$	4,339	3,004	2,354	1,893
Froude considerando o parâmetro $H_w$ e $u$	-	$Fr_w$	1,290	1,224	1,323	1,433
Reynolds na descarga	-	Re	6,37E+04	8,68E+04	1,25E+05	1,71E+05
Diâmetro do grão (mm)	mm	$d$	1,18 < Grão < 2			
Massa específica do grão	g/cm <sup>3</sup>	$\rho_s$	1,08 (borracha)			
Velocidade de sedimentação	m/s	$\omega$	0,01 ≤ $\omega$ ≤ 0,05			
Reynolds do grão	-	$Re_d$	12 ≤ $Re_d$ ≤ 90			

Conforme indicado anteriormente, neste trabalho será considerada somente a situação de ensaio sem rebaixamento do nível do reservatório, com operação supondo escoamento uniforme (“Pressure Flushing”), dessa forma, favorecendo a formação de um cone de depressão próximo ao descarregador de fundo, onde serão apresentadas somente as conclusões para o alcance da remoção de sedimentos no sentido do escoamento ( $L_{smax}$ ).

As principais variáveis que afetam a geometria do cone proveniente da remoção do sedimento pela descarga de fundo são a massa específica do fluido ( $\rho_w$ ), a viscosidade

dinâmica do fluido ( $\mu$ ), a aceleração da gravidade ( $g$ ), o diâmetro médio do sedimento ( $d_s$ ), a massa específica de sedimento ( $\rho_s$ ), a carga total acima do centro do orifício ( $H_W + D/2$ ), a descarga de saída do orifício ( $Q$ ), o diâmetro do orifício ( $D$ ), a velocidade média no interior da descarga ( $v$ ), a área do orifício ( $A_D$ ) e o comprimento máximo de remoção do sedimento ( $L_{smax}$ ). A Equação 1 apresenta esses termos de forma funcional.

$$f(\rho_w; \mu; g; d_s; \rho_s; H_W; D; v; L_{smax}) = 0 \quad (1)$$

Selecionando  $H_w$ ,  $g$  e  $\rho_w$  como as variáveis independentes, parte dos termos resultantes da análise dimensional estão apresentados a seguir, na Equação 2, sendo que  $Fr_d$  é o número de Froude considerado,  $Re_d$  é o número de Reynolds da descarga e os demais termos são equivalentes aos já apresentados.

$$f\left(Fr_d; Re_d; \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}; \frac{d_s}{D}; \frac{H_W}{D}; \frac{L_{smax}}{D}\right) = 0 \quad (2)$$

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando os ensaios foi possível observar que geometria da parte superior do cone de remoção de sedimentos é semicircular, podendo ser representada por um semicírculo de raio equivalente ao comprimento máximo de remoção do sedimento ( $L_{smax}$ ), conforme verificado por Emamgholizadeh et al. (2006) e Madadi et al. (2016) e apresentado na Figura 4 e Figura 5.

A análise das geometrias dos cones permitiu determinar o perfil longitudinal destes elementos, conforme apresentado na Figura 8 e Tabela 3.

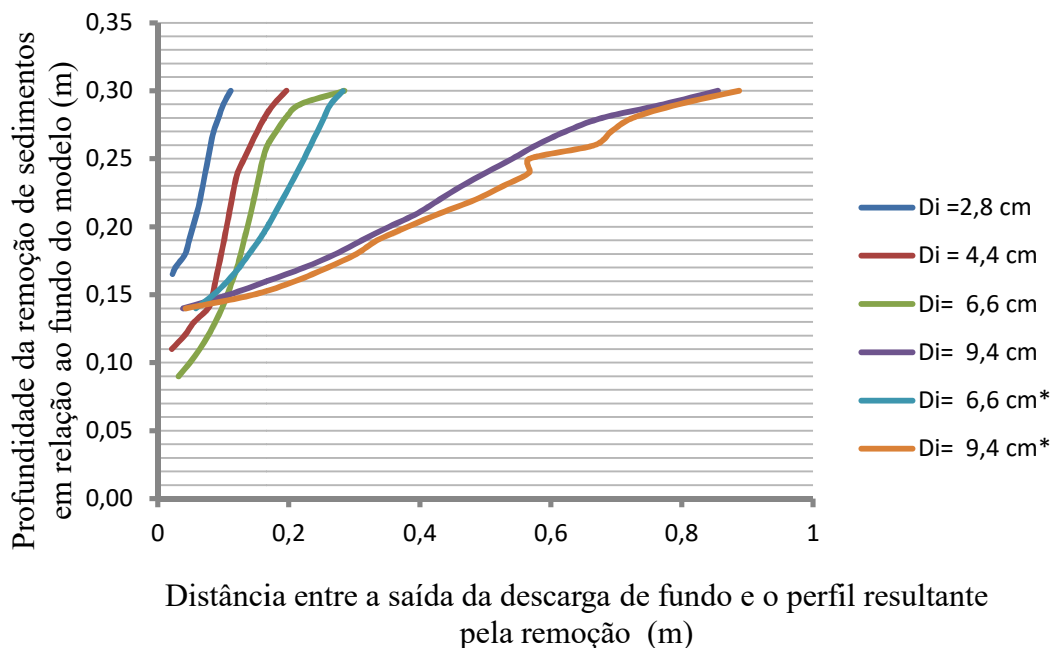
**Tabela 3.** Comprimento máximo de remoção do sedimento ( $L_{smax}$ ).

Diâmetro externo	cm	De	3,30	5,00	7,50	10,0
Diâmetro interno	cm	Di	2,80	4,40	6,30	9,40
Comprimento máximo de remoção do sedimento	m	$L_{smax}$	0,119	0,196	0,22	0,845
Relação de $L_{smax} / D_i$	-	$L_{smax}/D_i$	4,250	4,455	3,492	8,989

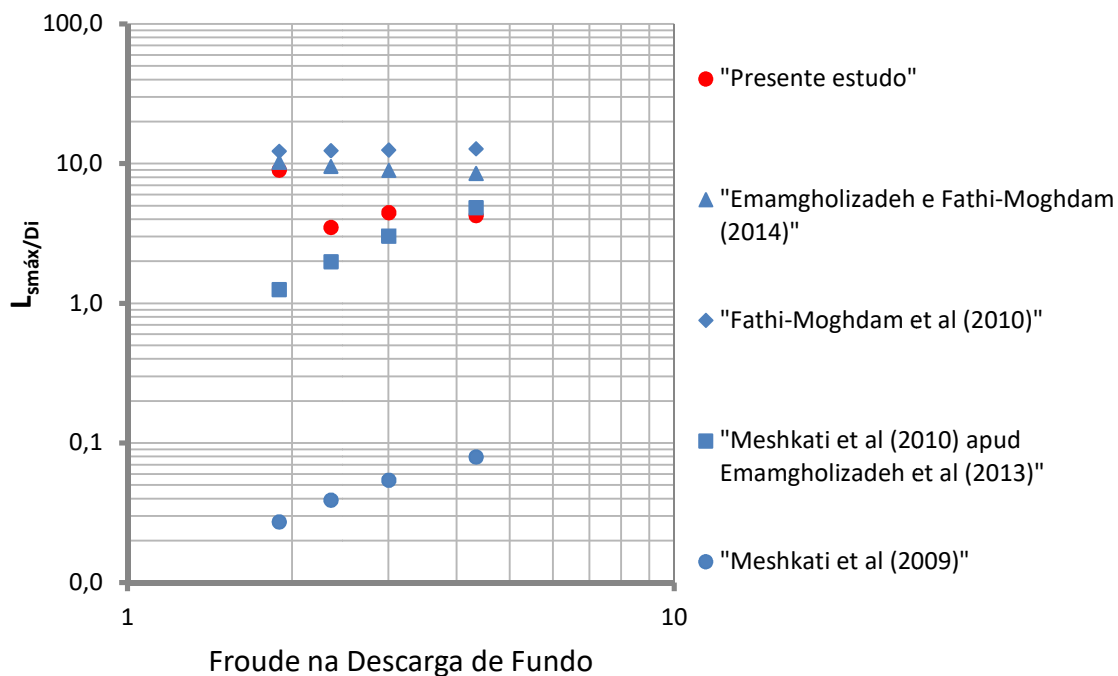
A partir do perfil longitudinal do cone foi possível determinar os valores de  $L_{smax}$  e compará-los com os valores encontrados pelas equações disponíveis na bibliografia e apresentadas na Tabela 1. Estas análises estão presentes na Figura 9.

De acordo com a Figura 9, pode-se observar que os valores de Meshkati et al. (2009) apresentam os resultados mais inferiores, provavelmente devido ao fato de o valor da massa específica do sedimento nesses ensaios ser igual a  $1800 \text{ kg/m}^3$  (sílica). Os valores de Meshkati et al. (2010) em Emamgholizadeh et al. (2013) foram os que mais se aproximaram dos valores obtidos neste estudo. Entretanto, os valores de Fathi-Moghadam et al. (2010) e Emamgholizadeh e Fathi-Moghadam (2014) apresentaram a

mesma ordem de grandeza entre si, mas com relações da ordem de 3 vezes maiores se comparados com os resultados da presente análise.



**Figura 8.** Valores de comprimento máximo de remoção dos sedimentos ( $L_{smax}$ ) obtidos no presente estudo (onde \* indica ensaios com diferentes condições).



**Figura 9.** Comparação com diferentes autores da relação  $L_{smáx}/D_i$  em função do número de Froude no interior da descarga de fundo.



## **5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

Segundo as análises preliminares pode-se observar que os resultados são sensíveis à massa específica do material ensaiado, sendo que este parâmetro deve ser considerado em análises futuras. A formulação de Meshkati et al. (2010) em Emamgholizadeh et al. (2013) apresentaram resultados coerentes, entretanto, também devendo ser considerada em análises futuras.

Na continuidade dos trabalhos referentes a esta pesquisa sugere-se que sejam realizadas novas configurações de ensaios e sejam utilizados materiais de diferentes massas específicas e granulometrias, de modo a compreender o fenômeno de formação e de tornar possível a formulação de equações de previsão.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem às instituições e empresas que contribuíram com apoio financeiro parcial para realização da pesquisa relacionada ao presente artigo, sendo elas a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES/Brasil), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq/Brasil), a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP/Brasil), a Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobras), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS/Brasil), Furnas Centrais Elétricas S.A., a Fundação de Apoio Universitário (FAU/UFPel) e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS).

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Batuca D.G., Jordaan J.M.Jr. (2000). Silting and desilting of reservoirs. CRC Press.
- Comitê Brasileiro de Barragens. (1996). Descarregadores de Fundo: Experiência Brasileira. 149 p.
- Comitê Brasileiro de Barragens. (2003). Assoreamento em Reservatório: diretrizes e estudos de caso. Boletim 115, [S.l]: [s.n.].
- 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.
- Emamgholizadeh S., Fathi-Moghadam M. (2014). Pressure Flushing of Cohesive Sediment in Large Dam Reservoirs. ASCE. Journal of Hydrologic Engineering 19(4), pp. 674-681.
- Emamgholizadeh S., Bateni S.M, Jeng D.S. (2013). Artificial intelligence-based estimation of flushing half-cone geometry. Engineering Applications of Artificial Intelligence, n. 26, pp.2551-2558.
- Fathi-Moghadam M. et al. (2010). Physical modelling of pressure flushing for desilting of non-cohesive sediment. Journal of Hydraulic Research, v. 48, n. 4, pp.509-514.
- Fruchard F., Camenen B. (2012). Reservoir Sedimentation: Different type of flushing- friendly flushing example of genissiat dam flushing, in proceedings of ICOLD International Symposium on Dams for a Changing World, Kyoto, Japan, 6 p.

- Hsieh W.S. (1999). Flushing sediment through reservoirs in *Journal of Hydraulic Research*, v. 37. n 6.
- Lai J.S., Shen H.W. (1996). Flushing sediment through reservoirs. *Journal of Hydraulic Research* 34(2), pp. 237-255.
- Madadi M.R., Rahimpour M., Qaderi K. (2016). Sediment flushing upstream of large orifices: An experimental study, in *Flow Measurement and Instrumentation* 52, pp.180–189.
- Mahmood, K. (1987). Reservoir sedimentation: impact, extent, and mitigation. [S.l.]: [s.n.].
- Meshkati M.E., Dehghani A. A., Naser G., Emamgholizadeh S., Mosaedi A. (2009). Evolution of Developing Flushing Cone during the Pressurized Flushing in Reservoir Storage. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, Vol.3, No 10, pp.355–359.
- Oliveira N. et al. (2000). *Guia de Avaliação de assoreamento de reservatórios*, 140 p. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/guiaasso.pdf>.
- Shahmirzadi M.E.M., Dehghani A.A., Sumi T., Mosaedi A., Mefth-a H.M. (2010). Experimental Investigation of Pressure Flushing Technique in Reservoir Storages, in *Water and Geoscience proceedings of the 5th IASME/WSEAS International Conference on Water Resources, Hydraulics and (WHH'10) and the 4th IASME/WSEAS International Conference on Geology and Seismology (GES'10)*, University of Cambridge, UK, February 23-25, pp. 132-137.
- Shoaib A. et al. (2014). Investigation of Flushing Phenomena in a Reservoir, in *International Journal of Scientific and Engineering Research*, Vol. 5, Issue 3 march 2014.
- Talebbeydokhti N., Naghshineh A. (2004). Flushing Sediment Through Reservoirs. *Iranian Journal of Science & Technology*, Dept. of Civil Engineering, Shiraz University, Shiraz, I. R. of Iran. Transaction B, 28(B1), pp. 119-136.