

## MODELAGEM MATEMÁTICA DO ASSOAREAMENTO NO RESERVATÓRIO DO MODELO REDUZIDO DE UMA PCH

Herycson W. M. Santos<sup>1\*</sup>, Emmanuel K. C. Teixeira<sup>2</sup>, Lucas F. Gonçalves<sup>1</sup>, Orlando F. Freitas Júnior<sup>1</sup>, Eliane P. C. Santos<sup>3</sup>

1. Estudante da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)
2. Professor da UFSJ – Dep. de Tecnologia em Eng. Civil (DTECH) / Orientador
3. Professora da UFSJ do DTECH

### Resumo

Reservatórios construídos para geração de energia elétrica estão sujeitos a algum grau de assoreamento. Por isso, deve-se estimar o volume de sedimentos acumulados. Assim, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a eficiência de um modelo numérico em estimar o assoreamento ocorrido no reservatório do modelo reduzido de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH). No modelo reduzido foram simulados dois períodos de assoreamento, um para calibrar o modelo numérico e outro para que se compare o assoreamento observado com o simulado. O modelo numérico utilizado consta no *software* HEC-RAS. Observou-se que o resultado numérico do assoreamento, no período utilizado para sua calibração, se aproximou do real. Porém, foi diferente em todas as seções, no segundo período de assoreamento simulado no modelo reduzido. Com isso, tem-se que o HEC-RAS é útil para simulação de assoreamento em reservatório, mas o seu resultado em período diferente do utilizado na sua calibração pode ser muito distante do real.

**Palavras-chave:** Hidrossedimentologia; HEC-RAS; Modelo físico.

**Apoio financeiro:** UFSJ.

**Trabalho selecionado para a JNIC:** Pro-reitoria de Pesquisa da UFSJ.

### Introdução

Os reservatórios podem ser construídos para diversas finalidades, como geração de energia e controle de enchentes (ESTIGONI *et al.*, 2014) e, ainda, acúmulo de rejeitos de mineração. Essas estruturas formadas em cursos d'água naturais estão sujeitas a algum grau de assoreamento, sendo que os problemas decorrentes desse fenômeno dizem respeito, principalmente, à redução do seu volume, o que pode interferir no uso para o qual o reservatório foi construído. Segundo Yang (2003), globalmente a taxa de perda anual da capacidade de armazenamento de reservatórios devido à sedimentação é estimada em 1% a 2% da capacidade de armazenamento total. No Brasil, Carvalho (2008) indicou uma perda de capacidade de armazenamento de 0,5% ao ano para os reservatórios do país.

Diante disso, faz-se necessário o estudo do assoreamento, visto que os mecanismos que contribuem para a sedimentação são bem conhecidos, mas seus conteúdos físicos ainda não são completamente dominados (SCHLEISS *et al.*, 2016). Entretanto, observa-se que esses estudos não recebem, em geral, a devida atenção no Brasil, o qual apresenta uma rede de monitoramento sedimentométrico bastante precária (BRITO, 2013). Tem-se também que a estimativa do volume e distribuição do material depositado pode auxiliar para que as medidas preventivas e corretivas possam ser tomadas de forma mais eficientes (Annandale, 2011 *apud* Adam *et al.* 2015).

Um meio de se estudar o assoreamento é a partir da modelagem matemática, a qual se utiliza de formulações para representar esse processo, sendo que essas equações devem ser posteriormente validadas, com seus resultados comparados aos obtidos em campo ou em laboratório, a partir de modelos físicos. Um *software* utilizado na estimativa de assoreamento é o HEC-RAS, o qual é citado em várias publicações da *American Society of Civil Engineers* (ASCE) e em outras, como Pinheiro *et al.* (1997), Nicklow e Mays (2000), Roman (2004), Chaves *et al.* (2008), Cortez (2013) e Vale (2014).

Assim, este trabalho teve como propósito a avaliação da eficiência de um modelo numérico, contido no HEC-RAS, para o estudo de assoreamento no reservatório de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH), sendo que para isso foram usados os dados de assoreamento coletados em um modelo reduzido dessa PCH.

### Metodologia

Nessa pesquisa, utilizou-se o *software* HEC-RAS 5.0.3, devido à sua consolidada aplicação na área hidráulica e por ser um programa livre, o qual foi desenvolvido pela *US Army Corps of Engineers* no começo da década de 70 e é o modelo matemático unidimensional mais conhecido (CAMPOS, 2001).

Num primeiro momento, para calibrar o modelo numérico, simulou-se o assoreamento com base nos dados hidrossedimentológicos (vazão e curva-chave de sedimentos) para o período 2013-2017. No programa HEC-RAS foram inseridos os dados da série histórica de vazões diárias da PCH, os quais foram convertidos para o modelo reduzido; a curva-chave de sedimentos do modelo reduzido; as seções transversais do modelo reduzido referentes a 2013; a granulometria do sedimento transportado; escolheu-se a equação de transporte

de sedimento de Wilcock e Crowe (2003), por ser a mais adequada para o sedimento em questão, de acordo com USACE (2016); o método de Report 12 (*default* do programa) para cálculo da velocidade de queda dos sedimentos; o método de Exner 5 para calcular a espessura da camada ativa, sendo esse método o indicado para leitos que tem limite de erosão, como é o caso da PCH, de acordo com Vale (2014); e adotou-se 21°C de temperatura para a água.

Outro parâmetro de entrada necessário na simulação numérica é o coeficiente de Manning, sendo esse o parâmetro a ser calibrado. Para isso, no HEC-RAS, como feito por Teixeira *et al.* (2018a), foram arbitrados valores de Manning, sendo que para cada valor arbitrado foi realizada uma simulação do assoreamento. O resultado obtido era comparado com o observado no modelo reduzido. Esse procedimento foi repetido até que o valor de Manning arbitrado resultasse num assoreamento simulado próximo ao real do modelo físico.

Posteriormente, simulou-se no HEC-RAS o assoreamento ocorrido entre 2008 e 2012, de forma a se avaliar a eficiência do programa em estimar esse fenômeno. No *software*, foram inseridos os mesmos parâmetros da simulação do período anterior, sendo que a diferença se deu nos valores da série histórica de vazões diárias da PCH (os valores foram convertidos para o modelo reduzido) e a curva-chave de sedimentos do modelo reduzido, os quais são do novo período de simulação (2008 a 2012). O coeficiente de Manning utilizado foi o calibrado na simulação do período 2013-2017.

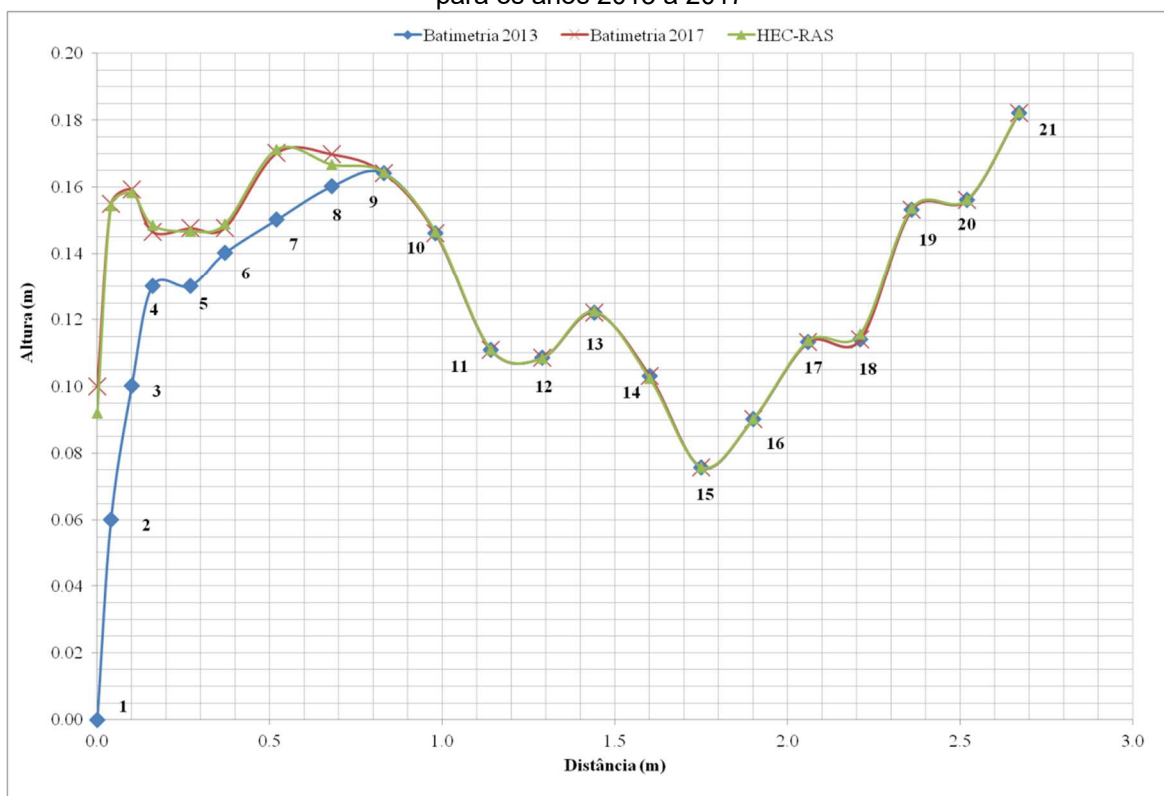
O resultado obtido via modelo numérico foi comparado ao real observado no modelo reduzido da PCH. Ressalta-se que se optou pela comparação com o modelo reduzido, ao invés do assoreamento observado na própria PCH, pois a medição do assoreamento no modelo físico se dá de forma mais precisa e controlada, comparada às técnicas utilizadas em campo, na PCH.

## Resultados e Discussão

Utilizando-se dados do período de 2013-2017, buscou-se um valor de Manning que reproduzisse o assoreamento simulado no HEC-RAS próximo ao observado no modelo reduzido, sendo o melhor valor médio encontrado de 0,035. Esse valor foi superior ao 0,01 encontrado por Teixeira *et al.* (2018a), para o mesmo modelo reduzido. Isso se justifica, pois após o estudo desses autores foi construído um vertedor no modelo reduzido, o qual passou a controlar o nível d'água de escoamento, consequentemente, alterando o valor de Manning.

Na Figura 1, estão apresentados os perfis longitudinais do assoreamento simulado no HEC-RAS (linha verde), utilizando-se o Manning calibrado, e o assoreamento ocorrido no modelo reduzido da PCH. A linha azul (Batimetria 2013) indica o ponto de menor cota das seções transversais, em 2013 (início do período simulado), e a vermelha (Batimetria de 2017) apresenta a altura assoreada nesses pontos. Percebe-se que o assoreamento final modelado (linha verde) está praticamente igual ao real (linha vermelha), indicando boa calibração do valor de Manning.

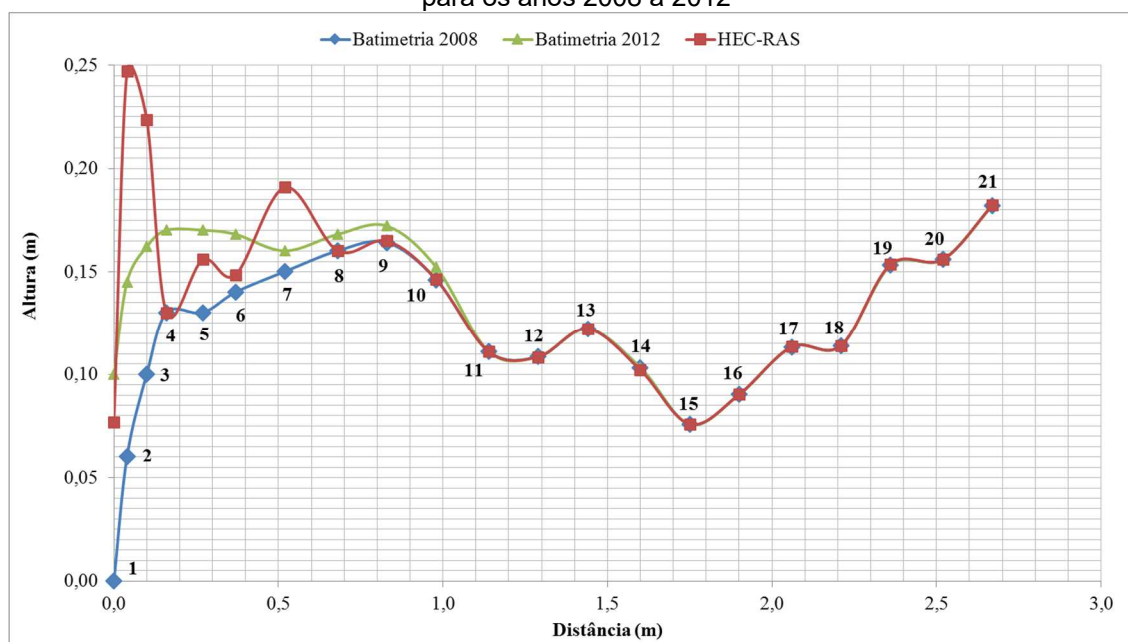
**Figura 1** - Perfil longitudinal do assoreamento real do modelo reduzido da PCH e o simulado no HEC-RAS, para os anos 2013 a 2017



A simulação numérica e o assoreamento observado no modelo reduzido, para o período 2008 a 2012, estão apresentados na Figura 2, em que a altura assoreada foi medida com relação ao ponto mais baixo de cada seção transversal. O resultado final obtido no HEC-RAS (linha vermelha), comparado ao ocorrido no modelo

físico (linha verde – Batimetria 2012), indicou que não houve assoreamento entre as seções “10” e “21”, como o ocorrido. Porém, o assoreamento simulado numericamente foi subestimado nas seções “1”, “5”, “6” e “9” e superestimado na “2”, “3” e “7”. Nas seções “4” e “8” o programa apresentou que houve erosão do leito, o que não ocorreu no real. Assim, tem-se que o assoreamento simulado no HEC-RAS se distanciou do observado no modelo físico.

**Figura 2** - Perfil longitudinal do assoreamento real do modelo reduzido da PCH e o simulado no HEC-RAS, para os anos 2008 a 2012



Um dos motivos que justifica o assoreamento simulado para o período 2008-2012 não ter sido igual ao observado em nenhuma seção transversal é o fato do Manning utilizado na simulação ser do período 2013-2017. As vazões dos períodos são diferentes, conseqüentemente, os níveis d'água também. Como apresentado por Chow (1959) e observado por Teixeira *et al.* (2018b), Zink e Jennings (2014), Fathi e Drikvandi (2012), Matos *et al.* (2011), Lyra *et al.* (2010) e Kim *et al.* (2010), tem-se que o coeficiente de Manning varia na seção transversal devido à variação do nível d'água, sendo quanto menor a profundidade da água, maior o valor do coeficiente, pois os efeitos das irregularidades do fundo do canal são mais evidentes. Assim, tem-se que ao se simular o assoreamento no HEC-RAS, deve se ter cuidado com a calibração de Manning, pois ele influencia no processo de simulação da sedimentação.

### Conclusões

Ao longo desse trabalho foram apresentados os fundamentos que nortearam o desenvolvimento dessa pesquisa, a qual teve por objetivo avaliar a eficiência de um modelo numérico, contido no *software* HEC-RAS, em estimar o assoreamento no reservatório do modelo reduzido de uma PCH. Com base nos resultados obtidos, tem-se que, para o primeiro período de simulação, o qual foi utilizado para calibração, o modelo numérico apresentou resultado praticamente idêntico ao observado no modelo reduzido. Porém, no segundo período de modelagem, o assoreamento obtido numericamente diferiu do ocorrido no modelo reduzido em todas as seções transversais, nas quais ocorreu o fenômeno. Diante disso, recomenda-se que se tenha cuidado ao se utilizar o HEC-RAS para estimar assoreamentos em períodos futuros, tendo como base parâmetros calibrados em outros períodos observados.

### Referências bibliográficas

- ADAM, N.; ERPICUM, S.; ARCHAMBEAU, P.; PIROTTON, M.; DEWALS, B. Stochastic modeling of reservoir sedimentation in a semi-arid watershed. *Water Resour Manage*, v. 29, p. 785–800, 2015.
- ANNANDALE, G. Going full circle. *Internacional Water Power Dam Construction*, v. 63, n.4, p. 30–34, 2011.
- BRITO, G. M. *Determinação do assoreamento do reservatório da PCH Cachoeirão*. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. 2013.
- CAMPOS, R. *Three-dimensional reservoir sedimentation model*. University of Newcastle, Newcastle, UK. [S.l.]. 2001.
- CARVALHO, N. O. *Hidrossedimentologia prática*. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2008. 599 p.
- CHAVES, P.; MOREIRA, J. C.; XAVIER, M. C. R.; DOMINGUES, N. R. Modelagem hidrossedimentológica com o modelo Hec-Ras 4.0: Caso de estudo do rio Macaé. In: VIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, ENES, 2008.

CHOW, V.T. *Open Channel Hydraulics*. McGraw–Hill Book Co., New York, 1959.

CORTEZ, J. R. Desempenho de modelos numéricos em estudos de assoreamento de reservatórios – caso UHE Aimorés. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

ESTIGONI, M. V.; MATOS, A. J. S.; MAUAD, F. F. Assessment of the accuracy of different standard methods for determining reservoir capacity and sedimentation. *Journal Soils Sediments*, v. 14, n. 7, p. 1224-1234, 2014.

FATHI, M. M.; DRIKVANDI, K. Manning roughness coefficient for rivers and flood plains with non-submerged vegetation. *International Journal of Hydraulic Engineering*, v. 1, n. 1, p. 1-4, jan. 2012.

KIM, J. S.; LEE, C. J.; KIM, W.; KIM, Y. J. Roughness coefficient and its uncertainty in gravel-bed river. *Water Science and Engineering*, v. 3, n. 2, p. 217-232, jun. 2010.

LYRA, G. B.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S.; LYRA, G.B. Coeficiente de rugosidade de Manning para o Rio Paracatu. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.4, p.343–350, abr. 2010.

MATOS, A. J. S.; PIOLTIME, A.; MAUAD, F. F.; BARBOSA, A. A. Metodologia para a caracterização do coeficiente de Manning variando na seção transversal e ao longo do canal. Estudo de caso bacia do Alto Sapucaí-MG. *RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 16, n. 4, p. 21-28, out./dez. 2011.

NICKLOW, J. W.; MAYS, L. W. Optimization of multiple reservoir networks for sedimentation control. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.126, n.4, 2000.

PINHEIRO, M. C.; SILVA, R. C. VIEIRA; SILVA, D. L. Modelação matemática de assoreamento em cabeceiras de reservatórios. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Vitória: ABRH. 1997.

ROMAN, V. *Análise do Equilíbrio Morfológico em Rios Regularizados: Modelagem Matemática Unidimensional do Transporte de Sedimentos no Rio São Francisco*. 2004. 160 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

SCHLEISS, A. J.; FRANCA, M. J.; JUEZ, C.; CESARE, G. Reservoir sedimentation. *Journal of Hydraulic Research*, v. 54, n.6, p. 595-614, 2016.

TEIXEIRA, E. K.C.; COELHO, DUTRA, A. V. R.; SALIBA, A. P. M.; M. L. P.; SANTOS, H. W. M.; GONÇALVES, L. F.; FREITAS JÚNIOR, O. F. Calibração do coeficiente de Manning do modelo reduzido de uma PCH. In: XIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, ENES, 2018a.

TEIXEIRA, E. K.C.; COELHO, M. M. L. P.; PINTO, E. J. A.; DINIZ, J. G.; SALIBA, A. P. M. Manning's roughness coefficient for the Doce River. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 23, n. 52, p. 1-12, 2018b.

USACE. U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. Hydrologic Engineering Center (HEC), Version 5.0, 2016, 960 p.

VALE, V. L. *Reconstituição da calha natural do reservatório da PCH Salto do Paraopeba*. 2014. 79 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

WILCOCK, P.R.; CROWE, J.C. Surface-based transport model for mixed-size sediment. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, v. 129, n.2, p. 120-128, 26. 2003.

YANG, X. *Manual on Sediment Management and Measurement*. World Meteorological Organization, Operational Hydrology, n. 47, Secretariat of the World Meteorological Organization – Geneva: Switzerland. 2003.

ZINK, J. M.; JENNINGS, G. D. CHANNEL ROUGHNESS IN NORTH CAROLINA MOUNTAIN STREAMS. *JAWRA: Journal of the American Water Resources Association*, v. 50, n. 5, p. 1354-1358, out. 2014.