



ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS DO SEDIMENTO DE LEITO NO RESERVATÓRIO DE MOGI-GUAÇU (SP)

Bruno Bernardo dos Santos¹; Renato Billia de Miranda² & Frederico Fábio Mauad³

ABSTRACT – The hydrossedimentological processes are complex and depend on several factors. The Knowledge of the behavior of bed sediments of the reservoirs, in addition to allowing calculation of retention efficiency and specific gravity of sediment, essential for estimating sediment deposition in a reservoir, assists in identifying the types of existing deposits and allows to define appropriate strategies to control the silting. In this context, this paper presents a study carried out in the reservoir of the Mogi-Guaçu Small Hydroelectric Power Plant (SP) in which the bed sediment was sampled employing the piston core to obtaining samples that were subjected to granulometry analysis. Analyzing the results it was possible to identify sediment deposits with different granulometric characteristics, indicating the need for a better monitoring of the reservoir, thus avoiding the increase of the silting processes, helping in the planning and management of water resources.

Palavras-Chave – Assoreamento, reservatórios, sedimento de fundo.

1) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), Avenida Trabalhador são-carlense, 400, São Carlos, SP, e-mail: bbernardo49@gmail.com

2) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), Avenida Trabalhador são-carlense, 400, São Carlos, SP, e-mail: eng.renato.miranda@gmail.com

3) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), Avenida Trabalhador são-carlense, 400, São Carlos, SP, e-mail: mauadffm@sc.usp.br

1 - INTRODUÇÃO

Os processos e estudos sedimentológicos são complexos e são de grande importância principalmente no caso de países com grande quantidade de recursos hídricos e com matriz energética predominantemente hidráulica, como é o caso do Brasil. De acordo com Lane (1955) e Vanoni (1977) são diversos os fatores que influenciam no processo de sedimentação, principalmente quanto à deposição, diretamente relacionada com assoreamento, como: clima, pluviosidade, hidrologia, formação geológica, topografia, cobertura vegetal, tipo e uso do solo, composição química das águas e dos sedimentos, entre outros.

Segundo Muller (1995) e Carvalho (2008) dentre os problemas ocasionados pelo assoreamento estão: redução do volume de água armazenado no reservatório, obstrução de canais de irrigação e navegação, e degradação da qualidade da água para consumo e aumento nos custos de tratamento. Outro fato importante destacado por Morris e Fan (2010) é que, com passar do tempo, os impactos causados pelo assoreamento se tornam mais graves e complexos.

O sedimento depositado pode causar danos dependendo da quantidade, qualidade e local de deposição. Assim, estudar os sedimentos presentes nos depósitos é de grande importância para o gerenciamento de reservatórios, já que segundo Vanoni (1977), a distribuição dos sedimentos em reservatório não é uniforme e pode dar origem a três tipos de depósitos: depósito de remanso, delta e depósito de fundo. Os depósitos de remanso, onde geralmente são encontrados sedimentos de granulometria maior, podem causar problemas de enchente a montante do reservatório (Carvalho, 2008; Vanoni, 1977). Já o depósito tipo delta é formado no interior do reservatório por sedimentos de diversas granulometrias e tem como principal consequência a diminuição gradativa do volume útil do reservatório. Por outro lado, o depósito de leito, geralmente formado por sedimentos mais finos (silte e argila), afeta diretamente o volume morto (Carvalho, 2008).

Assim, sabendo da importância dos estudos sedimentológicos em reservatórios a fim de reduzir os processos de assoreamento, buscou-se com esse artigo, por meio de medições do sedimento de leito do reservatório de Mogi-Guaçu (SP), identificar os pontos de deposição e obter as respectivas análises granulométricas a fim de auxiliar no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos.

2 - METODOLOGIA

A área de estudo foi o reservatório da Pequena Central Hidrelétrica de Mogi-Guaçu, localizada na Bacia Hidrográfica do Mogi-Guaçu (22°22'45.6" S; 46°53'59.1" W), barramento que represa as águas do rio que dá nome às cidades e ao empreendimento (Rio Mogi-Guaçu) possuindo potência instalada de 7,2 MW (Figura 1). Apresenta-se na Tabela 1 algumas características do reservatório.



Figura 1 - Vista aérea da barragem do reservatório de Mogi-Guaçu e sua localização no Estado de São Paulo
Fonte: AES Tietê (2018)

Tabela 1. Características da Pequena Central Hidrelétrica Mogi-Guaçu

Área (Km ²)	5,73	Vazão total (m ³ .s ⁻¹)	2099
Volume (m ³)	32,89 x 10 ⁶	Queda bruta (m)	11,6
Barragem (m)	150	Potência instalada (MW)	7,2

Fonte: Adaptado de AES Tietê (2018)

A economia da região é baseada predominantemente nas atividades relacionadas ao setor primário, com destaque para a agropecuária. Seu entorno é utilizado predominantemente para cultura de cana-de-açúcar, apresentando também pequenas áreas de pastagem e de cultivo de café, e sua área de influência encontra-se em zona caracterizada como de alta suscetibilidade à erosão CBH Mogi (2008). Além da geração, a barragem possui a finalidade de amortecimento de picos de cheia e abastecimento das cidades de Mogi-Mirim e Mogi-Guaçu. Ambos os municípios possuem em sua malha urbana áreas de alta suscetibilidade a enchente ao longo da calha do rio no trecho de jusante da barragem de Mogi-Guaçu.

Durante as atividades de campo foi realizado amostragem do sedimento do leito empregando o *piston core*, equipamento este utilizado para coleta de amostras indeformadas do leito em um perfil, possibilitando que seja realizada a análise de camadas do leito (Figura 2). Foram coletados seis perfis de sedimentos com localização apresentada na Figura 2 com profundidade amostrada variando entre 22 cm (core 2) e 40 cm (core 4, 5 e 6). Cada perfil foi dividido em sub-amostras de aproximadamente 10 cm cada, salvo a amostra mais profunda dos core 2 que teve 12 cm (entre profundidades de 10 e 22 cm) e do core 3 com 9 cm (entre profundidades de 30 e 39 cm), que apresentaram respectivamente 12 e 9 cm de sub amostras.

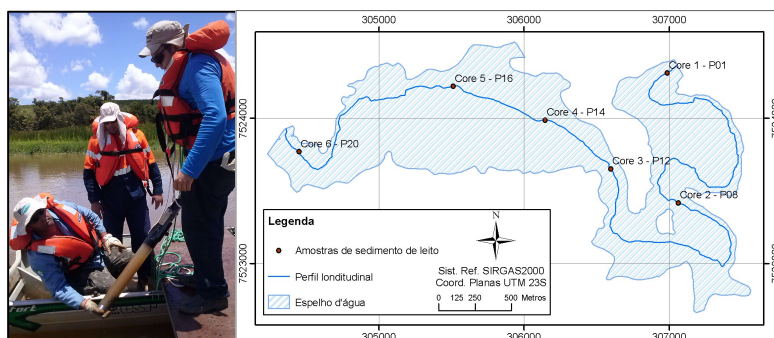


Figura 2 - Amostragem com o pistão core no ponto 8 (Esquerda); Todos os pontos de amostragem com o pistão core no reservatório (Direita)
Fonte: FIPAI (2015)

Além disso, o reservatório foi estrategicamente dividido em 20 pontos de amostragem para possibilitar o estudo do sedimento ao longo do mesmo sendo localizados aproximadamente sobre o canal principal de escoamento (Figura 3). Utilizando equipamentos como ADCP, LISST-100X, garrafa Van Dorn, sonda multiparâmetro, entre outros, realizou-se a caracterização completa do perfil longitudinal desse reservatório, além da obtenção de dados hidrométricos como descarga líquida, velocidade, largura e profundidade, necessários para o entendimento do processo de assoreamento desse reservatório (Figura 3).

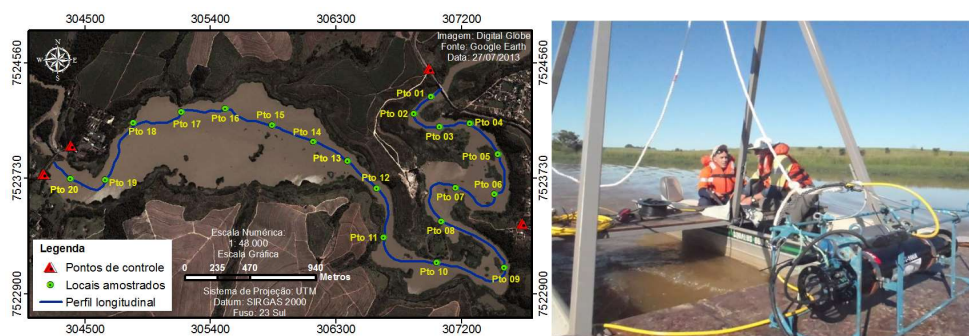


Figura 3 - Pontos de amostragem do perfil longitudinal (Esquerda); Obtenção de dados hidrométricos (Direita)

Os ensaios de laboratório para determinação da curva granulométrica foram baseados na NBR 7181 de 1984 - Solo: Análise Granulométrica (ABNT, 1984). O método consistia na análise granulométrica conjunta, ou seja, envolvendo os procedimentos de peneiramento para partículas maiores e densímetro para as frações mais finas. As peneiras utilizadas foram as especificadas na NBR NM ISO 3310-2 (ABNT, 2010).

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise granulométrica dos sedimentos de leito foi feita para as amostras coletadas em 5 dos seis locais apresentado. No local identificado como ponto 1 (Core 1), apesar de se tentar realizar a coleta por três vezes, o equipamento não conseguiu obter amostras indeformadas do leito devido



à alta quantidade de areia. Na Tabela 2 está apresentada a relação das profundidades alcançadas em cada ponto de coleta e o número de sub-amostras, cada uma possuindo aproximadamente 10 cm.

Tabela 2 - Profundidade alcançada e número de sub-amostras analisadas

Ponto amostrado	Profundidade máxima (cm)	Número de sub-amostras
Core 1 - Ponto 01	0	0
Core 2 - Ponto 08	22	2
Core 3 - Ponto 12	39	4
Core 4 - Ponto 14	40	4
Core 5 - Ponto 16	40	4
Core 6 - Ponto 20	40	4

Os resultados das análises da granulometria de cada sub-amostra são apresentados nas Tabelas 3 a 7, e resumidas na Figura 4. Nelas estão resumidos os percentuais de cada uma das frações granulométricas obtidas nos *cores* amostrados no reservatório de Mogi-Guaçu. É importante atentar que em nenhuma das amostras foi encontrada a fração pedregulho, portanto não sendo mostrada nas tabelas.

Tabela 3 - Distribuição das frações granulométricas do core 2

Profundidade (cm)	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
0	9,4%	9,9%	13,0%	18,9%	48,8%
10	9,4%	9,9%	13,0%	18,9%	48,8%
20	19,1%	12,5%	10,6%	18,4%	39,4%
22	19,1%	12,5%	10,6%	18,4%	39,4%

Tabela 4 - Distribuição das frações granulométricas do core 3

Profundidade (cm)	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
0	11,6%	8,6%	11,5%	21,6%	46,7%
10	11,6%	8,6%	11,5%	21,6%	46,7%
20	19,3%	21,8%	13,6%	13,4%	31,9%
30	21,3%	20,6%	14,0%	13,7%	30,3%
39	26,9%	22,5%	12,6%	10,8%	27,3%

Tabela 5 - Distribuição das frações granulométricas do core 4

Profundidade (cm)	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
0	27,2%	13,7%	9,6%	18,6%	30,9%
10	27,2%	13,7%	9,6%	18,6%	30,9%
20	17,5%	11,3%	14,4%	18,2%	38,5%
30	16,5%	13,9%	11,3%	17,2%	41,1%
40	11,7%	12,4%	11,0%	20,1%	44,8%

Tabela 6 - Distribuição das frações granulométricas do core 5

Profundidade (cm)	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
0	15,3%	16,7%	12,5%	16,6%	39,0%
10	15,3%	16,7%	12,5%	16,6%	39,0%



20	13,0%	22,1%	11,6%	15,4%	37,9%
30	8,1%	15,1%	16,4%	18,6%	41,7%
40	10,1%	16,3%	15,8%	17,7%	40,1%

Tabela 7 - Distribuição das frações granulométricas do core 6

Profundidade (cm)	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
0	3,8%	4,7%	7,8%	25,8%	57,9%
10	3,8%	4,7%	7,8%	25,8%	57,9%
20	5,9%	3,6%	12,6%	22,0%	55,8%
30	20,8%	6,3%	10,5%	19,0%	41,7%
40	5,9%	12,6%	16,2%	19,6%	45,7%

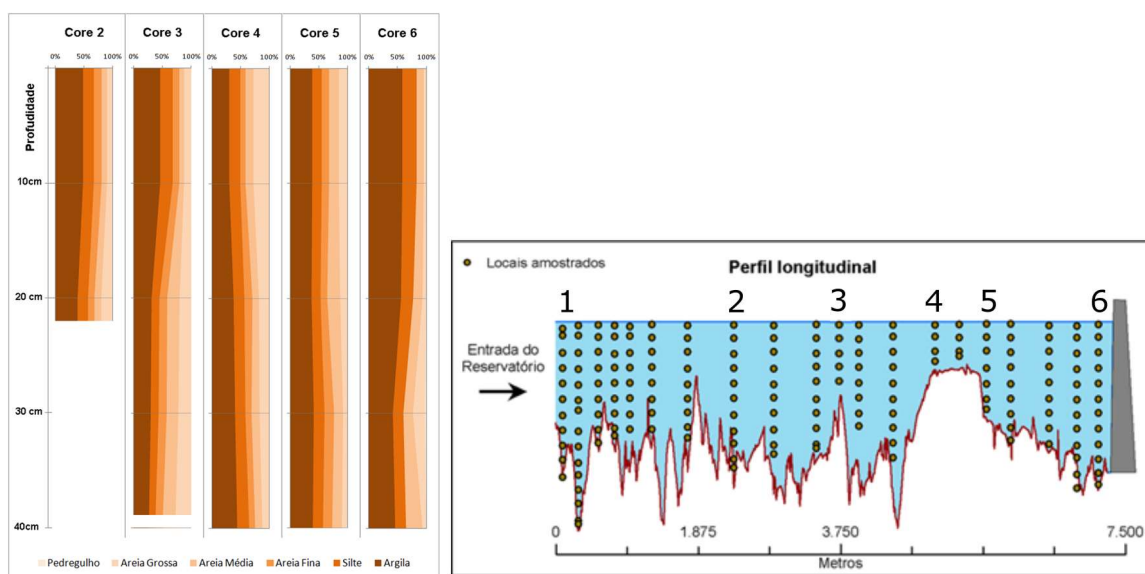


Figura 4 - Figura esquemática apresentando em resumo as análises dos cores 2 a 6, profundidade alcançada e distribuição das frações granulométricas (Esquerda); Perfil longitudinal do Reservatório de Mogi-Guaçu com a localização das amostragens de sedimento de fundo (Direita)

Fonte: FIPAI (2015)

As amostras podem ser classificadas, segundo método proposto por Flemming (2000) da seguinte maneira: Cores 2 e 3 (Lodo arenoso muito argiloso), Core 4 (Areia argilosa), Core 5 (Lodo arenoso muito argiloso) e Core 6 (Lodo argiloso ligeiramente arenoso). Nota-se também o menor percentual de argila e maior de areia na camada ativa do leito apresentada no Core 4, região atualmente assoreada e de baixa profundidade (Figura 4). Este local correspondia ao início do delta de deposição de sedimentos, destacando que atualmente o delta já se propagou para jusante e, que segundo a batimetria apresentada por Vitti et al. (2016), seu limite está próximo de onde foi realizado o core 5. Analisando todas as amostras, percebe-se uma redução contínua da quantidade de argila no sedimento de fundo, variando de 48,8% no core 2 a 30,9% no core 4. Entretanto, essa quantidade volta a aumentar, tendo um pico de 57,9% às proximidades da barragem. É importante deixar claro que a maioria da areia em suspensão se depositou no delta, o que justifica essa quantidade maior de argila próximo à barragem.

Na Figura 5 é ilustrado o mapa de deposição para o reservatório de Mogi-Guaçu, obtido a partir de simulação hidrodinâmica do transporte de sedimentos apresentados por Santos et al. (2016). Nota-se que ao final das simulações, o mapa apresentou taxas mais altas de deposição à montante do delta, acumulando em torno de 0,8 metros de sedimentos, justamente por causa das atividades de dragagens e exploração de areia. O mapa também apresentou pequenas áreas onde erosão acontece, em geral nos lados côncavos das curvas do reservatório e na entrada do delta do reservatório, que provavelmente se deu em função das vazões altas obtidas nos períodos.

Correlacionando com os resultados das análises granulométricas obtidas, é comum o aparecimento de frações granulométricas mais grosseiras na região de início dos deltas, isto se deve tanto pelo fato de as partículas mais grosseiras se depositarem primeiro, quanto ao fato de, com a redução de profundidade e consequente maior velocidade de escoamento nesta região, as partículas mais finas que eventualmente se depositariam neste local são erodidas e carregadas para jusante em eventos de cheias.

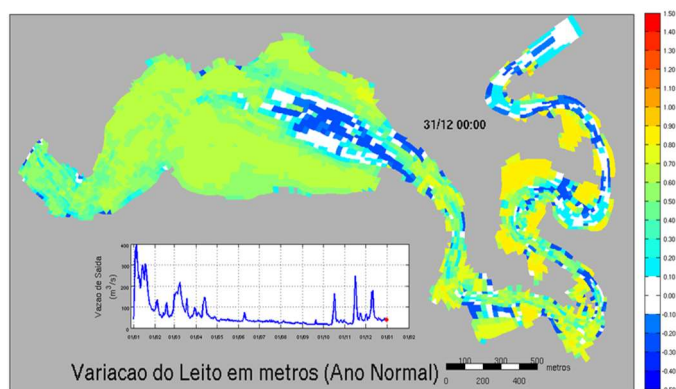


Figura 5 - Mapa de deposição do reservatório de Mogi-Guaçu para um ano hidrológico normal

Fonte: Santos et al. (2016)

Outro ponto que merece destaque foi a preponderância de deposição no delta de deposição e no corpo central do reservatório em direção à barragem, variando até 0,60 m, aproximadamente. Esses valores se apresentam razoáveis se comparados às diferenças batimétricas de 6,0 m à 7,0 m encontradas nessa área entre 2004 e 2014 em estudo apresentado por Vitti et al. (2016).

4 - CONCLUSÃO

Por meio das amostragens empregando o *piston core* para medição de sedimentos de fundo, foi possível determinar a quantidade de areia, silte e argila para cada um dos pontos estratégicos no Reservatório de Mogi-Guaçu. Comparando-se as amostras, verificou-se que os Core 4 e 5 apresentam quantidades de areia superiores a 44,5%, caracterizando bem a região de delta do reservatório, local com velocidades inferiores causando consequente deposição de faixas granulométricas maiores. Além disso, a quantidade de argila de aproximadamente 60% no Core 6

corroborar com os dados da literatura em relação aos processos de assoreamento do Reservatório de Mogi-Guaçu, já que nesse ponto, próximo à barragem, só há faixas granulométricas menores (areias finas, siltes e argilas) em suspensão. Desse modo, a partir dos resultados obtidos e da avaliação dos pontos de deposição e erosão no reservatório de Mogi-Guaçu, sugere-se aos gestores a necessidade da adoção de medidas preventivas e corretivas para o controle do assoreamento, destacando a importância da conservação dos reservatórios e das usinas hidrelétricas em operação atualmente.

5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AES TIETÊ (2018). *Pequena Central Hidrelétrica Mogi-Guaçu*. Disponível em: <<https://www.aestiete.com.br/quem-somos/nossas-plantas/>>. Acesso em: 27 mai. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (1984). *NBR 7181: Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2010). *NBR NM ISO 3310-2: Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação*. Rio de Janeiro: ABNT, 13 p.
- CARVALHO, N. O. (2008). *Hidrossedimentologia Prática*, 2ª Edição, Rio de Janeiro-RJ, Editora Interciência.
- COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MOGI GUAÇU – CBH MOGI (2008). *Plano da Bacia Hidrográfica 2008-2011*, São Paulo, SP.
- FLEMMING, B. W. (2000). A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis ternary diagrams. *Continental Shelf Research*, n. 20, p. 1125-1137.
- FUNDAÇÃO PARA O INCREMENTO DA PESQUISA E DO APERFEIÇOAMENTO INDUSTRIAL. (2015). *Desenvolvimento, validação e aplicação de um modelo tri-dimensional de transporte de sedimentos em reservatórios aplicado ao cálculo e elaboração de projeções futuras de geração hidrelétrica*. São Carlos. (Relatório P&D, Convênio FIPAI/AES).
- LANE, E.W. (1955). *The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering*. American Society of Civil Engineering, Proceedings, 81, paper 745, p. 1-17.
- MORRIS, G.L.; FAN, J. (2010). *Reservoir sedimentation handbook - design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use*. New York: McGraw-Hill Book. 805 p.
- MULLER, A.C. (1995). *Hidrelétricas, Meio Ambiente e Desenvolvimento*. Makron Books. São Paulo. 412 p.
- SANTOS, B. B. et al. (2016). Simulação Hidrodinâmica e de Transporte de Sedimentos no reservatório de Mogi-Guaçu (SP). In: Anais do III Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis, 2016, Porto Alegre, v. 1.
- VANONI V. A. (1977). *Sedimentation Engineering*. ASCE - American Society of Civil Engineers. New York.
- VITTI, D. M. C. et al. (2016). *Avaliação do assoreamento por meio de técnicas batimétricas entre 2004 e 2014 no reservatório de Mogi-Guaçu (SP)*. In: Anais do III Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis, 2016, Porto Alegre, v. 1.

AGRADECIMENTOS: Ao Núcleo de Hidrometria da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP) e à empresa AES Tietê S.A., pelo financiamento do Projeto de P&D (ANEEL PD-0064-1028/2011).