



Calibração do coeficiente de Manning do modelo reduzido de uma PCH

Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira¹; Alberto Varotto Rinco Dutra²; Aloysio Portugal Maia Saliba³; Márcia Maria Lara Pinto Coelho⁴; Herycson Walker Mendes Santos⁵; Lucas Ferraz Gonçalves⁶ & Orlando Francisco de Freitas Júnior⁷

ABSTRACT – When reservoirs are built, they are subject to some degree of silting, as they increase the wet area and decrease the flow velocity, thus reducing the sediment's sustaining forces. A mechanism to evaluate reservoir siltation is through physical models, which also provide data for validation of numerical models. Therefore, a reduced model of a Small Hydroelectric Power Plant (SHP) was constructed and, for this model, its Manning's coefficient was calibrated, since this coefficient is one of the parameters that must be informed to the numerical model. The best value found for Manning was 0.01, and this value allowed for depths measured in the reduced model close to those simulated in the HEC-RAS, in addition to the flow having the same behavior in both cases, real and simulated.

Palavras-Chave – Modelagem física, assoreamento em reservatórios.

1) Universidade Federal de São João Del-Rei, Rod. MG 443, km 07, Ouro Branco - MG, emmanuel.teixeira@ufsj.edu.br, (31) 9 8716-1876

2) Universidade Federal de São João Del-Rei, Rod. MG 443, km 07, Ouro Branco - MG, leonardodasilvamachado@hotmail.com, (31) 9 9998-4515

3) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, asaliba@ehr.ufmg.br, (31) 9 8809 - 2319

4) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, lara@ehr.ufmg.br, (31) 9 8716-1876

5) Universidade Federal de São João Del-Rei, Rod. MG 443, km 07, Ouro Branco - MG, herycson.mendes@gmail.com, (31) 9 8716-1876

6) Universidade Federal de São João Del-Rei, Rod. MG 443, km 07, Ouro Branco - MG, lucafgoncalves@hotmail.com, (31) 9 8716-1876

7) Universidade Federal de São João Del-Rei, Rod. MG 443, km 07, Ouro Branco - MG, offj.junior@hotmail.com, (31) 9 8716-1876



1 - INTRODUÇÃO

Quando se constrói um reservatório em um curso d'água natural, tende-se a alterar o equilíbrio do rio, já que são modificadas as características hidráulicas do escoamento e, conseqüentemente, a capacidade do rio em transportar sedimentos. Assim, essas estruturas estão sujeitas a algum grau de assoreamento. Esse processo está presente em muitos reservatórios no Brasil, tanto que Carvalho (1994) destaca uma lista de 38 reservatórios que foram afetados pelo assoreamento. Observando a data dessa publicação, pode-se prever que, atualmente, o número de reservatórios afetados é ainda maior. Além disso, tem-se que o número de estudos na área ainda é pequeno e não supre a carência que se tem. Assim, tem-se como desafio estimar a taxa de assoreamento e quando os sedimentos acumulados começarão a interferir nas funções para as quais o reservatório foi construído.

No estudo da arte sobre assoreamento em reservatórios realizado por Schleiss *et al.* (2016), os autores afirmaram que os mecanismos que contribuem para a sedimentação do reservatório são bem conhecidos, mas seus conteúdos físicos ainda não são completamente dominados teoricamente. Por isso, estudos sobre o processo do assoreamento, feitos em modelos reduzidos, podem ajudar no avanço da compreensão desse processo.

A modelagem física pode ser utilizada nos estudos de estruturas hidráulicas, transporte de sedimento, hidráulica fluvial e marítima. O modelo geralmente possui dimensões mais reduzidas que o protótipo (estrutura real), o que pode reduzir o custo e facilitar o controle das grandezas a serem consideradas. Além disso, ele deve comportar-se de modo semelhante ao sistema cujo comportamento se quer prever, ou seja, comportar-se semelhante ao protótipo. Por isso, recorre-se à Teoria da Semelhança para se estabelecer os princípios básicos a serem obedecidos ao se projetar, construir e operar o modelo físico.

Segundo Waldron (2008), a grande vantagem da modelagem física é a capacidade de replicar situações de fluxos complexos. Porém, uma das principais limitações dessa modelagem deve-se aos efeitos das escalas utilizadas para se alcançar a semelhança hidráulica entre o protótipo e o modelo. Por exemplo, na maioria das vezes não se consegue alcançar a semelhança da escala do número de Froude e à de Reynolds ao mesmo tempo, sendo necessário haver um relaxamento em uma delas, o que, se não bem estudado, pode provocar que o modelo não simule a realidade do protótipo.

Além de auxiliar no entendimento do comportamento do assoreamento em um reservatório, a modelagem física pode também contribuir para validação de modelos numéricos, visto que a falta de dados disponíveis para o protótipo pode impossibilitar a calibração das formulações de fluxo e de transporte de sedimentos, o que torna a confiabilidade das previsões da modelagem matemática questionável (MORAN *et al.*, 2013).



No Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) foi construído um modelo reduzido de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH), a qual está situada na bacia hidrográfica do São Francisco. Esse modelo físico está sendo usado para estudar o comportamento do assoreamento no reservatório da PCH e também para que os dados coletados nele possam validar o modelo matemático que está sendo desenvolvido, o qual visa estimar o assoreamento em reservatórios de água.

Ocorre que para simulação matemática do comportamento hidráulico de rios, como simulação do transporte de sedimentos, um parâmetro comumente necessário em modelagens numéricas é o coeficiente de rugosidade de Manning (KIM *et al.*, 2013). Esse coeficiente expressa a resistência ao escoamento e pode variar de acordo com vários interferentes, como a rugosidade do leito do canal, vegetação, mudanças na geomorfologia do leito do canal com agração ou degradação de material, transporte de sedimento em suspensão e/ou de fundo, entre outros.

Assim, o objetivo desse trabalho foi coletar dados no modelo reduzido da PCH e utilizá-los para determinação do coeficiente de Manning do modelo físico, para que esse parâmetro pudesse ser informado ao modelo matemático desenvolvido.

2 - METODOLOGIA

O modelo reduzido da PCH foi dimensionado com base nos princípios da semelhança hidráulica, os quais envolvem obter semelhança em aspectos geométricos, cinemáticos e dinâmicos. Segundo Julien (2002), modelos em que a escala vertical (z) é diferente das escalas do plano (xy) são usualmente necessários quando se aborda o problema de transporte de sedimentos. O autor observa que manter semelhança cinemática e dinâmica só é possível em escala real. Portanto, é necessário observar qual dos fenômenos (gravitacionais ou viscosos) é mais importante preservar no modelo.

Nos processos que envolvem transporte de sedimentos, as condições cinemáticas do escoamento são muito importantes. No caso do assoreamento de reservatórios, a maior parte do transporte é realizada durante as cheias, em que se observam condições de escoamento turbulentas, quando as forças viscosas são negligenciáveis. Assim, o modelo reduzido construído apresenta escala distorcida e é baseado na semelhança do número de Froude. O modelo foi construído com placas de isopor, as quais foram revestidas com fibra de vidro. Ele é apresentado na Figura 1, entretanto, outros detalhes sobre o seu dimensionamento não serão abordados, por não ser objeto desse trabalho.

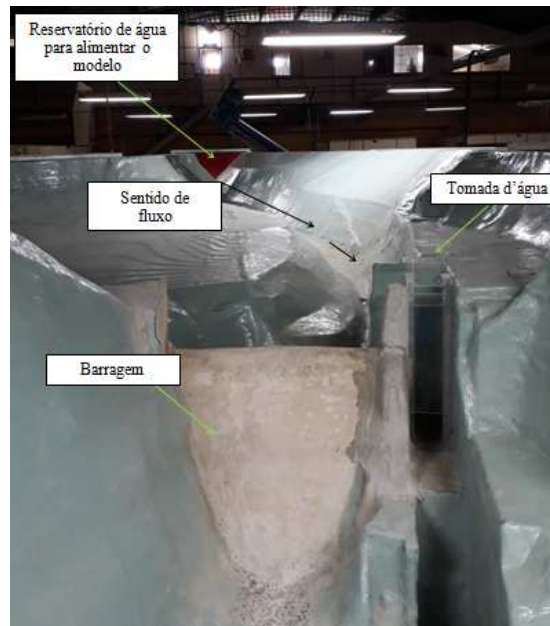


Figura 1 – Vista do modelo reduzido da PCH (fonte: autoria própria).

Como apresentado, uma característica importante para simulação numérica do assoreamento no modelo reduzido é o Coeficiente de Manning (n), por isso, ele teve que ser calibrado. Para isso, mediram-se quatro vazões e suas respectivas profundidades em três seções ao longo do modelo físico. A primeira é logo na entrada do modelo, sendo uma seção de controle crítica. As outras duas seções foram escolhidas por promover mais facilidade para medições das profundidades.

No programa HEC-RAS, inseriu-se a geometria do reservatório do modelo reduzido, sendo que as seções onde foram medidas as profundidades da água são a 28, 19 e 10, apresentadas na Figura 2. Essas seções estão distantes, aproximadamente, 4,0 m uma da outra.

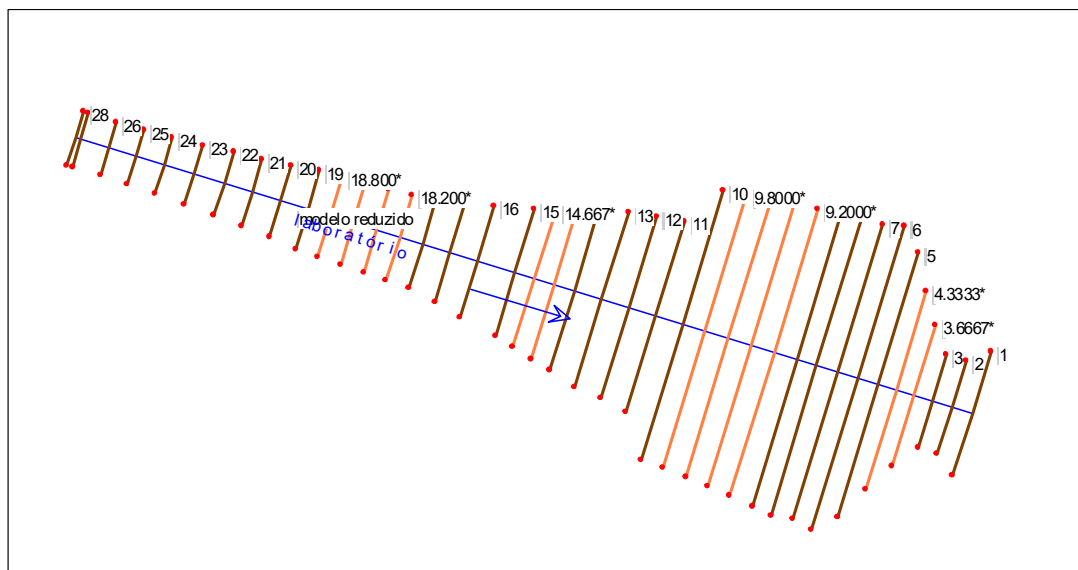


Figura 2 – Geometria do modelo reduzido inserida no HEC-RAS (fonte: autoria própria).



No HEC-RAS, arbitraram-se coeficientes de rugosidades de Manning até se estabelecerem profundidades simuladas próximas às lidas no modelo físico. Promoveram-se simulações para as quatro vazões ensaiadas adotando-se regime permanente de escoamento. Adotou-se escoamento crítico como condição de contorno tanto para a seção de montante quanto para a de jusante, sendo a seção de jusante onde está o vertedor, o qual é do tipo Creager.

Para cada Manning arbitrado, as profundidades de escoamento foram simuladas no programa. Fez-se a diferença entre a profundidade real medida no modelo reduzido e a simulada e calculou-se a raiz do erro do quadrático. Estipulou-se que o melhor Manning foi aquele que apresentou a menor raiz do erro médio quadrático (Equação 1).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_{HEC} - y_{real})^2}{n}} \quad (1)$$

sendo $RMSE$ o somatório do erro quadrático médio [m]; y_{HEC} [m] a profundidade de escoamento simulada no HEC-RAS; y_{real} [m] a profundidade de escoamento real medida no modelo reduzido; e n o número de medições.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando-se o HEC-RAS, obteve-se que o melhor resultado para o Coeficiente de Manning (n) foi alcançado para um valor de “ n ” igual a 0,01, sendo que para esse Manning obteve-se um menor erro médio quadrático, o qual foi de 0,016 m. Na Tabela 1 estão apresentados os resultados para esse valor de “ n ”. Nela é possível se comparar a diferença entre as profundidades reais (y_{real}) no modelo reduzido e as encontradas (y_{HEC}) a partir da simulação feita para as quatro vazões de escoamento.

Tabela 1 – Comparações entre as profundidades lidas e simuladas no HEC-RAS para um “ n ” de 0,01

Seção	Q (m ³ /s)	y_{real} (m)	y_{HEC} (m)	Fr
28	0,0038	0,070	0,065	0,95
19		0,060	0,050	0,56
10		0,095	0,090	0,41
28	0,0111	0,110	0,110	0,96
19		0,080	0,090	0,59
10		0,125	0,140	0,41
28	0,0194	0,160	0,140	0,99
19		0,100	0,070	2,02
10		0,165	0,170	0,45
28	0,0278	0,200	0,170	0,99
19		0,110	0,090	1,69
10		0,190	0,190	0,47

Na Figura 3 estão apresentados, para as quatro vazões ensaiadas, os perfis da linha d'água ao longo do modelo reduzido. Observa-se que no primeiro trecho, o qual está entre a primeira (seção 28) e a segunda seção (seção 19) utilizadas nas medições no modelo reduzido, o escoamento é prioritariamente supercrítico, visto que a profundidade de escoamento (linha azul) está abaixo da profundidade crítica (linha vermelha), algo que também foi observado no modelo reduzido. Já no segundo trecho, entre a segunda e a terceira seção (seção 10), o escoamento é mais subcrítico, também de acordo com o ocorrido no modelo físico. Assim, tem-se que o Manning calibrado ($n = 0,01$) além de permitir profundidades simuladas próximas às medidas, também propiciou regimes de escoamentos, com relação às forças gravitacionais, iguais aos reais.

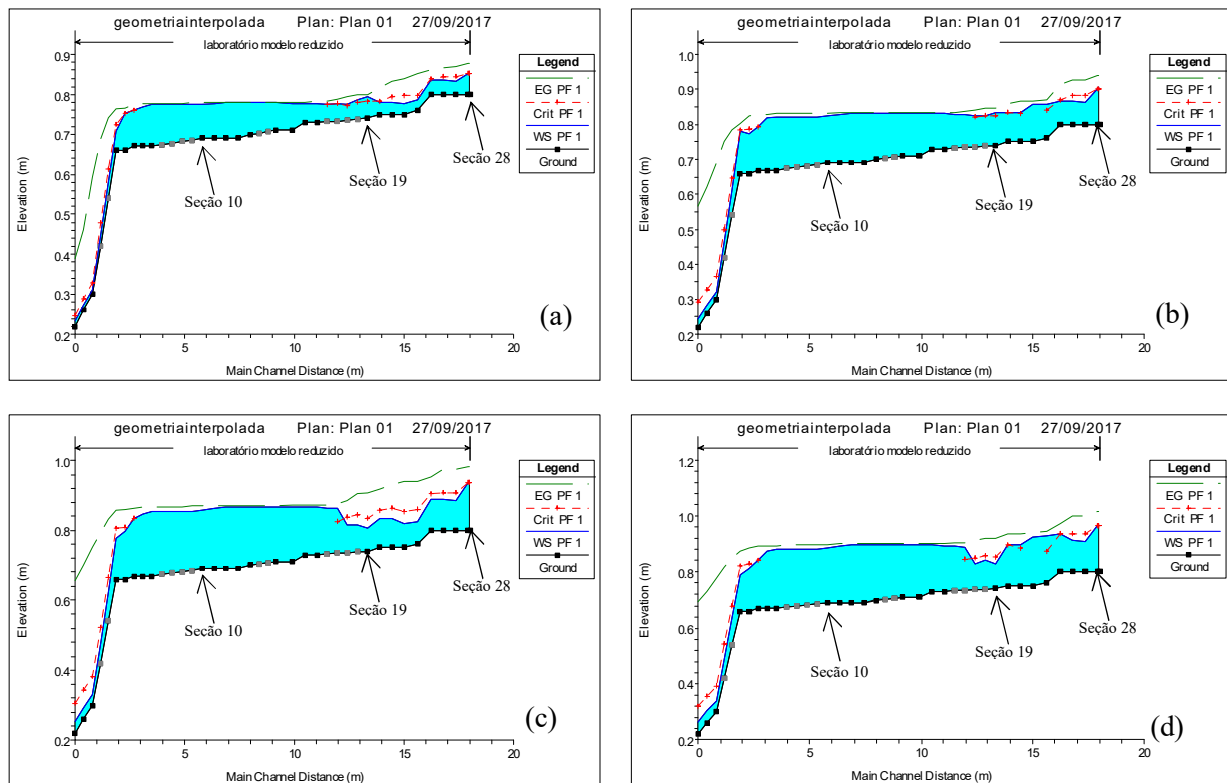


Figura 3 – Perfis da linha d'água ao longo do modelo reduzido – (a) vazão de $0,0038 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $0,011 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $0,019 \text{ m}^3/\text{s}$ e (d) $0,028 \text{ m}^3/\text{s}$ (fonte: autoria própria).

4 - CONCLUSÃO

Este artigo apresentou a calibração do coeficiente de Manning para o modelo reduzido de uma PCH, o qual foi construído com blocos de isopor revestidos com fibra de vidro. O melhor Manning encontrado ($n = 0,01$) propiciou profundidades de escoamentos no modelo físico próximas às simuladas no HEC-RAS. Além disso, os regimes de escoamentos nos trechos estudados foram os mesmos na simulação e no modelo reduzido.



BIBLIOGRAFIA

- CARVALHO, N. O. (1994). *Hidrossedimentologia prática*. Rio de Janeiro: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, 372 p.
- JULIEN, P. Y. (2002). *River mechanics*. 1ª ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 456 p.
- KIM, J. S.; LEE, C. J.; KIM, W.; KIM, Y. J. (2010). “*Roughness coefficient and its uncertainty in gravel-bed river*”. *Water Science and Engineering*, v. 3, n. 2, p. 217-232.
- MORAN, A. D.; ABDERREZZAK, K. E. K.; MOSSELMAN, E.; HABERSACK, H.; LEBERT, F.; AELBRECHT, D.; LAPERROUSAZ, E. (2013). “*Physical model experiments for sediment supply to the old Rhine through induced bank erosion*”. *International Journal of Sediment Research*, v. 28, n. 4, p. 431-447.
- SCHLEISS, A. J.; FRANCA, M. J.; JUEZ, C.; CESARE, G. (2016). “*Reservoir sedimentation*”. *Journal of Hydraulic Research*, v. 54, n.6, p. 595-614.
- WALDRON, R. L. (2008) “*Physical modeling of flow and sediment transport using distorted scale modeling*.” 2008. 86 f. Thesis (Master of Science in Civil Engineering) – Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Louisiana.