

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

CAPACIDADE DE VAZÕES MÉDIAS ANUAIS EM TRANSPORTAR SEDIMENTOS: ESTUDO DE CASO NO MODELO REDUZIDO DE UMA PCH

Martiniano Alves da Silva Filho¹; Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira²; Alberto Varotto Rinco Dutra³; Laís Turato Ballerini Silva⁴; Leonardo Montes Furtado⁵; Aloysio Portugal Maia Saliba⁶; Márcia Maria Lara Pinto Coelho⁷ & Eber José de Andrade Pinto⁸

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. Uma forma de se fazer isso é utilizando modelos físicos. Entretanto, a partir da literatura existente na área não é possível responder a algumas questões metodológicas que surgem em uma simulação física do assoreamento, como: qual vazão e descarga sólida utilizar; simular um hidrograma ou uma vazão constante; qual a escala de tempo do hidrograma (diária, mensal, anual). Assim, esse trabalho teve como objetivo simular um hidrograma de vazões médias anuais e suas respectivas descargas sólidas totais a fim de verificar se a partir disso era possível se obter o assoreamento ocorrido em um período de tempo em um modelo reduzido de uma PCH. A partir da simulação desse hidrograma no modelo físico, percebeu-se que as vazões médias anuais foram baixas e não propiciaram o transporte de sedimentos, o que foi comprovado a partir da utilização do ábaco de Shields.

ABSTRACT – Reservoirs built for electricity generation are subject to some degree of silting. Therefore, the volume of sediment accumulated must be estimated. One way to do this is by using physical models. However, from the existing literature in the area it is not possible to answer some methodological questions that arise in a physical simulation of silting, such as: what flow and solid discharge to use; to simulate a hydrograph or a constant flow; the time scale of the hydrograph (daily, monthly, annual). Thus, the objective of this work was to simulate a hydrograph of annual mean flows and their respective total solid discharges in order to verify if from this it was possible to obtain the silting occurring in a period of time in a reduced model of a SHP. From the simulation of this hydrograph in the physical model, it was observed that the annual mean flows were low and did not favor sediment transport, which was proven from the use of the Shields abacus.

Palavras-Chave – Ábaco de Shields; Modelo reduzido.

1) Universidade Federal de São João del-Rei, Rod. MG 443 km 07, Ouro Branco MG, (31) 99776-0476, martinalvesfilho@gmail.com
2) Universidade Federal de São João del-Rei, Rod. MG 443 km 07, Ouro Branco MG, (31) 98716-1876, emmanuel.teixeira@ufsj.edu.br
3) Universidade Federal de São João del-Rei, Rod. MG 443 km 07, Ouro Branco MG, (31) 99998-4515, albertovarotto20@gmail.com
4) Universidade Federal de São João del-Rei, Rod. MG 443 km 07, Ouro Branco MG, (31) 99890-6715, laishmhp@gmail.com
5) Universidade Federal de São João del-Rei, Rod. MG 443 km 07, Ouro Branco MG, (32) 98835-2656, leo-montes@hotmail.com
6) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte MG, (31) 98809 - 2319, asaliba@ehr.ufmg.br
7) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte MG, (31) 98834-1950, lara@ehr.ufmg.br
8) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte MG, (31) 98716-1876, eber.andrade@cprm.gov.br

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). 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 (ADAM *et al.* 2015).

Um meio de se estudar o assoreamento é a partir da modelagem física. O interesse da utilização desses modelos hidráulicos reside na possibilidade de simular um grande número de situações distintas, em tempo reduzido, permitindo desta forma a obtenção de soluções otimizadas, seguras e econômicas. O modelo geralmente possui dimensões menores que o protótipo, 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 Hidráulica para se estabelecer os princípios básicos a serem obedecidos ao se projetar, construir e operar o modelo físico, sendo essa teoria encontrada em diversas fontes, como Julien (2002).

Segundo Waldron (2008), uma grande vantagem da modelagem física é a capacidade de replicar situações de fluxos complexos. Porém, uma das principais limitações deve-se aos efeitos das escalas utilizadas para se alcançar a semelhança hidráulica entre o protótipo e o modelo. Por exemplo, 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 represente a realidade do protótipo.

Na literatura, vários trabalhos são apresentados, os quais utilizaram a modelagem física para estudar o complexo processo de transporte de sedimentos, como Moran *et al.* (2013), Bieri *et al.* (2012), Simonett e Weitbrecht (2011), Mefford e Gill (2010), Ho *et al.* (2010), Armanini *et al.* (2010), Waldron (2008), entre outros. Porém, todos esses trabalhos tiveram como objetivo a

estimativa futura do assoreamento e/ou a influência de alguma estrutura hidráulica nesse fenômeno, ou seja, nenhum se propôs a fazer uma retroanálise do assoreamento, o que possibilitaria responder a algumas questões metodológicas que surgem em uma simulação física, como: qual vazão e descarga sólida utilizar; simular um hidrograma ou uma vazão constante; qual a escala de tempo do hidrograma (diária, mensal, anual). Assim, esse trabalho teve como objetivo simular um hidrograma de vazões médias anuais e suas respectivas descargas sólidas totais, a fim de se verificar se a partir disso era possível se obter o assoreamento ocorrido em um período de tempo em um modelo reduzido de uma PCH.

METODOLOGIA

Nesse trabalho foi utilizado o modelo reduzido de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH), a qual está no Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH) da UFMG. Mais detalhes desse modelo podem ser consultados em Carvalho *et al.* (2014), sendo que aqui serão apresentados apenas os mais importantes, já que o projeto do modelo reduzido não configura um dos objetivos desse trabalho. Para o dimensionamento do modelo foram utilizados os princípios da semelhança hidráulica, os quais envolvem obter semelhança em aspectos geométricos, cinemáticos e dinâmicos. Segundo Julien (2002), modelos em que a escala vertical é diferente das escalas do plano são usualmente necessários quando se aborda o problema de transporte de sedimentos. Por isso, o modelo reduzido foi construído em escala distorcida, como apresentado na Tabela 1. Nessa tabela também estão apresentadas algumas outras escalas do modelo.

Tabela 1 – Escalas admitidas no projeto do modelo reduzido da PCH

Grandeza	Escala	Valor no protótipo	Valor no modelo
Comprimento	99,3	1200 m	12,1 m
Largura	99,3	600 m	6,0 m
Profundidade	25,0	30 m	1,2 m
Diâmetro do grão	0,4	0,45 mm	1,13 mm
Tempo	2.483	5 anos	18 h
Nº de Froude	1	-	-
Nº de Reynolds	125	-	-
Velocidade de sedimentação	2,5	7,9 cm/s	3,1 cm/s
Densidade dos sedimentos	15,8	1,65	1,11

Para simulação do assoreamento, eram conhecidas três batimetrias da PCH, as quais eram de 1956 (geometria primitiva da PCH), 2013 e 2017. Simular o assoreamento ocorrido entre os anos de 1956 e 2013, ou seja, 57 anos, no modelo reduzido equivale a 201,0 h, segundo a escala de tempo

do leito (Tabela 1). Realizar o experimento de forma ininterrupta nesse intervalo de tempo era inviável e impraticável operacionalmente. Por isso, a simulação do assoreamento foi realizada entre os anos de 2013 e 2017, ou seja, cinco anos de escoamento no protótipo, o que equivale a, aproximadamente, 18,0 h no modelo reduzido. Como a topografia inicial do modelo reduzido representava a do ano de 1956, ela precisou ser conformada para 2013, sendo que o modelo foi dividido em 21 seções transversais, nas quais foram medidas as alturas assoreadas ao término do período simulado (18,0 h).

Também foi necessário determinar quais vazões seriam utilizadas para simular o assoreamento ocorrido entre 2013 e 2017. Trabalhar com vazões diárias era difícil, visto que um dia do protótipo equivale a 35,0 s de escoamento no modelo, de forma que era inviável alterar de uma vazão para outra nesse curto intervalo de tempo. Assim, optou-se por trabalhar com as vazões médias anuais do período avaliado, já que um ano de escoamento equivale a, aproximadamente, 3,5 h no modelo, o que viabilizava as variações das vazões.

Na Tabela 2 estão apresentadas as vazões médias anuais (Q), as descargas sólidas (Q_{ST}) determinadas a partir delas, utilizando-se a curva-chave de sedimentos da PCH, e a quantidade total de sedimento inserida no modelo, sendo elas inseridas gradativamente ao longo das 3,5 h de escoamento de cada ano.

Tabela 2 – Dados utilizados para simulação do assoreamento ocorrido entre 2013 e 2017

Ano	Q (m ³ /h)	Q_{ST} (ton/d)	Massa (kg) total de sedimento inserido
2013	6,8	0,021	3,0
2014	2,8	0,002	0,2
2015	4,9	0,008	1,2
2016	7,1	0,024	3,4
2017	5,3	0,010	1,4

O sedimento utilizado para simular o assoreamento foi um material granulado de borracha, o qual é produzido industrialmente, com vantagens de ser insolúvel e atóxico, cuja densidade relativa determinada foi de 1,13 e seu diâmetro mediano (d_{50}) foi de 1,7 mm. Essa borracha foi estudada por Campello (2017) a fim de se verificar a sua eficiência como alternativa viável para sua utilização em modelos reduzidos; o autor apresenta que para o d_{50} de 1,7 mm, a velocidade média de queda é 2,7 cm/s.

À princípio, a alimentação dos sedimentos seria feita através de um equipamento dosador de sólidos (um parafuso de Arquimedes), o qual é composto por uma rosca sem fim acoplada a um silo, que por sua vez é acionada por um motor com velocidade variável através de inversor de frequência. Porém, verificou-se que, mesmo na menor rotação, a mínima descarga sólida do

equipamento era maior que as descargas sólidas do período a ser simulado, visto que no período (2013-2017) houve longa estiagem, de forma que as descargas sólidas foram muito pequenas. Diante disso, optou-se por inserir manualmente de forma contínua o sedimento no modelo reduzido.

O sedimento foi inserido em um único ponto – na seção mais à montante do trecho simulado. Isso foi feito, pois o assoreamento foi simulado num trecho de 300,0 m do reservatório (3,0 m no modelo reduzido), sendo que a contribuição principal de sedimento é a que vem de montante, ou seja, a contribuição lateral é pequena. Ressalta-se que em visita à PCH não se constatou erosões nas margens ao longo do trecho simulado, o que poderia favorecer a contribuição lateral de sedimentos.

A distribuição e o desenvolvimento do assoreamento no modelo reduzido ao longo do intervalo de tempo (18,0 h) foram acompanhados através de fotos, vídeos e medição dos depósitos de sedimentos, sendo o resultado final comparado com os dados da batimetria de 2017. A medição dos depósitos foi feita com o auxílio do Sensor Fotoelétrico modelo OM70-X0500. HI0660.VI, da Baumer. Esse sensor dispõe de um visor que mostra a distância entre o aparelho e a superfície medida, nesse caso, o depósito de sedimento. Como o aparelho é muito sensível e, em alguns momentos, apresentou grande variação em torno do valor medido, também se mediu os depósitos com auxílio de régua, para comprovar o valor medido pelo sensor. Assim, ao término das 18,0 h, o modelo reduzido foi esvaziado cuidadosamente para não se alterar a topografia dos sedimentos e foram medidas as alturas assoreadas ao longo das 21 seções transversais de interesse, de forma que a medida foi feita no ponto de menor cota da seção transversal, para assim compor o perfil longitudinal do assoreamento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para simulação do assoreamento no modelo reduzido foram utilizadas como base as batimetrias de 2013 e 2017 da PCH, as quais foram convertidas para o modelo físico, cujos perfis estão apresentados na Figura 1. Para cada uma das 21 seções transversais utilizadas na simulação, determinou-se o seu ponto de menor cota para compor esse perfil longitudinal. Esse procedimento é o mesmo adotado por alguns programas hidráulicos que simulam o assoreamento em uma dimensão, como o HEC-RAS. A seção “1” é a mais próxima do vertedor e a “21”, conseqüentemente, a mais à montante dele. Pela Figura 1, percebe-se que o assoreamento entre 2013 e 2017 se deu entre as seções “1” e “9”, ou seja, ocorreu mais próximo ao vertedor.

Conforme descrito anteriormente, a simulação do assoreamento do modelo reduzido da PCH, entre os anos 2013 e 2017, foi feita utilizando-se as vazões médias anuais. Porém, nesse período ocorreu uma estiagem na região da PCH, de forma que essas vazões foram baixas e não provocaram transporte de sedimento, como apresentado na Figura 2, ou seja, o sedimento permaneceu próximo

à seção 21 onde foi inserido. Por isso, o procedimento adotado mostrou-se incapaz de reproduzir o assoreamento real ocorrido na PCH, o qual está na Figura 1.

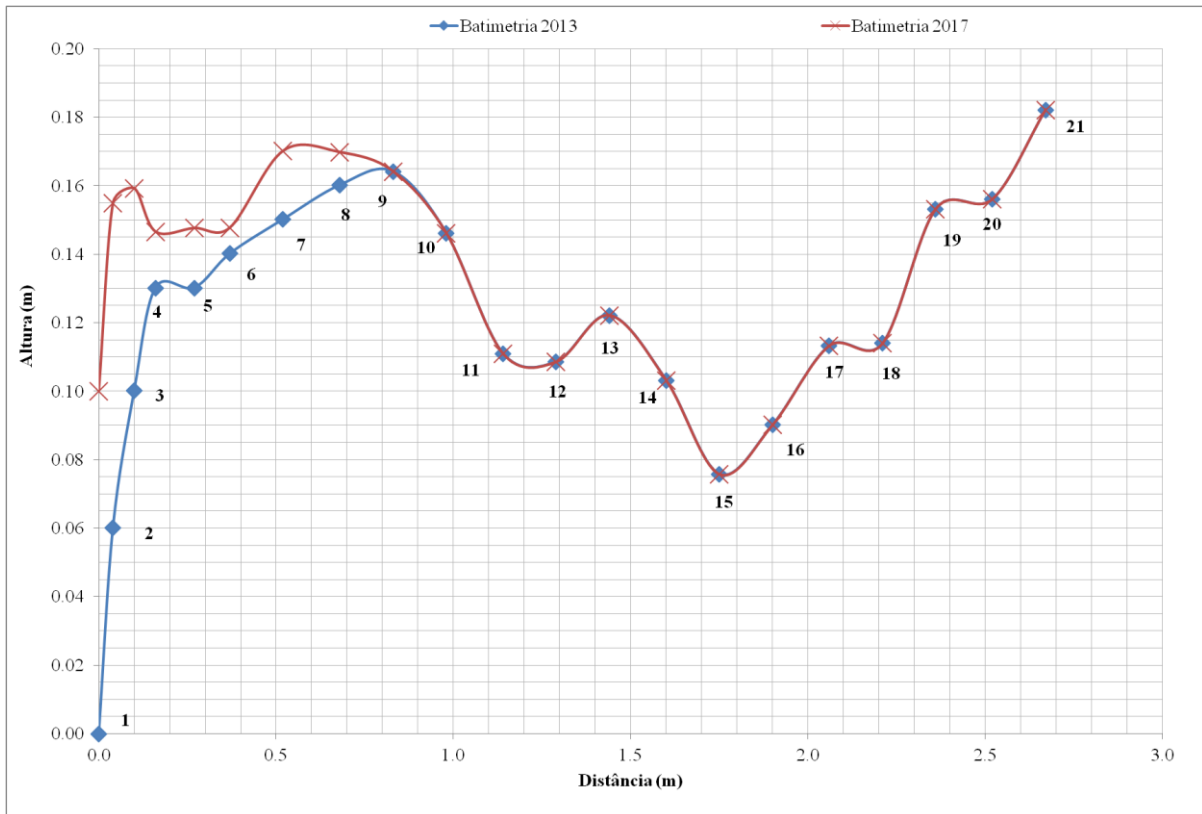


Figura 1 – Perfil longitudinal do fundo do reservatório da PCH para os anos 2013 e 2017 (valores convertidos para a escala do modelo reduzido)

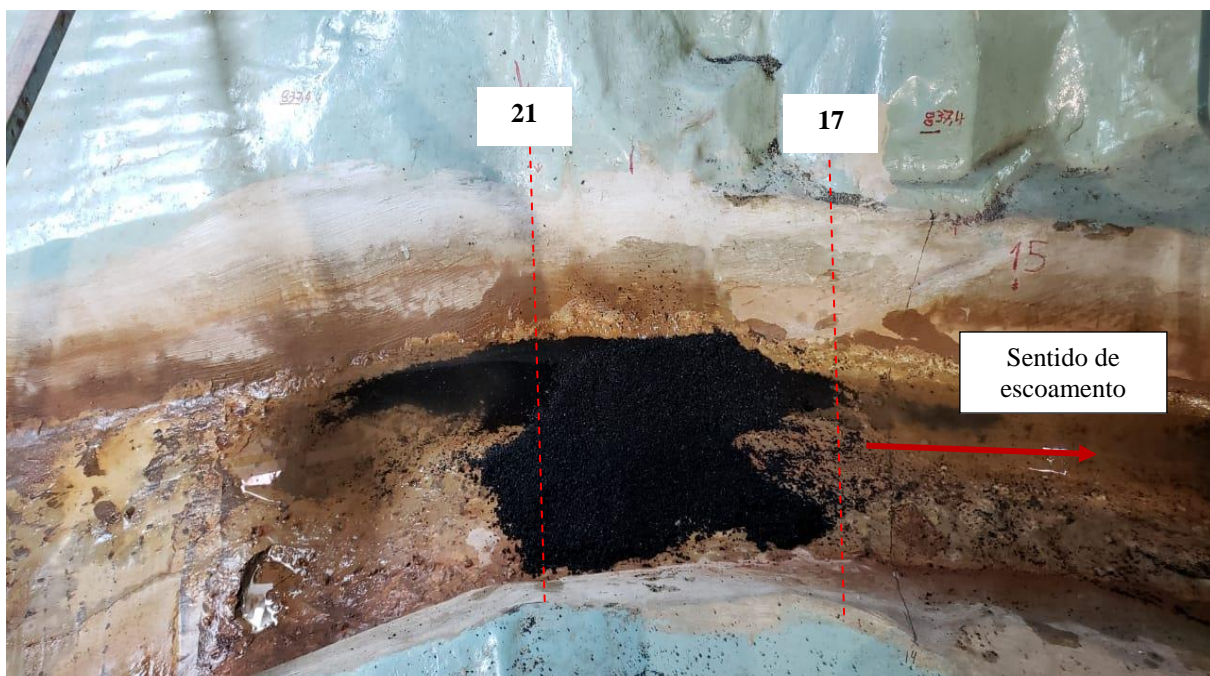


Figura 2 – Assoreamento próximo à seção “21”, a qual é a seção onde o sedimento era inserido no modelo reduzido

Um procedimento utilizado em hidráulica fluvial para se verificar o movimento ou não de partículas junto ao leito é o ábaco de Shields (Figura 3), o qual relacionou o início de movimento

das partículas a parâmetros adimensionais, como a tensão de arraste adimensional ($\bar{\tau}$) e número de Reynolds do grão (Re_*).

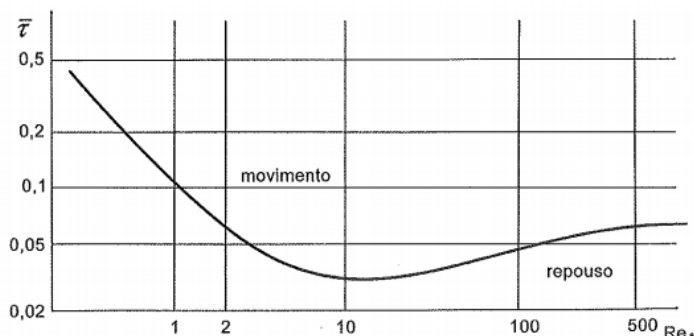


Figura 3 – Ábaco de Shields (Baptista e Coelho, 2010).

Utilizando-se esse ábaco, observou-se para as vazões médias anuais se as partículas se movimentavam ou não ao longo das seções transversais do modelo reduzido, como forma de se comparar numericamente o que foi observado em laboratório. Para isso, no programa HEC-RAS, encontraram-se as tensões cisalhantes das 21 seções transversais, para as cinco vazões anuais. Utilizando-as, foram calculados os parâmetros adimensionais ($\bar{\tau}$ e Re_*), os quais estão na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores dos parâmetros do ábaco de Shields para as 21 seções transversais, referentes às vazões anuais

Seção	Vazões (m ³ /h)									
	6,8		2,8		4,9		7,1		5,3	
	$\bar{\tau}$	Re_*	$\bar{\tau}$	Re_*	$\bar{\tau}$	Re_*	$\bar{\tau}$	Re_*	$\bar{\tau}$	Re_*
21	0,009	8,369	0,002	4,148	0,005	6,285	0,010	8,558	0,006	6,636
20	0,010	8,778	0,003	4,375	0,006	6,599	0,011	8,970	0,006	6,966
19	0,010	8,506	0,002	4,216	0,005	6,389	0,010	8,695	0,006	6,745
18	0,010	8,888	0,002	4,294	0,006	6,657	0,011	9,115	0,007	7,033
17	0,009	8,454	0,002	4,007	0,005	6,319	0,010	8,695	0,006	6,681
16	0,011	9,267	0,003	4,370	0,006	6,920	0,012	9,532	0,007	7,315
15	0,009	8,367	0,002	3,889	0,005	6,247	0,010	8,614	0,006	6,608
14	0,009	8,410	0,002	3,958	0,005	6,275	0,010	8,654	0,006	6,635
13	0,010	8,779	0,002	4,135	0,006	6,554	0,011	9,020	0,006	6,929
12	0,012	9,352	0,003	4,371	0,006	6,968	0,012	9,630	0,007	7,369
11	0,011	9,184	0,002	4,254	0,006	6,834	0,012	9,465	0,007	7,230
10	0,012	9,438	0,003	4,482	0,007	7,039	0,012	9,728	0,007	7,442
9	0,025	13,769	0,006	6,556	0,014	10,259	0,026	14,132	0,016	10,847
8	0,008	7,848	0,002	3,939	0,005	6,166	0,009	8,480	0,006	6,519
7	0,007	7,431	0,002	3,544	0,004	5,538	0,008	7,633	0,005	5,862
6	0,009	8,061	0,002	3,840	0,005	6,002	0,009	8,276	0,005	6,347
5	0,007	7,385	0,002	3,533	0,004	5,503	0,008	7,584	0,004	5,820
4	0,006	6,912	0,001	3,323	0,004	5,154	0,007	7,089	0,004	5,450
3	0,004	5,566	0,001	2,538	0,002	4,130	0,004	5,799	0,003	4,373
2	0,000	0,924	0,000	0,409	0,000	0,684	0,000	0,959	0,000	0,724
1	0,001	2,230	0,000	0,987	0,000	1,650	0,001	2,315	0,000	1,748

De acordo com a Tabela 3, os valores de $\bar{\tau}$ e Re_* variam de 0 a 0,026 e 0,987 a 14,132, respectivamente. Ou seja, no ábaco de Shields (Figura 3) todos eles estão abaixo da curva, o que indica repouso dos sedimentos. Assim, esse resultado numérico corrobora com o observado no modelo reduzido, ou seja, as vazões anuais foram pequenas para produzir transporte das partículas sólidas.

CONCLUSÃO

Ao longo desse trabalho foram apresentados os fundamentos que nortearam o desenvolvimento dessa pesquisa, a qual teve por objetivo verificar se o hidrograma de vazões médias anuais permitia simular o assoreamento ocorrido entre 2013 e 2017 numa PCH, tendo como base o seu modelo reduzido. A partir dos resultados obtidos, tem-se que essas vazões anuais não propiciaram transporte de sedimentos, visto que, por terem ocorrido num período de escassez, suas magnitudes foram baixas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal de São João del-Rei por ter dado aporte técnico e financeiro a esse trabalho.

REFERÊNCIAS

- ADAM, N.; ERPICUM, S.; ARCHAMBEAU, P.; PIROTON, M.; DEWALS, B. (2015). “*Stochastic modeling of reservoir sedimentation in a semi-arid watershed*”. *Water Resour Manage*, v. 29, pp. 785–800.
- ARMANINI, A.; SARTORI, F.; TOMIO, G.; CERCHIA, F.; VERGNANI, M. (2010), “*Analysis of a fluvial groyne system on hydraulic scale model*” in *Anais da International Conference on Fluvial Hydraulics Riverflow*, 2010.
- BAPTISTA, M. P.; COELHO, M. M. L. P. (2010). *Fundamentos de Engenharia Hidráulica*. Editora UFMG, Belo Horizonte, 480p.
- BIERI, M. D; MULLER, M.; BOILLAT, J. L.; SCHLEISS, A. J. (2012). “*Modeling of sediment management for the Lavey Run-of-River HPP in Switzerland*”. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 138, n. 4, pp. 340-347.
- CAMPELLO, B. S. C. (2017). “*Estudo da velocidade de queda e do Início do movimento das partículas de Borracha e areia*”. 105 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- CARVALHO, N. O. (2008). *Hidrossedimentologia prática*. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 599 p.
- CARVALHO, L. S.; SALIBA, A. P. M.; SANTOS, R. S. F.; HASELBAUER, M.; VELASCO, D.; VIANA, E. M. F.; MARTINEZ, C. B.; COSTA, M. E. F.; FREITAS, F. L. (2014).

“Desenvolvimento do projeto do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba” in Anais do XXVI Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago, Chile, 2014.

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

HO, J.; COONROD, J.; GILL, T.; MEFFORD, B. (2010). “Case study: movable bed model scaling for bed load sediment exclusion at intake structure on Rio Grande”. *Journal Hydraulic Engineering*, v. 136, pp. 247-250.

JULIEN, P. Y. (2002). *River mechanics*. 1ª ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 456 p.

MEFFORD, B.; GILL, T. (2010). “Physical hydraulic model proposal for US Army Corps of Engineers Missouri river bend model. U.S”. Department of the Interior, Bureau of Reclamation. Hydraulic Laboratory Report HL-2010-05. 2010.

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, pp. 431-447.

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

SIMONETT, S.; WEITBRECHT, V. (2011). “Bed load transport in a physical scale model of two merging mountain streams”. In: ROWINSKI, P. (Ed.), *Experimental Methods in Hydraulic Research*, Series: Geoplanet: Earth and Planetary Sciences. Springer, Heidelberg, Berlin, pp. 275-286.

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, 2008.

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