



Universidade Federal  
de São João del-Rei

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI**  
**CAMPUS ALTO PARAPEBA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

ALBERTO VAROTTO RINCO DUTRA

***INTERFERÊNCIA DO COEFICIENTE DE  
MANNING NA SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DO  
ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS***

**OURO BRANCO, MG**

**2019**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI  
CAMPUS ALTO PARAPEBA**

**ALBERTO VAROTTO RINCO DUTRA**

***INTERFERÊNCIA DO COEFICIENTE DE  
MANNING NA SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DO  
ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em cumprimento às exigências do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil da Universidade Federal de São João del-Rei.

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira**

**Ouro Branco – MG**

**2019**

**ALBERTO VAROTTO RINCO DUTRA**

***INTERFERÊNCIA DO COEFICIENTE DE  
MANNING NA SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DO  
ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São João del-Rei, *Campus* Alto Paraopeba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

A Banca Examinadora, composta pelos membros abaixo, avaliou este TCC:

---

Prof. Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira – Orientador

---

Prof. Guido Lessa Ribeiro Filho – Avaliador convidado

---

Prof<sup>a</sup>. Eliane Prado Cunha Costa dos Santos – Avaliadora convidada

**Ouro Branco, 17/12/2019**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista de jusante da PCH Salto do Paraopeba.....	12
Figura 2 - Assoreamento do reservatório da PCH Salto Paraopeba .....	12
Figura 3 – Seção transversal do vertedor da PCH Salto do Paraopeba .....	13
Figura 4 – Vista do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba .....	14
Figura 5 – Curva granulométrica da borracha usada no modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba .....	15
Figura 6 – Modelo reduzido com sua topografia conformada para o ano de 2013. ....	16
Figura 7 - Curva-chave de sedimentos do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba... ..	17
Figura 8 - Hidrograma do ano hidrológico 2012-2013 (outubro a setembro). ....	18
Figura 9 - Hidrograma do ano hidrológico 2013-2014 (outubro a setembro). ....	18
Figura 10 - Hidrograma do ano hidrológico 2014-2015 (outubro a setembro). ....	19
Figura 11 - Hidrograma do ano hidrológico 2015-2016 (outubro a setembro). ....	19
Figura 12 - Hidrograma do ano hidrológico 2016-2017 (outubro a setembro). ....	19
Figura 13 - Esquema em planta da geometria do modelo reduzido inserida no HEC-RAS ..	23
Figura 14 – Assoreamento próximo à seção “21”, seção onde foi inserido o sedimento no modelo reduzido. ....	27
Figura 15 - Perfil longitudinal do assoreamento real da PCH e o simulado no HEC-RAS, utilizando-se as vazões médias dos períodos de máximas, para os anos 2013 e 2017 (valores convertidos para a escala do modelo reduzido) .....	27
Figura 16 - Perfil longitudinal do assoreamento real da PCH e o simulado no HEC-RAS, utilizando-se as vazões dos períodos de máximas da terceira simulação.....	28
Figura 17 - Perfil longitudinal do assoreamento real da PCH e o simulado no HEC-RAS, utilizando-se as vazões dos períodos de máximas da quarta simulação.....	29
Figura 18 - Perfil longitudinal do assoreamento real da PCH e o simulado no HEC-RAS, utilizando-se as vazões dos períodos de máximas da quinta simulação .....	29
Figura 19 - Perfil longitudinal do assoreamento real da PCH e o simulado no HEC-RAS, utilizando-se as vazões dos períodos de máximas da sexta simulação .....	30
Figura 20 - Seção transversal 1. Distância ao vertedor: 0,0254 m .....	37
Figura 21 - Seção transversal 2. Distância à seção anterior: 0,0409 m.....	37
Figura 22 - Seção transversal 3. Distância à seção anterior: 0,0614 m.....	37
Figura 23 - Seção transversal 4. Distância à seção anterior: 0,0614 m.....	38
Figura 24 - Seção transversal 5. Distância à seção anterior: 0,1023 m.....	38
Figura 25 - Seção transversal 6. Distância à seção anterior: 0,1023 m.....	38
Figura 26 - Seção transversal 7. Distância à seção anterior: 0,1534 m.....	39
Figura 27 - Seção transversal 8. Distância à seção anterior: 0,1534 m.....	39
Figura 28 - Seção transversal 9. Distância à seção anterior: 0,1534 m.....	39
Figura 29 - Seção transversal 10. Distância à seção anterior: 0,1534 m.....	40
Figura 30 - Seção transversal 11. Distância à seção anterior: 0,1534 m.....	40
Figura 31 - Seção transversal 12. Distância à seção anterior: 0,1023 m.....	40
Figura 32 - Seção transversal 13. Distância à seção anterior: 0,1534 m.....	41
Figura 33 - Seção transversal 14. Distância à seção anterior: 0,1534 m.....	41
Figura 34 - Seção transversal 15. Distância à seção anterior: 0,1534 m.....	41
Figura 35 - Seção transversal 16. Distância à seção anterior: 0,1534 m.....	42
Figura 36 - Seção transversal 17. Distância à seção anterior: 0,1534 m.....	42
Figura 37 - Seção transversal 18. Distância à seção anterior: 0,1534 m.....	42
Figura 38 - Seção transversal 19. Distância à seção anterior: 0,1534 m.....	43
Figura 39 - Seção transversal 20. Distância à seção anterior: 0,1534 m.....	43
Figura 40 - Seção transversal 21. Distância à seção anterior: 0,1534 m.....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Detalhes da PCH Salto do Paraopeba .....	12
Tabela 2 – Dados utilizados para a simulação do assoreamento produzido entre 2013 e 2017. ....	17
Tabela 3 - Dados utilizados na operação do modelo físico para a segunda simulação do assoreamento (Procedimento final) .....	20
Tabela 4 – Dados utilizados na operação do modelo físico para a terceira simulação do assoreamento.....	21
Tabela 5 - Dados utilizados na operação do modelo físico para a quarta simulação do assoreamento.....	22
Tabela 6 - Dados utilizados na operação do modelo físico para a quinta simulação do assoreamento.....	22
Tabela 7 - Dados utilizados na operação do modelo físico para a sexta simulação do assoreamento.....	22
Tabela 8 – Comparação entre as profundidades lidas e encontradas pelo HEC-RAS para um $n$ de 0,012.....	25

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO GERAL.....	4
2.1. Objetivos específicos.....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1. Dinâmica dos sedimentos.....	5
3.2. Assoreamento em reservatórios.....	6
3.3. Modelos matemáticos determinísticos para a estimativa do assoreamento em reservatórios.....	7
3.4. Modelagem física para a estimativa do assoreamento em reservatórios.....	10
4. METODOLOGIA.....	11
4.1. Descrição da PCH Salto do Paraopeba.....	11
4.2. Modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba.....	13
4.3. Simulação do assoreamento no modelo reduzido.....	15
4.4. Calibração do coeficiente de Manning do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba.....	22
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
5.1. Calibração do coeficiente de Manning.....	24
5.2. Validação do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba.....	26
6. CONCLUSÃO.....	30
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32
ANEXO A – SEÇÕES TRANSVERSAIS DO MODELO REDUZIDO.....	37

# 1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da humanidade, barragens são construídas em canais fluviais para o acúmulo de água, viabilizando consumos. No Brasil, a importância dos reservatórios se dá pela abundância de recursos hídricos de superfície, assumindo um caráter de multiplicidade de uso, como irrigação, abastecimento público, navegação e geração de energia (VENÂNCIO, 2009).

Porém, a construção de uma barragem altera drasticamente as características do canal fluvial em que é inserida. Ela faz com que a velocidade de escoamento seja diminuída devido ao aumento da seção transversal corrente. Isso faz com que a turbulência nesse curso d'água diminua, o que acarretará na diminuição da capacidade de transporte de sedimentos, provocando a sedimentação de partículas sólidas e, conseqüentemente, o assoreamento.

O assoreamento é o principal problema que afeta os reservatórios, pois, dentre outros fatores, diminui seu volume útil de água utilizável. Linsley & Franzini (1978) consideram que o tempo de vida útil de um reservatório termina quando o volume assoreado for suficiente para impedir que o reservatório seja utilizado de acordo com os propósitos para os quais foi construído, considerando para efeito de estimativa geral um volume equivalente à perda de 80% do volume útil do reservatório.

Todo reservatório, independente de características de construção ou operação, tamanho, ou finalidade de uso está sujeito a ter sua capacidade de armazenamento tomada parcial, ou até mesmo totalmente, pelo assoreamento (CABRAL, 2009).

No Brasil, cerca de 95% da energia elétrica é gerada por meio de usinas hidrelétricas (CARVALHO, 2000; CARVALHO *et al.*, 2000), o que torna importante os estudos acerca do processo de assoreamento desses reservatórios.

Diante disto, vários modelos têm sido desenvolvidos a fim de se entender esse processo, prever a vida útil dessas estruturas e prevenir eventuais dificuldades de operação ou até mesmo interrupções no aprovisionamento da água. Os mais comuns são as modelagens empírica, física e matemática.

A modelagem empírica é baseada em observações existentes. A modelagem matemática é uma alternativa à empírica e pode fornecer resultados mais precisos que a primeira. Se baseia em formulações matemáticas determinísticas e/ou probabilísticas para representar o fenômeno real. Modelos físicos são mais complexos e necessitam de atenção especial no projeto e execução, para que se consiga

representar bem o protótipo. Entretanto, quando concebidos de maneira apropriada, são capazes de representar fielmente o fenômeno físico ocorrido. Em geral, são utilizados para validar os modelos matemáticos.

Os primeiros modelos numéricos, chamados “clássicos”, surgiram ainda no século vinte e incorporavam observações experimentais intensas, como, por exemplo, os estudos feitos por Einstein, baseado em considerações estatísticas de forças de sustentação, resultando nas equações de Einstein (1942, 1952). Quanto à medição do assoreamento de um reservatório, pode-se utilizar vários métodos, como o proposto por Carvalho *et al.* (2000), método da planimetria das curvas batimétricas descritas em Vanoni (1977) e Morris & Fan (1997) e através do método aperfeiçoado por Lopes (1993).

Alvim & Chaudhry (1987) apresentaram um estudo de previsão da distribuição dos sedimentos e a conseqüente modificação da geometria do fundo de reservatórios ao longo do tempo. Para isto, desenvolveram um método matemático de processo de sedimentação com a utilização de balanço de massa aplicada em um escoamento permanente bidimensional de fundo inclinado. Esta equação foi resolvida numericamente pelo método das diferenças finitas, para a obtenção dos perfis de concentração ao longo do eixo longitudinal do reservatório (CABRAL, 2009).

Na modelagem numérica, vários parâmetros são necessários para o cálculo da estimativa do assoreamento: geometria do fundo do canal, séries históricas de vazões e informações sobre a bacia, como tipo de solos predominantes e suas respectivas granulometrias, fatores esses que influenciarão na descarga sólida total. A carência desses dados pode dificultar o estudo, além de comprometer a veracidade dos resultados.

Outro parâmetro importante na modelagem numérica é o Coeficiente de Manning. A fórmula de Manning é uma das mais comumente utilizadas para se determinar o fluxo, principalmente em canais naturais. O  $n$  na fórmula de Manning normalmente explica a fricção da rugosidade do canal de ligação e a distorção interna normal. Como a fórmula de Manning foi derivada de observações empíricas, seu coeficiente deve ser ajustado para que a fórmula se ajuste aos dados observados (DAVIS & SORENSEN, 1969).

Esse coeficiente de rugosidade é comumente utilizado em modelagens numéricas para estudar o comportamento hidráulico de rios (KIM *et al.*, 2013), além de gerar simulações para construir mapas de inundações, projetos de estruturas hidráulicas, como pontes e barragens, entre outras aplicações.



Entretanto, a aplicação de um coeficiente adequado pode ser uma tarefa difícil, envolvendo experiência prática e julgamentos individuais e locais, o que poderia resultar em diferentes valores obtidos na análise de um mesmo reservatório ou canal (ZINK; JENNINGS, 2014; AYVAZ, 2013). Chow (1959) apresenta que vários fatores interferentes podem afetar o coeficiente, como a variação do nível d'água, a rugosidade da superfície, irregularidades e alinhamento do canal, efeitos da vegetação, alterações na geomorfologia do leito do canal devido ao depósito ou degradação de materiais e transporte de materiais em suspensão. Diante disso, foi estudado neste trabalho como o Manning em um mesmo trecho do reservatório de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH) varia com a mudança de vazão e como isso pode afetar a simulação matemática do assoreamento.

## **2. OBJETIVO GERAL**

Avaliar, para um mesmo perfil longitudinal do reservatório de uma PCH, qual é a influência do coeficiente de Manning na simulação matemática do assoreamento, sendo esse coeficiente calibrado para uma série de vazões e utilizado também em outras séries.

### **2.1. *Objetivos específicos***

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver uma metodologia de simulação do assoreamento em um modelo reduzido e verificar a eficiência desse modelo em reproduzir o mesmo fenômeno ocorrido no protótipo;
- Calibrar o coeficiente de Manning utilizando os dados de duas batimetrias do reservatório da PCH;
- Promover simulações do assoreamento no modelo físico e no modelo numérico, a fim de compará-las.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. *Dinâmica dos sedimentos***

O processo de assoreamento de reservatório está minimamente ligado a dinâmica dos sedimentos na bacia hidrográfica na qual ele está inserido. Estes processos podem ser naturais ou promovidos por ação antrópica, e podem ser divididos em quatro fases: erosão, transporte, deposição e adensamento.

A erosão compreende o processo de desprendimento de partículas de solos e rochas, e o seu transporte de sua fonte para outras localidades, fornecendo, assim, sedimentos para o sistema fluvial (MORRIS & FAN, 2010). Esse fenômeno pode ser classificado em geológico e acelerado. O primeiro, também chamado de “natural” ocorre devido a movimentações tectônicas, terremotos, intemperismo, além da ação da água, vento e gravidade (MACARTHUR *et al.*, 2008). A segunda é promovida devida à ação antrópica.

O transporte dos sedimentos pode ser causado por ventos, geleiras, gravidade e por correntes de água superficial, sendo este último responsável pela maior porcentagem do transporte (WICANDER, 2014). Os sedimentos podem ser transportados por arraste, saltação e suspensão, de acordo com sua granulometria.

A deposição dos sedimentos ao longo de um reservatório é caracterizada principalmente pela granulometria dos detritos. Sedimentos com granulometria maior tendem a se depositar no final do reservatório, formando os depósitos de remanso. Sedimentos caracterizados como areias, em geral se depositam logo que o escoamento penetra o reservatório. São condicionados principalmente pela variação do nível d'água e formam os depósitos de deltas. Por fim, partículas menores, como siltes e argilas, tendem a se depositarem em locais mais próximos do eixo da barragem. Esses depósitos acarretam na redução do volume útil do reservatório, podendo ainda promover o desgaste de componentes como tubulações e pás de turbinas (VANONI, 1975).

Não somente relacionada à granulometria dos sedimentos, a deposição está ligada a diversos outros fatores, como apresentam Salas e Shin (1999): a vazão do rio, a quantidade de sedimentos que atinge o reservatório e o tamanho e operação do reservatório.

O volume e o peso específico das partículas depositadas irão variar ao longo tempo devido ao adensamento. Este processo consiste na redução do volume de um solo completamente saturado em consequência da drenagem de uma determinada quantidade de água dos poros. (CRAIG, 2012). A drenagem é ocasionada pela pressão feita pelo peso próprio do sedimento, juntamente com uma sobrecarga adicional.

### **3.2. Assoreamento em reservatórios**

Reservatórios são estruturas hidráulicas construídas para a regularização de vazão em um curso d'água e atendimento de usuários ao longo do tempo. São utilizados para as mais diversas finalidades, que vão desde geração de energia elétrica, através de usinas hidrelétricas, passando por abastecimento público, contenção de cheias, e até mesmo acúmulo de rejeitos de mineração. A instalação dessas estruturas promove grandes impactos ambientais desde a instalação até a operação. Esses impactos podem ser de natureza biológica, sociais, hidrológica, dentre outras, a depender da dimensão do reservatório (BOAS, 2005).

Essas estruturas são sempre sujeitas a algum grau de assoreamento. Isso porque a construção destas alteram as características físicas e hidráulicas do curso d'água, aumentando sua área molhada e diminuindo sua capacidade de transporte de sedimentos. Com o passar do tempo, o assoreamento pode aumentar a ponto de reduzir a capacidade do reservatório e, conseqüentemente, sua vida útil (BICHALHO, 2006).

A redução do volume útil dos reservatórios implica diretamente nas funções para as quais ele foi construído, e pode acarretar tanto em perdas financeiras, quanto até mesmo de vidas humanas. Carvalho (2008) afirma que, apesar da importância dos estudos sedimentológicos para países com matriz energética predominantemente hidrelétrica, como o Brasil, as informações sobre o assoreamento dos reservatórios do país ainda são limitadas, devido à falta de levantamentos batimétricos sistemáticos e a divulgação de seus resultados.

De acordo com Morris & Fan (1997) e Carvalho (2000), à medida que o tempo decorre, os impactos do assoreamento se tornam mais severos e mais fáceis de serem constatados, mas de difícil solução. São esperadas conseqüências tanto a montante, quanto à jusante. Por isso, são importantes as metodologias que visem à estimativa do assoreamento.

### **3.3. Modelos matemáticos determinísticos para a estimativa do assoreamento em reservatórios**

A dinâmica dos sedimentos em um reservatório pode ser estudada através de diferentes tipos de modelagem. A modelagem empírica, modelagem matemática e modelagem física são as mais utilizadas. A partir destas, é possível analisar a distribuição e o comportamento dos sedimentos em reservatórios.

A modelagem empírica é baseada na experimentação e observação. Sua aplicação, por necessitar de menos dados de entrada, é a menos complexa e em geral a mais rápida das três.

A modelagem matemática surge como uma abordagem que pode ser utilizada para auxiliar tanto no projeto de estruturas de contenção, quanto na avaliação de seus impactos no ambiente. Podem ser de natureza uni, bi, ou tridimensional, a depender das características do reservatório e da disponibilidade de dados (MORAN, 2013). A modelagem matemática se baseia em formulações determinísticas, probabilísticas (estocásticas) ou ao mesmo tempo determinísticas e probabilísticas a fim de representar o fenômeno físico. As equações utilizadas no processo devem ser posteriormente validadas e seus resultados comparados aos obtidos em campo ou em laboratório, a partir de modelos físicos, que serão descritos no item a seguir.

Yang (2002) classificou a modelagem matemática quanto às dimensões simuladas, conforme a seguir.

Modelos em três dimensões são utilizados para simular pontos localizados, como, por exemplo, a curva de um rio, ou o processo erosivo em uma estrutura hidráulica. São processos complexos, em que os dados de campo também devem possuir três dimensões, a fim de que se possam fazer as devidas calibrações. As equações de Navier-Stokes podem ser utilizadas e resolvidas por diferenças finitas. Estas equações descrevem o escoamento gradualmente variado de um fluido não viscoso incompressível.

Os modelos em duas dimensões são aqueles em que os parâmetros da vertical podem ser aproximados de seu valor médio, sendo utilizados para a simulação apenas os da largura do canal e longitudinal ao escoamento. Em geral, são utilizados para simular pequenos trechos de rios e reservatórios rasos. São modelos menos complexos que os de três dimensões.

Já os modelos em uma dimensão, como o utilizado neste trabalho, são utilizados para simulações de trechos maiores e de longo prazo, por permitirem menos esforço

computacional e maior agilidade. O parâmetro analisado é a componente longitudinal ao canal, sendo as componentes vertical e horizontal transversal consideradas como constante ao longo do trecho. Segundo Cortez (2013), os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo unidimensional dependem da qualidade dos dados de entrada, sendo necessárias informações sobre a carga de matéria sólida em suspensão, da amostragem e classificação granulométrica do material do leito, além da seleção da formulação mais adequada para o transporte do material do leito e da descarga sólida de arraste.

Os modelos computacionais podem ainda serem divididos em uma série de classificações, como segue abaixo.

- Quanto à vazão, podem ser de caráter permanente, ou não permanente. Quando a vazão é constante ao longo da simulação, ela é dita permanente. Se há alguma variação, é dita não permanente.
- Roman (2004) classifica os modelos em acoplados ou não acoplados. O primeiro resolve simultaneamente a fase líquida e sólida do escoamento, enquanto que no segundo, a fase líquida é resolvida primeiramente e em seguida a fase sólida.
- Segundo Vale (2014), os modelos podem ser classificados em de equilíbrio, ou de não equilíbrio. Quando a interação entre o sedimento presente na massa líquida e o do leito do rio é imediata, ou seja, sem a necessidade de uma equação de decaimento, o modelo é chamado de equilíbrio. Senão, o modelo é de não equilíbrio. Em geral, modelos de equilíbrio são utilizados apenas quando o material é grosso e transportado por arraste junto ao leito do canal.
- Por fim, os modelos ainda podem ser divididos em uniformes ou não uniformes. Quando é utilizado apenas um tamanho característico dos sedimentos, o modelo é tido como uniforme. Caso contrário, se o modelo utiliza vários tamanhos característicos para os cálculos, o modelo é dito não uniforme. Neste caso, são realizados cálculos para cada faixa granulométrica separadamente.

Para este trabalho, foi utilizado o *software* Hydrologic Engineering Center's River Analysis System - HEC-RAS (versão 5.0.3), desenvolvido pela *US Army Corps of Engineers* no começo da década de 70. Ele pode ser classificado como permanente, não acoplado, de não equilíbrio e não uniforme. De acordo com Usace (2016), as equações de transporte de sedimento incorporadas pelo *software* HEC-RAS 5.0.3 foram: Ackers e White (1973), Engelund e Hansen (1967), Laursen (1958) e Copeland (1989), Meyer-Peter e Muller (1948), Toffaleti (1968), Yang (1973 e 1984) e Wilcock e

Crowe (2003). Todas essas formulações podem ser encontradas no manual do programa.

O HEC-RAS permite, dentre outros cálculos, calibrar valores para o Coeficiente de Manning. Na literatura, é possível encontrar diversas publicações que fizeram essa calibração. Prajapati, Vadher e Yadav (2016) encontraram coeficientes de rugosidade usando a Equação de Manning, as relações empíricas de Limerinous, Strickler, Meyer-Peter e Muller e da tabela de Cowan. Os resultados foram comparados com o valor observado na estação de Garudeshwar, no rio Purna, na Índia. Eles concluíram que o coeficiente de rugosidade calculado pela equação de Manning é o mais próximo do observado, com um erro de quase zero por cento.

Mtamba *et al.* (2015) usaram Radarsat-2 e Landsat TM para estimativa espacial do coeficiente de rugosidade de Manning. Utilizando o modelo hidrodinâmico FLO-2D, os autores compararam o nível de água encontrado ao usar o coeficiente de rugosidade obtido com informações de campo, ao obtido pela rugosidade estimada a partir de imagens, sendo que os dois métodos apresentaram resultados semelhantes.

Fathi (2012) realizou um estudo laboratorial sobre as características de resistência hidráulica devido a uma plantação flexível em um canal aberto de laboratório. Utilizando diferentes tamanhos de hastes e concentrações individuais de forma que caíssem em faixas práticas de vegetação costeira, obteve valores de  $n$  para as várias condições de fluxo bem como para parâmetros vegetativos.

Zink e Jennings (2014) estimaram o coeficiente de rugosidade em rios de montanha na Carolina do Norte. Fard, Heidarnejad e Zohrabi (2013) determinaram uma equação para o coeficiente de rugosidade do rio Karum. Parhi, Sankhua e Roy (2012) calibraram o valor do coeficiente de Manning no rio Mahanadi por meio de simulação de inundações usando o Sistema de Análise de Rio do Centro de Engenharia Hidrológica (HEC-RAS). Matos *et al.* (2011) basearam suas pesquisas em estudos teóricos e práticos para determinar o coeficiente de rugosidade do rio Sapucaí, em Minas Gerais. Lyra *et al.* (2010) determinaram o coeficiente de rugosidade do rio Paracatu em função das características geométricas do canal e da série de vazões diárias das estações fluviais existentes ao longo do rio.

Grande parte dos trabalhos disponíveis na literatura realizou a calibração do coeficiente de Manning a partir da comparação entre as profundidades do nível d'água obtidas em campo com as obtidas via simulação. Porém, neste trabalho, propõe-se uma calibração feita a partir dos níveis de assoreamento do reservatório de uma PCH,

visto que, como existe um vertedor nesse reservatório, quem controlará o nível d'água será essa estrutura e não o coeficiente de Manning.

### **3.4. Modelagem física para a estimativa do assoreamento em reservatórios**

Quando não se dispõe de dados suficientes específicos do local, como, por exemplo, batimetria, distribuições de tamanho do sedimento ao longo do leito e descarga de sedimento, o fluxo hidráulico e o transporte de sedimentos não podem ser calibrados. Com isso, a confiabilidade das previsões da modelagem matemática torna-se questionável. Para contornar estas situações, geralmente recorre-se à modelagem física, como uma ferramenta alternativa para se simular os sistemas hidráulicos e se verificar a precisão dos dados encontrados pela modelagem matemática (CAO; CARLING, 2002 *apud* MORAN, 2013). Os modelos físicos permitem a simulação de um grande número de situações distintas, possibilitando a obtenção de soluções otimizadas, seguras e econômicas.

Apesar de sua natureza complexa, como, por exemplo, os efeitos de escala, quando projetados adequadamente, espera-se que os modelos físicos reproduzam satisfatoriamente os processos dominantes no protótipo, mesmo que estes sejam de caráter tridimensional (ETTEMA *et al.*, 2000 *apud* MORAN, 2013). Os processos fluviais morfogênicos podem então ser observados, em um período de tempo reduzido, dentro de um ambiente de laboratório controlado e gerenciável, enquanto se reúne um conjunto de dados quantitativo.

Para que o modelo se comporte de forma semelhante ao protótipo, recorre-se à Teoria da Semelhança, para se estabelecer os princípios básicos a serem seguidos ao se projetar, construir e operar o modelo físico reduzido.

Segundo Julien (2002), a teoria da semelhança intenta o estabelecimento de uma relação entre o protótipo e o modelo, respeitando todo tipo de relação entre as diversas grandezas interferentes em qualquer fenômeno físico.

A semelhança entre modelos físicos e protótipos pode ser obtida através de três aspectos básicos: semelhança geométrica, semelhança cinemática e semelhança dinâmica.

A semelhança geométrica é a semelhança de formas e traduz-se pela existência de uma relação constante entre o modelo e o protótipo envolvendo escalas pertinentes às grandezas de comprimento (QUINTELA, 2007).



A semelhança cinemática é a semelhança do movimento, ou seja, especifica os parâmetros que envolvem tempo e deslocamento, tais como velocidade, aceleração, viscosidade cinemática, dentre outras. Na semelhança cinemática deve existir uma razão constante entre partículas homólogas. Mas para que isso ocorra, as linhas de corrente deverão estar semelhantemente orientadas, implicando que os escoamentos cinematicamente semelhantes devem ser geometricamente semelhantes e que o regime de escoamento no modelo e protótipo deve ser igual (JULIEN, 2002).

A semelhança dinâmica indica um mesmo comportamento dinâmico entre os fluidos, ou seja, trata-se dos parâmetros que envolvem força e massa, como massa específica, peso específico e viscosidade dinâmica. Nela, as partículas homólogas são controladas por forças cujas resultantes tem direção e sentido iguais, e grandezas e módulos proporcionais (QUINTELA, 2007). Além disso, as trajetórias descritas por essas partículas são geometricamente semelhantes.

## **4. METODOLOGIA**

### ***4.1. Descrição da PCH Salto do Paraopeba***

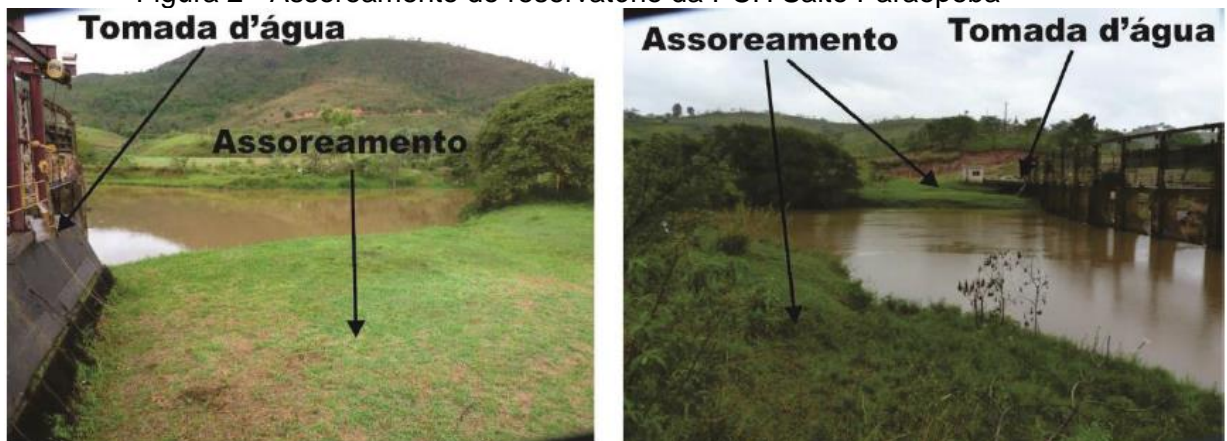
A PCH Salto do Paraopeba (Figura 1) foi construída em meados dos anos 1950 no rio Paraopeba, afluente do rio São Francisco. A usina possui duas unidades geradoras, com capacidade total de produção de 2.470 kW (SPEC, 2011).

Por volta do ano 2000 a CEMIG assumiu a operação da usina. Nessa época a usina já se encontrava extremamente assoreada (Figura 2), até ser paralisada, situação em que se encontra hoje. Em 2011 foi elaborado um projeto de repotenciação da usina. O projeto incluía, além de um reforço necessário no maciço, a ampliação da capacidade de geração de energia para 12 MW. Também foi verificada a segurança do extravasor, concluindo-se sua segurança para cheias de 1000 anos de recorrência. A Tabela 1 apresenta algumas características e vazões notáveis da PCH. Na Figura 3 está representado um arranjo do seu vertedor.



Figura 1 – Vista de jusante da PCH Salto do Paraopeba

Figura 2 - Assoreamento do reservatório da PCH Salto Paraopeba

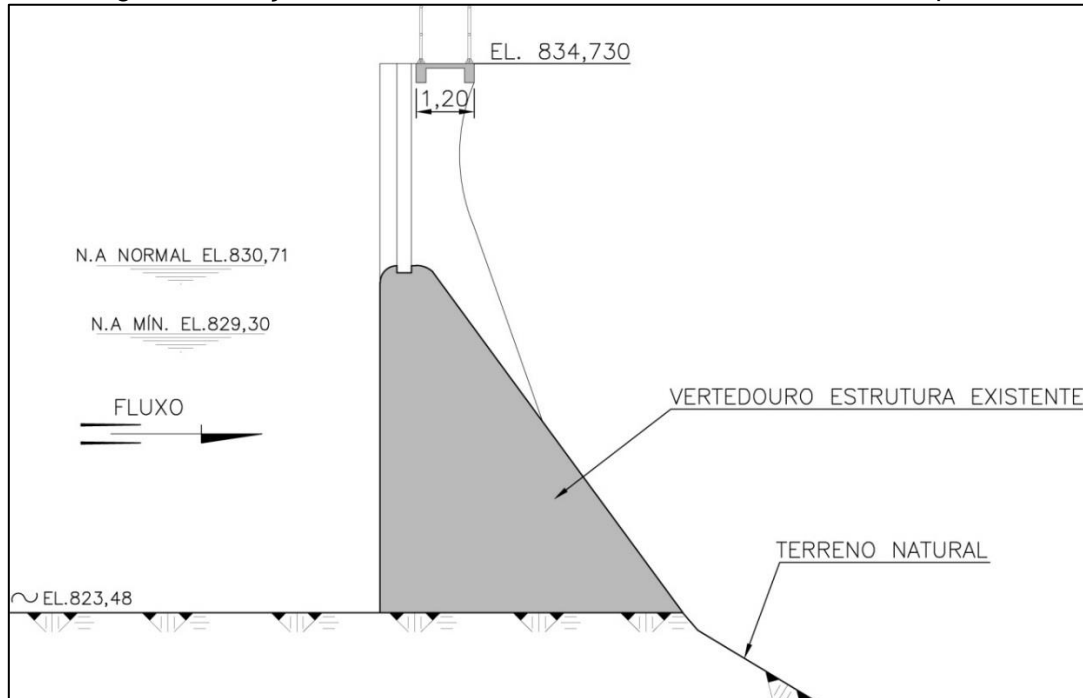


Fonte: Vale, 2014.

Tabela 1 - Detalhes da PCH Salto do Paraopeba

Item	Valor
Área de drenagem (km <sup>2</sup> )	2.485
Tempo de concentração (h)	12,10
Nível de água máximo normal no reservatório (m)	830,71
Nível de água máximo normal de jusante (m)	812,05

Figura 3 – Seção transversal do vertedor da PCH Salto do Paraopeba



Fonte: Adaptado de SPEC, 2011.

#### 4.2. Modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba

No Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) encontra-se um modelo reduzido desta PCH. Foi construído a partir de um convênio de pesquisa e desenvolvimento entre a CEMIG e a UFMG. Os projetos desse modelo foram desenvolvidos pela TEC3 Geotecnia e Recursos Hídricos Ltda (TEC3). Outras informações sobre o projeto podem ser consultadas em Carvalho *et al.* (2014). O modelo reduzido representa até 200 m a jusante da barragem e 1000 m à montante, sendo que esse ponto se trata de uma seção de controle hidráulico (escoamento crítico).

A Figura 4 apresenta o modelo reduzido construído, bem como a barragem. Na construção da barragem, foi utilizada uma mistura de borracha de PVC (material que foi utilizado como sedimento) com argamassa, com traço de cinco latas de borracha para duas e meia de argamassa. As camadas eram erguidas de 5 a 7,0 cm de forma a não permitir que a massa escorregasse. Além disso, esperava-se um prazo mínimo de um dia de cura entre as camadas.

O sedimento empregado na simulação do assoreamento é um material granular de borracha, produzido industrialmente. Segundo Campello (2017), possui diâmetro mediano ( $d_{50}$ ) igual a 1,7 mm e densidade relativa de 1,13. Ademais, o material é

atóxico, insolúvel, e a velocidade de queda para o  $d_{50}$  é de 2,7 cm/s. A Figura 5 exhibe a granulometria da borracha.

Figura 4 – Vista do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba

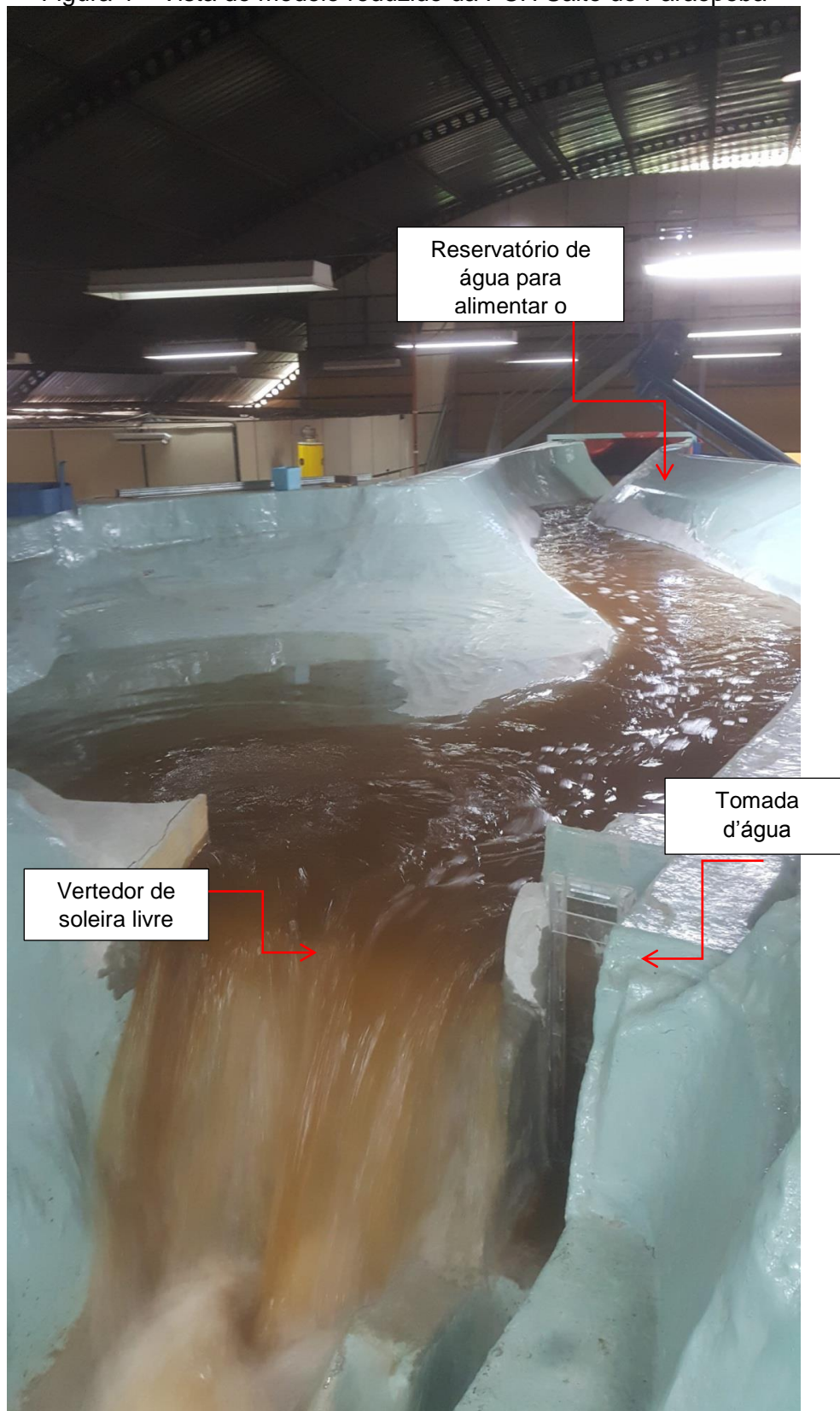
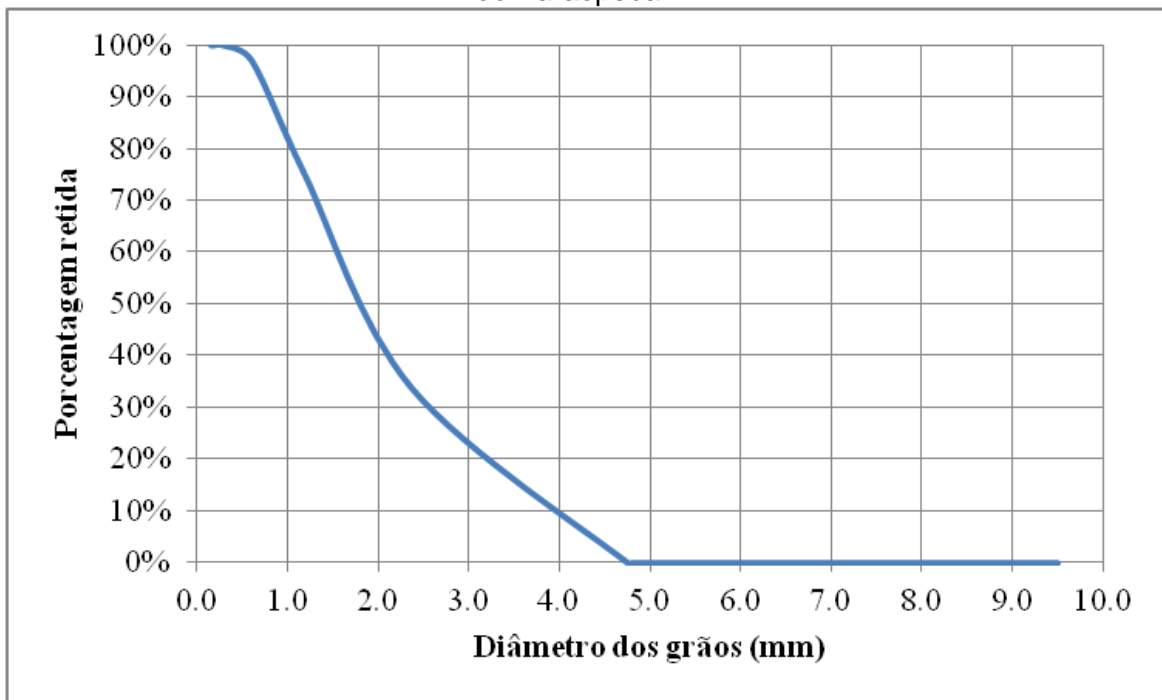




Figura 5 – Curva granulométrica da borracha usada no modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba



O circuito hidráulico disponível para a alimentação do modelo é composto por uma bomba modelo EHF 150-25, existente no CPH. A água é recalçada para um reservatório acoplado à entrada do modelo. O controle e alteração das vazões foram feitos através de um inversor de frequência juntamente com o auxílio de um medidor de vazões eletromagnético.

#### **4.3. Simulação do assoreamento no modelo reduzido**

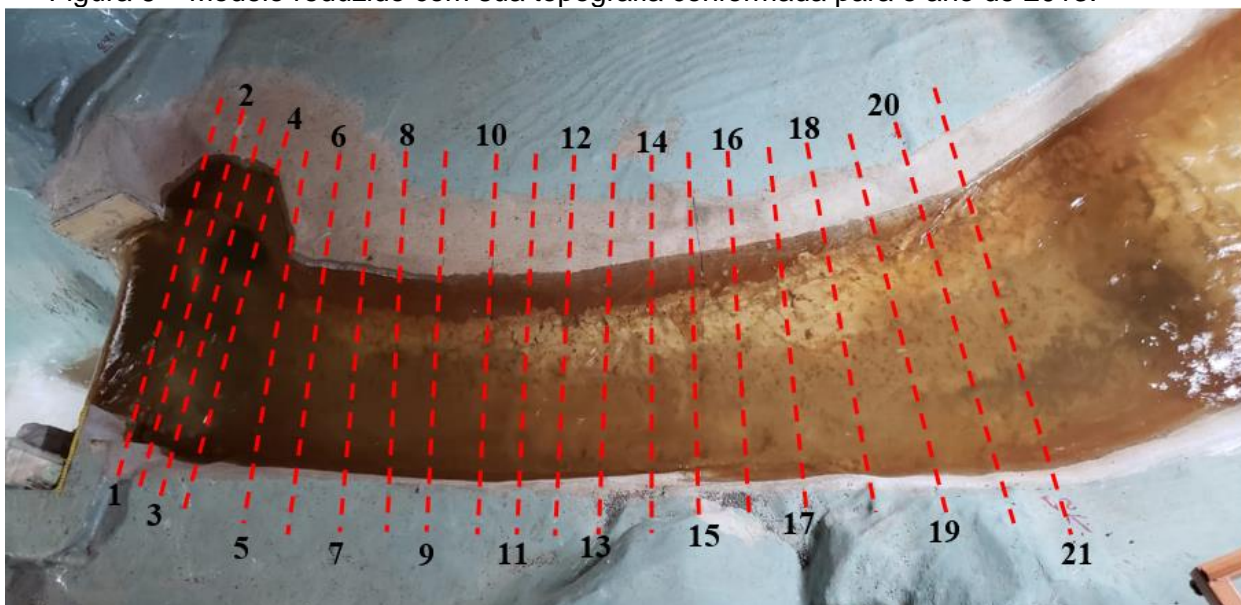
Com o modelo já construído, inicialmente verificou-se sua eficiência quanto da simulação do assoreamento ocorrido em campo. Para isso, dispunha-se da batimetria de 1956, data em que a usina foi implantada, e duas batimetrias posteriores, as quais foram feitas nos anos de 2013 e 2017. É importante ressaltar que nessas datas o protótipo já estava intensamente assoreado.

O período compreendido entre 1956 e 2013, ou seja, 57 anos, corresponderia no modelo a 201,0 horas, segundo a escala do leito do canal, que é 1:2.483. Esse intervalo de tempo era muito grande para se realizar o experimento, visto que ele deveria ser feito de forma ininterrupta. Assim sendo, para realizar a simulação do assoreamento, a fim de se verificar a eficiência do modelo em representar o real, utilizou-se o período compreendido entre os anos de 2013 e 2017. Esse intervalo, no modelo, correspondeu a 18,0 horas.

Dado que o protótipo já estava assoreado nessa data, foi necessário fazer a conformação do leito do canal do modelo para a batimetria de 2013, conforme

apresentado na Figura 6. A numeração de 1 a 21, na figura, corresponde às seções transversais modeladas.

Figura 6 – Modelo reduzido com sua topografia conformada para o ano de 2013.



A conformação do fundo do canal foi esculpida utilizando-se uma mistura de borracha de PVC (a mesma utilizada como sedimento durante as simulações) com cimento, recoberta com uma fina camada de argamassa. O modelo reduzido representa um trecho de 1000,0 m a montante do vertedor, porém a batimetria de 2013 contém apenas os primeiros 300,0 m. Com isso, a simulação foi feita apenas nesse trecho menor, que está situado entre as seções “1” a “21”.

Após a conformação do modelo, foi necessário determinar quais vazões seriam utilizadas na simulação. As vazões médias diárias representam no modelo apenas 35 segundos. Trabalhar com esses valores seria impraticável, pois o intervalo de tempo é muito curto, e, conseqüentemente, a bomba não conseguiria fornecer a vazão exata durante o tempo correto.

Optou-se, então, por utilizar as vazões médias anuais, com descarga sólida também referente a essas vazões. A descarga sólida foi encontrada por meio da curva-chave de sedimentos da Figura 7. No modelo, cada ano hidrológico corresponde a 3,5 horas, o que viabiliza a alternância de vazões. As vazões anuais ( $Q$ ), a descarga sólida total ( $Q_{ST\text{anual}}$ ) e a quantidade de sedimento inserida no modelo são apresentadas na Tabela 2.

Figura 7 - Curva-chave de sedimentos do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba

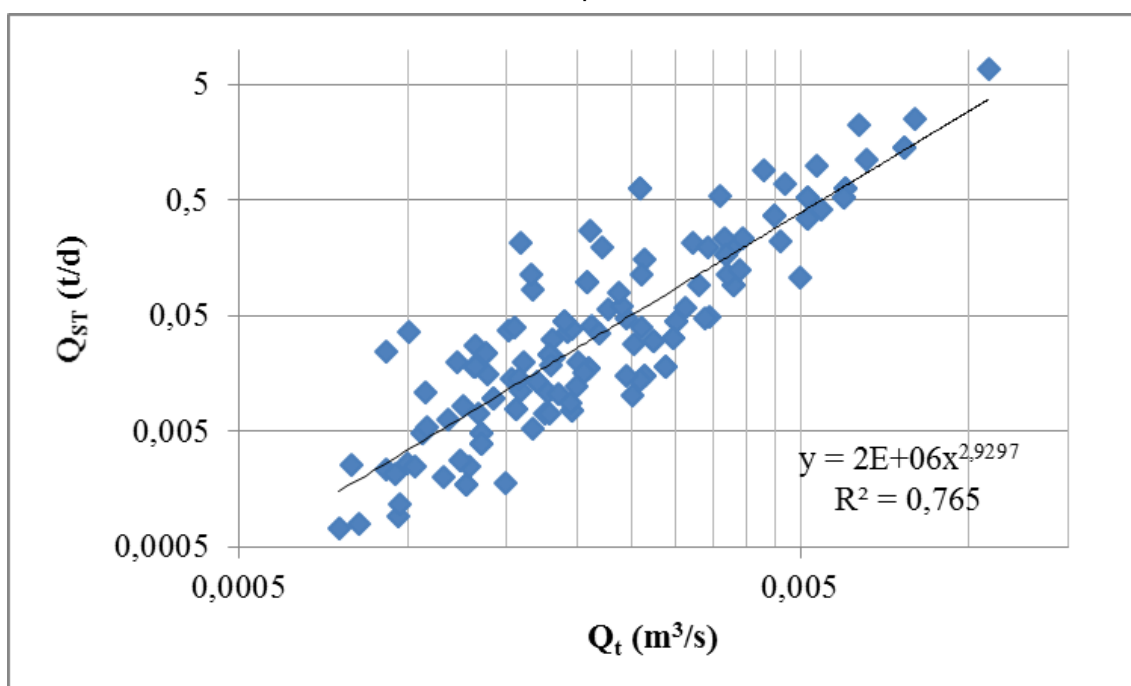


Tabela 2 – Dados utilizados para a simulação do assoreamento produzido entre 2013 e 2017.

Ano	Q (m³/h)	Q <sub>ST</sub> anual (t/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 foi inserido na seção “21”, que no protótipo equivale a 300,0 m à montante do barramento. Inserir o sedimento na seção mais a montante é o procedimento adotado pelo *software* HEC-RAS, utilizado neste trabalho. Além disso, em visita à PCH, percebeu-se que nesse trecho não havia sinais de erosão nas margens, ou seja, a maior parte do sedimento que se acumulou no reservatório realmente veio através da calha do rio.

Contudo, entre 2013 e 2017 houve uma seca na região da PCH, o que acarretou em vazões médias anuais pequenas, as quais não foram capazes de carregar o sedimento inserido, de forma que a deposição se deu majoritariamente próxima à seção “21”.

Utilizou-se, então, a vazão média da onda que compreendia a vazão máxima anual, pois é durante o período das ondas de cheia que ocorre o maior transporte de partículas. Essas vazões foram chamadas de vazões médias de períodos de máximas ( $Q_{MM}$ ) e seus valores foram obtidos dos hidrogramas dos respectivos anos hidrológicos, apresentados nas Figuras 8 a 12. Entre as linhas tracejadas está a onda que compreende a vazão máxima.

Figura 8 - Hidrograma do ano hidrológico 2012-2013 (outubro a setembro).

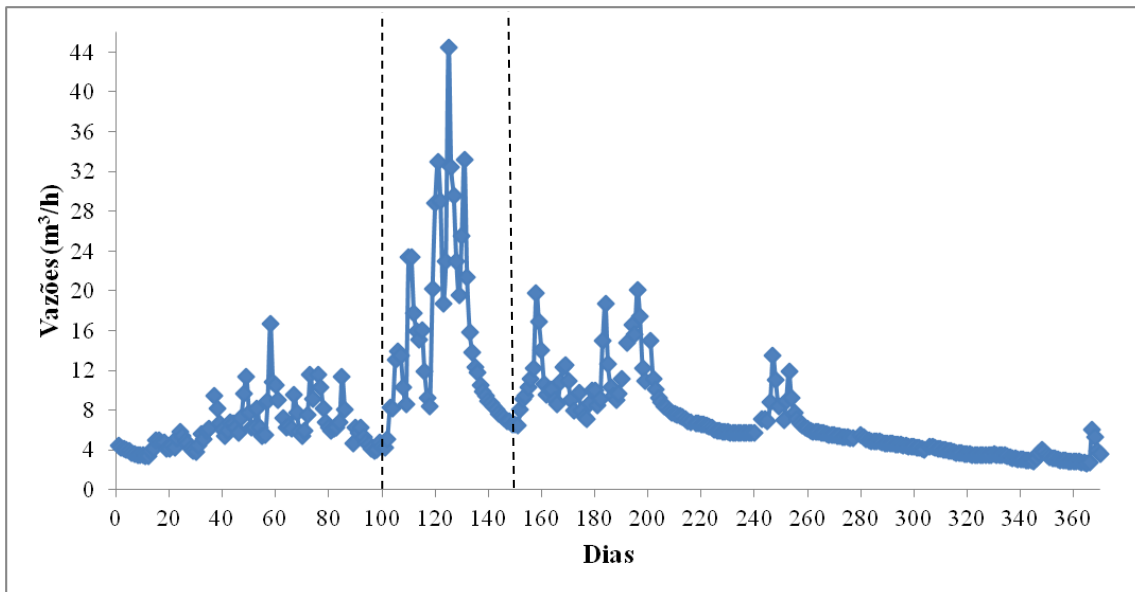


Figura 9 - Hidrograma do ano hidrológico 2013-2014 (outubro a setembro).

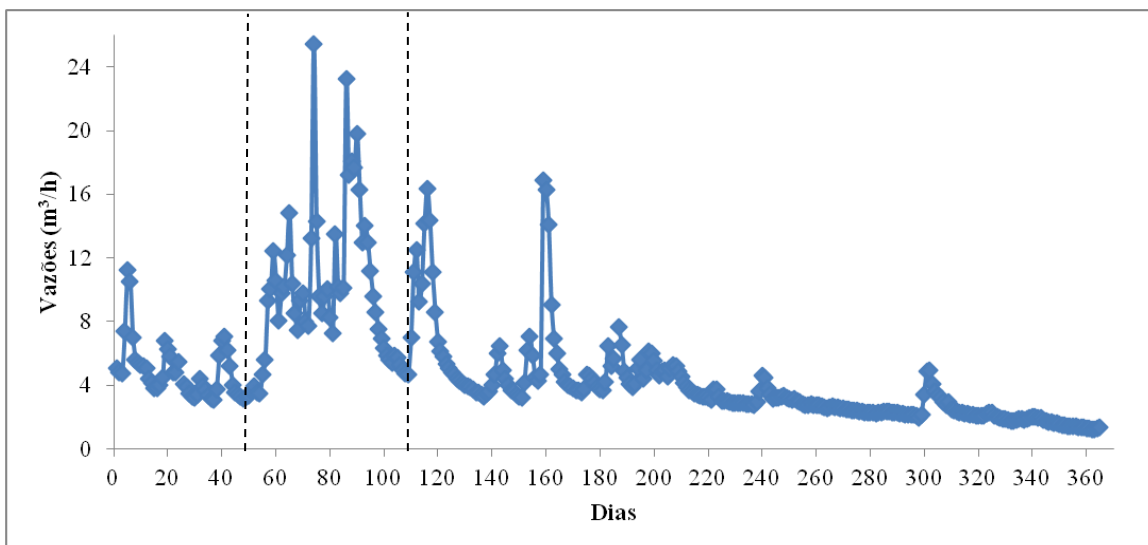




Figura 10 - Hidrograma do ano hidrológico 2014-2015 (outubro a setembro).

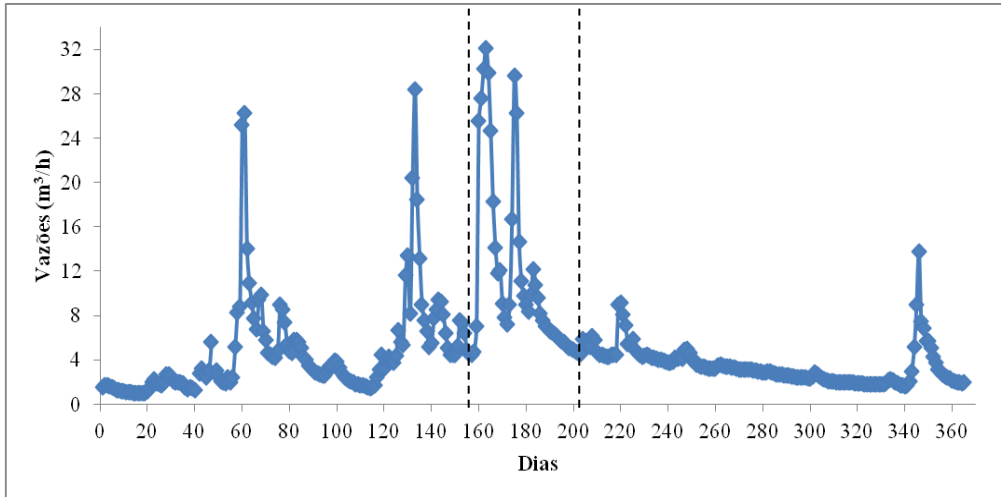


Figura 11 - Hidrograma do ano hidrológico 2015-2016 (outubro a setembro).

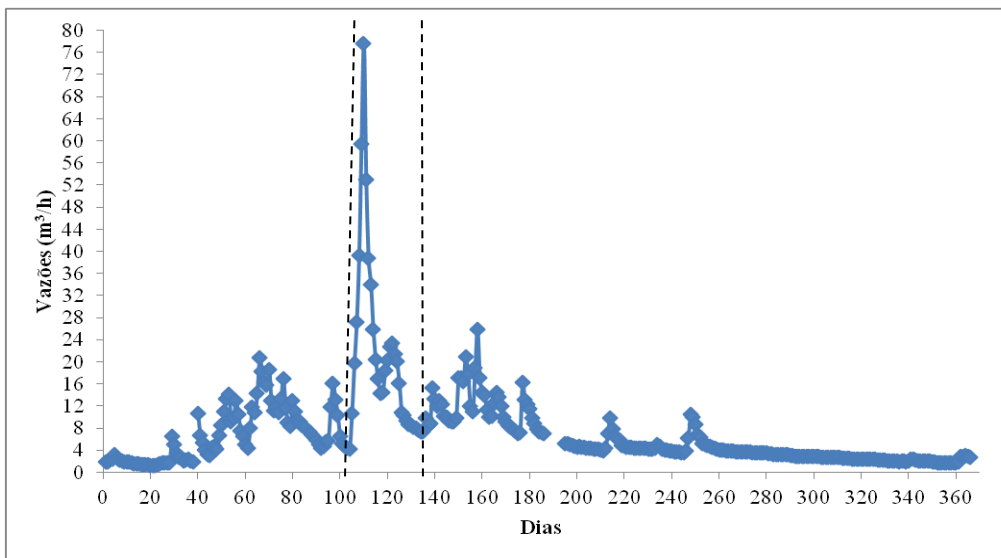
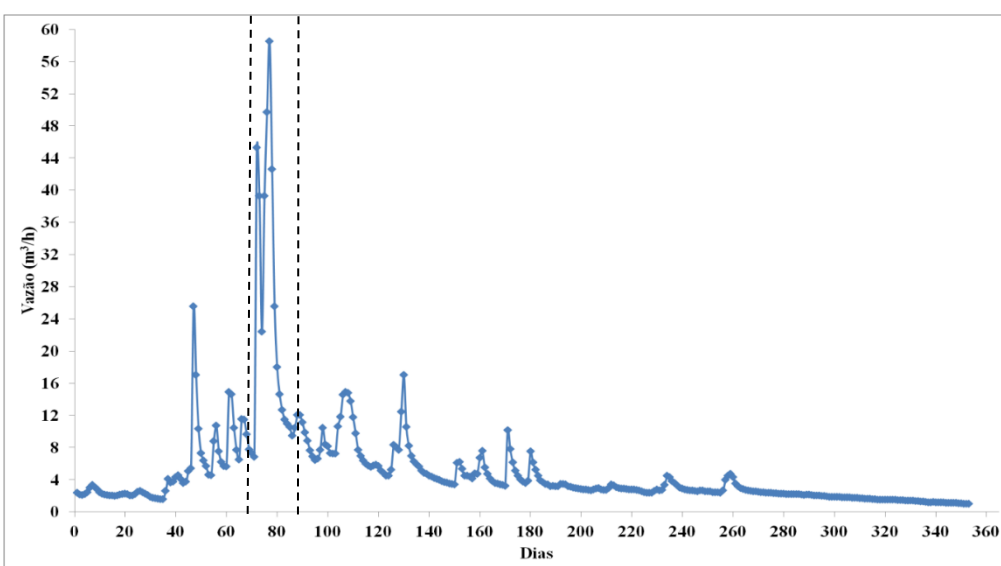


Figura 12 - Hidrograma do ano hidrológico 2016-2017 (outubro a setembro).



Nos três primeiros anos, a onda de cheia teve duração de aproximadamente 50 dias e nos dois últimos de 30 dias. No entanto, optou-se por padronizar todas as ondas em 50 dias, que no modelo reduzido corresponde a 30 minutos de escoamento. Assim, a simulação do assoreamento ocorrido entre 2013 e 2017 ocorreu ininterruptamente por 2,5 horas. Para o cálculo da descarga sólida, utilizaram-se as vazões médias anuais.

Comparando a batimetria da PCH de 2013 com a de 2017, encontrou-se uma massa acumulada de 2.085.723,5 kg, que no modelo corresponde, segundo o fator de escala, a 8,4 kg. A massa a ser inserida com base nas vazões médias anuais, obtida através da Tabela 2 foi de 9,2 kg, maior que a quantidade real. Porém, durante o experimento parte dos sedimentos vertia, de modo que ao final, a quantidade retida foi bem próxima da real.

A Tabela 3 apresenta os valores utilizados para a segunda simulação do assoreamento, com base nas vazões médias dos períodos de máximas ( $Q_{MM}$ ) obtidas do período entre 2013 e 2017 e descarga sólida encontrada a partir das vazões médias anuais ( $Q_{ST\text{anual}}$ ). Cada uma das vazões escoou por 30 minutos e foram alteradas pelo inversor de frequência acoplado à bomba.

Tabela 3 - Dados utilizados na operação do modelo físico para a segunda simulação do assoreamento (Procedimento final)

Ano	$Q_{MM}$ (m <sup>3</sup> /h)	$Q_{ST\text{médiamáx}}$ (t/d)	$Q_{ST\text{anual}}$ (t/d)
2013	27,2	1,216	0,021
2014	13,1	0,143	0,002
2015	23,0	0,744	0,008
2016	31,5	1,870	0,024
2017	25,3	0,984	0,010

O desenvolvimento do assoreamento no modelo reduzido foi acompanhado através de fotos, vídeos e medições das praias de sedimentos ao final das 2,5 horas. O assoreamento produzido foi comparado com o obtido através de uma simulação numérica feita com auxílio do *software* HEC-RAS 5.0.3.

No modelo reduzido, para a realização das medições, utilizou-se um Sensor Fotoelétrico modelo OM70-X0500.HI0660.VI da Baumer. O sensor apresentou uma grande sensibilidade ao toque, de forma a apresentar, em alguns momentos, grandes variações nos valores medidos. Por isso, também se mediram os depósitos com auxílio de uma régua, para confirmar os valores obtidos pelo sensor. Assim, ao final do experimento, o modelo foi cuidadosamente esvaziado, de forma a não se alterar a

topografia das praias de sedimentos, e foram medidos vários pontos ao longo das 21 seções de interesse.

Posteriormente, depois de verificada a eficiência do modelo em representar o fenômeno real ocorrido, visando validar a metodologia desenvolvida, simulou-se um novo assoreamento, com base nas vazões obtidas do período de 2008 a 2012. Como não se dispunha dos dados de batimetria desse período, optou-se por utilizar a batimetria de 2013 que já estava conformada no modelo, ou seja, apenas os dados hidrossedimentológicos são referentes ao período mencionado. É importante ressaltar que essa metodologia não comprometeu os resultados, visto que o objetivo era a comparação entre o assoreamento ocorrido no modelo e o simulado numericamente. Os parâmetros utilizados estão apresentados na Tabela 4, abaixo.

Tabela 4 – Dados utilizados na operação do modelo físico para a terceira simulação do assoreamento

<b>Ano</b>	<b>Q<sub>MM</sub> (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Q<sub>ST</sub>anual (t/d)</b>	<b>Massa (kg) de sedimento inserida</b>
2008	34,5	0,017	2,5
2009	38,1	0,026	3,8
2010	33,1	0,037	5,4
2011	32,9	0,016	2,3
2012	33,5	0,031	4,6

Nascimento e Roenick (2018) desenvolveram uma série de códigos computacionais para a geração estocástica de dados hidrossedimentológicos, que permitiram a criação de conjuntos de vazões aleatórias de cinco anos. Foram escolhidas três dessas séries para novas simulações física e numérica do assoreamento, utilizando a metodologia descrita anteriormente. Ressalta-se que nas novas simulações do assoreamento foram variadas apenas as séries de vazões, sendo mantida constante a curva-chave de sedimentos do modelo reduzido. Os valores utilizados nas simulações do assoreamento são apresentados nas Tabelas 5 a 7.

No HEC-RAS, inseriu-se a geometria do reservatório, as vazões, a curva chave de sedimentos e o coeficiente de Manning encontrado de acordo com a calibração que será descrita a seguir. O assoreamento simulado foi comparado com o produzido no modelo reduzido para as condições utilizadas.

Tabela 5 - Dados utilizados na operação do modelo físico para a quarta simulação do assoreamento

$Q_{MM}$ (m <sup>3</sup> /h)	$Q_{STanual}$ (t/d)	Massa (kg) de sedimento inserida
31,3	0,020	3,0
15,7	0,001	0,2
20,8	0,008	1,2
29,0	0,023	3,4
26,4	0,009	1,4

Tabela 6 - Dados utilizados na operação do modelo físico para a quinta simulação do assoreamento

$Q_{MM}$ (m <sup>3</sup> /h)	$Q_{STanual}$ (t/d)	Massa (kg) de sedimento inserida
32,3	0,020	3,0
19,1	0,001	0,2
26,0	0,008	1,2
26,3	0,023	3,4
33,5	0,009	1,4

Tabela 7 - Dados utilizados na operação do modelo físico para a sexta simulação do assoreamento

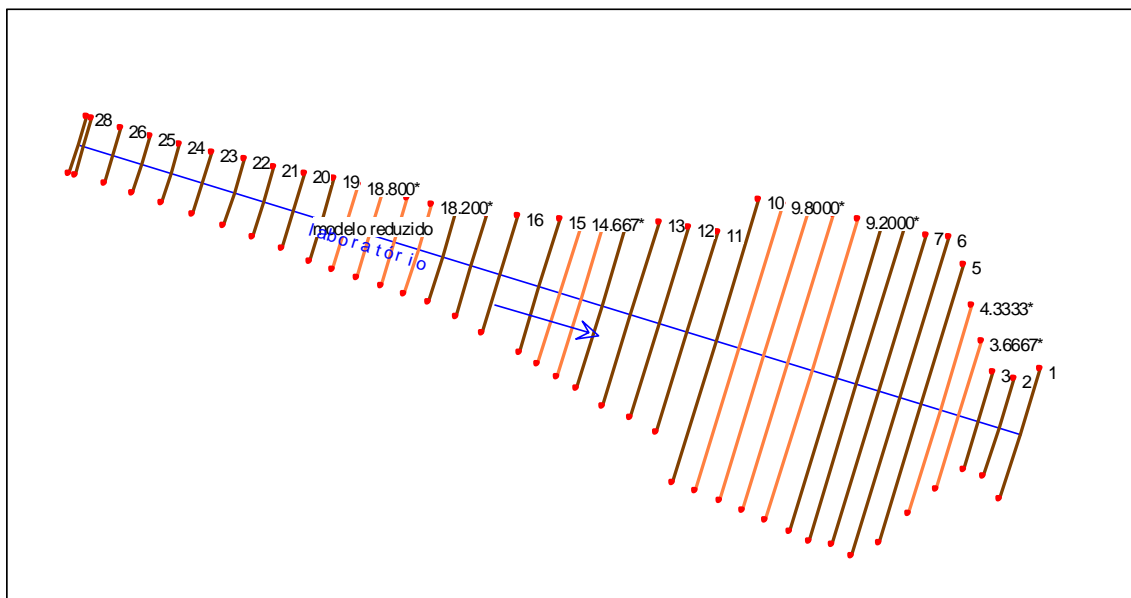
$Q_{MM}$ (m <sup>3</sup> /h)	$Q_{STanual}$ (t/d)	Massa (kg) de sedimento inserida
31,9	0,020	3,0
20,9	0,001	0,2
33,9	0,008	1,2
30,2	0,023	3,4
28,4	0,009	1,4

#### **4.4. Calibração do coeficiente de Manning do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba**

O coeficiente de Manning é um importante fator para a caracterização de um escoamento. Por isso, ele teve que ser estipulado para o modelo reduzido. Para isso, mediram-se quatro vazões e suas respectivas alturas de lâmina d'água para três seções ao longo do modelo. A primeira foi definida na entrada do modelo, por se tratar de uma seção de controle crítica. As outras duas foram escolhidas de forma a promover uma maior facilidade nas medições de profundidades.

No software HEC-RAS 5.0.3, inseriu-se a geometria do reservatório do modelo, de acordo com as seções transversais (apresentadas no Anexo A). As seções escolhidas para realizar as medições de profundidade foram a 28, 19 e 10, que distam aproximadamente 4,0 m entre si. As seções estão representadas na Figura 13.

Figura 13 - Esquema em planta da geometria do modelo reduzido inserida no HEC-RAS



Em seguida, arbitraram-se valores do coeficiente de Manning até se obter linhas d'água próximas às lidas no modelo físico. Adotou-se escoamento crítico como condição de contorno tanto para a seção de montante, por ser uma seção de estrangulamento, quanto para a de jusante (vertedor). Foram feitas simulações para as quatro vazões ensaiadas, com regime de escoamento permanente.

Este procedimento foi feito antes da construção da barragem no modelo reduzido. Após a construção desta, não foi possível calibrar o coeficiente de rugosidade de Manning pelo método descrito anteriormente, pois o controle do nível d'água passou a ser feito pelo vertedor, e não pelas forças atuantes no escoamento. Adotou-se, então, outro procedimento.

Utilizou-se dos níveis de assoreamento ocorrido no período compreendido entre 2013 e 2017. No HEC-RAS, inseriram-se as seções do reservatório do modelo reduzido (Anexo A), as vazões da Tabela 3 e a curva chave de sedimentos (Figura 7). Em seguida, arbitraram-se valores para o coeficiente de Manning até se obter um assoreamento semelhante ao ocorrido na PCH, no período estipulado.

Os valores calibrados para o coeficiente de Manning, utilizando as vazões da Tabela 3, foram utilizados para mais quatro simulações numéricas do assoreamento, as quais se diferenciaram pelo valor das vazões, sendo essas as apresentadas nas Tabelas 5 a 7. Assim, ao final se obteve cinco simulações numéricas do assoreamento e cinco realizadas no modelo reduzido, as quais foram comparadas para se observar se o mesmo Manning utilizado na modelagem numérica, para cinco séries de vazões diferentes, produz resultados de assoreamento distintos.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. *Calibração do coeficiente de Manning*

A determinação do coeficiente de Manning ( $n$ ) foi feita logo após a construção do modelo físico, antes da construção da barragem. Este coeficiente é um dos parâmetros de entrada do HEC-RAS para a simulação do assoreamento em reservatórios.

Utilizando-se o próprio HEC-RAS, por processo iterativo, obteve-se que o melhor resultado alcançado foi de 0,012. A Tabela 8 apresenta os resultados para esse valor. Nela, é possível comparar os valores lidos ( $y_{lido}$ ) e encontrados através do *software* ( $y_{HEC}$ ). As seções 28 e 19 são as que mais destoaram em alguns pontos. Isso se deve ao fato destas seções possuírem maior velocidade de escoamento, de forma a dificultar as leituras de nível d'água. Com isso, os valores lidos podem não representar exatamente o real.

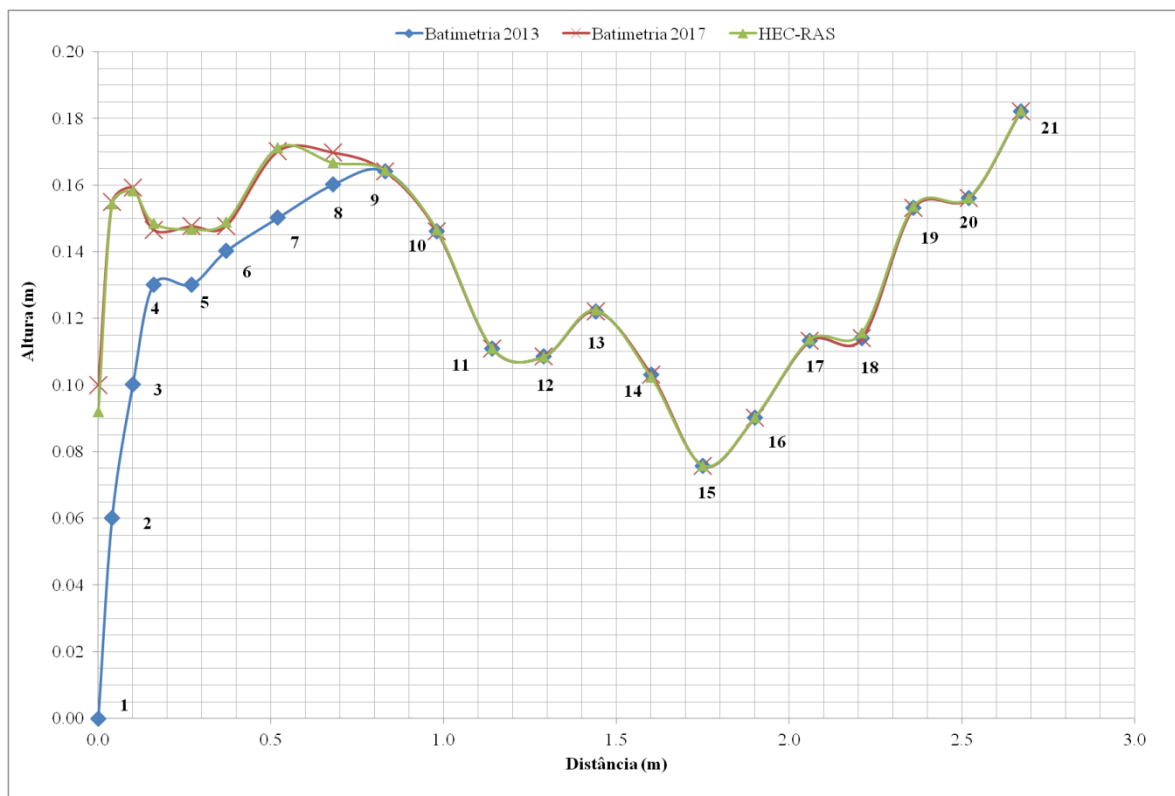
Tabela 8 – Comparação entre as profundidades lidas e encontradas pelo HEC-RAS para um  $n$  de 0,012.

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

Após a calibração do coeficiente de Manning foi construído o vertedor no modelo, de forma que este passou a controlar o nível d'água. Com isso, foi necessário encontrar um novo coeficiente, utilizando-se não mais os níveis d'água, mas sim as alturas de assoreamento entre 2013 e 2017. No HEC-RAS, utilizando-se as vazões médias dos períodos de máximas e a curva chave de sedimentos, por processo iterativo, encontrou-se o valor de  $n$  que melhor representava o assoreamento produzido no modelo. O valor médio obtido foi de 0,035. A diferença entre este valor e o encontrado anteriormente (0,012) se deve à construção do vertedor, bem como a mudança da geometria e material do canal. O canal que antes era feito em fibra de vidro, agora tinha seu leito revestido em argamassa e impermeabilizantes, visto que havia muitos vazamentos no modelo.

A Figura 14 apresenta o assoreamento simulado utilizando-se  $n = 0,035$ , e a batimetria do reservatório feita em 2017. Nela é possível perceber que o assoreamento simulado foi praticamente igual ao real, constatando uma boa calibração para  $n$ .

Figura 14 - Perfil longitudinal do assoreamento real da PCH e o simulado no HEC-RAS, utilizando-se as vazões diárias, para os anos 2013 e 2017 (valores convertidos para a escala do modelo reduzido)



### 5.2. Validação do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba

Conforme descrita no item anterior, a primeira simulação do assoreamento produzido entre os anos de 2013 e 2017 foi feita utilizando-se as vazões anuais. Entretanto, as vazões eram pequenas e não promoveram o transporte do sedimento, fazendo com que este ficasse acumulado próximo à seção “21” onde foi lançado, conforme a Figura 15. Assim, o procedimento adotado foi incapaz de representar o assoreamento ocorrido no protótipo.

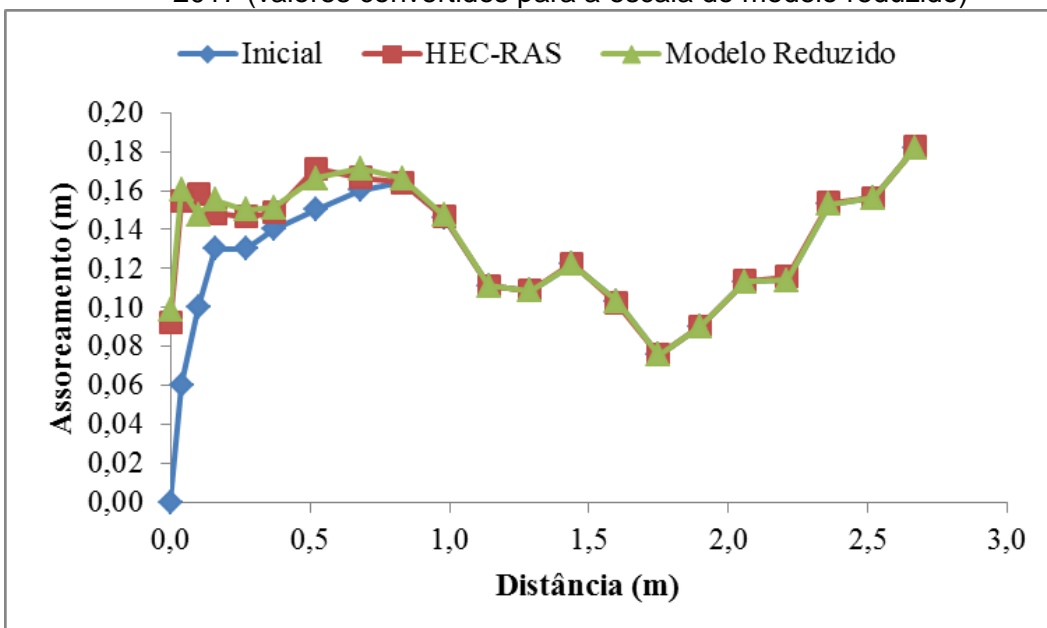


Figura 15 – Assoreamento próximo à seção “21”, seção onde foi inserido o sedimento no modelo reduzido.



A segunda simulação foi feita utilizando-se as vazões médias dos períodos que compreendiam as máximas de cada ano hidrológico, a descarga sólida encontrada a partir das médias anuais, sendo que, no HEC-RAS, além das vazões e descargas sólidas também foi inserido o coeficiente de Manning encontrado na calibração ( $n = 0,035$ ). No modelo reduzido, a simulação foi repetida três vezes, a fim de se garantir a eficiência da execução. A Figura 16 apresenta as médias dos valores encontrados para esta simulação, bem como os valores obtidos pelo HEC-RAS. Percebe-se que o assoreamento computacional está muito próximo do observado no modelo, o que indica que a calibração de Manning foi feita com excelência.

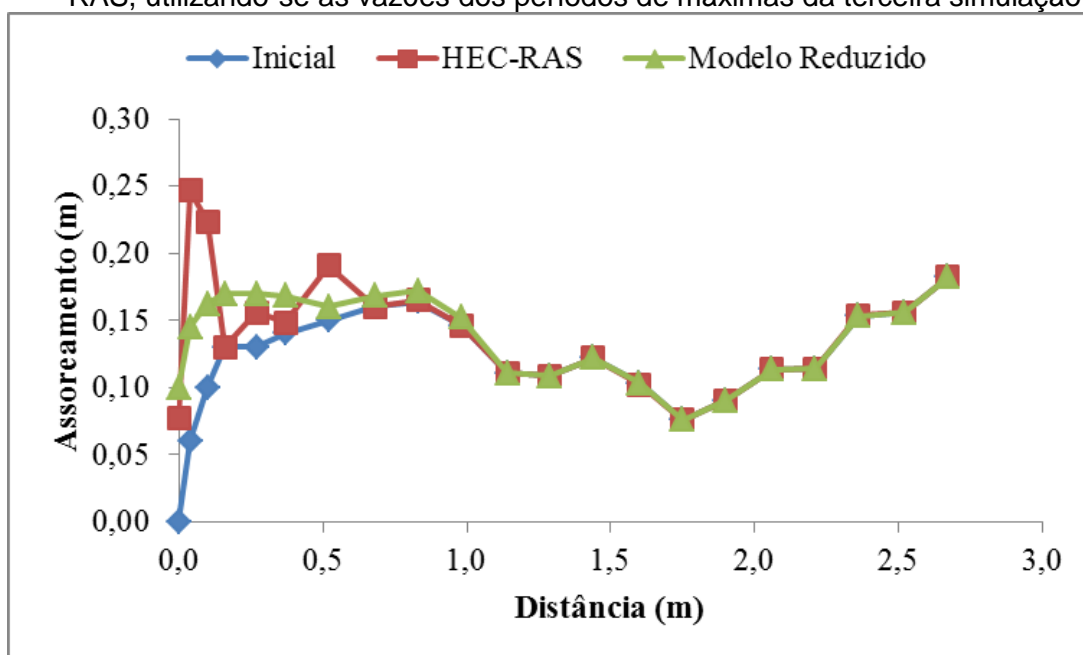
Figura 16 - Perfil longitudinal do assoreamento real da PCH e o simulado no HEC-RAS, utilizando-se as vazões médias dos períodos de máximas, para os anos 2013 e 2017 (valores convertidos para a escala do modelo reduzido)



Na terceira simulação, no modelo reduzido, utilizaram-se as vazões obtidas do período compreendido entre 2008 e 2012, e descarga sólida encontrada a partir destas vazões. Além desses parâmetros, no HEC-RAS também se utilizou o mesmo coeficiente de Manning da calibração anteriormente descrita.

A Figura 17 exibe o comparativo entre o assoreamento medido no modelo físico e o encontrado pelo HEC-RAS. Percebe-se que os valores medidos no modelo se encontram distantes dos valores obtidos no HEC-RAS.

Figura 17 - Perfil longitudinal do assoreamento real da PCH e o simulado no HEC-RAS, utilizando-se as vazões dos períodos de máximas da terceira simulação



Em seguida, no modelo reduzido, foram feitas mais três simulações, nas quais foram utilizadas três séries de vazões obtidas estocasticamente por Nascimento e Roenick (2018), sendo que, no HEC-RAS, além das séries estocásticas de vazões, novamente se utilizou o mesmo Manning calibrado. Os resultados estão apresentados nas Figuras 18, 19 e 20.

Figura 18 - Perfil longitudinal do assoreamento real da PCH e o simulado no HEC-RAS, utilizando-se as vazões dos períodos de máximas. Quarta simulação

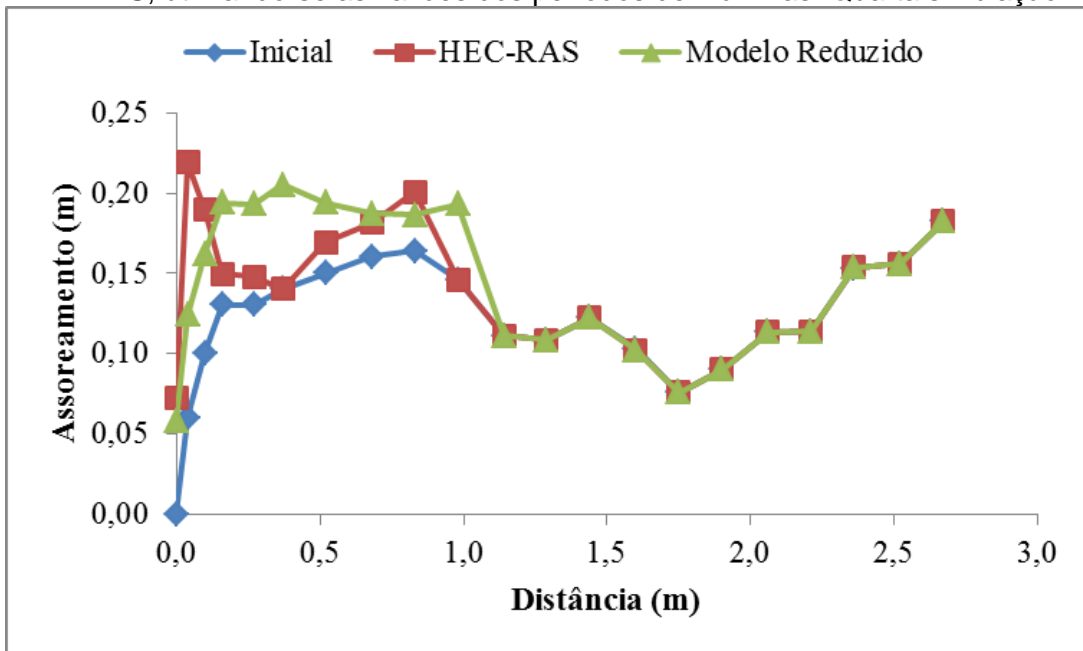


Figura 19 - Perfil longitudinal do assoreamento real da PCH e o simulado no HEC-RAS, utilizando-se as vazões dos períodos de máximas. Quinta simulação

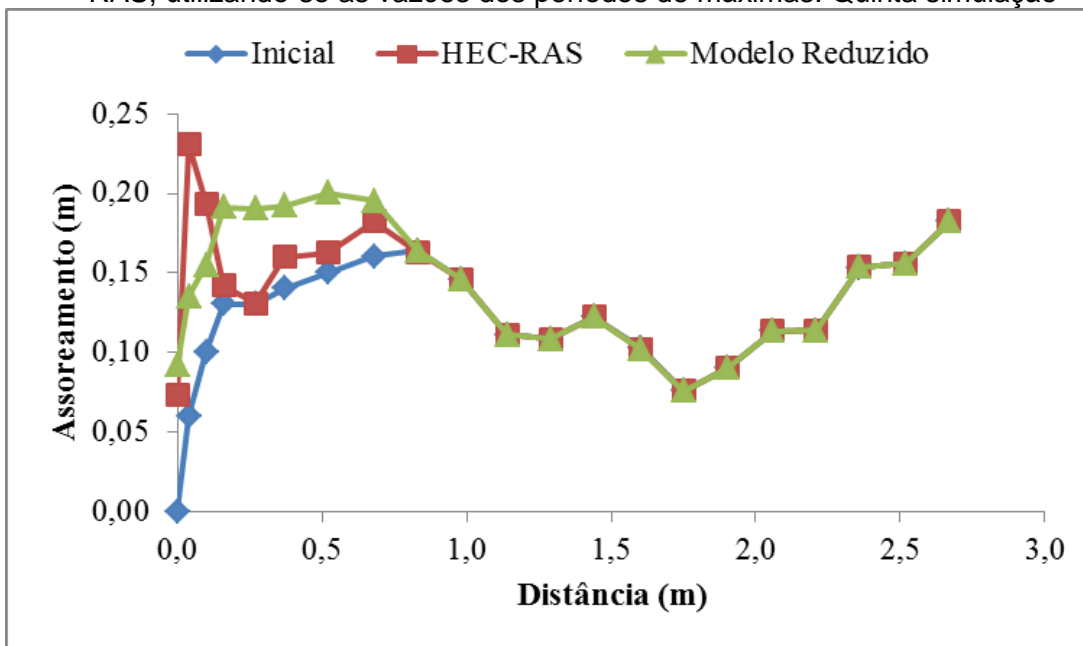
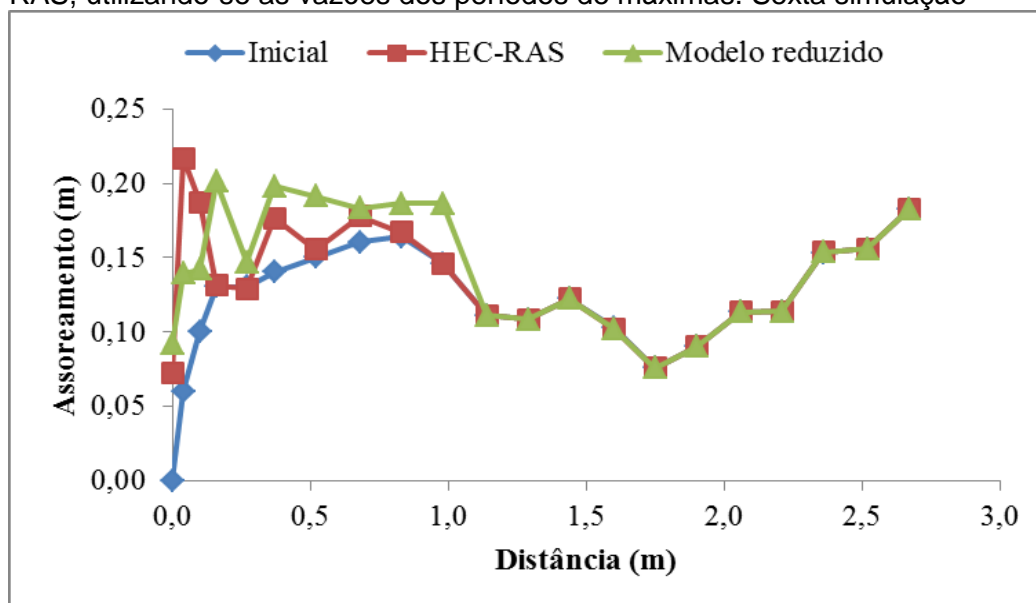


Figura 20 - Perfil longitudinal do assoreamento real da PCH e o simulado no HEC-RAS, utilizando-se as vazões dos períodos de máximas. Sexta simulação



É possível constatar que os valores do HEC-RAS estão distantes do observado no modelo reduzido para as quatro últimas simulações. O coeficiente de Manning utilizado nesses casos foi calibrado com base na série de vazões da primeira simulação. As simulações subsequentes utilizaram outras séries de vazões, o que implica em diferentes profundidades de nível d'água, e, portanto, em áreas molhadas distintas. Esses fatores implicam diretamente no valor da rugosidade do canal e conseqüentemente, no valor de Manning a ser adotado. Acredita-se que este seja o motivo da disparidade entre os valores simulados no HEC-RAS e os observados no modelo. Assim, tem-se que seria necessária uma nova calibração do coeficiente de Manning para cada nova simulação feita no HEC-RAS utilizando séries diferentes de vazões.

## 6. CONCLUSÃO

Ao longo desse trabalho foram apresentados os fundamentos que nortearam o desenvolvimento dessa pesquisa, a qual teve por objetivo verificar se o Manning calibrado para uma série de vazões pode ser utilizado em outras séries para simulação numérica do assoreamento no reservatório do modelo reduzido de uma PCH. Com base nos resultados obtidos, tem-se que:

- As vazões anuais, primeiramente testadas no modelo reduzido, não propiciaram transporte de sedimentos, visto que, por terem ocorrido num período de escassez, suas magnitudes eram baixas. Por isso, foram utilizadas as vazões médias das ondas que compreendiam as vazões máximas. A duração de escoamento de cada

vazão foi de 30 minutos, o que equivale a 50 dias no protótipo e são referentes às durações das ondas de máximas dos três primeiros anos hidrológicos, sendo que os dois últimos anos hidrológicos possuíam onda com tempo inferior a 50 dias. Porém, manteve-se constante o tempo de escoamento, pois duração inferior a 30 minutos não favoreceu o transporte de sedimentos. As vazões anuais não promoveram o transporte de sedimento, mas as descargas sólidas totais obtidas a partir delas resultaram em carga de sedimento acumulada no modelo físico próxima a do real. Assim, foram utilizadas as vazões médias dos períodos de máximas, com durações de 30 minutos e descargas sólidas totais referente às vazões anuais. O assoreamento do modelo reduzido determinado para o período 2013-2017 foi similar à batimetria de 2017 da PCH, de forma que o procedimento adotado permitiu reproduzir o fenômeno ocorrido no protótipo.

- Utilizando-se os dados hidrossedimentológicos ocorridos entre os anos de 2013-2017, convertidos para o modelo reduzido, observou-se, a partir de simulações feitas no HEC-RAS, que um valor de Manning médio de 0,035 propiciou um assoreamento simulado numericamente semelhante ao ocorrido no reservatório.
- No HEC-RAS, visando à simulação numérica do assoreamento, ao se utilizar séries distantes de vazões, mas sempre o mesmo valor de coeficiente de Manning, observou-se que os assoreamentos encontrados no modelo reduzido e na modelagem numérica diferiram, demonstrando que a variação da vazão provoca variação em Manning e, conseqüentemente, afeta a qualidade da simulação numérica do assoreamento. Ou seja, quando for simular o assoreamento, torna-se necessário calibrar o coeficiente de Manning para cada série de vazão utilizada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERS, P., WHITE, W. R. Sediment transport: New approach and analysis, *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, v. 99, n. HY 11, p. 2040-2060, 1973.

ALVIM, A. M; CHAUDHRY. *Modelo matemático do assoreamento de reservatórios*. In: VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos/ III Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos. 236-247p. V3. 1987.

AYVAZ, M. T. *A linked simulation-optimization model for simultaneously estimating the Manning's surface roughness values and their parameter structures in shallow water flows*. *Journal of Hydrology*, v. 500, p. 183-199, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.07.019>.

BICALHO, C. C. *Estudo do transporte de sedimentos em suspensão na bacia do rio Descoberto*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília - UNB, Brasília, 2006.

BOAS, C. L. M. *O uso múltiplo de reservatórios*. 2005. 170 f. Mestrado em Gestão Econômica do Meio Ambiente, UnB/FACH, Goiânia, 2005.

CABRAL, J. B. P. Estudo do processo de assoreamento em reservatórios. *Caminhos da Geografia*, v. 14. p. 62-69, 2009.

CAMPELLO, B. S. C. *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.; FILIZOLA JÚNIOR, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. *Guia de práticas sedimentométricas*. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, 2000a.

CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JÚNIOR, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. *Guia de avaliação de assoreamento em reservatórios*. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, 2000b.

CARVALHO, N. O.; GUILHON, L. G.; TRINDADE, P. A. Assoreamento de um pequeno reservatório – Itiquira, um estudo de caso. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 5, n.1, p. 69-79, 2000c.

CARVALHO, N. O. *Hidrossedimentologia prática*. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2008. 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. *Desenvolvimento do projeto do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba*. In: XXVI CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, Santiago, Chile, 2014.

CHOW, V. T. *Open channel hydraulics*. New York: McGraw-Hill, 1959.

COPELAND, R. R.; THOMAS, W. A. Corte maderá creek sedimentation study: Numerical model investigation. *US Army Engineer Waterways Experiment Station*, Vicksburg, MS. TR-HL-89-61989. 1989.

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.

CRAIG, R. F. *Mecânica dos solos*. 7ª ed [Reimpr.] - Rio de Janeiro: LTC, 2012.

DAVIS, C.V.; SORENSEN, K. E. *HANDBOOK OF APPLIED HYDRAULICS*. 3ª ed – Chicago: McGraw-Hill Book Company, 1969.

ENGELUND, F.,; HANSEN, E. A monograph on sediment transport in alluvial streams. In: TEKNISK VERLAG, Copenhagen, 1967.

FARD, R. S.; HEIDARNEJAD, M.; ZOHRABI, N. Study factors influencing the hydraulic roughness coefficient of the Karun river (Iran). *International Journal of Farming and Allied Sciences*, v. 22, n. 2, p. 976-981, 2013.

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, 2012.

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

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, 2010.

KIM, W.; KIM, Y. S.; WOO, H. S. *Estimation of channel roughness coefficients in the Han river using unsteady flow model*. Hangug Sujaweon Haghoe Nonmunjib, v. 28, n. 6, p. 133-146, 1995.

KIM, Y.; TACHIKAWA, Y.; SHIIBA, M.; KIM, S.; YOROZU, K.; NOH, S. J. *Simultaneous estimation of inflow and channel roughness using 2D hydraulic model and particle filters*. Journal of Flood Risk Management, v. 6, n. 2, p. 112-123, 2013.

LAURSEN, E. M. Total sediment load of streams. *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, v. 84(HY1), p. 1530-1 a 1530-36, 1958.

LINSLEY, R. K.; FRANZINI, J. B. *Engenharia de Recursos Hídricos*. São Paulo - SP. 198p. 1978

LOPES, A. V. *Aplicação de métodos de previsão de assoreamento de reservatórios*. 1993. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.

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, 2010.

MACARTHUR, R. C.; NEILL, C. R.; HALL, B. R.; GALAY, V. J.; SHVIDCHENKO, A. B. Overview of sedimentation engineering. In: *SEDIMENTATION ENGINEERING. PROCESSES, MEASUREMENTS, MODELING, AND PRACTICE – ASCE, AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS*. Virginia. 2008.

MATOS, A. J. S.; PIOLTINE, 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, 2011.

MEYER-PETER, E.; MULLER, R. Formulas for bed load transport. *Proceedings, 3rd Meeting of Intern. Assoc. Hydraulic Res. Stockholm*, p. 39-64, 1948.

MORAN, A. D.; ABDERREZZAK, K. E. K.; MOSSELMAN, E.; HABERSACK, H.; LEBERT, F.; AELBRECHT, D.; LAPERROUSAZ, E. 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, 2013.



MORRIS, G. L.; FAN, J. *Reservoir sedimentation handbook*. McGraw-HILL. New York. 365p. 1997.

MORRIS, G. L.; FAN, J. *Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use*. Eletronic Ver. 1.04. McGraw-Hill. New York, 2010.

MTAMBA, J.; VAN DER VELDE, R.; NDOMBA, P.; ZOLTÁN, V.; MTALO, F. Use of Radarsat-2 and Landsat tm images for spatial parameterization of Manning's roughness coefficient in hydraulic modeling. *Remote Sensing*, v. 7, n. 1, p. 836-864, 2015.

NASCIMENTO, P. C.; ROENICK, R. G. A. *Códigos computacionais para geração estocástica de dados hidrossedimentológicos*. 2018. 37 F. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco, 2018.

PARHI, P. K.; SANKHUA, R. N.; ROY, G. P. Calibration of channel roughness for Mahanadi River (India), using HEC-RAS model. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 4, n. 10, p. 847-850, 2012.

PRAJAPATI, P. R.; VADHER, B. M.; YADAV, S. M. Comparative analysis of hydraulic roughness coefficient at Purna River sites. *Global Research and Development Journal for Engineering*, v. 1, n. 4, p. 574-579, 2016.

QUINTELA, A. C. *Hidráulica*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian. 2007

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.

SALAS, J. D.; SHIN, H. S. Uncertainty analysis of reservoir sedimentation. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.125, n.4, p. 339-50, 1999.

SPEC Planejamento, Engenharia e Consultoria Ltda. Relatório final do Projeto Básico – PCH Salto Paraopeba. Volume i – Texto. Relatório no. 11.118-RT-GT10-3001. Belo Horizonte: SPEC, 2011.

TEC 3 Geotecnia e Recursos Hídricos Ltda. Relatório técnico do projeto executivo do modelo reduzido da PCH Salto Paraopeba. Volume i – Texto. Relatório no. T14005-018-RL-01-B. Belo Horizonte: TEC 3, 2015.

TOFFALETI, F. B. Technical Report No. 5. A Procedure for Computation of Total River Sand Discharge and Detailed Distribution, Bed to Surface, Committee on Channel Stabilization, U.S. Army Corps of Engineers, November, 1968.

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.

VANONI, V. A. *Sedimentation Engineering*. ASCE, American Society of Civil Engineers. New York. 1975.

VENÂNCIO, S. S. *Simulação Numérica aplicada ao assoreamento do reservatório Represa Velha*. 2009. 168 p + Anexos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

WICANDER, R.; MONROE, J. S. *Fundamentos de Geologia*. 3ª ed [Reimpr] - São Paulo: 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, C. T. Incipient motion and sediment transport. *Journal Hydrology. Div. ASCE*, v. 99, n. 10, p. 1679-1704, 1973.

YANG, C. T. Unit stream power equation for gravel. *Journal Hydrology. Div. ASCE*, v. 110, n. HY12, p. 1783-1798. 1984.

YANG, C. T. Sediment transport modeling – combination of theoretical concepts and practical approach. In: UNESCO. MODELING EROSION, SEDIMENT TRANSPORT AND SEDIMENT YIELD, TECHNICAL DOCUMENTS IN HYDROLOGY NO. 60, INTERNATIONAL HYDROLOGICAL PROGRAMME. Paris: Unesco, 2002.

ZINK, J. M.; JENNINGS, G. D. Channel roughness in North Carolina mountain streams. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 50, n. 5, p. 1354-1358, 2014.

## ANEXO A – SEÇÕES TRANSVERSAIS DO MODELO REDUZIDO

As figuras abaixo apresentam as 21 seções transversais utilizadas neste trabalho tanto na simulação numérica, quanto no modelo reduzido. Nelas estão representadas a batimetria inicial de 1956, bem como as posteriores de 2013 e 2017.

Figura 21 - Seção transversal 1. Distância ao vertedor: 0,0254 m

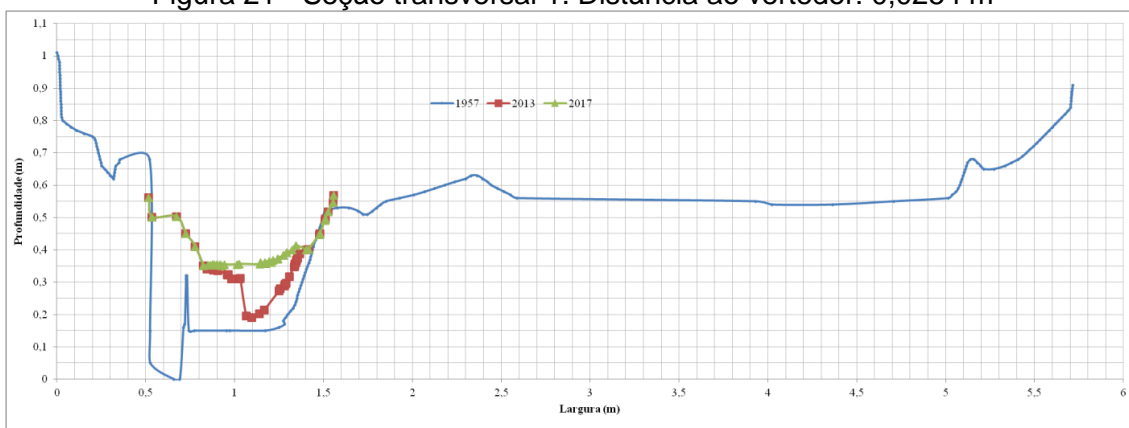


Figura 22 - Seção transversal 2. Distância à seção anterior: 0,0409 m

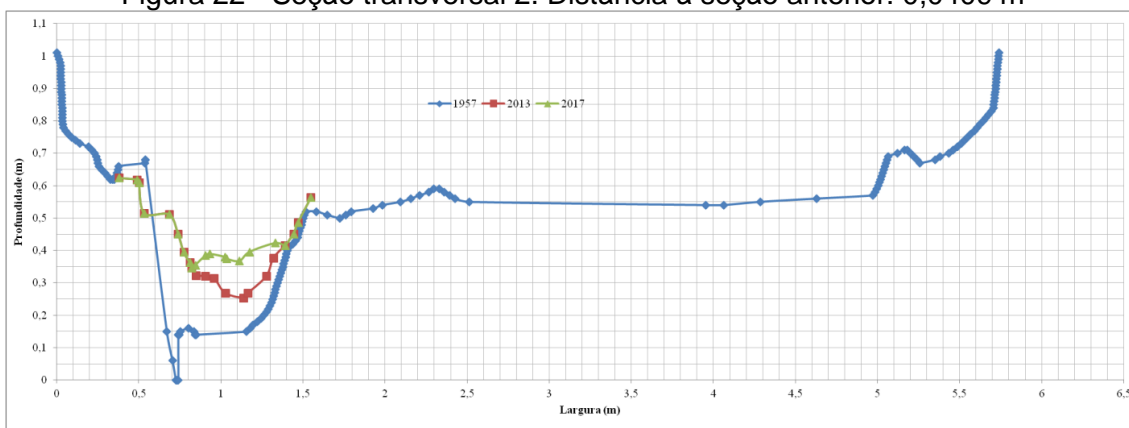


Figura 23 - Seção transversal 3. Distância à seção anterior: 0,0614 m

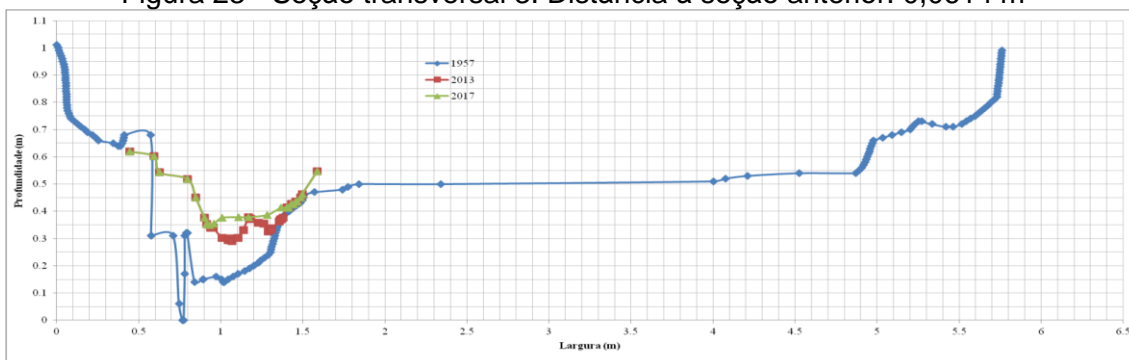


Figura 24 - Seção transversal 4. Distância à seção anterior: 0,0614 m

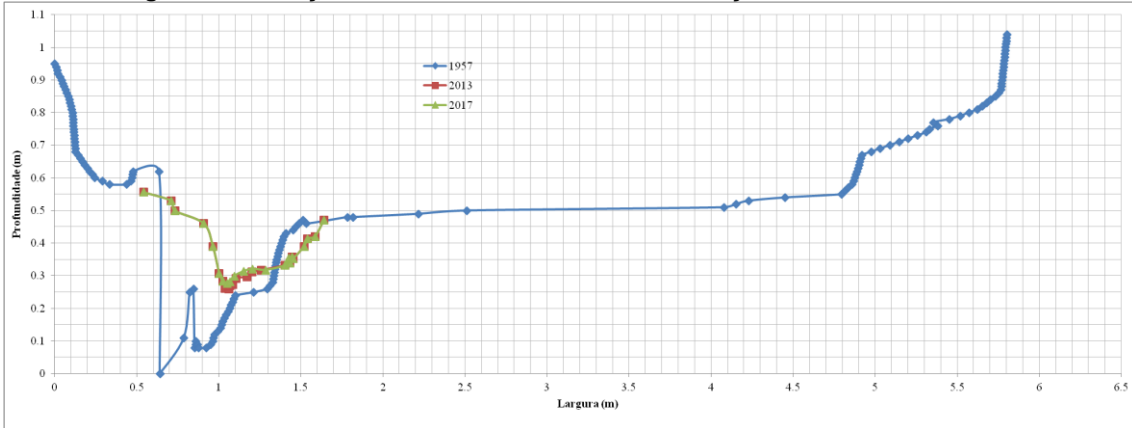


Figura 25 - Seção transversal 5. Distância à seção anterior: 0,1023 m

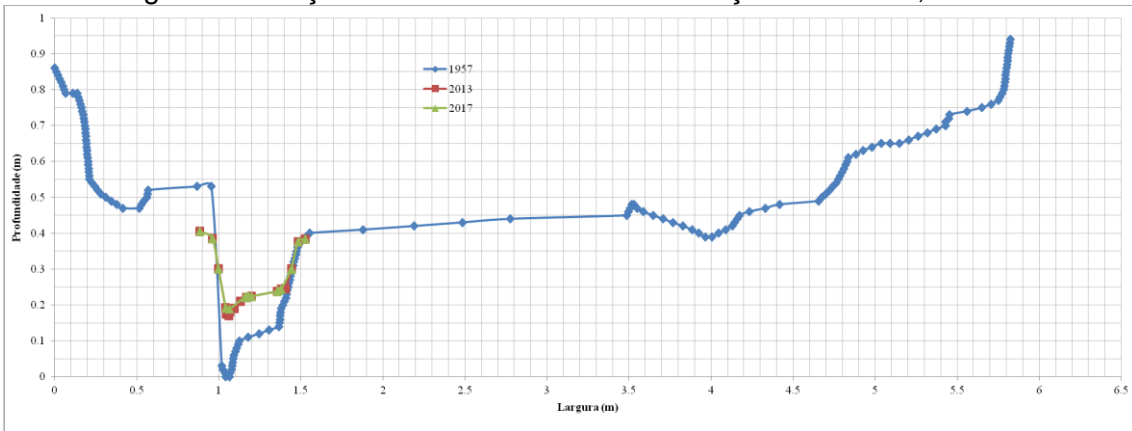


Figura 26 - Seção transversal 6. Distância à seção anterior: 0,1023 m

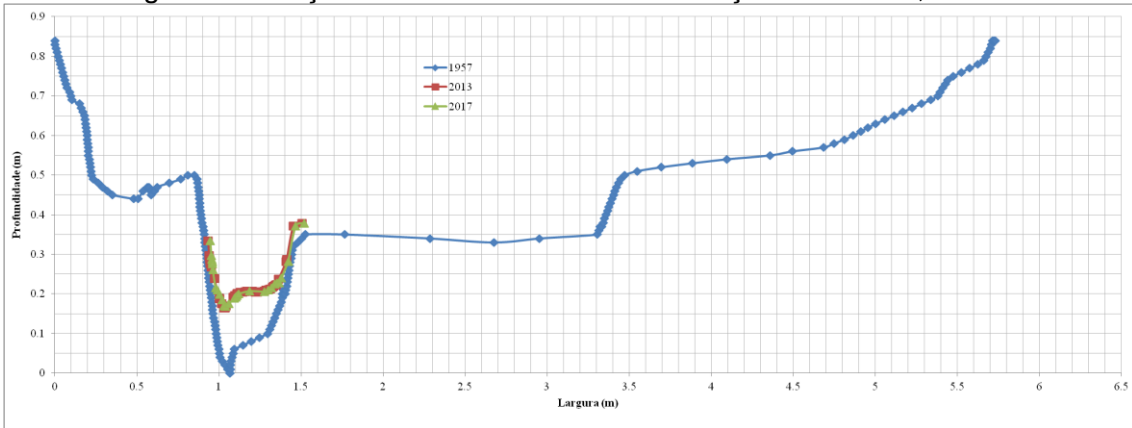


Figura 27 - Seção transversal 7. Distância à seção anterior: 0,1534 m

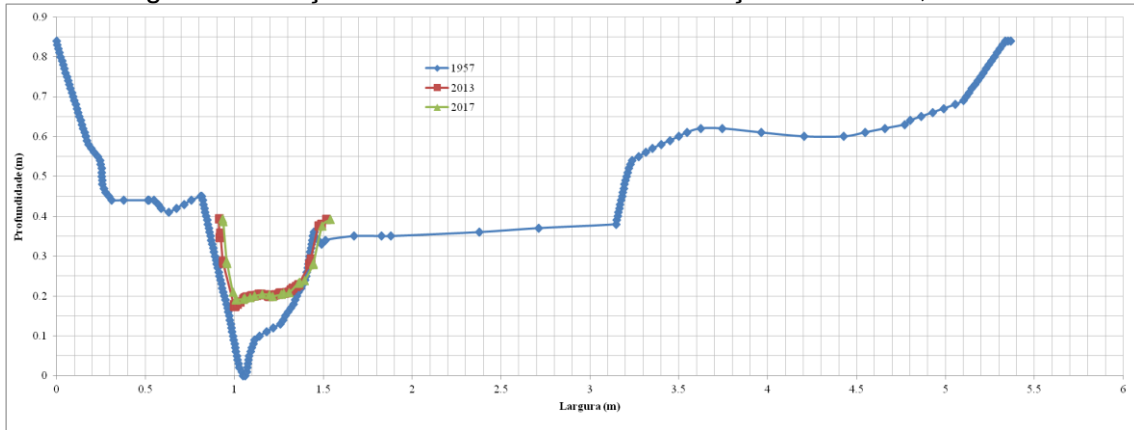


Figura 28 - Seção transversal 8. Distância à seção anterior: 0,1534 m

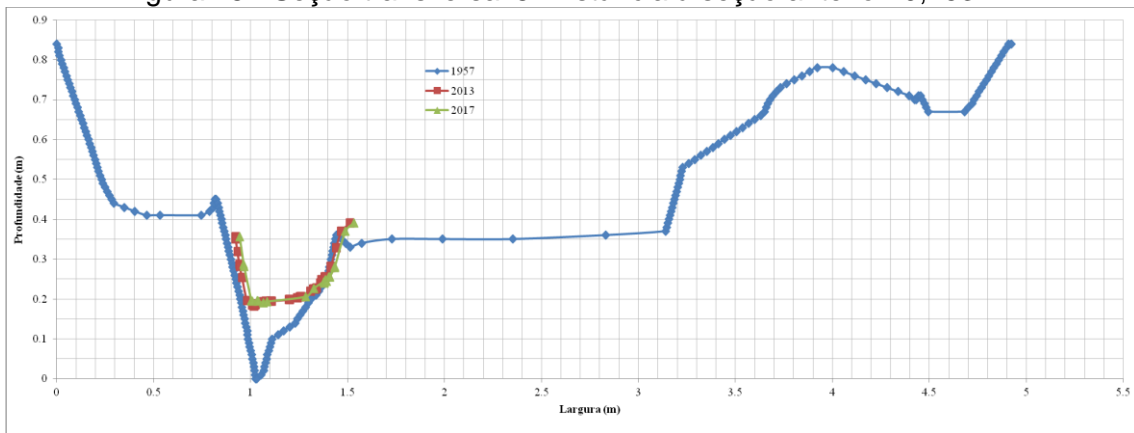


Figura 29 - Seção transversal 9. Distância à seção anterior: 0,1534 m

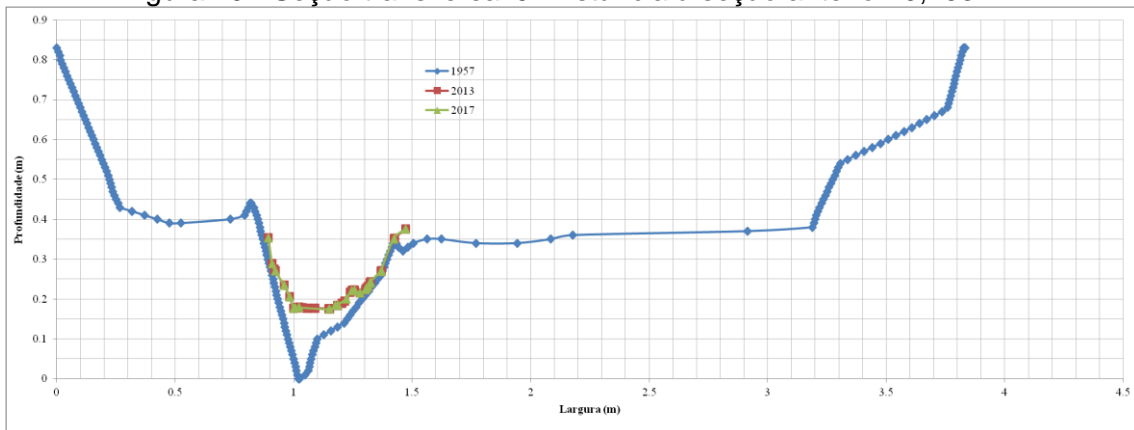


Figura 30 - Seção transversal 10. Distância à seção anterior: 0,1534 m

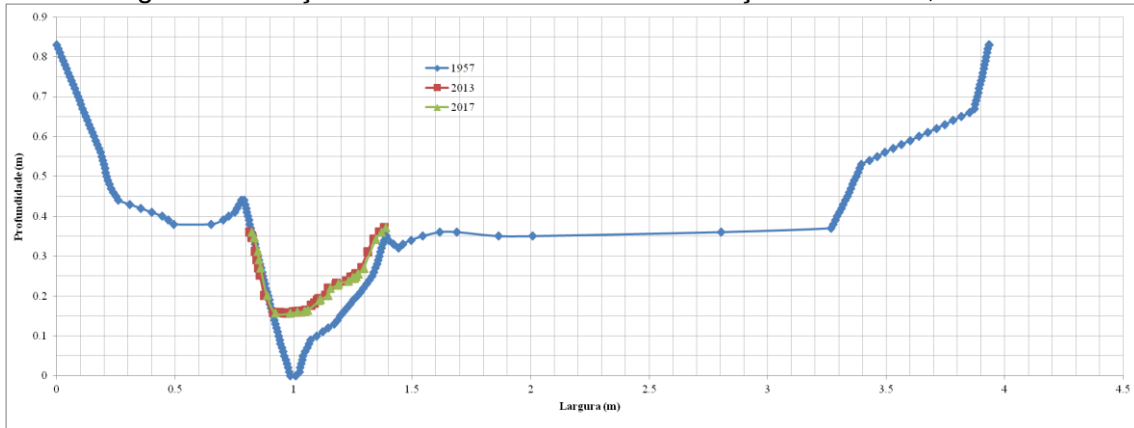


Figura 31 - Seção transversal 11. Distância à seção anterior: 0,1534 m

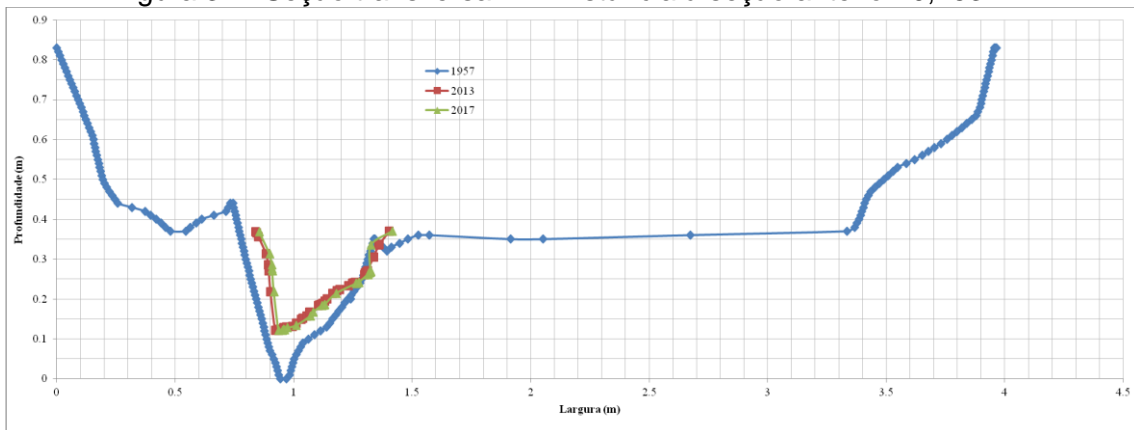


Figura 32 - Seção transversal 12. Distância à seção anterior: 0,1023 m

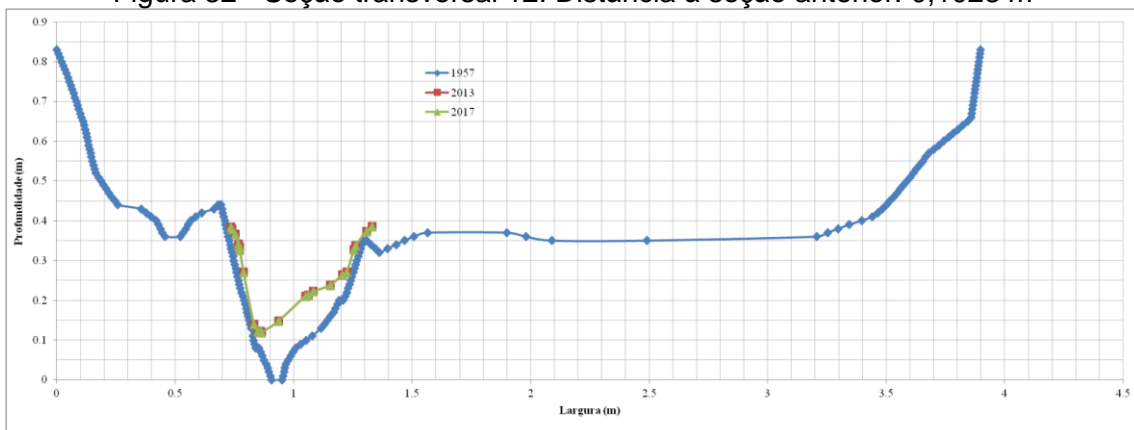


Figura 33 - Seção transversal 13. Distância à seção anterior: 0,1534 m

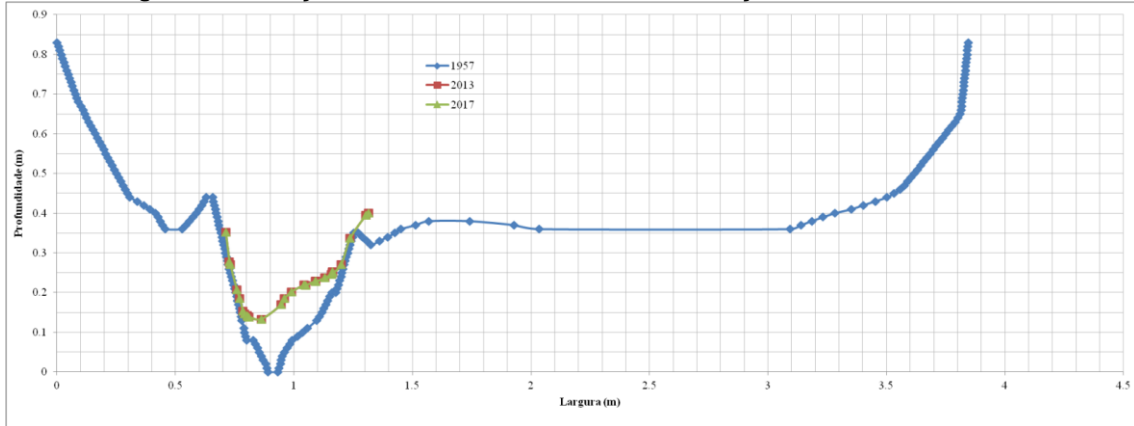


Figura 34 - Seção transversal 14. Distância à seção anterior: 0,1534 m

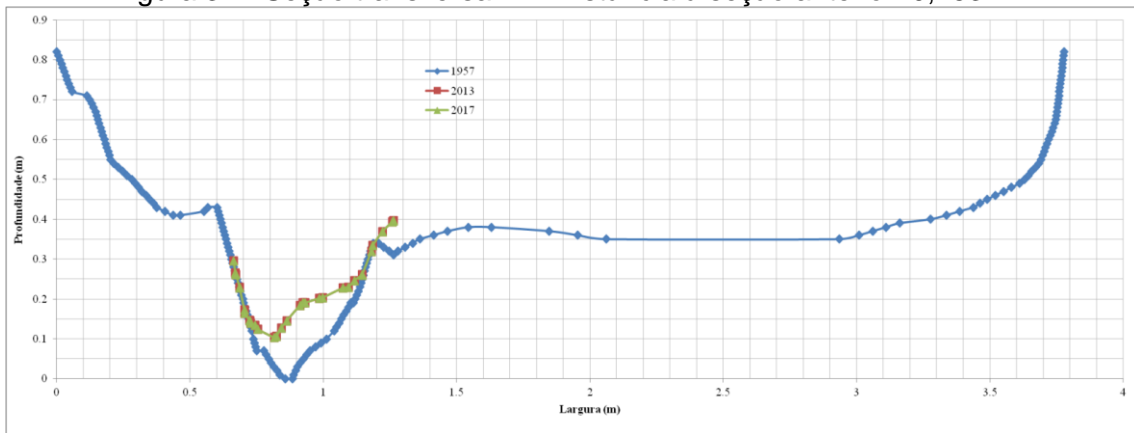


Figura 35 - Seção transversal 15. Distância à seção anterior: 0,1534 m

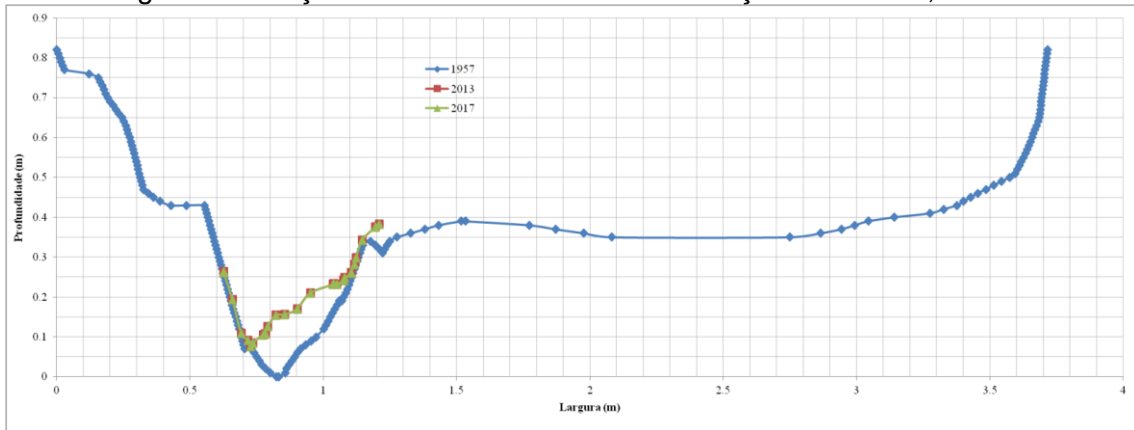


Figura 36 - Seção transversal 16. Distância à seção anterior: 0,1534 m

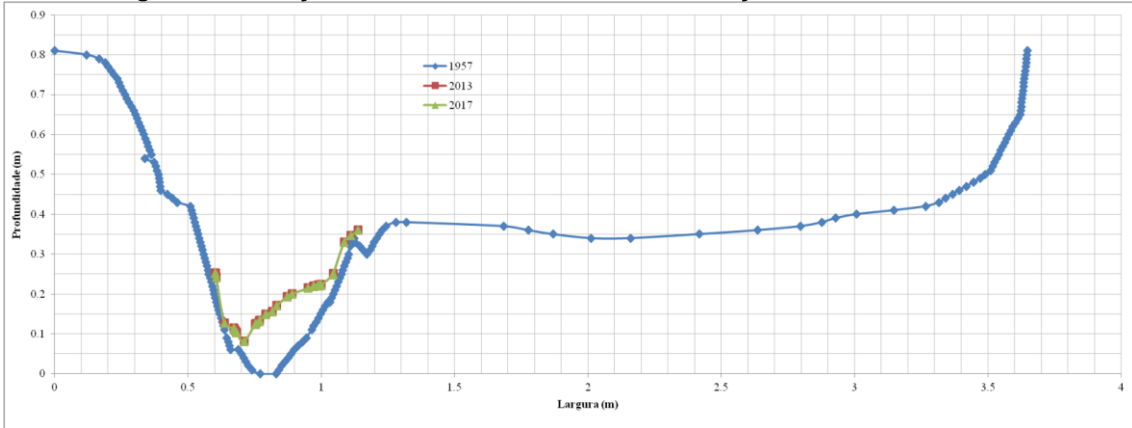


Figura 37 - Seção transversal 17. Distância à seção anterior: 0,1534 m

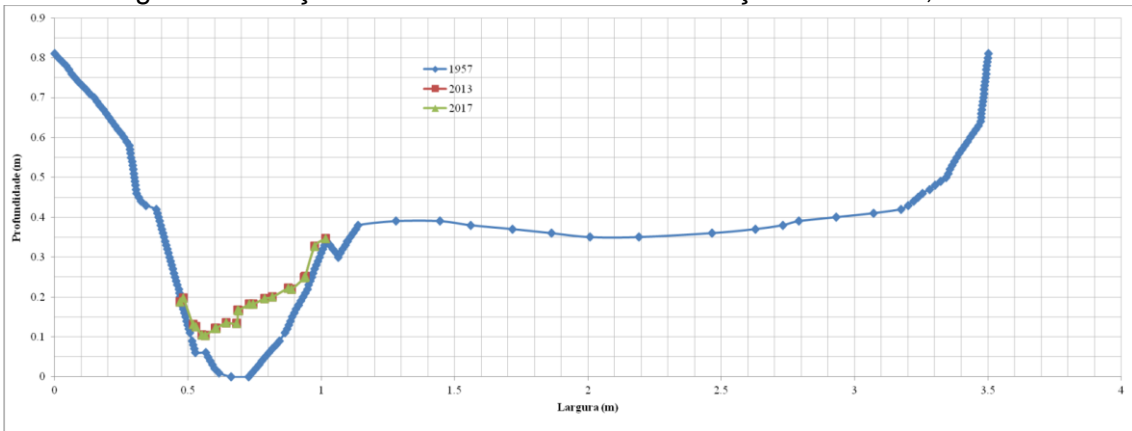


Figura 38 - Seção transversal 18. Distância à seção anterior: 0,1534 m

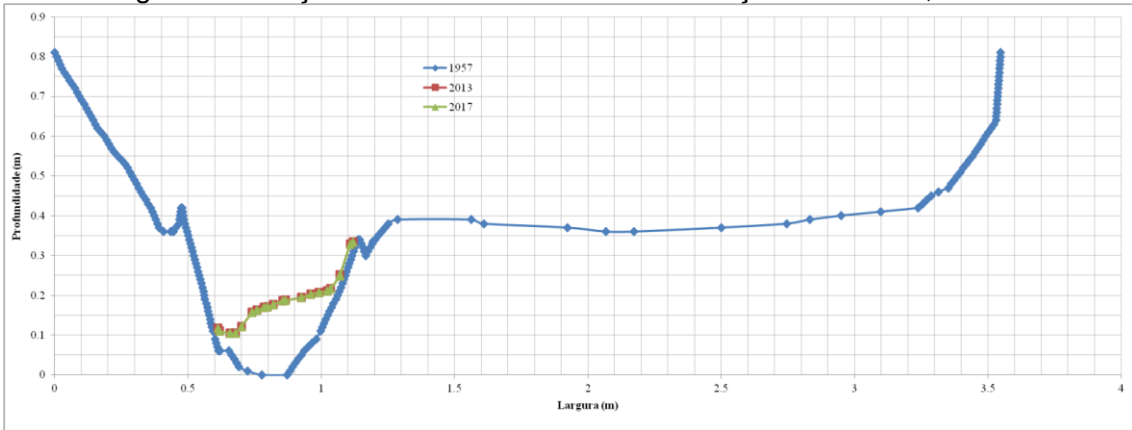




Figura 39 - Seção transversal 19. Distância à seção anterior: 0,1534 m

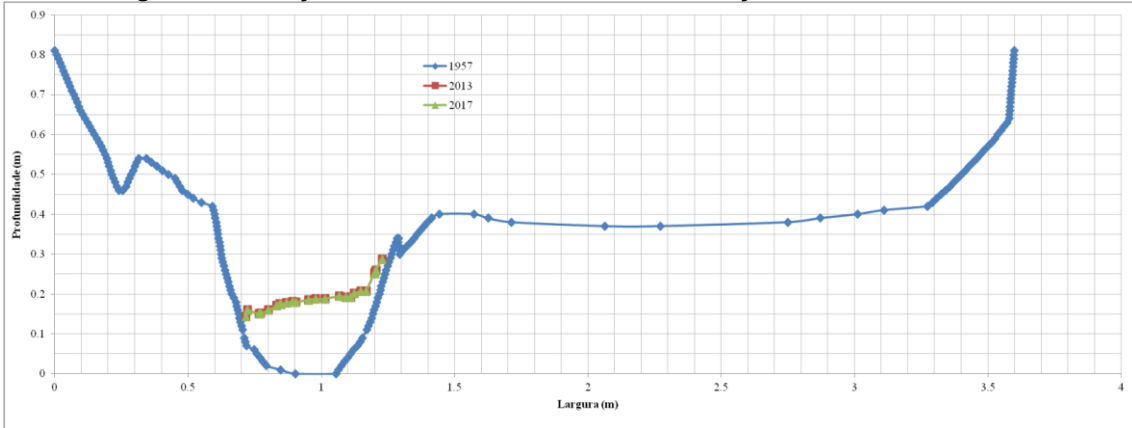


Figura 40 - Seção transversal 20. Distância à seção anterior: 0,1534 m

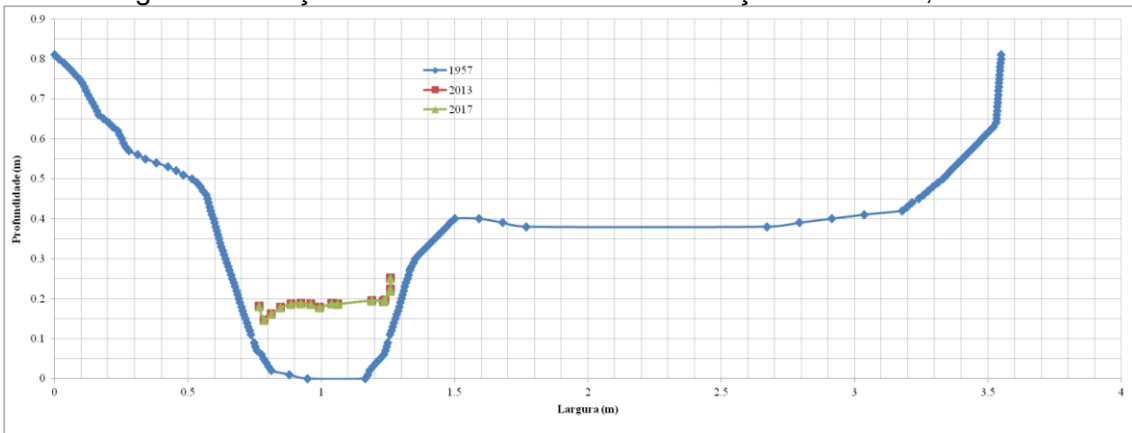


Figura 41 - Seção transversal 21. Distância à seção anterior: 0,1534 m

