

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA NA ESTIMATIVA
DE ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS

Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira

Belo Horizonte

2019

SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA NA ESTIMATIVA DE ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS

Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira

Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira

SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA NA ESTIMATIVA DE ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Hidráulica e Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem Física e Matemática em Hidráulica

Orientador: Prof.^a Dra. Márcia Maria Lara Pinto Coelho

Coorientador: Prof. Dr. Eber José de Andrade Pinto

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2019

T266s

Teixeira, Emmanuel Kennedy da Costa.

Simulação estocástica na estimativa de assoreamento em reservatórios [manuscrito] / Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira. - 2019. xiv, 172 f., enc.: il.

Orientadora: Márcia Maria Lara Pinto Coelho.

Coorientador: Eber José de Andrade Pinto.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 138-172.

Bibliografia: f. 125-137.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Modelagem física - Teses. 4. Reservatórios - Teses. I. Coelho, Márcia Maria Lara Pinto. II. Pinto, Éber José de Andrade. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Avenida Antônio Carlos, 6627 - 4º andar - 31270-901 - Belo Horizonte - BRASIL

Telefax: 55 (31) 3409-1882 - posgrad@desa.ufmg.br

http://www.smarh.eng.ufmg.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Simulação Estocástica Na Estimativa de Assoreamento Em Reservatórios

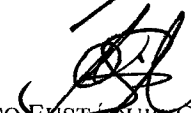
EMMANUEL KENNEDY DA COSTA TEIXEIRA

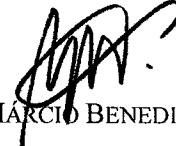
Tese defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:


Prof. MÁRCIA MARIA LARA PINTO COELHO

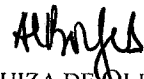

Prof. EBER JOSÉ DE ANDRADE PINTO


Prof. ALOYSIO PORTUGAL MAIA SALIBA

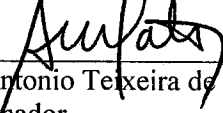

Prof. FRANCISCO EUSTÁQUIO OLIVEIRA E SILVA


Prof. MÁRCIO BENEDITO BAPTISTA

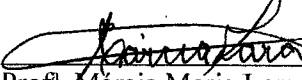

Prof. CHRISTOPHER FREIRE SOUZA


Profa ANA LUIZA DE OLIVEIRA BORGES

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH


Prof. Antonio Teixeira de Matos
Coordenador

Versão Final aprovada por


Profª Márcia Maria Lara Pinto Coelho
Orientadora

Belo Horizonte, 14 de março de 2019.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que protege e dá sabedoria todos os dias para mim e minha família. Graças a Ele alcanço mais essa etapa. A caminhada está sendo árdua, mas em cada derrota tenho certeza que uma vitória virá em seguida, pois Ele nunca me abandona.

À minha mãe, Rogéria, que é a melhor mãe do mundo. Ela que sempre me incentivou a estudar e faz tudo pra que eu chegue a qualquer lugar. Tenho certeza que se pudesse ela teria enfrentado todas as dificuldades e desafios do doutorado junto comigo. Muito obrigado por sempre estar ao meu lado e pelo amor incondicional. Agradeço todos os dias por ter você e o meu pai na minha vida.

Ao meu pai, Vanderlei, que também é o melhor pai do mundo. Ele que por alguns anos enfrentou a estrada de madrugada pra me levar para o ponto de ônibus. Ele que me transmite o exemplo de homem, pai e esposo. Obrigado por ser tão paciente e pelo amor incondicional. Vocês são a razão de toda vitória que conquisto.

À minha esposa, Maryellen, que está ao meu lado há tanto tempo e que me ajuda a cada dia ser uma pessoa melhor. Essa vitória também é sua, pois em cada conquista busco ter uma vida melhor ao seu lado. Sem você perto de mim a caminhada teria sido mais difícil. Como é bom ter você ao meu lado e, principalmente, saber que você estará nas horas alegres e tristes. Te amo. Você é o amor da minha vida.

Ao meu irmão, Leonamme, que tantas vezes me ajudou em dias que o trabalho estava pesado. Obrigado por sempre estar disposto a ajudar. Obrigado pelos anos que fez da sua presença a minha perto dos nossos pais.

À toda minha família, pela confiança e apoio, não só pra mim, mas também para os meus pais que se encontram longe dos filhos.

À minha orientadora, Márcia, pela confiança depositada em mim. Agradeço por ter aceitado me orientar mesmo sem nunca ter tido contato comigo e nem me conhecer. Agradeço sempre por ter encontrado você na minha caminhada. Diante de tantos discentes que têm problemas na pós-graduação por conta do convívio com o orientador, sou muito grato por ter uma ótima relação com você.

Ao meu coorientador, Eber, que mesmo com tantos compromissos com a sua jornada dupla na UFMG e CPRM sempre me atende com muita cordialidade e disponibilidade. Na verdade, tenho sorte de ter não apenas um, mas dois ótimos orientadores (Márcia e Eber), cada um em sua área de atuação.

Ao Aloysio, que posso dizer que é um terceiro orientador, que, como costumo brincar, é meu orientador na ilegalidade, já que não posso ter mais um coorientador. Mesmo sem ter um vínculo oficial comigo, muito obrigado por me atender sempre que precisei. Tenho que te agradecer muito, pois nos últimos tempos te incomodei demais por conta do CPH. Obrigado pela gentileza de sempre.

Aos professores Ana Luiza, Christopher, Francisco e Márcio por prontamente terem aceitado o convite para participar da minha banca. Com certeza suas considerações serão extremamente importantes para meu crescimento e para a melhora do meu trabalho.

Aos meus alunos da UFSJ, os quais me ajudaram muito em algumas etapas do doutorado. Sempre brinco que em determinados momentos confio mais no trabalho de vocês do que no meu, de tão qualificados que vocês são.

À UFMG e ao Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, que me proporcionaram a oportunidade de pleitear esse novo título.

Aos professores do DTECH da UFSJ, os quais me ajudaram sempre que possível em minhas dificuldades e estiveram sempre dispostos a me ajudar e contribuir para que minha jornada de trabalho e doutorado fosse a menos desgastante possível.

Ao professor Jackson, grande parceiro da UFSJ, que sempre me ajudou no possível para que eu continuasse firme no doutorado, inclusive, agradeço por ter sido o grande entusiasta para que eu fizesse doutorado na UFMG.

À amiga Eliane, da UFSJ, por tanta disposição em querer me ajudar e pela amizade no dia-a-dia do CAP.

RESUMO

Reservatórios são construídos para diversas finalidades, como geração de energia, abastecimento de água, etc. Essas estruturas estão sujeitas a algum grau de assoreamento, visto que ao aumentar a área molhada do curso d'água, a velocidade de escoamento é diminuída, o que altera a capacidade do transporte de sedimentos. Esse assoreamento, dentre outros problemas, pode interferir no uso para o qual o reservatório foi construído. Assim, deve-se estimar a altura de material depositado e quando os sedimentos acumulados começarão a interferir nas funções do reservatório. Entretanto, prever o acúmulo de sedimentos é difícil porque os processos envolvidos são complexos, sujeitos à variabilidade temporal e a incertezas, o que torna o estudo não apenas determinístico, mas também estocástico. Assim, o objetivo desta pesquisa foi desenvolver um método estocástico e avaliar o seu desempenho na estimativa do assoreamento em reservatórios. Para a realização desse projeto foram utilizados os dados hidrossedimentológicos e topográficos da PCH Salto do Paraopeba, que foi construída em 1956, sendo que o reservatório se encontra intensamente assoreado, o que a tornou inoperante. No CPH da UFMG há um modelo reduzido do reservatório dessa PCH, sendo que o resultado de assoreamento observado nesse modelo foi utilizado para validar o método estocástico. Obtiveram-se os dados de vazões e concentrações de sedimentos em suspensão da PCH, os quais foram convertidos para a realidade do modelo reduzido, de acordo com as escalas de semelhanças hidráulicas. A partir desses dados, foram geradas estocasticamente milhares de séries sintéticas, utilizando o *software* estatístico R e o modelo AR(1). Os dados gerados foram introduzidos no HEC-RAS para estimar o assoreamento no modelo reduzido da PCH. Para isso, foi desenvolvido um código computacional que permite o acoplamento automático do modelo estocástico com o determinístico. O resultado obtido via simulação estocástica foi comparado com o assoreamento medido no modelo físico, observando-se que o assoreamento real, para os dois períodos analisados (2008-2012 e 2013-2017), sempre esteve entre o 1º e 3º quartil de probabilidade do resultado estocástico, ou seja, ao se ordenar de forma crescente os resultados gerados estocasticamente, tem-se que o assoreamento real sempre foi maior que 25% dos assoreamentos gerados e menor que 75% deles. Assim, tem-se que o método estocástico pode auxiliar em projetos futuros de estimativa de assoreamento em reservatórios, visto que ele permite a obtenção das probabilidades de alturas assoreadas em seções de interesse.

Palavras-chave: Estocástica. Assoreamento. Modelo físico.

ABSTRACT

Reservoirs are built for various purposes such as power generation, water supply, etc. These structures are subject to some degree of sedimentation, since by altering the river's equilibrium, its capacity to transport sediments is altered. Such siltation, among other problems, may interfere with the use for which the reservoir was built. Thus, the height of deposited material must be estimated and when the accumulated sediments will begin to interfere with the functions of the reservoir. However, predicting the accumulation of sediments is difficult because the processes involved are complex, subject to temporal variability and uncertainties, which makes the study not only deterministic but also stochastic. Thus, the objective of this research was to develop a stochastic model and to evaluate its performance in the estimation of sedimentation in reservoirs. For the realization of this project, the hydrosedimentological and topographic data of the Salto do Paraopeba PCH was used, which was built in 1956, and the reservoir is intensely silted, which made it inoperative. In the CPH of the UFMG there is a reduced model of the reservoir of this PCH, and the result of silting observed in this model was used to validate the stochastic model. The discharge data and sediment concentrations in suspension of the PCH were obtained, which were converted to the reality of the reduced model according to the hydraulic similarity scales. From these data, thousands of synthetic series were stochastically generated, using statistical software R and model AR(1). The data generated were introduced in the HEC-RAS software to estimate the siltation in the reduced SHP model. For this, a computational code was developed that allows the automatic coupling of the stochastic model with the deterministic one. The result obtained by stochastic simulation was compared with the sedimentation measured in the physical model, observing that the actual siltation for the two periods analyzed (2008-2012 and 2013-2017) was always between the 1st and 3rd quartile of probability of the result stochastic, that is, the actual silting was always greater than 25% of the stochastically generated values and less than 75% of them. Thus, it is possible that the stochastic model can help in future projects of estimation of sedimentation in reservoirs, since it allows to obtain the probabilities of heights silted in sections of interest.

Keywords: Stochastic. Sedimentation. Physical model.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XI
LISTA DE SÍMBOLOS	XII
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	6
2.1 OBJETIVO GERAL	6
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	7
3.1 DINÂMICA DOS SEDIMENTOS.....	7
3.1.1 Erosão	7
3.1.2 Transporte de sedimentos.....	8
3.1.3 Deposição dos sedimentos.....	9
3.1.4 Adensamento dos sedimentos	11
3.2 ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS	11
3.3 MODELOS MATEMÁTICOS DETERMINÍSTICOS PARA ESTIMATIVA DO ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS	
14	
3.3.1 Análise das equações de transporte de sedimentos	20
3.3.2 Modelagem matemática determinística utilizando o HEC-RAS	21
3.4 MODELOS MATEMÁTICOS ESTOCÁSTICOS PARA ESTIMATIVA DO ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS...	27
3.4.1 Erros associados ao processo de modelagem matemática de assoreamento em reservatórios	28
3.4.2 Parâmetros estocásticos utilizados na estimativa do assoreamento de reservatórios	30
3.4.3 Modelos estocásticos de geração de dados de séries sintéticas	34
3.5 MODELAGEM FÍSICA EM HIDRÁULICA.....	43
3.5.1 Teoria da semelhança hidráulica	44
3.5.2 Modelos físicos com leitos móveis.....	49
3.5.3 Modelagem física da dinâmica de sedimentos.....	53
4 MATERIAL E MÉTODOS	58
4.1 APRESENTAÇÃO GERAL DA METODOLOGIA.....	58
4.2 OBTENÇÃO DOS DADOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS	59
4.3 MODELAGEM FÍSICA DO ASSOREAMENTO NA PCH SALTO DO PARAOPÉBA	67
4.3.1 Descrição da PCH Salto do Paraopeba	67
4.3.2 Projeto do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba	69
4.3.3 Simulação do assoreamento no modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba	75
4.3.4 Calibração do coeficiente de Manning do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba.....	82
4.4 MODELAGEM ESTOCÁSTICA DOS DADOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS	83
4.5 AUTOMATIZAÇÃO DO MODELO DETERMINÍSTICO E SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA DO ASSOREAMENTO PARA O	
MODELO REDUZIDO DA PCH SALTO DO PARAOPÉBA.....	88
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	92
5.1 MODELAGEM FÍSICA DO ASSOREAMENTO NA PCH SALTO DO PARAOPÉBA	92
5.1.1 Calibração do coeficiente de Manning do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba.....	92
5.1.2 Validação do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba	94
5.2 MODELAGEM ESTOCÁSTICA DOS DADOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS	103
5.3 AUTOMATIZAÇÃO DO MODELO DETERMINÍSTICO E SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA DO ASSOREAMENTO NO	
MODELO REDUZIDO DA PCH SALTO DO PARAOPÉBA.....	108
6 CONCLUSÕES	120
7 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	123
REFERÊNCIAS	125

APÊNDICE A – FUNÇÕES PARA GERAÇÃO DAS SÉRIES SINTÉTICAS.....	138
APÊNDICE B – CÓDIGOS COMPUTACIONAIS PARA ACOPLAMENTO DO MODELO ESTOCÁSTICO AO DETERMINÍSTICO	147
APÊNDICE C – SIMULAÇÃO DO ASSOREAMENTO NO HEC-RAS	155
APÊNDICE D – SEÇÕES TRANSVERSAIS DO MODELO REDUZIDO.....	166

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Representação esquemática do transporte de sedimentos em cursos d'água.....	9
Figura 3.2: Depósitos de sedimentos nos reservatórios, suas localizações e principais problemas causados	9
Figura 3.3: Volume de controle para o material do leito	24
Figura 3.4: Desenho esquemático do volume de controle interpretado pelo HEC-RAS	25
Figura 3.5: Modificação da seção transversal devido à deposição de sedimento	26
Figura 3.6: Modificação da seção transversal devido à erosão de sedimento.....	26
Figura 3.7: Ábaco de Shields	50
Figura 4.1 – Fluxograma geral da metodologia dessa tese de doutorado.....	58
Figura 4.2 – Estações fluviométricas próximas à PCH Salto do Paraopeba	62
Figura 4.3 – Regressão linear para as vazões mensais das estações Alberto Flores e Belo Vale	63
Figura 4.4 – Curva-chave de sedimentos para a PCH Salto do Paraopeba	66
Figura 4.5 – Curva-chave de sedimentos do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba ..	66
Figura 4.6 – Fluxograma para obtenção dos dados hidrossedimentológicos	67
Figura 4.7 - Vista de jusante da PCH Salto do Paraopeba	68
Figura 4.8 - Assoreamento do reservatório da PCH Salto Paraopeba.....	68
Figura 4.9 – Seção transversal do vertedor da PCH Salto do Paraopeba	69
Figura 4.10 – Vista do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba.....	72
Figura 4.11 – Curva granulométrica da borracha usada no modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba.....	73
Figura 4.12 – Dosador de sólidos responsável por alimentar o modelo reduzido.....	74
Figura 4.13 – Reservatório de água que alimentou o modelo reduzido	74
Figura 4.14 – Modelo reduzido com sua topografia conformada para o ano de 2013	75
Figura 4.15 – Hidrograma do ano hidrológico 2012-2013 (outubro a setembro). Entre as linhas tracejadas está a onda que compreende a vazão máxima.....	78
Figura 4.16 – Hidrograma do ano hidrológico 2013-2014 (outubro a setembro). Entre as linhas tracejadas está a onda que compreende a vazão máxima.....	78
Figura 4.17 – Hidrograma do ano hidrológico 2014-2015 (outubro a setembro). Entre as linhas tracejadas está a onda que compreende a vazão máxima.....	78
Figura 4.18 – Hidrograma do ano hidrológico 2015-2016 (outubro a setembro). Entre as linhas tracejadas está a onda que compreende a vazão máxima.....	79
Figura 4.19 – Hidrograma do ano hidrológico 2016-2017 (outubro a setembro). Entre as linhas tracejadas está a onda que compreende a vazão máxima.....	79
Figura 4.20 – Esquema em planta da geometria do modelo reduzido inserida no HEC-RAS	83
Figura 4.21 - Curva-chave de sedimentos utilizada para obtenção da descarga sólida na simulação estocástica.....	86
Figura 4.22 – Relação entre as vazões anuais e os valores de K , referentes ao modelo físico	87
Figura 4.23 - Fluxograma apresentando como os parâmetros estocásticos foram obtidos	88
Figura 4.24 - Fluxograma das simulações estocástica e determinística	89
Figura 5.1 – Perfis da linha d'água ao longo do modelo reduzido – (a) vazão de 0,0038 m ³ /s; (b) 0,011 m ³ /s; (c) 0,019 m ³ /s e (d) 0,028 m ³ /s	93
Figura 5.2 – 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).....	94
Figura 5.3 – Perfil longitudinal do fundo do reservatório da PCH para os anos 2013 e 2017 (valores convertidos para a escala do modelo reduzido).....	95

Figura 5.4 – Assoreamento próximo à seção “21”, a qual é a seção onde o sedimento era inserido no modelo reduzido	96
Figura 5.5 – Simulação, no HEC-RAS, da evolução do assoreamento para os períodos que compreendiam as vazões máximas de cada ano hidrológico (valores convertidos para a escala do modelo reduzido).....	98
Figura 5.6 – Perfil longitudinal do assoreamento real da PCH (batimetria 2017) 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).....	98
Figura 5.7 – Assoreamento obtido no modelo reduzido utilizando-se as vazões médias dos períodos de máximas, para o período entre 2013 e 2017	100
Figura 5.8 – Perfil longitudinal do assoreamento real da PCH (batimetria de 2017) e o observado no modelo reduzido (média das duas repetições do experimento), utilizando-se as vazões médias dos períodos de máximas, para os anos de 2013 a 2017	101
Figura 5.9 – Assoreamento obtido utilizando-se as vazões médias dos períodos de máximas, para o período entre 2008 e 2012	102
Figura 5.10 – Perfil longitudinal do assoreamento observado no modelo reduzido (média das duas repetições), utilizando-se as vazões médias dos períodos de máximas, para os anos 2008 a 2012 (valores referentes à escala do modelo reduzido).....	103
Figura 5.11 - Histograma das vazões anuais da PCH Salto do Paraopeba (1967 a 2017)	104
Figura 5.12 – Correlograma das vazões anuais da PCH Salto do Paraopeba (1967 a 2017)	104
Figura 5.13 – Função parcial de autocorrelação das vazões anuais da PCH Salto do Paraopeba (1967 a 2017).....	105
Figura 5.14 - Resíduos distribuídos ao longo dos anos (1967 a 2017).....	106
Figura 5.15 – Séries com os dados hidrossedimentológicos gerados estocasticamente.....	107
Figura 5.16 – Sequência de preenchimento de vazões de forma automática no HEC-RAS: (a) Arquivo do HEC-RAS sem dados de vazões; (b) Arquivo criado quando se salva um arquivo de vazões no HEC-RAS; (c) Vazões geradas a partir do modelo AR(1); (d) Arquivo do HEC-RAS com as vazões preenchidas de forma automática	109
Figura 5.17 – Sequência de preenchimento da curva-chave de sedimentos de forma automática no HEC-RAS: (a) Arquivo do HEC-RAS sem dados de vazões e descargas sólidas totais; (b) Arquivo criado quando se salva um arquivo de curva-chave de sedimentos no HEC-RAS; (c) Curva-chave de sedimentos gerada estocasticamente; (d) Arquivo do HEC-RAS com a curva-chave de sedimentos preenchida de forma automática.....	110
Figura 5.18 – Arquivos com os assoreamentos obtidos após 1000 simulações no HEC-RAS	111
Figura 5.19 – Resultado da simulação estocástica para o assoreamento ocorrido entre 2013 e 2017, nas 21 seções transversais, e as batimetrias de 2013 e 2017	113
Figura 5.20 – Raios hidráulicos, das 21 seções transversais, obtidos a partir das vazões diárias ocorridas entre 2013 e 2017 (valores convertidos para o modelo reduzido).....	115
Figura 5.21 – Comparações das estatísticas dos assoreamentos obtidos para diferentes quantidades de simulações: seções 1 e 6	116
Figura 5.22 – Comparações das estatísticas dos assoreamentos obtidos para diferentes quantidades de simulações: seções 7 a 9	117
Figura 5.23 – Resultado da simulação estocástica para o assoreamento ocorrido entre 2008 e 2013, nas 21 seções transversais, do simulado no HEC-RAS e no modelo reduzido	118
Figura 6.1 – Interface inicial do HEC-RAS 5.0.3	155
Figura 6.2 – Criação de novo projeto no HEC-RAS	155
Figura 6.3 – Exemplo de inserção da geometria do reservatório	156
Figura 6.4 - Exemplo de seção transversal inserida no HEC-RAS	156
Figura 6.5 – Geometria como o vertedor inserido.....	157

Figura 6.6 – Exemplo de inserção de dados de sedimentos no HEC-RAS	158
Figura 6.7 – Exemplo de inserção da curva granulométrica do material do leito do reservatório	159
Figura 6.8 – Condições de contorno de sedimentos	160
Figura 6.9 – Exemplo de inserção da curva-chave de sedimentos	161
Figura 6.10 – Exemplo de seleção do regime de escoamento	161
Figura 6.11 – Exemplo de preenchimento da série de vazões.....	162
Figura 6.12 – Exemplo da condição de contorno <i>Rating Curve</i>	163
Figura 6.13 – Exemplo de inserção da temperatura da simulação	164
Figura 6.14 – Tela principal de simulação do assoreamento.....	164
Figura 7.1 – Seção transversal 1. Distância ao vertedor: 0,0254 m	166
Figura 7.2 – Seção transversal 2. Distância à seção anterior: 0,0409 m	166
Figura 7.3 – Seção transversal 3. Distância à seção anterior: 0,0614 m	166
Figura 7.4 – Seção transversal 4. Distância à seção anterior: 0,0614 m	167
Figura 7.5 – Seção transversal 5. Distância à seção anterior: 0,1023 m	167
Figura 7.6 – Seção transversal 6. Distância à seção anterior: 0,1023 m	167
Figura 7.7 – Seção transversal 7. Distância à seção anterior: 0,1534 m	168
Figura 7.8 – Seção transversal 8. Distância à seção anterior: 0,1534 m	168
Figura 7.9 – Seção transversal 9. Distância à seção anterior: 0,1534 m	168
Figura 7.10 – Seção transversal 10. Distância à seção anterior: 0,1534 m	169
Figura 7.11 – Seção transversal 11. Distância à seção anterior: 0,1534 m	169
Figura 7.12 – Seção transversal 12. Distância à seção anterior: 0,1023 m	169
Figura 7.13 – Seção transversal 13. Distância à seção anterior: 0,1534 m	170
Figura 7.14 – Seção transversal 14. Distância à seção anterior: 0,1534 m	170
Figura 7.15 – Seção transversal 15. Distância à seção anterior: 0,1534 m	170
Figura 7.16 – Seção transversal 16. Distância à seção anterior: 0,1534 m	171
Figura 7.17 – Seção transversal 17. Distância à seção anterior: 0,1534 m	171
Figura 7.18 – Seção transversal 18. Distância à seção anterior: 0,1534 m	171
Figura 7.19 – Seção transversal 19. Distância à seção anterior: 0,1534 m	172
Figura 7.20 – Seção transversal 20. Distância à seção anterior: 0,1534 m	172
Figura 7.21 – Seção transversal 21. Distância à seção anterior: 0,1534 m	172

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Perda anual de volume em alguns reservatórios.....	12
Tabela 3.2 - Reservatórios brasileiros total ou parcialmente assoreados	12
Tabela 3.3 - Principais modelos matemáticos e suas características	16
Tabela 3.4 – Utilização do HEC-RAS na simulação do transporte de sedimentos	21
Tabela 3.5 - Classes granulométricas adaptada de <i>American Geophysical Union</i>	33
Tabela 3.6 – Utilização de abordagem estocástica na simulação de transporte de sedimentos	41
Tabela 3.7 - Razões de escala conforme lei do número de Reynolds.....	49
Tabela 3.8 - Razões de escala conforme lei do número de Froude	49
Tabela 3.9 - Escalas para modelos físicos distorcidos e de leitos móveis.....	51
Tabela 3.10 - Resumo de trabalhos que empregaram modelos físicos para estudar a dinâmica de sedimentos	53
Tabela 4.1 – Inventário das estações do rio Paraopeba	60
Tabela 4.2 – Correlação entre as estações fluviométricas mais próximas à PCH Salto do Paraopeba.....	61
Tabela 4.3 – Série de vazões anuais da PCH Salto do Paraopeba.....	64
Tabela 4.4 – Série de vazões anuais do modelo reduzido	64
Tabela 4.5 - Detalhes da PCH Salto do Paraopeba.....	68
Tabela 4.6 - Vazões afluentes e respectivos níveis de água (NA) previstos no vertedor da PCH Salto Paraopeba	69
Tabela 4.7 - Grandezas e escalas admitidas no projeto do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba.....	70
Tabela 4.8 – Dados utilizados para simulação do assoreamento ocorrido entre 2013 e 2017 (1ª tentativa)	76
Tabela 4.9 – Dados utilizados para simulação do assoreamento ocorrido entre 2013 e 2017 (Procedimento final)	81
Tabela 4.10 – Dados utilizados para simulação do assoreamento ocorrido entre 2008 e 2012	81
Tabela 5.1 – Comparações entre as profundidades lidas e simuladas no HEC-RAS para um “n” de 0,012.....	92
Tabela 5.2 – Tensões cisalhantes para as 21 seções transversais, referentes às vazões anuais.....	96
Tabela 5.3 – Valores dos parâmetros do abado de Shields para as 21 seções transversais, referentes às vazões anuais	97
Tabela 5.4 – Principais parâmetros estatísticos da série original e das séries sintéticas	105
Tabela 5.5 – Principais parâmetros estatísticos dos resíduos das séries sintéticas.....	106
Tabela 5.6 – Principais estatísticas da simulação estocástica para o assoreamento o ocorrido na PCH Salto do Paraopeba (valores, em “m”, convertidos para o modelo reduzido)	112
Tabela 6.1 - Coeficientes de expansão e contração que podem ser utilizados no HEC-RAS.....	158

LISTA DE ABREVIATURAS

Agência Nacional de Águas – ANA

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL

Centro de Pesquisas Hidráulicas – CPH

Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG

Hydrologic Engineering Center's River Analysis System – HEC-RAS

Pequena Central Hidrelétrica – PCH

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

LISTA DE SÍMBOLOS

A - área molhada da seção transversal

a - aceleração

α - coeficiente de Coriolis

B - operador autorregressivo

B_0 - largura do leito móvel

C - coeficiente de contração ou expansão

C_{SS} - concentração de sedimento em suspensão

d_* - diâmetro adimensional do grão

d_{50} - diâmetro médio dos sedimentos

d_s - diâmetro da partícula

e - resíduos das séries temporais

E_r - eficiência de retenção do reservatório

ϕ - coeficiente de autocorrelação de atraso 1

F - força

Fr - número de Froude

FS - fração de areia

g - aceleração da gravidade

$(G - 1)$ - densidade do sedimento submerso

γ - peso específico da água

γ_s - peso específico dos sedimentos

h_e - perda de carga entre duas seções

K - razão entre vazões anuais e as médias das ondas de máximas

L - comprimento de um trecho

M - massa

μ - média de um conjunto de dados

n - coeficiente de Manning

q_{Bi} - descarga volumétrica específica de sedimento para cada fração de sedimento

Q - vazões anuais

Q - vazão média do período de máxima

Q_{SA} - descarga sólida de arraste

Q_{SS} - descarga sólida em suspensão

Q_{ST} - descarga sólida total

Q_t - vazão anual para o tempo t de interesse

$\bar{Q}$ - média dos dados observados da série temporal de vazões

R - raio hidráulico da seção transversal

R^2 - coeficiente de determinação

Re - número de Reynolds

Re_{*r} - número de Reynolds do grão

ρ - massa específica

S - inclinação de um trecho

s - densidade relativa do sedimento

$\bar{S}_f$ - coeficiente de atrito entre duas seções

σ_x - desvio padrão da série temporal X_t

τ_0 - tensão de arraste do leito

τ_* - número de Shields

τ_{*m}^* - tensão de cisalhamento

u^* - velocidade de cisalhamento

v - velocidade média de escoamento

v_s - velocidade da partícula de sedimento

V_f é o volume de fluido

V_{sed} - volume de sedimento

ν - viscosidade cinemática

W_i^* - parâmetro adimensional de transporte de carga do leito

$\psi(B)$ - função de transferência

x - componente horizontal longitudinal

$\bar{x}$ - média dos dados observados da série temporal X_t ;

X_t - série temporal

y - profundidade da água

ε_i - componente de aleatoriedade gerada a partir da distribuição Normal $\sim N(0,1)$.

y_s - profundidade do sedimento

Z - elevação do canal

Z_t - ruído de uma série de números aleatórios

1 INTRODUÇÃO

Os reservatórios podem ser construídos para diversas finalidades, como abastecimento público de água, geração de energia, irrigação, 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, visto que a construção de um barramento em um rio afeta as suas características físicas e hidráulicas. Segundo Garg e Jothiprakash (2008), a velocidade do escoamento e a turbulência são reduzidas, o que se deve ao aumento da área molhada da seção transversal do rio e a diminuição da declividade da linha d'água. Tal redução tem o efeito de desacelerar o movimento da partícula na direção da corrente e de restringir a resultante das forças de sustentação (LOPES, 1993). Desse modo, as partículas sólidas podem se depositar ao longo do reservatório.

O depósito das partículas mais grossas da carga de sedimentos afluyente ao reservatório, compostas principalmente por pedregulho e areia, tende a ocorrer na entrada do lago (final do remanso). As partículas de tamanho médio são as próximas a serem depositadas, seguidas pelas partículas finas, as quais tendem a se depositar no trecho final do reservatório ou permanecem em suspensão e alcançam os órgãos de descarga (MINHONI, 2013).

Diversos fatores afetam o volume de sedimentos que se acumulará em um reservatório, sendo eles: a quantidade de sedimentos produzidos na bacia de contribuição; as condições geológicas, climáticas e vegetação da região; as características físicas e hidráulicas do reservatório; e as características dos sedimentos. Segundo Salas e Shin (1999), dentre os fatores citados, os principais são: a vazão do rio; a quantidade, o tamanho e o peso específico dos sedimentos que entram no reservatório; e o tamanho e a operação do reservatório.

Problemas decorrentes do assoreamento em reservatório dizem respeito, principalmente, à redução do seu volume, o que pode interferir no uso para o qual ele 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, um estudo realizado em 1994, com base em trabalhos da área executados até a data, indicou uma perda de capacidade de armazenamento de 0,5% ao ano para os reservatórios do país (CARVALHO, 2008).

O assoreamento também pode causar outros problemas, como: abrasão de componentes, tubulações e pás de turbinas; problemas mecânicos nas manobras das eclusas e comportas; dificuldade ou impedimento da captação de água pela estrutura de tomada d'água; afogamento dos locais de desova, alimentação e abrigo dos peixes; formação de bancos de areia diminuindo o calado para a navegação; além de afetar a segurança da barragem (ALBERTIN *et al.*, 2010). Em reservatórios construídos para o controle de enchentes, o assoreamento reduz sua capacidade de retenção, podendo causar perdas econômicas e até de vidas humanas à jusante deles.

Um problema que pode ocorrer à jusante do reservatório é a erosão das margens e leitos do canal de escoamento, pois a água limpa escoada para jusante tem maior poder de erosão devido ao desequilíbrio provocado pela retirada da carga natural de sedimentos no escoamento (CARVALHO, 2008).

Em se tratando de reservatórios de hidrelétricas, Maia (2006) apresenta que o assoreamento é um sério problema que leva à diminuição da capacidade de geração de energia das usinas, visto que ocorre alteração na vazão regularizada. Assim, o faturamento da concessionária com a venda de energia elétrica é reduzido, o que, conseqüentemente, acarretará na redução da compensação financeira que é paga aos Estados, Distrito Federal, Municípios e Órgãos da União, receita esta proporcional à geração de energia elétrica. Lenhardt *et al.* (2009) afirmam que as conseqüências do assoreamento em reservatórios de hidrelétricas são numerosas, inclusive em termos de impactos ecológicos.

Uma usina que sofre com o problema do assoreamento em seu reservatório é a Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Salto do Paraopeba, localizada no rio Paraopeba, em Jeceaba – MG. Trata-se de uma usina construída em 1956 para operar a fio d'água, cuja profundidade no nível d'água normal é de aproximadamente 7,0 m, contendo duas unidades geradoras, sendo a primeira composta por gerador de 1.500 kW e turbina do Tipo Francis, e a segunda constituída por gerador de 970 kW e turbina tipo Francis geminada.

No Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) foi construído um modelo reduzido dessa PCH, sendo que, como será descrito na Metodologia, foram utilizados os dados obtidos a partir desse modelo para validar o método estocástico desenvolvido neste trabalho.

A Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) assumiu a operação dessa usina em 2000, sendo que a operação se deu com bastante interferência dos depósitos de sedimentos até ser paralisada em 2006, situação em que se encontra hoje. Atualmente o reservatório está intensamente assoreado, com a tomada d'água obstruída.

Vistos os problemas que podem ser causados pelo assoreamento, são essenciais os estudos que visem apresentar metodologias para predizer taxas de sedimentação em reservatórios, sendo que esses estudos são importantes tanto na fase de projeto, quanto ao longo da operação, pois é necessária a estimativa do tempo a partir do qual o assoreamento irá interferir nas funções para as quais o reservatório foi construído. A viabilidade econômica do projeto de uma barragem pode também depender desta estimativa de assoreamento.

Com auxílio de trabalhos nessa área, os quais promovam estimativa espaço-temporal do assoreamento, possibilita-se o estudo do volume do material a ser sedimentado ao passar dos anos e sua distribuição não uniforme no reservatório. Além disso, tanto as medidas preventivas quanto as corretivas podem ser tomadas de forma mais eficientes, pois, como discutido por Annandale (2011) e Adam *et al.* (2015), o controle da sedimentação em reservatórios deve ser uma prioridade pelas décadas que estão por vir.

Outro motivo que apresenta a relevância do estudo do assoreamento está no Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, o qual afirma que estudos sedimentológicos devem ser realizados em todas as fases do aproveitamento, desde o planejamento (inventário, estudo de viabilidade e projeto básico) até a operação do reservatório (ANEEL, 2000). Entretanto, observa-se na prática que esses estudos não recebem, em geral, a devida atenção no Brasil, que apesar de possuir uma matriz energética amplamente baseada na energia hidráulica, apresenta uma rede de monitoramento sedimentométrico aquém do que deveria ser. Com isso, as empresas do setor hidrelétrico têm investido e ainda têm que investir nos estudos da ocorrência do processo de assoreamento, pois devem atualizar os dados operacionais de seus empreendimentos, os quais devem ser reportados periodicamente à Agência Nacional de Águas – ANA. Assim, torna-se importante o desenvolvimento de trabalhos experimentais e/ou simulações numéricas, no âmbito nacional, que auxiliem na determinação do assoreamento de reservatórios.

Entretanto, prever o acúmulo de sedimentos é uma tarefa difícil porque os processos envolvidos - erosão, transporte, deposição e consolidação dos sedimentos - são complexos e

podem ocorrer simultaneamente. Além disso, os fatores que interferem no processo estão sujeitos à grande variabilidade temporal e às várias incertezas, o que torna o estudo do assoreamento não apenas determinístico, mas também estocástico.

Tem-se também que para obtenção de resultados confiáveis são necessários dados locais representativos e consistentes, os quais raramente estão disponíveis, uma vez que a densidade de estações sedimentométricas é reduzida, dificilmente há amostragens de longo prazo nos locais de interesse e muitas vezes não se tem acesso público aos dados. Além da baixa quantidade das estações, nas existentes são realizadas apenas medições da concentração sólida em suspensão, sem a determinação da descarga sólida total e de dados de granulometria. Por isso, muitos estudos sedimentológicos no país são prejudicados.

Assim, estimar o processo de assoreamento apenas do ponto de vista determinístico, como é feito atualmente, faz com que todas as incertezas associadas ao processo sejam desprezadas, o que pode levar a resultados errôneos das alturas assoreadas, visto que um modelo determinístico fornece um único resultado de assoreamento. Por exemplo, o modelo determinístico determina um único perfil longitudinal do assoreamento ao longo do reservatório, sendo que esse perfil tende a não ocorrer na realidade devido às incertezas nos parâmetros utilizados na estimativa do assoreamento.

Diante disso, uma alternativa é utilizar um modelo determinístico associado a um estocástico, permitindo que ao final da simulação sejam gerados milhares de cenários de assoreamento, de forma que se poderá determinar as estatísticas do sedimento depositado no reservatório ao longo do tempo, como a mediana, o desvio padrão e os quartis da probabilidade de ocorrência da altura assoreada ao longo do reservatório.

Atualmente, métodos de análises estocásticas estão sendo desenvolvidos em algumas áreas relacionadas ao manejo de recursos hídricos. Porém, os estudos relacionados com as análises de incertezas da modelagem de transporte de sedimentos ainda são limitados (Oh *et al.*, 2015). Mais especificamente, são poucos os estudos que propuseram algum método estocástico para estudar o assoreamento em reservatórios, podendo-se citar os trabalhos realizados por Laquini, 2009, Adam *et al.*, 2015 e Oh *et al.*, 2015.

Entretanto, ressalta-se que nenhum deles desenvolveu o que está sendo proposto aqui nessa tese de doutorado, que é desenvolver um código computacional para acoplar um modelo

determinístico amplamente utilizado na área de Hidráulica, o qual é o HEC-RAS, a um estocástico, cujas funções, de forma a deixar toda a modelagem automática, foram desenvolvidas no *software* R (amplamente utilizado na área de Estatística). A principal originalidade dessa tese é o fato de que o método estocástico desenvolvido foi validado a partir dos dados de assoreamento advindo do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba, sendo que esse modelo físico permitiu maior precisão na utilização dos dados hidrossedimentológicos, simulação de outro cenário de assoreamento não analisado no protótipo, além de facilitar a inspeção do processo de assoreamento durante todo o período analisado.

No Capítulo 3 do texto dessa tese foi apresentada uma revisão bibliográfica contendo os temas abordados nessa pesquisa. Primeiramente, foi feita a revisão sobre o processo de assoreamento e, posteriormente, foram apresentados os modelos utilizados para a estimativa desse fenômeno, a saber: modelo numérico, o qual pode ser determinístico e/ou probabilístico e modelo físico. No Capítulo 4 é apresentada a metodologia para desenvolvimento do método estocástico, para automatização do *software* determinístico e os procedimentos realizados no modelo reduzido da PCH. A partir da metodologia, foi possível se obter os resultados apresentados no Capítulo 5, sendo que com base neles são apresentadas as conclusões no Capítulo 6 e as recomendações para novas pesquisas no Capítulo 7. Nos Apêndices estão apresentadas as etapas para modelagem do assoreamento no HEC-RAS, os códigos desenvolvidos para automatização desse programa e as seções transversais executadas no modelo reduzido.

2 OBJETIVOS

2.1 *Objetivo geral*

O objetivo geral desta pesquisa é promover o acoplamento de um modelo estocástico a um determinístico, de forma a desenvolver um método para estimativa estocástica do assoreamento em reservatórios, podendo, assim, obter as estatísticas da estimativa das alturas assoreadas ao longo do tempo.

2.2 *Objetivos específicos*

Os objetivos específicos são:

- Gerar estocasticamente dados hidrossedimentológicos da PCH Salto do Paraopeba;
- Desenvolver a metodologia e determinar o assoreamento ocorrido no modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba para compará-lo com os resultados obtidos com a modelagem estocástica;
- Avaliar o desempenho do método estocástico de forma a se observar se os resultados de assoreamentos obtidos a partir das simulações numéricas estocásticas abrangem o cenário real observado no modelo reduzido.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Nesse capítulo, primeiramente será descrita a dinâmica dos sedimentos (Item 3.1) em uma bacia hidrográfica, o que pode culminar com o depósito desses sedimentos em um reservatório, causando, assim, o seu assoreamento (Item 3.2). Para predição desse assoreamento, foram desenvolvidos vários modelos numéricos e físicos. Os numéricos podem ser divididos em determinísticos (Item 3.3) e estocásticos (Item 3.4), os quais podem ser utilizados conjuntamente ou separados. Os modelos físicos (Item 3.5), além de serem utilizados para estimativa do assoreamento, também podem ser úteis para calibrar e validar os modelos numéricos desenvolvidos.

3.1 *Dinâmica dos sedimentos*

O processo de assoreamento de um reservatório está associado à dinâmica dos sedimentos na bacia hidrográfica na qual ele foi construído, sendo esse processo natural, mas podendo também sofrer interferência antrópica. Ele é dividido em quatro fases, as quais serão apresentadas a seguir: (i) erosão; (ii) transporte dos sedimentos; (iii) deposição e (iv) adensamento dos sedimentos.

3.1.1 *Erosão*

O processo pelo qual os sedimentos são removidos de solos e/ou rochas é denominado erosão, a qual envolve o desprendimento e o transporte de materiais intemperizados de um local para outro, fornecendo, assim, sedimentos para o sistema fluvial (MORRIS; FAN, 2010). O desprendimento e o transporte das partículas se dão por ação da água ou outros agentes, como o vento.

A erosão pode ser classificada em dois tipos: geológica e acelerada. A primeira, também conhecida como erosão natural ou normal, ocorre vagarosamente e sem a intervenção humana. MacArthur *et al.* (2008) relatam que ela é resultado de movimentações tectônicas, terremotos, intemperismo e decomposição química, além da ação da água, do vento, gravidade e do gelo, ao longo de milhares de anos. A segunda, também denominada antrópica, é aquela provocada pelo homem.

3.1.2 Transporte de sedimentos

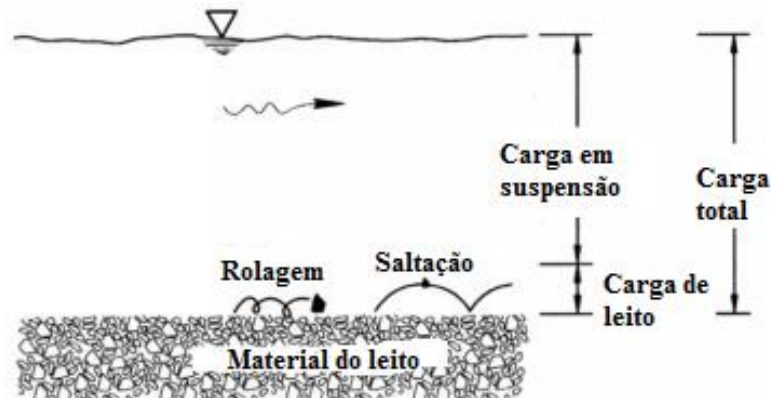
À medida que a intensidade da precipitação excede a taxa de infiltração da água no solo ou à capacidade deste em acumular água, inicia-se a retenção da água na superfície do terreno. A partir deste momento, inicia-se o escoamento superficial da água, associado ao transporte de partículas do solo.

Os sedimentos transportados pelo escoamento superficial podem chegar aos cursos d'água, nos quais podem ser transportados por arraste, saltação ou em suspensão, de acordo com sua granulometria. Carvalho (2008) define os tipos de transporte de sedimentos da seguinte forma:

- Carga sólida de arraste: Caracterizada pelas partículas mais pesadas e de maior granulometria que se deslocam junto ao fundo, rolando ou deslizando longitudinalmente no curso d'água, de forma contínua ou intermitente em contato com o leito;
- Carga sólida saltante: Consiste nos sedimentos saltando ao longo do curso d'água por efeito da correnteza ou pelo impacto de outras partículas. Esse transporte pode ser considerado como uma fase intermediária entre o movimento de arraste e o de suspensão. As partículas que não são suficientemente grandes para se manter no leito, nem pequenas para serem transportadas em suspensão, avançam ao longo do leito fluvial através de uma série de saltos curtos (SUGUIO, 1990);
- Carga sólida em suspensão: As componentes verticais das velocidades do fluxo turbulento mantêm em suspensão as partículas de sedimentos que se deslocam no sentido longitudinal, carregadas pelo fluxo. Constituída por partículas de menor granulometria, representa a maior fração de sedimentos que passa pelos reservatórios através das estruturas extravasoras ou pelas turbinas, no caso de usinas hidrelétricas, pois a ação da velocidade de queda dessas partículas é menor em contraposição à velocidade de escoamento. Para Carvalho *et al.* (2000a), o estudo do transporte da carga em suspensão é de maior complexidade, porém, amostragens dessa carga são mais frequentes, comparadas as outras duas, devido à facilidade de sua determinação. Além disso, ela representa, na maioria dos casos, a maior parte da descarga sólida total.

A soma das três cargas resulta na carga total de sedimentos sendo transportada, conforme é esquematizado na **Figura 3.1**.

Figura 3.1: Representação esquemática do transporte de sedimentos em cursos d'água

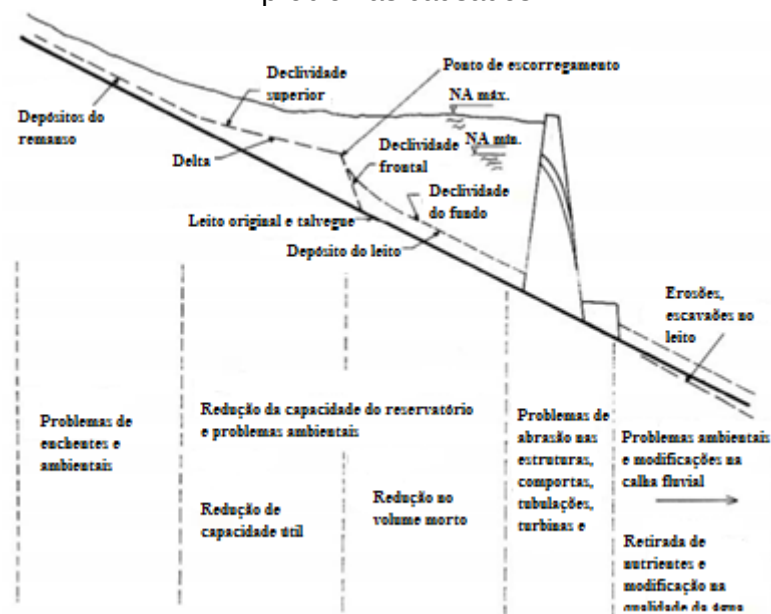


Fonte: Morris e Fan, 2010.

3.1.3 Deposição dos sedimentos

Na **Figura 3.2** estão ilustrados os tipos depósitos de sedimentos existentes, de acordo com a classificação proposta por Vanoni (1975), suas localizações ao longo do reservatório, bem como os principais problemas decorrentes. As classificações dos depósitos são:

Figura 3.2: Depósitos de sedimentos nos reservatórios, suas localizações e principais problemas causados



Fonte: Carvalho, 2008.

- Depósito de remanso: São constituídos pelos materiais de maior granulometria, como seixos, que se depositam no final do remanso (**Figura 3.2**). Teoricamente esses depósitos podem progredir tanto para dentro do lago como a montante, pois, conforme o depósito

cresce, o efeito de remanso se estende. O impacto causado por este tipo de depósito são as enchentes a montante, pois os depósitos de remanso tendem a obstruir a seção do canal, resultando em elevação de níveis d'água.

- Depósitos de deltas: Sua formação é condicionada pela variação do nível d'água. Possuem partículas que se depositam logo que o escoamento penetra o reservatório, sendo, geralmente, da granulometria da areia. Esses depósitos têm sua extremidade de montante no nível médio de operação do reservatório, ou ligeiramente acima, inclinando-se para jusante (declividade superior) e depois para o fundo do reservatório (declividade frontal). Na **Figura 3.2** é apresentado um delta, assim como as suas declividades, a superior e a frontal. Borland (1971 apud LOPES, 1993), com base nos levantamentos do *U.S. Bureau of Reclamation*, apresenta que, para a maioria dos reservatórios, a declividade superior é, aproximadamente, igual à metade da inclinação do leito original do rio e a declividade frontal é em média igual a 6,5 vezes a declividade superior. O problema decorrente desse tipo de depósito é a redução da capacidade útil do reservatório.
- Depósito de fundo ou leito: Situa-se em locais mais próximos ao eixo da barragem, sendo constituído de partículas de silte e argila, que são geralmente transportadas para jusante dos deltas devido ao seu menor peso. Esses depósitos reduzem o volume do lago e podem ocasionar problemas relativos à operação do reservatório, como abrasão de componentes, tubulações e turbinas. A forma desses depósitos depende principalmente das características minerais das argilas e das características químicas da água, sendo que eles ocorrem nas proximidades da barragem, com profundidade uniforme ao longo da seção transversal.

Apesar de ter sido apresentado que os depósitos de sedimentos variam de acordo com a granulometria das partículas, a deposição está ligada também a outros fatores, como apresentam Salas e Shin (1999): a vazão do rio e a quantidade de sedimentos que entra no reservatório, sendo que quanto maior for a vazão, maior tende a ser a quantidade de sedimento; o peso específico dos sedimentos, em que as partículas de maiores pesos tendem a sedimentar mais rapidamente; e o tamanho e a operação do reservatório, visto que, por exemplo, abertura e fechamento de comportas influenciam na distribuição de velocidade, consequentemente, na deposição do sedimento.

3.1.4 Adensamento dos sedimentos

As partículas depositadas terão seu peso específico variável ao longo do tempo, pois estão sujeitas ao adensamento, que reduzirá o espaço ocupado pelo volume do material depositado. Este processo, dependente do tempo, pode ocorrer por décadas, devido ao peso próprio da partícula juntamente à sobrecarga de uma sedimentação adicional (MORRIS; FAN, 2010).

Segundo Laquini (2009), este fenômeno é abordado pelos modelos de sedimentação em reservatórios de forma empírica, como a equação apresentada por Lane e Koelzer (1943) *apud* Laquini (2009), que foi desenvolvida a partir de dados observados de reservatórios americanos. Porém, na mecânica dos solos, há alguns modelos que utilizam equações diferenciais para descrever o comportamento físico do processo de adensamento, como Terzaghi e Frohlich (1936), Mikasa (1965) e Gibson *et al.* (1967), entre outros, todos citados por Laquini (2009).

3.2 Assoreamento em reservatórios

Os reservatórios são sistemas complexos e dinâmicos que apresentam como função a regularização da vazão em cursos d'água para atendimento aos usuários ao longo do tempo. Eles são de grande importância, contribuindo para o abastecimento de água, geração de energia através de hidrelétricas, acúmulo de rejeito de mineração, dentre outras. A construção dessas estruturas causa modificações consideráveis no ecossistema, causando grandes impactos ambientais, tanto na construção quanto na sua operação, podendo causar alterações biológicas, sociais, hidrológicas e atmosféricas, a depender do porte do reservatório e da diversidade ambiental, no qual ele é executado (BOAS, 2005).

Os reservatórios estão sujeitos à entrada e deposição de sedimentos, causando o seu assoreamento, um processo inevitável, pois a barragem, ao alterar as características hidráulicas do fluxo de água, leva ao aumento de sua área molhada e, conseqüentemente, à diminuição da velocidade de escoamento, o que faz com que o fluxo se torne menos eficiente para o transporte de sedimentos. Com o passar do tempo, o assoreamento aumenta, e a capacidade do reservatório diminui, levando à redução de sua vida útil (BICALHO, 2006).

Para a construção de um reservatório é de grande importância a verificação da sua vida útil, levando em consideração o acréscimo, em seu volume total, da sedimentação. Um estudo do Banco Mundial mostrou que a vida útil média dos reservatórios no mundo caiu de 100 para 22

anos, levando em comparação à média de todos os países e que a perda de volume devido aos depósitos é em torno de 1% ao ano. Este estudo ainda apontou que são gastos anualmente para a remoção dos volumes assoreados aproximadamente seis bilhões de dólares (CARVALHO *et al.* 2000b).

No Brasil, um estudo realizado em 1994 pelo IPH/UFRGS para a Eletrobrás indicou uma perda de capacidade de armazenamento de 0,5% ao ano para os reservatórios do país (CARVALHO, 2008). Entretanto, pode-se observar na **Tabela 3.1** que, na maioria dos casos apresentados na tabela, a perda de volume útil dos reservatórios foi superior à 0,5% ao ano.

Tabela 3.1 - Perda anual de volume em alguns reservatórios

Autor	Reservatório	Período analisado	Redução anual do volume do reservatório (%)
Paiva <i>et al.</i> (1998)	Vacacaí Mirim (RS)	1972 – 1997	0,90
Dill (2002)	Vacacaí Mirim (RS)	1997 – 2001	1,71
Vilhena <i>et al.</i> (2003)	Funil (RJ)	1969 – 1992	1,00
Cabral (2009)	Cachoeira Dourada (GO)	1959 – 2005	0,68
Miranda (2011)	Três Irmãos (SP)	1975 – 2008	0,43
Brito (2013)	Cachoeirão (MG)	2000 – 2013	1,22
Minhoni (2013)	Pipoca (MG)	2006 – 2013	0,63
Cortez (2013)	Aimorés (MG)	2007 – 2008	2,60

Na **Tabela 3.2** estão apresentados outros reservatórios brasileiros que se encontram total ou parcialmente assoreados. Estão listados mais de 40 empreendimentos nessas situações, localizados, principalmente, nas bacias do Atlântico-Leste e do Paraná.

Tabela 3.2 - Reservatórios brasileiros total ou parcialmente assoreados

Reservatório	Curso d'água	Finalidade
Bacia do São Francisco		
Rio das Pedras	Velhas	UHE – 10 MW
Paraúna	Paraúna	UHE – 30 MW
Pandeiros	Pandeiros	UHE – 4,2 MW
Acabamundo	Acabamundo	Controle de cheias
Arrudas	Arrudas	Controle de cheias
Pampulha	Pampulha	Controle de cheias
Bacia Atlântico Leste		
Funil	Contas	UHE – 30 MW
Pedras	Contas	UHE – 23 MW
Peti	Santa Bárbara	UHE – 9,4 MW
Brecha	Piranga	UHE – 10,5 MW

Tabela 3.2 - Reservatórios brasileiros total ou parcialmente assoreados (continuação)

Reservatório	Curso d'água	Finalidade
Bacia Atlântico Leste		
Piracicaba	Piracicaba	--
Sá Carvalho	Piracicaba	UHE – 50 MW
Dona Rita	Tanque	UHE – 2,41 MW
Salto Grande	Santo Antônio	UHE – 104 MW
Tronqueiras	Tronqueiras	UHE – 7,87 MW
Bretas	Suaçuí Pequeno	--
Mascarenhas	Rio Doce	UHE – 120 MW
Paraitinga	Paraitinga	UHE – 85 MW
Jaquari	Jaquari	UHE – 27,6MW
Una	Uma	Abastecimento de água
Bacia do Paraná		
Caconde	Pardo	UHE – 80,4 MW
Euclides da Cunha	Pardo	UHE – 108,8 MW
Americana	Atibaia	UHE – 34 MW
Jurumirim	Paranapanema	UHE – 22 MW
Piraju	Paranapanema	UHE – 120 MW
Presidente Vargas	Tibaji	UHE – 22,5 MW
Poxoréu	Poxoréu	UHE --
São Gabriel	Coxim	UHE – 7,5 MW
Ribeirão das Pedras	Descoberto	Abastecimento de água
São João	São João	UHE – 3,2 MW
Bacia do Uruguai		
Caveiras	Caveiras	UHE – 4,3 MW
Silveira	Santa Cruz	UHE --
Celso Ramos	Chapecozinho	UHE – 5,76 MW
Furnas do Segredo	Jaquari	UHE --
Bacia Atlântico Sudeste		
Santa Cruz	Tacanica	UHE – 1,4 MW
Piraí	Piraí	UHE – 1,37 MW
Ernestina	Jacuí	UHE – 1 MW
Passo Real	Jacuí	UHE – 125 MW

Fonte: Adaptada de Carvalho, 2008.

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. Por isso, são importantes as metodologias que visem à estimativa do assoreamento.

Um dos parâmetros necessários para cálculo do volume assoreado é a eficiência de retenção (E_r) do reservatório, a qual é definida como sendo a razão de sedimentos depositados e o fluxo total de sedimentos afluentes. O seu valor pode ser obtido a partir de medições

sistemáticas das descargas sólidas afluentes e efluentes ao reservatório. No caso de estudos anteriores à construção da barragem, utilizam-se as curvas envoltórias como as de Brune (1953) e as de Churchill (1948), ambas citadas em Carvalho (2008).

Brune (1953), com base em dados de 44 reservatórios dos Estados Unidos, desenvolveu uma relação empírica entre a capacidade de afluência (razão entre volume do reservatório e a vazão afluente anual) e a eficiência de retenção.

Utilizando dados de reservatórios do Tennessee Valley Authority, Churchill (1948) desenvolveu uma relação entre a porcentagem de sedimento que passa pelo reservatório e o índice de sedimentação, o qual é a razão entre o volume do reservatório no nível médio de operação, a vazão média afluente diária durante o período de estudo e o comprimento do reservatório. A versão da curva de Churchill convertida para o sistema métrico pode ser consultada em Carvalho (2008).

Para médios e grandes reservatórios utiliza-se a envoltória de Brune para determinação da “Er” e para pequenos, adota-se a de Churchill (CARVALHO *et al.* 2000a). Segundo Carvalho *et al.* (2000a), um pequeno reservatório é aquele cujo seu volume total no nível d’água máximo normal é inferior a 10 hm³. Considera-se um reservatório grande quando seu volume total é superior a 100 hm³. Entre os referidos limites, configura-se um reservatório de médio porte.

O cálculo do assoreamento utilizando as envoltórias de Brune e Churchill é algo preliminar, por isso, para simular a dinâmica de sedimentos em reservatórios existem diversos modelos numéricos e físicos desenvolvidos, como serão apresentados nos tópicos seguintes.

3.3 Modelos matemáticos determinísticos para estimativa do assoreamento em reservatórios

Visando estudar a dinâmica dos sedimentos, vários modelos têm sido desenvolvidos para prever a distribuição desses sedimentos em reservatórios. Geralmente, pode-se dividi-los em empíricos, matemáticos e físicos.

Um método é considerado empírico se ele é baseado em observações existentes. A aplicação desses métodos pode ser mais rápida e menos complexa que a modelagem matemática, além de necessitar de menor quantidade de dados de entrada. Desde a década de 1950, vários

métodos empíricos para prever a distribuição da sedimentação em reservatórios foram apresentados. O primeiro deles foi o Método Clássico. Entretanto, ele não é, na verdade, um método para prever a distribuição de sedimentos em reservatórios. Ele assume simplesmente que os sedimentos depositados se acomodam em camadas paralelas à linha d'água, o que fornece resultados geralmente muito irreais (CAMPOS, 2001).

Outro método muito utilizado para estimar a distribuição de sedimentos num reservatório é o Método da Redução da Área, proposto por Borland e Miller (1960) *apud* Miranda (2011), o qual foi desenvolvido com base em um levantamento de 30 reservatórios pelo *U.S. Bureau of Reclamation* e outros órgãos americanos. O método reconhece que a distribuição dos sedimentos depende: da forma de operação e geometria do reservatório; do tamanho da partícula depositada; e do volume de sedimentos acumulados.

Como limitação, tem-se que os métodos empíricos não são capazes de identificar em um reservatório os locais específicos que serão afetados por sedimentos; estes são apenas capazes de prever a mudança nas curvas cota-área e cota-volume. Por isso e devido ao avanço da computação, cada vez mais são utilizados os modelos matemáticos, que representam os fenômenos físicos que ocorrem durante o assoreamento de um reservatório, por meio de equações diferenciais.

A modelagem matemática se utiliza de formulações determinísticas ou probabilísticas (as quais serão apresentadas no Tópico 3.4) ou ao mesmo tempo determinísticas e probabilísticas, de forma a representar um processo físico. Essas equações devem ser posteriormente validadas com seus resultados comparados aos obtidos em campo ou em laboratório, a partir de modelos físicos, como o que será descrito no Tópico 3.5.

O transporte de sedimentos pode ser modelado matematicamente em uma, duas ou três dimensões. Na **Tabela 3.3** estão resumidos os principais modelos desenvolvidos para simular a dinâmica de sedimentos, bem como as suas principais características.

O primeiro que consta na tabela é o HEC6, o qual foi desenvolvido pela *US Army Corps of Engineers* no começo da década de 70 e é o modelo matemático unidimensional mais conhecido (CAMPOS, 2001), sendo que sua versão mais atual – HEC-RAS 5.0.3 – será o modelo matemático utilizado nessa tese de doutorado. Morris e Fan (2010) também reforçam

que esse modelo é provavelmente o mais utilizado na simulação do transporte de sedimentos em rios e reservatórios.

Tabela 3.3 - Principais modelos matemáticos e suas características

Modelo	Ano	Transporte	Sedimentação
HEC6	1970	1D	1D
Soares	1975	1D	1D
Lopez	1978	1D	1D
FLO-2D	1986	2D	2D
Olsen	1991	3D	3D
Consoli	1991	1D	1D
Ziegler e Nisbet	1995	2D	2D
Zhou e Lin	1998	1D	1D
Silva	1998	1D	1D
Campos	2001	3D	3D
Wu e Vieira	2002	1D	1D
Toniolo e Parker	2003	1D	1D

Yang (2002) apresenta as seguintes classificações dos modelos matemáticos quanto às dimensões simuladas:

- Modelos em três dimensões são utilizados basicamente para simulações localizadas, tal como uma curva do rio, efeitos de erosão em uma estrutura hidráulica, etc. São modelos com equacionamento complexo e que necessitam de dados de campo também em três dimensões, para testes e calibração. Neste método, as equações de Navier-Stokes são resolvidas por diferenças finitas, sendo que essas equações descrevem o escoamento gradualmente variado de um fluido não viscoso incompressível.
- Os modelos em duas dimensões mais utilizados são aqueles em que os parâmetros da vertical podem ser aproximados por seus valores médios e a simulação ocorreria nos sentidos da largura do canal e longitudinal ao escoamento. São utilizados para simular pequenos trechos de rio e reservatórios rasos. Estes modelos requerem menor esforço computacional e para sua calibração, em relação aos modelos tridimensionais.
- Os modelos em uma dimensão, tal como o utilizado nesta pesquisa, são normalmente adotados para trechos mais longos de rio e simulações de longo prazo, por permitirem menor esforço computacional e maior agilidade. Esses modelos assumem a condição de que a distribuição de velocidades e concentração de sedimentos é uniforme para as dimensões vertical e horizontal transversal. Os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo unidimensional dependem da qualidade dos dados de entrada, sendo necessárias

informações sobre a carga de material sólido 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 (CORTEZ, 2013).

Os modelos computacionais podem ser divididos em permanentes ou não permanentes, sendo os primeiros quando a vazão é constante ao longo do período simulado, enquanto no segundo ela é variável. O *software* HEC-RAS 5.0.3 resolve as equações hidráulicas em regime permanente, porém, permite discretizar o hidrograma de entrada em intervalos de tempo tão pequenos quanto se queira definir, de tal forma que os cálculos de linha d'água e de transporte de sedimentos em regime transitório pode ser considerado como *quase não permanente*.

De acordo com Roman (2004) os modelos também podem ser classificados em acoplados ou não acoplados. Os primeiros resolvem simultaneamente as equações da fase líquida e da fase sólida do escoamento. Enquanto os segundos, como o HEC-RAS 5.0.3, resolvem inicialmente as equações da fase líquida e posteriormente às equações da fase sólida do escoamento.

Vale (2014) apresenta que os modelos matemáticos podem ser classificados em de equilíbrio ou de não equilíbrio. Os sedimentos podem ser transportados na massa fluida ou junto ao leito do rio. Se a troca de volumes de sedimentos entre a massa fluida e o leito do rio é considerada imediata, sem a utilização de uma equação de decaimento, o modelo é considerado de equilíbrio, caso contrário, tem-se o modelo de não equilíbrio, como o HEC-RAS 5.0.3. Os modelos de equilíbrio são normalmente utilizados quando o material é grosso e normalmente transportado por arraste.

Os modelos matemáticos de transporte de sedimentos também podem ser classificados como modelos uniformes ou não uniformes (HEC-RAS 5.0.3). Os modelos uniformes utilizam um único tamanho característico de sedimento para os cálculos, enquanto os não uniformes utilizam vários tamanhos característicos para os sedimentos, realizando cálculos para cada faixa granulométrica separadamente.

Quando se trabalha com modelos matemáticos, é necessário escolher a formulação mais adequada para o transporte do material sólido de arraste e do leito, dentre as várias existentes. De acordo com USACE (2016), as equações 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, sendo que a única detalhada a seguir é a de Wilcock e Crowe (2003), por ter sido utilizada nessa tese, visto que foi a que melhor se ajustou aos dados hidrossedimentológicos utilizados, como será apresentado no item Metodologia.

Wilcock e Crowe (2003) definiriam uma equação para o transporte do material de leito para cursos d'água com presença de areia e cascalho. O método se baseia na teoria de que o movimento do sedimento depende principalmente do material diretamente em contato com o fluxo e foi desenvolvida com base nas granulometrias das paredes de canais e rios (GARCÍA, 2002).

A função de Wilcock e Crowe (2003) reduz o potencial de transporte de partículas menores, com base na premissa de que elas estão retidas entre grandes seixos e cascalho e não ficam totalmente expostas ao escoamento ou a camada limite turbulenta (USACE, 2016). A função de transporte Wilcock e Crowe (2003) é:

$$W_i^* = 0,002\varphi^{7,5} \text{ para } \varphi < 1,35 \quad 3.1$$

$$W_i^* = 14\left(1 - \frac{0,894}{\varphi^{0,5}}\right)^{4,5} \text{ para } \varphi \geq 1,35 \quad 3.2$$

Onde,

W_i^* é o parâmetro de transporte de carga do leito adimensional, o subscrito indica a fração de cada tamanho de partícula;

φ é definido como (τ/τ_{ri}) , sendo τ a tensão de cisalhamento do leito e τ_{ri} a tensão de cisalhamento de referência para cada fração de tamanho de partícula.

O parâmetro W_i^* é definido por:

$$W_i^* = \frac{(s - 1)gq_{Bi}}{F_i u_*^3} \quad 3.3$$

Onde,

s é densidade relativa do sedimento, adimensional;

g é a aceleração da gravidade, em “m/s²”;

q_{Bi} é descarga volumétrica específica de sedimento para cada fração de sedimento, em “m³/s.m”;

F_i é a proporção das partículas de tamanho “i” na superfície do leito;

u^* é a velocidade de cisalhamento ($u^* = (\tau/\rho)^{0,5}$), em “m/s”, sendo ρ a massa específica da água, em “kg/m³”.

A tensão de cisalhamento de referência (τ_{ri}) é definida como a tensão de cisalhamento que produz um valor de 0,002 para Wi^* . Wilcock e Crowe (2003) propuseram uma relação entre τ_{ri} e tensão de cisalhamento de referência para o tamanho geométrico médio das partículas na superfície do leito (τ_{rm}), a qual é dada como uma função da relação entre o diâmetro da partícula da classe de tamanho (d_i) e o diâmetro geométrico médio da partícula na superfície do leito (d_{sm}):

$$\frac{\tau_{ri}}{\tau_{rm}} = \left(\frac{d_i}{d_{sm}} \right)^b \quad 3.4$$

$$b = \frac{0,67}{1 + e^{\left(1,5 + \frac{d_i}{d_{sm}}\right)}} \quad 3.5$$

A tensão de cisalhamento de referência para o tamanho geométrico médio das partículas na superfície do leito (τ_{rm}) é calculada a partir da tensão de cisalhamento de referência adimensional para o tamanho geométrico médio das partículas na superfície do leito (τ_{rm}^*) de acordo com a Equação 3.6.

$$\tau_{rm} = \tau_{rm}^*(s - 1)\rho g d_{sm} \quad 3.6$$

A tensão adimensional de cisalhamento de referência para o tamanho geométrico médio das partículas na superfície do leito é calculada para o substrato, que é uma função do teor de areia da superfície do leito, conforme Equação 3.7.

$$\tau_{rm}^* = 0,021 + 0,015e^{-20FS} \quad 3.7$$

Na qual,

FS é a fração de areia.

3.3.1 Análise das equações de transporte de sedimentos

Como se tem várias equações de transporte de sedimentos, na literatura se encontram trabalhos que se propuseram a compará-las. Yang e Wan (1991) fizeram um estudo comparativo de sete equações de transporte de sedimentos do material do leito, considerando como critério diferentes gamas de valores para três variáveis do escoamento: concentração de sedimentos, número de Froude e declividade da linha de energia. Para o estudo comparativo foram utilizados 1119 dados de laboratório e 319 dados de campo. O estudo indica que os equacionamentos que melhor representam o transporte de sedimentos em canais naturais em ordem de preferências foram aqueles propostos por Yang, Toffaleti, Einstein, Ackers e White, Colby, Laursen, Engelund e Hansen, Ackers e White.

Vale (2014), utilizando o HEC-RAS, realizou simulações matemáticas do assoreamento do reservatório da PCH Salto do Paraopeba, a qual é objeto de estudo desse trabalho, buscando o modelo de transporte de sedimentos que melhor apresentasse a variação da geometria ocorrida ao longo de 41 anos, que é o intervalo de tempo de dados que ele possuía, tendo selecionado o modelo de Toffaleti (1968).

Yang (1996) fez uma lista de recomendações sobre as equações de transporte de sedimentos passíveis de aplicação e estudo dentre as diversas opções disponíveis. A seguir é transcrita a lista de recomendações apresentadas para as equações englobadas no HEC-RAS:

- Meyer-Peter e Müller (1948) deve ser usada quando o material do leito for mais grosso que 5 mm;
- Toffaleti (1968) é indicada para rios com leito de areia grossa;
- Yang (1973) é sugerida para areias em canais de laboratórios e rios;
- Yang (1984) deve ser utilizada para descarga de arraste ou para cascalhos;
- Ackers e White (1973) ou Engelund e Hansen (1969) é indicada para regime subcrítico;
- Laursen (1958) é indicada para canais de laboratório e rios rasos com areia fina e silte grosso.

Carvalho (2008) também apresenta algumas considerações quanto à seleção da equação do transporte de sedimentos:

- A fórmula de Meyer-Peter e Muller (1948) é usada quando o material do leito é mais grosso que 0,4 mm;
- A fórmula de Toffaleti (1968) é adequada para grandes rios com leitos de areias;
- A fórmula de Yang (1973) é usada em rios com leito de areia;
- A fórmula de Yang (1984) é usada quando a maior parte do material do leito tem granulometria entre 2 a 10 mm;
- As fórmulas de Ackers e White (1973) e de Engelund e Hansen (1969) são aplicáveis a rios com leito de areias e escoamento subcrítico;
- A fórmula de Laursen (1958) é aplicável a rios rasos com areia fina ou silte mais grosso.

De acordo com USACE (2016) a equação de Wilcock e Crowe (2003) é indicada para sedimento na faixa de 0,5 a 4,0 mm.

3.3.2 Modelagem matemática determinística utilizando o HEC-RAS

O *software* HEC-RAS é utilizado e citado em várias publicações da *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, sendo constantemente atualizado e aperfeiçoado, a partir de comparações entre simulações e dados de campo (ROMAN, 2004). Na **Tabela 3.4** são citados alguns trabalhos que promoveram simulações do transporte de sedimentos utilizando o HEC-RAS.

Tabela 3.4 – Utilização do HEC-RAS na simulação do transporte de sedimentos	
Referência	Objetivo
Pinheiro <i>et al.</i> (1997)	Simular o efeito do assoreamento na cabeceira de um reservatório
Nicklow e Mays (2000)	Simulação do transporte de sedimentos para minimizar a erosão e o assoreamento em sistemas de múltiplos reservatórios
Roman (2004)	Estudou o equilíbrio morfológico do rio São Francisco sob a ótica do transporte de sedimentos.
Chaves <i>et al.</i> (2008)	Simulação hidrossedimentológica do trecho de jusante do rio Macaé (RJ)
Cortez (2013)	Avaliação de desempenho de diversas metodologias para se analisar a evolução do depósito de sedimentos em reservatórios.
Vale (2014)	Determinação da geometria primitiva do reservatório da PCH Salto do Paraopeba

3.3.2.1 Equações hidráulicas utilizadas pelo HEC-RAS

A modelagem matemática realizada pelo HEC-RAS considera o trecho de rio em escoamento permanente, sendo que no hidrograma de entrada são consideradas várias vazões permanentes de duração num tempo Δt . Para cada vazão de entrada é calculada a linha d'água no trecho, são realizados os cálculos da continuidade dos sedimentos, considerando-se o volume de sedimentos afluentes ao trecho, a capacidade de transporte de sedimentos do deflúvio, causando agradação ou degradação da calha fluvial, e o consequente volume de sedimentos defluente do trecho. Cada trecho é calculado separadamente conforme as seções transversais inseridas pelo usuário.

Ao se iniciar a modelagem matemática, o *software* realiza o cálculo de linha d'água, através das equações de conservação de energia resolvidas pelo método passo-a-passo padrão (*standard step method*). A perda de carga é calculada pela fórmula de Manning. A seguir a Equação 3.8 apresenta a equação da conservação de energia (USACE, 2016).

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad 3.8$$

Em que,

Os índices 1 e 2 correspondem as seções transversais de montante e jusante, respectivamente;

Z é a elevação do canal principal, em “m”;

y é a profundidade da água, em “m”;

v é a velocidade média do escoamento, em “m/s”;

α é o coeficiente de Coriolis;

g a aceleração da gravidade, em “m/s²”;

h_e a perda de carga entre 1 e 2, em “m”, a qual é calculada conforme a Equação 3.9.

$$h_e = L \cdot \bar{S}_f + C \cdot \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad 3.9$$

Na qual,

L o comprimento do trecho, em “m”;

$\bar{S}_f$ o coeficiente de atrito entre duas seções;

C a contração ou expansão da seção.

Para o cálculo do coeficiente de Coriollis (α) das velocidades tem-se a Equação 3.10.

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{k_j^3}{A_j^2} \right)}{\left(\frac{k_j^3}{A_j^2} \right)} \quad 3.10$$

Sendo K dado pela Equação 3.11:

$$K_j = \frac{1}{n_j} A_j R_j^{2/3} \quad 3.11$$

Em que,

A é a área molhada da seção transversal, em “m²”;

n é o coeficiente de Manning, adimensional;

R é o raio hidráulico da seção transversal, em “m”.

As análises de transporte de sedimentos no HEC-RAS são realizadas para cada fração granulométrica, variando desde a argila até o cascalho. Conforme o seu manual, disponibilizado pelo USACE (2016), os parâmetros hidráulicos necessários para o cálculo do transporte de sedimento são velocidade, profundidade, largura e declividade da linha de energia, todos eles obtidos nas simulações dos perfis de linha d’água. Os dados de entrada para o modelo consistem na geometria do reservatório, geralmente obtida por meio de seções topobatimétricas, hidrograma de vazões afluentes, condições de contorno hidráulicas, curva-chave de sedimentos totais e na granulometria do material em suspensão e de fundo.

De acordo com Vale (2014), para cada faixa granulométrica e para uma determinada vazão em trânsito, o *software* calcula as taxas de transporte de sedimento. Para isso, é definido um volume de controle (**Figura 3.3**), limitado por duas seções sucessivas e com largura igual à da seção transversal, sendo essa a largura da seção sujeita a erosão ou assoreamento. A Equação 3.12 apresenta a equação da continuidade de sedimento para um volume de controle.

$$V_{sed} = \frac{L_u + L_D}{2} B_0 Y_s \quad 3.12$$

Em que,

V_{sed} é o volume de sedimento, em “m³”;

B_0 é a largura do leito móvel, em “m”;

L_u e L_d são os comprimentos dos trechos a montante e a jusante, respectivamente, em “m”;

Y_s é a profundidade do sedimento no volume de controle, em “m”.

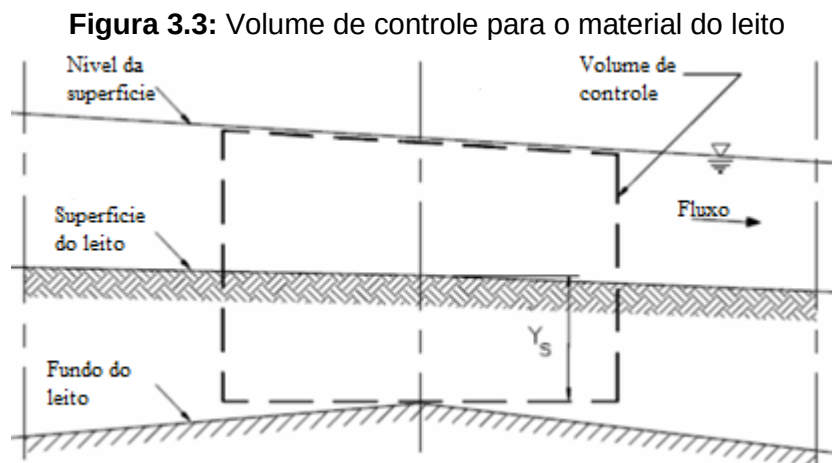
O volume de fluido no volume de controle é dado pela Equação 3.13.

$$V_f = \frac{L_u + L_D}{2} B_0 y \quad 3.13$$

Em que:

V_f é o volume de fluido, em “m³”;

y é a profundidade do fluido em “m”.

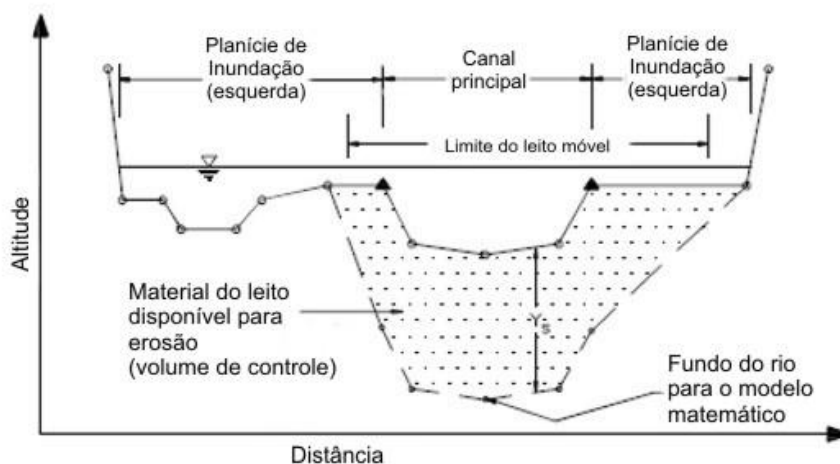


Fonte: USACE, 2016.

Os parâmetros hidráulicos, granulometria de material de fundo e capacidade de transporte calculada são admitidos uniformes ao longo do volume de controle. O HEC-RAS admite que ao longo do tempo a profundidade de sedimento (Y_s) do volume de controle pode se alterar, devido ao balanço entre o sedimento que entra e que sai do volume, mas não admite variação lateral. A **Figura 3.4** apresenta como o HEC-RAS interpreta uma seção transversal onde haverá aggradação ou degradação de sedimentos.

No HEC-RAS também é possível estimar a erosão sofrida pelo leito. Para isso, deve se fornecer a largura e a profundidade máxima do material sedimentar disponível para erosão, de acordo com o indicado na **Figura 3.4**. Nela, a linha cheia representa a seção inicial de escoamento e a linha tracejada o limite máximo erodível.

Figura 3.4: Desenho esquemático do volume de controle interpretado pelo HEC-RAS



Fonte: USACE, 2016.

A base para a simulação do movimento vertical do leito é a equação de continuidade de sedimento – Equação de Exner (Equação 3.14) – a qual é resolvida pelo método das diferenças finitas (USACE, 2016).

$$\frac{\delta G}{\delta x} + B_0 \frac{\delta Y_s}{\delta t} = 0 \quad 3.14$$

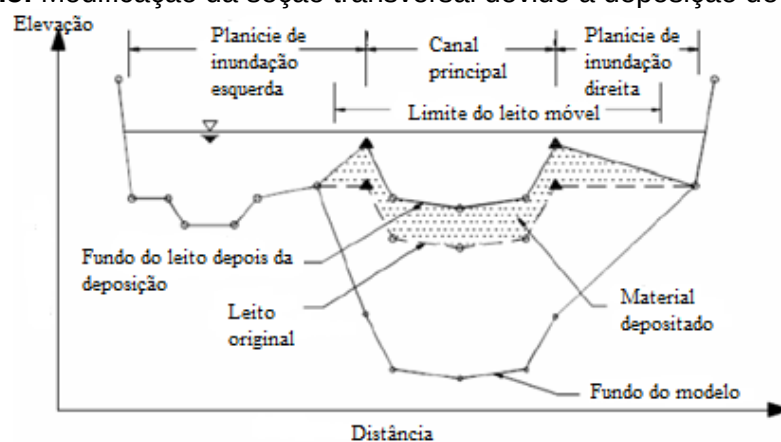
Na qual,

G é a descarga média de sedimento durante o intervalo de tempo t ;

x é a distância ao longo do canal.

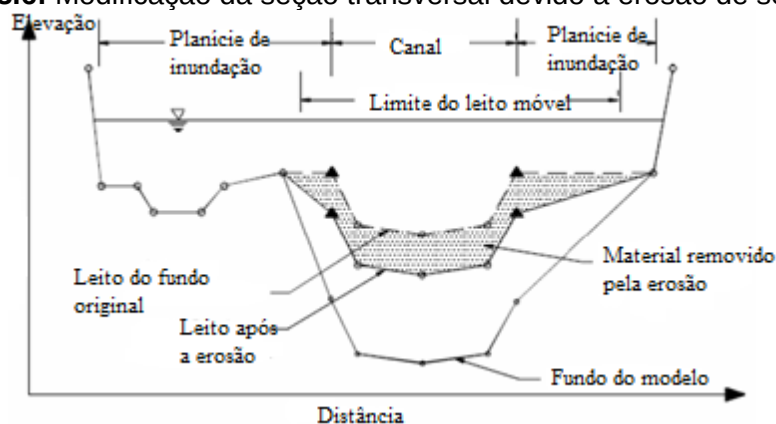
Quando ocorre erosão ou deposição durante certo intervalo de tempo, o modelo ajusta as elevações do leito na porção móvel da seção transversal. A **Figura 3.5** e a **Figura 3.6** ilustram os ajustes realizados pelo modelo em casos de deposição (assoreamento) e erosão, respectivamente.

Figura 3.5: Modificação da seção transversal devido à deposição de sedimento



Fonte: USACE, 2016.

Figura 3.6: Modificação da seção transversal devido à erosão de sedimento



Fonte: USACE, 2016.

Por fim, para simular o transporte de sedimento, deve-se escolher o parâmetro para a velocidade de queda dos sedimentos, tendo os seguintes métodos disponíveis no *software*: Rubey, Toffaleti, Van Rijn e Report 12, sendo este último o método padrão indicado pelo *software*. Segundo USACE (2016), a equação de Toffaleti é indicada quando o fator de forma (S_f) do sedimento é de 0,9, enquanto Van Rijn desenvolveu suas equações para um S_f de 0,7. Esse fator é dado pela divisão do maior comprimento da partícula, em relação ao seu eixo cartesiano, pelos comprimentos intermediário e menor, referentes aos dois outros eixos. Rubey desenvolveu sua relação com base na combinação da lei de Stoke. Ele sugeriu que, em água com temperatura de 16°C, partículas com forma de grãos de quartzo triturados, com densidade relativa de 2,65, são as mais aplicáveis à equação. Report 12 é uma solução iterativa que utiliza as mesmas curvas de Van Rijn, mas usa a velocidade de queda computada para calcular um novo número de Reynolds e continua a iterar até que a velocidade de queda assumida corresponda à calculada dentro de uma tolerância aceitável. Todas as equações utilizam o fator de forma, porém, apenas Report 12 é flexível para calcular a velocidade de

queda como uma função desse fator. Por isso, o manual do HEC-RAS recomenda que, quando não é possível determinar a melhor equação, deve-se utilizar Report 12.

Segundo o manual do HEC-RAS, o modelo fornece como resultados os perfis de leito do rio e de linha d'água após cada período simulado, indicando os balanços sedimentométricos em cada trecho de interesse. Os balanços de sedimento são fornecidos por faixas granulométricas, de modo a se ter uma noção da influência de cada parcela no transporte total. Caso requerido, o modelo fornece também as seções transversais, modificadas após o processo de transporte sólido.

3.4 Modelos matemáticos estocásticos para estimativa do assoreamento em reservatórios

De acordo com Villela e Mattos (1995), duas escolas estudam o transporte e deposição de sedimentos:

(i) a escola determinística, que emprega equações para avaliar estes processos, sendo essas equações descritas no item anterior (Tópico 3.3);

(ii) a escola estocástica, que faz uso de dados medidos em campo para analisar as relações entre as variáveis envolvidas nestes eventos. Essa permite avaliar o processo de assoreamento considerando o grau de incerteza associados à determinação dos fatores, dos quais depende o processo e sua grande variabilidade temporal e espacial. Essa escola procura determinar o comportamento de um processo através do estudo de suas propriedades estatísticas, podendo assim apresentar as incertezas associadas ao processo da estimativa do assoreamento em reservatórios.

A modelagem estocástica é uma ferramenta promissora para estimativa do assoreamento em reservatórios, por considerar as incertezas associadas, visto que estimativas determinísticas normalmente subestimam o volume assoreado, de forma que a vida útil dos reservatórios seja menor do que a projetada, como pode ser observado a partir de trabalhos de assoreamentos já realizados, os quais estão a seguir.

Thakkar e Bhattacharyya (2006) apontam que pelo menos 14 dos 27 reservatórios estudados na Índia apresentam taxa anual de assoreamento superior às previstas nos seus estudos de viabilidade, chegando a números de até 27 vezes. Os autores apresentam que um motivo para

que isso ocorra é a deficiência e limitação dos dados utilizados, de forma que existe grande incerteza nos estudos de previsão do assoreamento, e que esta pode levar a sérios problemas de gestão da segurança hídrica e energética. Para os outros 13 reservatórios não houve comparação entre a taxa anual de assoreamento e a de projeto, pois os autores não obtiveram os dados de projeto.

Ribeiro e Salomão (2001) citam que, no centro oeste brasileiro, a PCH Casca I foi desativada antes do previsto e as UHEs Casca II e Casca III tiveram sua geração reduzida em relação ao previsto em projeto em função da alta concentração de sedimentos em seus reservatórios.

Outro caso que apresentou problemas precoce com assoreamento foi a UHE Itiquira, no Mato Grosso, onde a vida útil do reservatório foi reduzida em sete anos, devido ao assoreamento (CARVALHO *et al.*, 2000c).

Miranda (2011) realizou simulações da capacidade de regularização do reservatório da UHE Três Irmãos após o seu assoreamento, constatando que durante o período de estiagem o reservatório não conseguiria suprir integralmente as suas demandas de projeto, deixando de gerar, em média, 377 MWh por mês durante os 15 anos do período estudado.

Como apresentado, as estimativas do assoreamento em reservatórios acabam contendo erros, os quais podem estar associados a alguns dos fatores discutidos a seguir.

3.4.1 Erros associados ao processo de modelagem matemática de assoreamento em reservatórios

A utilidade de certo modelo está diretamente relacionada à exatidão e confiabilidade de suas previsões. Entretanto, muitas vezes os dados considerados críticos para que se façam as previsões de interesses não estão disponíveis, de forma que essas previsões estão submetidas a incertezas. Essas incertezas são resultantes de todos os erros envolvidos nos processos de construção do modelo, sendo que esses erros não são independentes entre si e podem interagir de forma imprevisível para produzir erros nos resultados finais (JACOMINO, 1997).

De acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA SS-100, 1989), os principais fatores que afetam a confiabilidade das previsões feitas por um modelo são descritos a seguir.

3.4.1.1 Erros associados ao problema em estudo (Cenário)

Esse tipo de erro consiste no fato de se utilizar determinados modelos em situações diferentes daquelas para as quais o modelo foi desenvolvido. Como exemplo, pode-se citar o uso de modelos baseados em observações de curta duração para realizar previsões de longa duração.

3.4.1.2 Erros associados ao modelo conceitual

Os erros associados ao modelo englobam tanto aqueles associados às incertezas na concepção do sistema, incertezas na representação matemática e incertezas na solução desta representação matemática (BONANO; CRANWELL, 1988, *apud* LAQUINI, 2009). Erros decorrentes da concepção dos sistemas são devidos, principalmente, às incertezas associadas à percepção do mundo real, incluindo uma má interpretação dos dados obtidos para ele. Incertezas também são decorrentes de simplificações introduzidas para a redução dos problemas a serem analisados. Por exemplo, um escoamento tridimensional e transiente é geralmente modelado unidimensional e permanente. Fan (1988) obteve informações sobre 34 modelos de assoreamento de rios, 18 de bacias hidrográficas e 20 de reservatórios, e constatou que modelos diferentes podem fornecer resultados significativamente diferentes mesmo quando são usados os mesmos conjuntos de dados de entrada.

3.4.1.3 Erros associados às estimativas dos valores dos parâmetros e à sua variabilidade natural

Em determinadas situações existem poucos dados disponíveis para a quantificação dos valores de todos os parâmetros envolvidos no problema de interesse, como, por exemplo, séries históricas curtas de vazões diárias, inexistência de descargas sólidas totais, entre outras. Além disso, os processos que descrevem os diferentes comportamentos ambientais estão sujeitos à grande variabilidade natural no tempo e no espaço, sendo que muitos dos parâmetros que descrevem estes processos só podem ser conhecidos empiricamente ou teoricamente. Uma forma de se avaliar as incertezas associadas às estimativas dos valores dos parâmetros e à sua variabilidade natural é se ajustar uma distribuição de probabilidade aos dados medidos. Entretanto, na maioria das vezes não é possível realizar medições desses dados e, portanto, as incertezas não podem ser determinadas de uma forma objetiva.

3.4.2 Parâmetros estocásticos utilizados na estimativa do assoreamento de reservatórios

Para estimativa do assoreamento em reservatórios são utilizados parâmetros hidrossedimentológicos, os quais são de caráter estocástico, visto que estão associados a incertezas nas suas obtenções e também possuem variabilidade espaço-temporal. A seguir, esses parâmetros estocásticos são descritos.

3.4.2.1 Vazões, profundidades de escoamento e coeficiente de rugosidade

Righetto (1998) discutiu o caráter estocástico das vazões de um curso d'água, sendo elas uma variável aleatória que apresentam três componentes principais: o componente de tendência, o qual descreve a variação da vazão (aumento ou diminuição) ao longo do tempo; o componente de periodicidade, o qual define as variações provocadas pela sazonalidade (período seco e chuvoso); e o componente aleatório, o qual representa a variação e aleatoriedade da magnitude e frequência de ocorrência da variação da vazão.

Para composição da série histórica de vazões e profundidades do escoamento é necessário que sejam feitas medições em campo. Entretanto, todos os métodos de medições possuem incertezas. Lee (2001) realizou análise estatística no erro da medição do nível de água em estações de medições considerando dois elementos de erro principais: erro instrumental e erro devido a ondas causadas pelo vento. Supondo que os erros tenham distribuição normal com valor médio de zero, ele estimou o desvio padrão da distribuição para 15,7 mm. Isso equivale a um erro de $\pm 40,5$ mm com um nível de confiança de 99%. Com relação à incerteza associada a vazão, em geral, a incerteza na medida pelo método velocidade *versus* área, Kim *et al.* (2010) apresenta que para profundidades superiores a 10 m, com pelo menos 20 verticais de medição, as vazões são diminuídas em 10%, sendo que essa incerteza pode ser reduzida para 5% com medidas precisas.

Como ocorrem incertezas nos valores das vazões e profundidades de escoamento, consequentemente, também se tem incertezas associadas ao coeficiente de rugosidade. Kim *et al.* (2010) concluiu que um erro de 10% na medição de descarga pode levar a uma incerteza de mais de 10% na estimativa do coeficiente de rugosidade, enquanto a incerteza no valor do coeficiente correspondente à profundidade é, aproximadamente, 5%. Teixeira *et al.* (2018), ao variar em ± 5 e $\pm 10\%$ dos valores de vazões e profundidades d'água em três seções do rio Doce, obtiveram valores do coeficiente de rugosidade variando entre 1 e 1,7%.

3.4.2.2 Descarga sólida total e curva-chave de sedimentos

Oh, Tsai e Choi (2015) afirmaram que uma estimativa precisa das concentrações de sedimentos é particularmente difícil e continua a ser um desafio, uma vez que existe um elevado grau de incerteza envolvido no processo global de transporte de sedimentos. Assim, os autores propuseram uma abordagem estocástica desse transporte para quantificar a incerteza associada à estimativa da concentração de sedimentos. Deve-se destacar que a descarga total de sedimentos, utilizada nas estimativas do assoreamento de reservatórios, muitas vezes é obtida de forma indireta a partir da concentração de sedimento em suspensão.

A determinação da carga de material sólido em suspensão pelo método direto é baseada na medição do transporte de sedimentos em um tempo médio em um determinado ponto ou ao longo de uma vertical, sendo a amostragem realizada através do movimento vertical do dispositivo de coleta a uma velocidade constante. Van Rijn (1993) destaca que este método somente é aplicável para cursos d'água de pouca profundidade. O método indireto é baseado na medição simultânea, mas separada da vazão do fluido e da concentração de sedimentos durante um intervalo de tempo, que são multiplicados para obter o transporte de material sólido em curso. Com base nos trabalhos realizados por Anderson (1975), Van Rijn (1993) conclui que os resultados obtidos através dos métodos diretos são cerca de 10% inferiores aos obtidos por medições indiretas.

Na ausência de dados de medições da descarga de arraste, é prática em estudos preliminares dos processos de assoreamento assumir a descarga não amostrada como fração da descarga sólida em suspensão. Carvalho (2008) quantifica esta fração como 10% da descarga em suspensão nos estudos de reservatórios no Brasil, enquanto há países em que se arbitra até 30% da descarga em suspensão como a fração correspondente à descarga de fundo e de arrasto.

Vale (2014) determinou a descarga sólida de arraste do rio Paraopeba utilizando a metodologia proposta em Eletrobrás (1992), a qual apresentou boa aderência entre os valores calculados por ela e os advindos de três campanhas de medições de concentração de sedimentos de arraste feitas na PCH Salto do Paraopeba. Em Eletrobrás (1992) é apresentado um diagnóstico de vários rios brasileiros, entre eles o rio Paraopeba. Para esse rio, a relação entre a descarga sólida de arraste e a em suspensão varia entre 1 e 0,5. Vale (2014) encontrou

que o melhor ajuste aos pontos resultantes das campanhas realizadas à montante do reservatório da PCH se dá quando a relação entre as descargas é 0,5.

A descarga sólida total, de forma indireta, é dada pela soma das descargas sólida de arraste e em suspensão. Ou seja, visto que a medição da concentração de sedimentos em suspensão é imprecisa, tem-se que a descarga sólida em suspensão também é imprecisa, sendo que é a partir dela que é estimada a descarga sólida de arraste e, conseqüentemente, a descarga sólida total. Assim, tem-se uma propagação de incertezas.

A relação entre as vazões e a descarga sólida total, para uma determinada seção fluvial, pode ser representada graficamente como uma simples relação unívoca, sendo que essa relação é amplamente utilizada para a estimativa das descargas de sedimentos para períodos em que estão disponíveis dados de descarga líquida, porém, não estão disponíveis dados de sedimentos (GRAY; SIMÕES, 2008).

A curva-chave de sedimentos é geralmente definida por uma função potencial, na forma apresentada na Equação 3.15.

$$Q_{ST} = aQ^b \quad 3.15$$

Na qual,

Q_{ST} é a descarga sólida total;

Q é a descarga líquida;

a e b são parâmetros que podem ser determinados a partir de regressão linear ou não linear.

Carvalho *et al.* (2000a) destacam a dificuldade em se determinar a curva-chave de sedimentos, uma vez que a dispersão dos dados obtidos é grande, a uma mesma vazão líquida a descarga sólida pode variar de 10 a 100 ou mais. Gray e Simões (2008) complementam que a estimativa da curva-chave a partir de técnicas empíricas resulta em uma combinação de erros desde a amostragem até a formulação para estimativa da descarga sólida. Os autores concluem que as magnitudes destes erros permanecem indefinidas e indefiníveis, e a falta de sincronia entre os picos de vazões líquidas e concentração de sedimentos durante um evento de cheias é mais regra do que exceção, o que reforça o caráter estocástico da curva-chave de sedimentos.

3.4.2.3 Propriedades dos sedimentos

Algumas propriedades dos sedimentos são necessárias para os cálculos de transporte de sedimentos, sendo duas delas o diâmetro e a distribuição granulométrica dos sedimentos.

Em cursos d'água naturais não existem sedimentos de granulometria única, e sim uma diversidade de tamanhos e formas. A dificuldade ou mesmo impossibilidade de se trabalhar com os vários tamanhos, por vezes, exige a utilização de diâmetros característicos, sendo eles obtidos a partir de análises de laboratório dos sedimentos coletados em campo, as quais são feitas a partir de retenção de sedimentos em peneiras com aberturas cada vez menores.

Um diâmetro nominal muito utilizado é o diâmetro mediano dos sedimentos (d_{50}), o qual é o diâmetro característico para o qual 50% dos sedimentos, em peso, apresentam um diâmetro inferior a este valor. Esse diâmetro é muito utilizado nas equações de transporte de sedimentos apresentadas no Tópico 3.3. Porém, seu valor é uma variável temporal e espacial, e acaba sendo utilizado com valor único, o que traz incerteza para o cálculo do transporte de sedimentos.

Com relação à granulometria, os sedimentos podem ser classificados como argila, silte, areia, cascalho, pedregulho ou matacão. Neste trabalho serão utilizadas as classes granulométricas conforme definidas pelo *American Geophysical Union*, por ser esta a classificação adotada pelo modelo HEC-RAS e ser geralmente adotada nos estudos sobre sedimentos (Yang, 1996). A nomenclatura e as classes granulométricas estão apresentadas na **Tabela 3.5**.

Tabela 3.5 - Classes granulométricas adaptada de *American Geophysical Union*

Classe granulométrica	Diâmetros (mm)	
	Mínimo	Máximo
Matacão	2048	4096
Pedregulho grande	1024	2048
Pedregulho médio	512	1024
Pedregulho pequeno	256	512
Seixo grande	128	256
Seixo pequeno	64	128
Cascalho muito grosso	32	64
Cascalho grosso	16	32
Cascalho médio	8	16
Cascalho fino	4	8
Cascalho muito fino	2	4
Areia muito grossa	1	2
Areia grossa	0,5	1
Areia média	0,25	0,5

Tabela 3.5 - Classes granulométricas adaptada de *American Geophysical Union* (continuação)

Classe granulométrica	Diâmetros (mm)	
	Mínimo	Máximo
Areia fina	0,125	0,25
Areia muito fina	0,062	0,125
Silte grosso	0,031	0,062
Silte médio	0,016	0,031
Silte fino	0,008	0,016
Silte muito fino	0,004	0,008
Argila grossa	0,002	0,004
Argila média	0,001	0,002
Argila fina	0,0005	0,0010
Argila muito fina	0,00024	0,00050

Fonte: Vanoni (1975).

Outra característica importante dos sedimentos é o seu peso específico. Além de obviamente influenciar no processo de transporte e deposição do sedimento, essa propriedade física é importante, pois, para a determinação do volume de sedimentos é necessária à conversão dos dados amostrados da carga de sedimentos transportados por um curso d'água, geralmente expressos em unidades de peso por tempo, em unidades de volume por tempo, afinal, objetiva-se encontrar o volume de sedimentos que irá se depositar dentro de um reservatório em um determinado tempo ou o tempo que levará para que um determinado volume de sedimentos chegue ao reservatório.

Vale (2014) assumiu que os sedimentos predominantemente transportados na PCH Salto do Paraopeba são de origem quartzosa, sendo classificado como uma areia média, como na maioria dos rios brasileiros, o qual possui densidade relativa de 2,65, ou seja, peso específico de 26500 N/m³. Esse valor é o mesmo encontrado em outros trabalhos da área de transporte de sedimentos em rios, como em Carvalho *et al.* (2000a), Almeida (2012), Brune (2014), entre outros.

3.4.3 Modelos estocásticos de geração de dados de séries sintéticas

De acordo com Koenigsdorf (2009), um processo estocástico pode ser definido como uma sequência de variáveis aleatórias indexadas ao tempo, ou seja, um processo estocástico pode ser definido como uma coleção de variáveis aleatórias ordenadas no tempo, $\{x_t, t \in T\}$, onde T é um conjunto ordenado de índices. O autor descreve ainda que tais processos podem ser classificados em estacionários e não estacionários.

Para Werner e Ribeiro (2003), modelos estacionários são aqueles que assumem que o processo está em equilíbrio. Colocado de outra forma, um processo é considerado estacionário se as suas propriedades estatísticas não se alteram com tempo. Um processo é fortemente estacionário se todos os momentos conjuntos são invariantes a translações no tempo. Por outro lado, um processo é considerado fracamente estacionário se suas média e variância se mantêm constantes ao longo do tempo e a função de autocovariância depende apenas da defasagem entre os instantes de tempo.

Um processo estocástico pode ser classificado como um processo em tempo discreto ou em tempo contínuo. Um processo estocástico em tempo discreto é aquele em que o valor da variável só varia em um determinado instante de tempo. Esta variável é classificada com variável discreta. Já um processo em tempo contínuo, a variável assume valores a qualquer instante de tempo, por isso é chamada de variável contínua.

Uma série temporal é a realização de um processo estocástico que os resultados estão ordenados em intervalos regulares de tempo (cada dia, cada mês, cada ano, etc.). Nesse contexto, Lúcio *et al.* (2010) descrevem que uma série temporal pode ser analisada como uma realização de um processo estocástico, por meio de modelos estocásticos.

A partir desta abordagem, uma série de vazões, por exemplo, é vista como um processo estocástico, ou seja, um processo formado pela superposição de variáveis aleatórias ao longo do tempo. Sendo assim, constituem uma série temporal. Tem-se que nessas séries apesar de se conhecer os fenômenos intervenientes no ciclo hidrológico, a parcela exata de interferência de cada um deles e suas relações no desenvolvimento do processo meteorológico ainda são desconhecidas.

Para muitos processos ambientais é provável que o estado em determinado momento está correlacionado com o estado em momentos anteriores. Estes processos são referidos como processos autorregressivos, $AR(p)$. Num processo autorregressivo, o valor presente da série temporal X_t é expresso linearmente em termos dos valores passados da série e da perturbação aleatória a_t ocorrendo no instante t .

Além dos processos autorregressivos existem os processos de média móvel, $MA(q)$, nos quais os valores presentes da série se expressam em função dos valores presentes e passados das

perturbações aleatórias, que formam uma série de ruído branco. A ordem deste processo depende do valor mais antigo da série de ruído branco considerado.

Box e Jenkins (1970) popularizaram uma técnica que combina as características dos modelos autorregressivos AR(p) e de média móvel MA(q), ou seja, o modelo ARMA(p, q) dado por:

$$X_t = \alpha_1 X_{t-1} + \dots + \alpha_p X_{t-p} + Z_t + \beta_1 Z_{t-1} + \beta_2 Z_{t-2} + \dots + \beta_q Z_{t-q}$$

Em que,

$\alpha_1, \dots, \alpha_p$ são coeficientes do modelo autoregressivo de ordem p ;

$\beta_1, \dots, \beta_q$ são coeficientes do modelo de média móvel de ordem q ;

Z_t é um processo puramente aleatório normalmente distribuído com média zero e variância σ_Z^2 .

Aplicando o operador de retardo B , definido como $B^n X_t = X_{t-n}$, o modelo ARMA(p, q) pode ser reescrito como:

$$(1 - \alpha_1 B - \alpha_2 B^2 - \dots - \alpha_p B^p) X_t = (1 + \beta_1 B + \beta_2 B^2 + \dots + \beta_q B^q) Z_t$$

Ou,

$$\phi(B) X_t = \theta(B) Z_t$$

Os processos definidos anteriormente (AR(p), MA(q) e ARMA(p, q)) são estacionários. Isto significa que a média da série temporal e as covariâncias entre as suas observações não variam com o tempo. Se o processo não for estacionário, terá que se proceder à sua estacionarização. A estacionarização de uma série temporal recomendada por Box e Jenkins (1970) é obtida com operações de diferenciação, mesmo que aplicada sucessivas vezes. À série estacionária, aplica-se então um modelo ARMA(p, q), ou seja, um modelo ARMA no qual X_t é substituído pela sua d -ésima diferença $\nabla^d X_t$ é capaz de descrever alguns tipos de séries não estacionárias. Denotando a série diferenciada por

$$W_t = \nabla^d X_t = (1 - B)^d X_t$$

O processo autorregressivo integrado de médias móveis, denotado $ARIMA(p, d, q)$, é dado por

$$W_t = \alpha_1 W_{t-1} + \dots + \alpha_p W_{t-p} + Z_t + \beta_1 Z_{t-1} + \beta_2 Z_{t-2} + \dots + \beta_q Z_{t-q}$$

Ou equivalentemente,

$$\phi(B)(1 - B)^d X_t = \theta(B) Z_t$$

Dessa forma, tem-se o modelo $ARIMA(p, d, q)$, o qual corresponde então a um processo autorregressivo integrado com média móvel onde d representa d -ésima diferença da série temporal. Estes modelos também são conhecidos como modelos de séries temporais Box-Jenkins. Mais recentemente, foram elaborados os modelos da classe SARIMA para dados sazonais e o ARFIMA (ou ARIMA fracionários) utilizado para analisar séries com memória longa.

Geralmente na modelagem estocástica de vazões anuais utilizam-se os modelos autoregressivos, $ARIMA(p, 0, 0)$ ou $AR(p)$. O modelo autorregressivo $AR(p)$, o qual é apresentado na Equação 3.16 (CHATFIELD, 2000).

$$X_t = \alpha_1 X_{t-1} + \alpha_2 X_{t-2} + \dots + \alpha_p X_{t-p} + Z_t \quad 3.16$$

Usando o operador autorregressivo B , definido como $B^n X_t = X_{t-n}$, o modelo $AR(p)$ pode ser escrito de forma mais sucinta (Equação 3.17).

$$\phi(B) X_t = Z_t \quad 3.17$$

Onde B é um polinômio de ordem p :

$$\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p \quad 3.18$$

Como B é um operador, as propriedades algébricas de ϕ devem ser investigadas examinando-se as propriedades de $\phi(B)$, donde x denota uma variável complexa. Pode-se mostrar que a Equação 3.17 possui uma única solução estacionária, desde que as raízes de $\phi(B) = 0$ se situem fora do círculo unitário, sendo a solução expressa na Equação 3.19, a qual é válida para algumas constantes ψ_t , tal que $\sum |\psi_j| < \infty$.

$$X_t = \sum_{j \geq 0}^{\infty} \psi_j Z_{t-j} \quad 3.19$$

O modelo AR(p) mais simples é o caso de primeira ordem ($p = 1$), onde a Equação 3.16 se restringe a Equação 3.20.

$$X_t = \alpha X_{t-1} + Z_t \quad 3.20$$

Onde o primeiro termo (αX_{t-1}) possui caráter determinístico, possuindo dependência com os dados já observados para a variável em questão, e o segundo (Z_t) é uma variável aleatória estacionária, independente (sem autocorrelação), normalmente distribuída (ruído branco), ou seja, é a componente estocástica do modelo AR(1). Na Equação 3.20, α é um parâmetro do modelo e quando estimado pelas equações de Yule-Walker representa o coeficiente de autocorrelação de atraso 1 (*lag* 1), ρ_1 , ou seja, indica que os dados de um ano da variável possuem autocorrelação com o ano seguinte ou anterior.

Na Equação 3.20, padronizando X_t e representando a variável padronizada por Y_t tem-se a Equação 3.21.

$$Y_t = \rho_1 Y_{t-1} + Z_t \quad 3.21$$

Como $Z_t = Y_t - \rho_1 Y_{t-1}$ é uma variável aleatória estacionária, independente, normalmente distribuída com média zero e variância σ_z^2 , fazendo algumas simplificações obtém-se:

$$E[Z_t] = 0$$

$$VAR[Z_t] = \sigma_z^2 = (1 - \rho_1^2) \sigma_y^2$$

Como Y_t é uma variável normal padrão:

$$\sigma_y^2 = 1$$

Assim:

$$VAR[Z_t] = \sigma_z^2 = (1 - \rho_1^2)$$

Sendo ε_t uma variável normal padrão, $\varepsilon_t \sim N(0,1)$, tem-se:

$$\varepsilon_t = \frac{Z_t - E[Z_t]}{\sqrt{\sigma_z^2}} = \frac{Z_t - 0}{\sqrt{1 - \rho_1^2}}$$

Assim:

$$Z_t = \varepsilon_t \sqrt{1 - \rho_1^2}$$

Substituindo na Equação 3.21:

$$Y_t = \rho_1 Y_{t-1} + \varepsilon_t \sqrt{1 - \rho_1^2}$$

Como Y_t é uma variável padrão:

$$Y_t = \frac{X_t - \bar{x}}{\sigma_x}$$

Com isso, o modelo AR(1) pode ser escrito pela Equação 3.22.

$$X_t = \bar{x} + \rho_1 (X_{t-1} - \bar{x}) + \sigma_x \varepsilon_t \sqrt{1 - \rho_1^2} \quad 3.22$$

Em que,

$\bar{x}$ é a média dos dados observados da série temporal X_t ;

ρ_1 é o coeficiente de autocorrelação *lag* 1 da série temporal X_t ;

σ_x é o desvio padrão da série temporal X_t ;

ε_t é a componente aleatória gerada a partir da distribuição Normal com média zero e variância igual a 1.

Os procedimentos para o ajuste de modelos de séries temporais do tipo Box-Jenkins são os seguintes: identificação da estrutura do modelo; estimativa e calibração do modelo e; validação do modelo.

A identificação da estrutura do modelo é efetuada analisando o gráfico da série temporal, por exemplo, de vazões anuais. Neste gráfico é possível identificar *outliers*, valores faltantes e quebra estrutural nos dados. Variáveis não estacionárias podem apresentar uma tendência pronunciada e/ou uma mudança na variância. Uma ferramenta bastante utilizada na identificação da ordem do modelo autorregressivo é o exame da função de autocorrelação (ACF) e da função de autocorrelação parcial (PACF). No caso de modelos AR(1) com o coeficiente α positivo, a ACF apresenta um decaimento exponencial e a PACF é igual a zero para *lags* maiores que 1.

A estimação dos parâmetros dos processos autorregressivos pode ser efetuada pelo método dos mínimos quadrados, pelo método dos momentos, pelo método da maxiverossimilhança e pelas equações de Yule-Walker. Melhores detalhes sobre esses métodos são encontrados em Salas *et al.* (1980) e Chatfield (2000).

Como podem ser ajustados vários modelos, é necessária a aplicação de uma metodologia que possibilite a seleção do modelo mais adequado. Uma forma de selecionar um entre alguns modelos existentes é empregar os chamados critérios de informação que levam em conta não apenas a qualidade do ajuste, mas, também, penalizam a inclusão de parâmetros extras. Assim, um modelo com mais parâmetros pode ter um ajuste melhor, mas não necessariamente será preferível em termos de critério de informação. Dentre os critérios mais utilizados tem-se o Critério de Akaike (AIC) e o Critério de Informação Bayesiano (BIC). Mais detalhes podem ser encontrados em Chatfield (2000).

Ao se utilizar um modelo estocástico, como o AR(1), na sua validação é importante avaliar se as séries sintéticas geradas a partir do modelo apresentam características estatísticas semelhantes às da série original (média, variância e autocorrelação). Além disso, também se devem avaliar os resíduos (e) das séries temporais, ou seja, os erros de previsão de um passo a frente, de acordo com a Equação 3.23.

$$e_t = X_t - Y_t \quad 3.23$$

Em que:

X_t é o valor da vazão da série sintética no ano t ;

Y_t é o valor correspondente ao mesmo ano na série original.

De acordo com Chatfield (2000), se os dados se ajustarem bem ao modelo, então os resíduos devem formar uma série aleatória com média próxima de zero. Além disso, a autocorrelação da série de resíduos deve ser analisada para se verificar se os dados se ajustam bem ao modelo, devendo esta ser significativa e próxima da original.

Anteriormente foram apresentadas as fontes de incertezas na análise de determinada variável (Tópico 3.4.1), por isso, métodos de abordagem estocástica estão sendo desenvolvidos em algumas áreas relacionadas ao manejo de recursos hídricos, como nos trabalhos apresentados na **Tabela 3.6**.

Tabela 3.6 – Utilização de abordagem estocástica na simulação de transporte de sedimentos

Autor	Objetivo	Modelo estocástico
Moll, Schilperoort e De Leeuw (1987)	Avaliaram vários métodos estatísticos para analisar formas de leito de rios aluviais	AR (2)
Wu e Shen (1999)	Atualização dos parâmetros de um modelo de arraste de sedimento	Cadeia de Markov Monte Carlo
Freitas (2001)	Comparação entre modelos estocásticos para geração sintética de vazões	AR(1), GAR(1), ARR, PAR(1), Two-tier, Método dos Fragmentos e Modelo de Desagregação
Bialik (2011)	Desenvolvimento de um modelo teórico de grãos não uniformes em um fluxo turbulento de canal aberto	Simulação de Monte Carlo
Costa, Damázio e Raupp (2014)	Avaliar os volumes de espera calculados no estudo de prevenção de cheias e as regras de operação de reservatórios propostas a partir da análise estatística de variáveis associadas ao controle de cheias.	OPCHENS
Figueiredo e Blanco (2014)	Previsões de vazão e níveis de água médios mensais para a bacia do rio Tapajós	ARIMA

Tabela 3.6 – Utilização de abordagem estocástica na simulação de transporte de sedimentos (continuação)

Autor	Objetivo	Modelo estocástico
Oh, Tsai e Choi (2015)	Proposição de uma abordagem estocástica do transporte de sedimento para quantificar a incerteza associada à estimativa da concentração de sedimentos	Oh, Tsai e Choi
Câmara <i>et al.</i> (2016)	Desenvolvimento de um modelo hidrológico estocástico para a previsão diária de nível fluviométrico do rio Tocantins	ARIMA

Observando os trabalhos apresentados na **Tabela 3.6** sobre modelos estocásticos, tem-se que em nenhum o processo do assoreamento de reservatórios foi abordado, pois ainda são raros esses estudos. Na literatura foram encontrados três trabalhos mais recentes sobre o tema, os quais estão resumidos abaixo. Entretanto, ressalta-se que nenhum deles desenvolveu o que está sendo proposto aqui nessa tese de doutorado, que é um modelo estocástico já existente, o qual será acoplado, via código computacional, a um determinístico amplamente utilizado, sendo validado a partir dos dados de um modelo físico.

No trabalho de Laquini (2009) é descrito um modelo matemático tridimensional baseado numa formulação unidimensional (modelo quase-tridimensional), o qual é usado para simular o processo de assoreamento no reservatório de água da Barragem John Martin, Colorado, EUA. O autor apresenta o método de simulação de Monte Carlo como uma ferramenta responsável por levar em consideração o caráter estocástico do problema, em conjunto com a técnica de amostragem hipercubo latino. Os resultados mostraram que o método de Monte Carlo permitiu descrever as distribuições de probabilidade e os momentos estatísticos das respostas, como, por exemplo, a área de sedimentos depositados em cada seção transversal do reservatório, e forneceu informações importantes tanto para o projeto quanto para a operação do reservatório.

Adam *et al.* (2015) estimaram a sedimentação futura no reservatório Sidi Yacoub no norte da Argélia usando uma abordagem estocástica. Segundo os autores, a grande novidade do trabalho é a abordagem estocástica desenvolvida para caracterizar as vazões de montante e jusante ao reservatório, sendo essa uma abordagem nova, a qual permite um alto nível de detalhamento na reprodução da variabilidade das séries anuais. Assim, a estimativa para assoreamentos futuros pôde ser executada numa abordagem verdadeiramente estocástica,

tendo como premissa a estacionariedade das distribuições estatísticas das vazões ao longo de todo o período analisado.

Estigoni (2016) discutiu a incerteza na estimativa do assoreamento devido ao aporte de sedimentos, o qual é geralmente realizado por meio da relação da descarga sólida com a vazão (curva-chave de sedimentos), sendo esta uma relação expressada por uma equação do tipo potência. Segundo o autor, muitas vezes a curva-chave de sedimentos calibrada pode não representar bem a realidade, visto que a maioria do transporte de sedimentos se dá em eventos de cheia, fazendo a ressalva que medições durante esses eventos são importantes, porém tendem a não acontecer. Foram montados quatro cenários de vazões variando em torno de uma mesma média, sendo a diferença entre os cenários a amplitude de variação das vazões. Os resultados apresentados demonstraram que quanto maior a amplitude de variabilidade da vazão, maior o aporte de sedimentos, mesmo se tendo uma vazão média constante. O autor também apresentou que quanto maior o expoente da curva-chave de sedimentos, maior é a influência da variabilidade da vazão no cálculo da descarga sólida.

3.5 Modelagem física em Hidráulica

Em determinadas situações a decisão pelo uso de um modelo matemático, seja determinístico ou estocástico, deve ser cuidadosamente analisada. À medida que o sistema que está sendo simulado torna-se mais complexo, muitas premissas de trabalho acabam sendo estimadas, visto que o modelo pode não conseguir representar todas as variáveis do processo, o que pode afastar o resultado simulado do real. Além disso, a falta de dados disponíveis para o local de interesse pode impossibilitar a calibração das formulações de fluxo e de transporte de sedimentos, o que torna a confiabilidade das previsões da modelagem matemática questionável (MORAN *et al.*, 2013). Assim, para contornar essas situações, frequentemente recorre-se a modelagem física para simular os sistemas hidráulicos. O interesse da utilização de modelos hidráulicos reside assim 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 mais reduzidas 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, a qual será descrita a seguir, para se estabelecer os princípios básicos a serem obedecidos ao se projetar, construir e operar o modelo físico.

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, na maioria das vezes não se consegue alcançar a semelhança da escala do número de Froude e à de Reynolds ao mesmo tempo, sendo necessário haver um relaxamento em uma delas, o que, se não bem estudado, pode provocar que o modelo não represente a realidade do protótipo.

3.5.1 Teoria da semelhança hidráulica

Os conceitos de modelagem e semelhança introduzidos neste capítulo foram baseados no livro de Julien (2002).

A teoria da semelhança objetiva o estabelecimento de relação de transferência entre os modelos e os protótipos, bem como do tipo de relações entre as diversas grandezas intervenientes em qualquer fenômeno físico. Ela se fundamenta, entretanto, tanto no bom conhecimento da natureza física dos fenômenos intervenientes, como no domínio dos princípios da análise dimensional.

A semelhança entre modelos físicos e os protótipos, pode ser alcançada segundo três aspectos básicos: semelhança geométrica, semelhança cinemática e semelhança dinâmica. A seguir, essas semelhanças serão descritas, sendo que será usado o subscrito “m” para se referir ao modelo, “p” para o protótipo e “r” a razão entre o modelo e o protótipo.

3.5.1.1 Semelhança geométrica

A semelhança geométrica implica na semelhança de forma entre o modelo e o protótipo, sendo que ela envolve escalas pertinentes às grandezas de comprimento (Equação 3.24), áreas (Equação 3.25) e volumes (Equação 3.26).

$$\frac{L_m}{L_p} = L_r \quad 3.24$$

$$\frac{A_m}{A_p} = \frac{L_m^2}{L_p^2} = L_r^2 \quad 3.25$$

$$\frac{Vol_m}{Vol_p} = \frac{L_m^3}{L_p^3} = L_r^3 \quad 3.26$$

Em que,

L é comprimento;

A é área;

Vol é volume.

A escala de comprimento pode ser escrita no sistema cartesiano (x , y e z), onde:

$$\frac{x_m}{x_p} = \frac{y_m}{y_p} = \frac{z_m}{z_p} = L_r \quad 3.27$$

Sendo z a componente vertical, x a componente horizontal longitudinal e y a componente horizontal lateral do modelo.

Quando as escalas verticais e laterais não são idênticas, tem-se um modelo denominado Distorcido, sendo que o fator de distorção é obtido através da razão de y_r/z_r . Já quando as escalas verticais e longitudinais são diferentes, o modelo é chamado de Inclinado, sendo a sua declividade (S) apresentada na Equação 3.28.

$$\frac{z_r}{x_r} = S_r \quad 3.28$$

Em um modelo distorcido, a área transversal da seção está apresentada na Equação 3.29, enquanto na Equação 3.30 está a área em planta da seção.

$$A_{xr} = y_r z_r \quad 3.29$$

$$A_r = y_r x_r \quad 3.30$$

O volume para modelo distorcido é apresentado na Equação 3.31.

$$Vol_r = y_r x_r z_r \quad 3.31$$

A necessidade de distorcer modelos se deve às seguintes razões:

- a) por razões de ordem prática – Limitações de espaço físico e razões de custo. É o caso da modelagem de cursos de água extensos (dimensões horizontais grandes), com pequenas profundidades (dimensões verticais reduzidas) que impediriam que um modelo não distorcido fosse viável;
- b) por razões técnicas de necessidade de permanecer dentro dos limites de aplicação da lei física que rege o fenômeno. É o caso de estudos de transporte de sedimentos, onde se adota uma escala vertical relativa aos diâmetros dos grãos diferentes das outras escalas de comprimento.
- c) pode ainda ocorrer o caso em que a própria lei da física exija a distorção, como são os casos de modelos fluviais de fundo móvel, onde se estudam problemas de morfologia fluvial.

3.5.1.2 Semelhança cinemática

A semelhança cinemática implica na semelhança de movimento, ou seja, se refere a parâmetros que envolvem comprimento e tempo, isto é, velocidade (v), aceleração (a), viscosidade cinemática (ν), entre outras. Na semelhança cinemática existe uma razão constante entre a velocidade de partículas homólogas, que se deslocam segundo trajetórias semelhantes, em direção e sentido. Para que isso ocorra, as linhas de corrente estarão semelhantemente orientadas, implicando que os escoamentos cinematicamente semelhantes devem ser geometricamente semelhantes e que o regime de escoamento nos modelos e protótipos deve ser o mesmo. A semelhança cinemática envolve as escalas apresentadas nas Equações 3.32 a 3.35.

$$\frac{T_m}{T_p} = T_r \quad 3.32$$

$$\frac{v_m}{v_p} = V_r = \frac{L_m/T_m}{L_p/T_p} = \frac{L_r}{T_r} \quad 3.33$$

$$\frac{Q_m}{Q_p} = Q_r = \frac{L_m^3/T_m}{L_p^3/T_p} = \frac{L_r^3}{T_r} \quad 3.34$$

$$\frac{a_m}{a_p} = a_r = \frac{V_m/T_m}{V_p/T_p} = \frac{V_r}{T_r} = \frac{L_r}{T_r^2} \quad 3.35$$

3.5.1.3 Semelhança dinâmica

Semelhanças dinâmicas sugerem um mesmo comportamento dinâmico dos fluidos, ou seja, se referem a parâmetros que envolvem força (F) e massa (M), como a massa específica (ρ), o peso específico (γ) e a viscosidade dinâmica (μ). Para que haja semelhança dinâmica, as trajetórias descritas pelas partículas homólogas são geometricamente semelhantes e as forças individuais agem em elementos de fluidos correspondentes de forma que haja a mesma razão de forças em ambos os sistemas. Forças individuais agindo num elemento de fluido devem ser consequências de uma força do corpo, como o peso ou campo gravitacional, ou forças superficiais resultadas de gradientes de pressão, tensão de viscosidade ou tensão superficial. A força inercial resultante necessita que a força poligonal seja geometricamente similar.

As escalas dessa semelhança estão apresentadas nas Equações 3.36 a 3.38.

$$\frac{F_m}{F_p} = F_r \quad 3.36$$

$$\frac{M_m}{M_p} = M_r \quad 3.37$$

Como:

$$F_r = M_r a_r$$

$$F_r = M_r \frac{L_r}{T_r^2} \quad 3.38$$

As seis forças encontradas nos fenômenos dos escoamentos são as forças de inércia, de viscosidade, de gravidade, de pressão, de tensão superficial e de compressão elástica, sendo que os efeitos gravitacionais e de viscosidade são, respectivamente, descritos pelos números de Froude (Equação 3.39) e número de Reynolds (Equação 3.40).

$$Fr_r = \frac{V_r}{\sqrt{g_r L_r}} \quad 3.39$$

$$Re_r = \frac{V_r z_r}{\nu_r} \quad 3.40$$

Em que,

g é a aceleração da gravidade;

ν é viscosidade cinemática do fluido.

Em modelos hidráulicos, os números de Reynolds e Froude iguais à unidade podem apenas ser simultaneamente satisfeitos quando:

$$\frac{V_r^2}{z_r} = V_r z_r$$

Sendo que para isso ocorrer $V_r = z_r = 1$. Logo, a semelhança exata de todas as razões de força em modelos hidráulicos é estritamente impraticável, pois demandaria a construção da estrutura real. Obviamente, forças que são desprezíveis comparadas com outras não afetarão o polígono de força. Portanto, na modelagem hidráulica deve-se analisar as componentes de força que são dominantes no sistema. Assim, podem-se negligenciar os efeitos de forças não significativas, adotando-se critérios de semelhança baseados apenas nas forças relevantes, sem prejuízo da qualidade dos resultados do modelo.

Na Hidráulica, as forças gravitacionais e viscosas quase sempre são as mais importantes. Portanto, deve-se determinar se a gravidade ou a viscosidade é o parâmetro físico predominante para determinar os parâmetros de escala adequadamente. Essa estratégia é razoável enquanto um dos termos, gravitacional ou viscosidade, podem ser desprezados.

Quando as forças de inércia e de viscosidade são consideradas como as únicas a regerem o movimento da água, o número de Reynolds deve ser o mesmo no modelo e no protótipo. Se for usado o mesmo fluido no modelo e protótipo, então $\mu_r = \rho_r = 1$, assim as escalas para as diversas grandezas físicas podem ser estabelecidas em função do número de Reynolds, sendo essas escalas apresentadas na **Tabela 3.7**.

Tabela 3.7 - Razões de escala conforme lei do número de Reynolds

Semelhança geométrica	Semelhança cinemática	Semelhança dinâmica
Comprimento L_r	Tempo L_r^2	Força 1
Área L_r^2	Velocidade L_r^{-1}	Massa L_r^3
Volume L_r^3	Aceleração L_r^{-3}	Trabalho L_r
	Vazão L_r	Potência L_r^{-1}
	Velocidade angular L_r^{-2}	
	Aceleração angular L_r^{-4}	

Em canais abertos, efeitos gravitacionais são tipicamente predominantes e a resistência ao escoamento é pouco afetada pela viscosidade enquanto o escoamento for hidraulicamente rugoso. Isso quer dizer que para os estudos a serem conduzidos em modelo, o critério de semelhança de Froude é o mais indicado. Se for usado o mesmo fluido no modelo e protótipo ($\rho_r = 1$), os quais são submetidos ao mesmo campo gravitacional de forças ($g_r = 1$), as razões ou escalas para as diversas grandezas físicas podem ser estabelecidas em função do número de Froude, indicadas na **Tabela 3.8**.

Tabela 3.8 - Razões de escala conforme lei do número de Froude

Semelhança geométrica	Semelhança cinemática	Semelhança dinâmica
Comprimento L_r	Tempo $L_r^{1/2}$	Força L_r^3
Área L_r^2	Velocidade $L_r^{1/2}$	Massa L_r^3
Volume L_r^3	Aceleração 1	Trabalho L_r^4
	Vazão $L_r^{5/2}$	Potência $L_r^{7/2}$
	Velocidade angular $L_r^{-1/2}$	
	Aceleração angular L_r^{-1}	

3.5.2 Modelos físicos com leitos móveis

Modelos reduzidos com leitos móveis são utilizados quando o transporte de sedimentos é significativo. Exemplos típicos incluem erosões localizadas em pilares de pontes e abaixo de vertedouros, soleiras, barragens, reservatório de sedimentação, entre outros. Segundo Julien (2002), em escoamento hidraulicamente rugoso, o transporte de sedimento é significativo quando o número de Shields (τ_*) é maior que 0,06, sendo esse um parâmetro utilizado na Hidráulica para se determinar o início do transporte de sedimentos.

De acordo com Baptista e Coelho (2010), a equação de Shields (Equação 3.41) aborda a ação da água, promotora do escoamento, caracterizada pela tensão de arraste, frente à força estabilizadora caracterizada pelo peso submerso das partículas.

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)d} \quad 3.41$$

Em que,

$\bar{\tau}$ é a tensão de arraste adimensional;

τ_0 é a tensão de arraste do leito, em “N/m²”;

γ é o peso específico da água, em “N/m³”;

γ_s é o peso específico dos sedimentos, em “N/m³”;

d é o diâmetro médio dos sedimentos, em “m”.

O ábaco de Shields é apresentado na **Figura 3.7**, sendo que para sua utilização também é necessário o cálculo do número de Reynolds do grão (Re_{*r}) (Equação 3.42). Tem-se que quando os valores dos parâmetros tensão de arraste adimensional e número de Reynolds do grão estão sob a curva, tem-se que as partículas do leito estão em repouso. Já quando estão sobre a curva, ocorre movimentação dessas partículas.

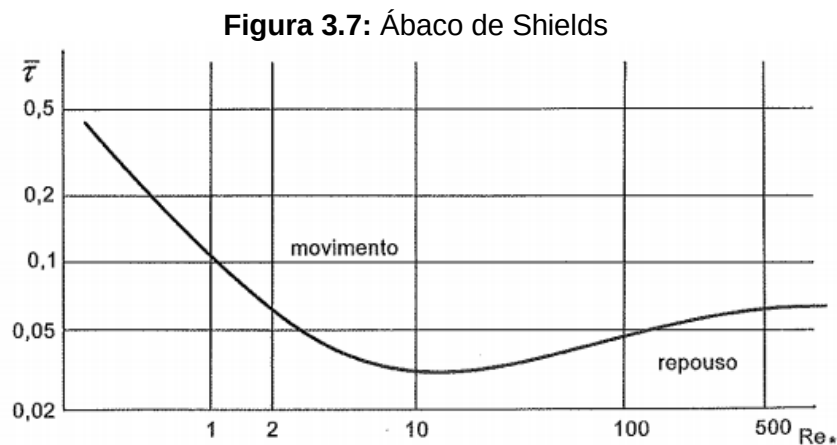
$$Re_{*r} = \frac{d_{sr} v_s}{\nu} \quad 3.42$$

Em que,

d_{sr} é o diâmetro da partícula, em “m”;

v_s é a velocidade da partícula, em “m/s”;

ν é a viscosidade cinemática do fluido, em “m²/s”.



Fonte: Baptista e Coelho, 2010.

Para modelos de leitos móveis, a semelhança no transporte de sedimentos é obtida quando o número de Shields e o diâmetro adimensional do grão (d_*) são similares em ambos os sistemas e iguais a unidade, isto é, $\tau_{*r} = d_{*r} = 1$. Essas condições implicam que o número de Reynolds do grão (Re_{*r}) (Equação 3.42) deve ser igual a 1, pois se tem que $\tau_* d_*^3 = Re_*^2$.

Existem quatro critérios de semelhança que devem ser satisfeitos para modelos de leitos dinâmicos: (i) semelhança de Froude; (ii) resistência, por exemplo, Manning; (iii) diâmetro adimensional do grão; e (iv) número de Shields. Esses quatro critérios devem ser satisfeitos simultaneamente em cursos de água com fluxo variado e transporte de sedimentos. Assim, esses critérios envolvem sete parâmetros: velocidade (v_r), aceleração da gravidade (g_r), comprimento vertical (z_r), diâmetro da partícula (d_{sr}), inclinação (S_r), densidade do sedimento submerso ($(G - I)_r$), e viscosidade cinemática do fluido (ν_r).

Em modelos hidráulicos com $g_r = \nu_r = 1$ e quatro critérios de semelhança, citados no parágrafo anterior, tem-se apenas um grau de liberdade, por exemplo, a escala vertical de comprimento do modelo z_r .

As semelhanças em leitos móveis são ditas completas, com um grau de liberdade, quando os quatro critérios de semelhança são satisfeitos simultaneamente. Essa semelhança implica que a direção jusante do escoamento é a dominante e a aceleração nas direções lateral e vertical são negligenciáveis. Portanto, ela é essencialmente adequada para processos de transporte de sedimentos em uma dimensão.

Para o caso em que as forças gravitacionais são as dominantes, ou seja, o critério de Froude será obedecido, Julien (2002) apresenta as relações de escalas satisfazendo os quatro critérios de semelhanças, as quais estão na **Tabela 3.9**.

Tabela 3.9 - Escalas para modelos físicos distorcidos e de leitos móveis

Semelhanças	Escalas	Escalas para $m = 1/6$
	Geométrica	
Vertical (z_r)	z_r	z_r
Largura (y_r)	y_r	y_r
Extensão (x_r)	$z_r \left(\frac{1 + 4m}{1 + m} \right)$	$z_r^{1,43}$
Diâmetro da partícula (d_{sr})	$z_r \left(\frac{2m - 1}{2 + 2m} \right)$	$z_r^{-0,286}$
Área (A_r)	$y_r z_r$	$z_r y_r$
Volume (Vol_r)	$y_r z_r \left(\frac{2 + 5m}{1 + m} \right)$	$y_r z_r^{2,43}$

Tabela 3.9 - Escalas para modelos físicos distorcidos e de leitos móveis (continuação)

Cinemática		
Tempo (escoamento) (t_r)	$z_r \left(\frac{1+7m}{2+2m} \right)$	$z_r^{0,928}$
Tempo (leito) (t_{br})	$z_r \left(\frac{2+5m}{1+m} \right)$	$z_r^{2,428}$
Velocidade (V_r)	$z_r^{1/2}$	$z_r^{1/2}$
Velocidade cisalhante (u_{*r})	$z_r \left(\frac{1-2m}{2+2m} \right)$	$z_r^{0,286}$
Velocidade de decantação (ω_r)	$z_r \left(\frac{1-2m}{2+2m} \right)$	$z_r^{0,286}$
Descarga líquida (Q_r)	$y_r z_r^{1/2}$	$y_r z_r^{1/2}$
Descarga sólida (q_{br})	1	1
Dinâmica		
Massa (M_r)	$y_r z_r \left(\frac{2+5m}{1+m} \right)$	$y_r z_r^{2,43}$
Pressão (p_r)	z_r	z_r
Tensão cisalhante (τ_r)	$z_r \left(\frac{1-2m}{1+m} \right)$	$z_r^{0,57}$
Força (F_r)	$y_r z_r \left(\frac{2+5m}{1+m} \right)$	$y_r z_r^{2,43}$
Adimensionais		
Declividade (S_r)	$z_r \left(\frac{-3m}{1+m} \right)$	$z_r^{-0,43}$
Darcy-Weisbach (f_r)	$z_r \left(\frac{-3m}{1+m} \right)$	$z_r^{-0,43}$
Número de Froude (Fr_r)	1	1
Número de Reynolds (Re_r)	$z_r^{3/2}$	$z_r^{3/2}$
Número de Shields (τ_{*r})	1	1
Número de Reynolds do grão (Re_{*r})	1	1
Diâmetro adimensional do grão (d_{*r})	1	1
Densidade do sedimento submerso ($G-1)_r$)	$z_r \left(\frac{3-6m}{2+2m} \right)$	$z_r^{0,857}$

Fonte: Julien, 2002.

Como um caso particular, de acordo com a relação de Strickler entre o coeficiente de Manning (n) e o diâmetro da partícula do leito, tem-se que $n \approx d_s^{1/6}$, assim, o expoente de resistência ao escoamento (m) da equação de Manning-Strickler corresponde à $m = 1/6$.

Como apresentado anteriormente, um dos critérios para modelos de leitos dinâmicos é o de semelhança no diâmetro adimensional ($d_{*r} = 1$) do grão. Para esse critério, tem-se a Equação 3.43, que estabelece a relação entre o diâmetro do sedimento e a densidade da partícula submersa.

$$d_{sr}^3 = \frac{1}{(G-1)_r} \quad 3.43$$

Assim, a partir dessa relação, observa-se que modelos reduzidos requerem sedimentos leves quando partículas grandes são utilizadas. Um exemplo de material que pode ser utilizado é a borracha. Campello (2017) apresentou resultados do estudo das características físicas e hidrodinâmicas do grão de borracha de pneus moído como alternativa viável para utilização em modelos reduzidos, representando o comportamento dos grãos de areia, material presente em maior proporção no processo de transporte e deposição de sedimentos ao longo de um reservatório. Em laboratório, utilizando um canal acrílico, o autor analisou a velocidade de queda das partículas de borracha e o seu início de movimento. O autor concluiu que os resultados foram satisfatórios, cumprindo os objetivos de uma análise exploratória da borracha como material substitutivo da areia, no âmbito da velocidade de queda e do início do movimento, para uso em modelos físicos de fundo móvel.

3.5.3 Modelagem física da dinâmica de sedimentos

Modelos físicos de rios existem desde pelo menos 1875, quando Louis Jerome estabeleceu um modelo do rio Garonne em Bordeaux (JULIEN, 2002). Esses modelos são normalmente construídos para testar diversas estruturas de engenharia em rios e para conduzir experimentos em condições de laboratório controladas. Por isso, na literatura, vários trabalhos são apresentados, os quais utilizaram a modelagem física para estudar o complexo processo de transporte de sedimentos.

Na **Tabela 3.10** estão listados trabalhos que utilizaram modelo físico para estudar o transporte de sedimentos, sendo que estão apresentadas as características do modelo físico, os fenômenos examinados e se existe ou não comparação modelo-protótipo.

Tabela 3.10 - Resumo de trabalhos que empregaram modelos físicos para estudar a dinâmica de sedimentos

Referência	Característica do modelo	Fenômeno investigado	Comparação modelo-protótipo
Song e Yang (1979)	Distorcido. Areia uniforme. Número Froude exagerado por um fator de 1,9.	Manutenção de condições de navegação em uma confluência de rio.	Sim
Young e Warburton (1996)	Não distorcido. Material natural. O fluxo é turbulento no modelo.	Morfologia e sedimentação em rios com cascalhos.	Sim
Healey (1997)	Não distorcido. Mistura de areia e cascalho.	Avaliação de métodos para a mitigação da erosão em bancos de sedimentos.	Sim

Tabela 3.10 - Resumo de trabalhos que empregaram modelos físicos para estudar a dinâmica de sedimentos (continuação)

Referência	Característica do modelo	Fenômeno investigado	Comparação modelo-protótipo
Davinroy <i>et al.</i> (1999); Gaines e Maynard (2001); Rodgers <i>et al.</i> (2003); Maynard (2006)	Distorcido. Partícula leve (plástico).	Projeto de alternativas de controle de canal (diques).	Sim
Wei <i>et al.</i> (2001)	Modelos distorcidos e não distorcidos foram testados. Areia uniforme e também partículas leves foram testadas.	Avaliação da carga de fundo.	Não
Woidt <i>et al.</i> (2001)	Não distorcido. Solo coesivo para o banco e areia fina de sílica para o leito.	Sedimentação com a ingestão de bomba.	Não
Waldron (2008)	Distorcido. Partículas leves (plásticos sintéticos).	Eficiência dos desvios dos sedimentos para a reabilitação de zonas úmidas degradadas.	Não
Marr <i>et al.</i> (2007)	Distorcido. Mistura de areia grosseira e fina.	Taxa e tempo de remobilização dos sedimentos armazenados após a remoção da barragem.	Não
Bennett <i>et al.</i> (2008)	Distorcido. Areia de tamanho uniforme.	Uso da vegetação para restauração do padrão sinuoso do rio.	Não
Bromley (2008)	Distorcido. Mistura de areia e cascalho. Fluxo supercrítico.	Alterações da morfologia a jusante devido à remoção da barragem.	Sim
Mefford <i>et al.</i> (2008)	Não distorcido. Mistura de areia e cascalho.	Desempenho de um <i>bypass</i> de alto fluxo para melhorar o transporte de carga de leito em uma estrutura desvio.	Não
Pugh (2008)	Distorcido. Areia uniforme.	Projeto de alternativas de controle de canal para limitar a ingestão de sedimentos em uma barragem de desvio planejada.	Não
Waldron (2008)	Distorcido. Areia.	O propósito do estudo foi determinar até que ponto os resultados experimentais do modelo podiam ser considerados quantitativos	Sim

Tabela 3.10 - Resumo de trabalhos que empregaram modelos físicos para estudar a dinâmica de sedimentos (continuação)

Referência	Característica do modelo	Fenômeno investigado	Comparação modelo-protótipo
Armanini <i>et al.</i> (2010)	Não distorcido. Partículas leves (plásticos), tamanho de partícula uniforme.	Projeto de <i>groynes</i> para melhorar a condição de navegação.	Não
Ho <i>et al.</i> (2010)	Distorcido. Partículas leves (carvão esmagado). Tamanho de partícula uniforme. Fluxo subcrítico.	Exclusão de sedimentos em uma estrutura de admissão de água.	Não
Mefford e Gill (2010)	Distorcido. Partículas leves (carvão), tamanho uniforme.	Avaliação de diferentes trabalhos de restauração para criação de habitat de águas rasas ao longo de um desvio em curva.	Não
Simonett e Weitbrecht (2011)	Não distorcido. Mistura de areia e cascalho.	Concepção e otimização de trabalhos de treinamento para defesa de inundações.	Não
Bieri <i>et al.</i> (2012)	Distorcido. Mistura não uniforme de areia	Estudo de caso em uma hidrelétrica na Suíça	Não
Moran <i>et al.</i> (2013)	Não distorcido. Areia	Investigação de diferentes estratégias no fornecimento de sedimentos para o Velho Rhine	Não

Fonte: Adaptado de Abderrezzak *et al.* (2014).

Na literatura nacional, os únicos trabalhos encontrados que utilizaram modelos físicos foram: Chella (2002) e Souza (2006). Ressalta-se que isso não significa que esses trabalhos não sejam feitos, pelo contrário, há laboratórios que realizam esse tipo de estudo, como o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, o Laboratório de Hidráulica da Universidade de São Paulo e o Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza (CEHPAR). Porém, na maioria das vezes os trabalhos não são publicados, pois são projetos realizados como consultorias.

Chella (2002) construiu o modelo reduzido da Usina Hidrelétrica Melissa baseado no critério de semelhança de Froude. A usina tomada como estudo de caso apresentava um problema real de assoreamento. A escala do modelo foi de 1:50 e como material móvel do leito foi utilizada a serragem de imbuia selecionada e tratada. O modelo reduzido reproduziu um trecho do reservatório de aproximadamente 6000 m. A alimentação de água do modelo foi feita através de um sistema de recalque que permite simular no modelo vazões compreendidas entre 0,10 e

5,55 L/s, sendo os níveis de água ao longo do modelo lidos por meio de réguas linimétricas implantadas em locais de interesse do estudo. Para a alimentação de sedimentos no modelo foi desenvolvido um dispositivo capaz de adicionar sedimento ao fluxo de água de forma precisa. Este sistema de alimentação de sedimentos foi composto por uma caixa de madeira de 0,3m x 0,3m e 0,6m de altura, que têm em seu interior uma haste (rosca sem fim) que era movimentada através de um motor de passo controlado por computador. Como não havia dados sedimentométricos disponíveis do rio Melissa, a autora estimou um valor alto para a descarga sólida, tendo como base os relatos de pessoas ligadas à usina e fotos mostrando o grau de assoreamento do reservatório, sendo adotado o valor base de 2000 mg/L no protótipo, o que resulta numa descarga sólida de 0,00726 L/s no modelo. A vazão imposta nos ensaios correspondeu a 60% da vazão máxima que passa pelo vertedouro da usina, o que resulta em 96,30 m³/s, que, a partir da escala de vazões, equivale a 5,45 L/s no modelo. O ensaio de lançamento de material sólido no modelo foi de 24 h, o que corresponde a 84h51min no protótipo. A autora concluiu que o lançamento do material sólido através do alimentador de sedimentos não resultou como desejado. Esperava-se a ocorrência de transporte por arraste, mas o material se depositou em forma de uma grande duna, interrompendo o processo de transporte para jusante. Foi percebido, através de registros fotográficos que, no protótipo, o assoreamento deve ter ocorrido através da sedimentação do material transportado em suspensão, já que não se notava a presença de dunas visíveis no reservatório, enquanto que no modelo reduzido, a configuração dos depósitos ao final do teste mostrou que o transporte ocorreu predominantemente por arraste, mas de forma muito precária. Outro ponto discutido é que a imposição de uma alta concentração de sedimentos, com a finalidade única de acelerar o processo de transporte e assoreamento, não dá bons resultados. Uma alimentação com baixa concentração pode conduzir a uma melhor distribuição dos depósitos, mas o inconveniente seria o tempo de teste para se conseguir um volume razoável de depósitos.

Souza (2006) realizou um trabalho experimental de assoreamento em modelo físico, o qual foi denominado de armadilha de sedimentos, ou seja, esse modelo na verdade não era um modelo reduzido de nenhum protótipo, sendo apenas um aparato experimental construído em laboratório, cujo objetivo era comparar o resultado experimental com o modelado numericamente, a fim de validar o programa computacional MIKE 21C. A armadilha construída auxiliou na pesquisa de transporte de sedimentos e assoreamento de reservatórios, proporcionando diferentes configurações de vazão nos canais afluentes, descarga de sedimento e abertura de vertedor. A deposição de sedimento pôde ser registrada através de

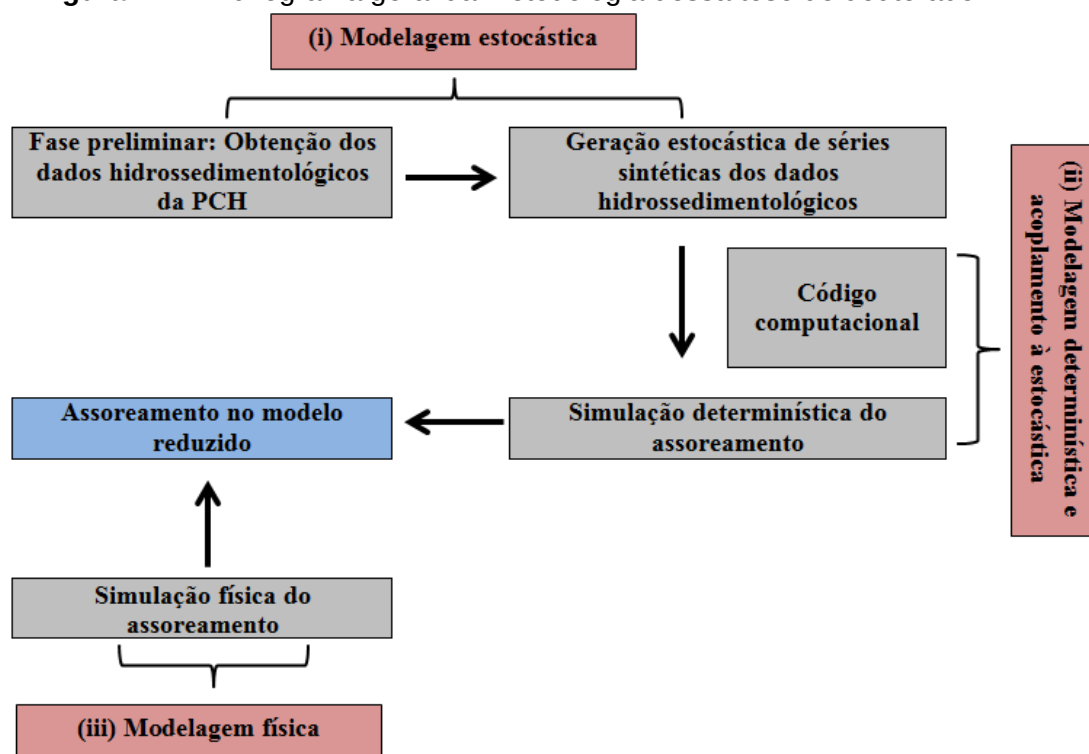
fotografias tiradas de diferentes ângulos, ao longo do processo de assoreamento. Utilizando equipamento de velocimetria a laser, o autor obteve os campos de velocidade instantânea em várias regiões do reservatório e para o conhecimento do padrão do escoamento de água em seu interior, para a vazão afluente experimentada. O abastecimento de água foi feito por canal prismático construído em acrílico. O sistema de alimentação de areia (material usado no assoreamento) consistia de um reservatório elevado, o qual continha o sedimento, e um sistema de transporte do material até o canal, o qual utilizava ar comprimido até os canais, sendo a descarga sólida constante. A vazão ensaiada foi de $0,002 \text{ m}^3/\text{s}$ e a descarga de areia, com d_{50} igual a $0,12 \text{ mm}$, foi definida em $2,0 \text{ g/s}$, o que representou uma concentração média de 1 g/L na extremidade de montante do canal, local de lançamento. O assoreamento foi realizado durante 72 horas, sendo que durante esse período o processo foi filmado e fotografado e as dunas de sedimentos foram medidas. No programa MIKE 21C foi simulado numericamente o processo do assoreamento da armadilha. A formulação de Engelund e Hansen (1967) para transporte de sedimentos, dentre as oferecidas no programa, apresentou os melhores resultados na reprodução do trabalho experimental. O autor conclui que houve semelhança entre os resultados experimentais e os simulados, tanto para o padrão do escoamento no interior da armadilha quanto para a deposição de sedimentos, o que permitiu avaliar o programa MIKE 21C como ferramenta útil no estudo e na estimativa do assoreamento de reservatórios.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Apresentação geral da metodologia

Nesse item serão apresentados os procedimentos que nortearam essa tese de doutorado. Para a realização desse projeto foram utilizados os dados hidrossedimentológicos e topográficos da Pequena Central Hidrelétrica Salto do Paraopeba (doravante denominada como PCH), que foi construída em 1956, sendo que o seu reservatório se encontra intensamente assoreado, o que a tornou inoperante. A escolha dessa PCH se deu por haver um modelo reduzido do seu reservatório construído no Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, sendo que os resultados obtidos nesse modelo foram utilizados para validar o método estocástico desenvolvido. A metodologia é dividida em três partes, como apresentado na **Figura 4.1**, a saber: (i) modelagem estocástica; (ii) acoplamento do modelo estocástico ao determinístico; e (iii) modelagem física. Essas etapas se interligam para atingir o objetivo de desenvolver um método estocástico, a partir de dados hidrossedimentológicos existentes, para estimativa de assoreamento em reservatórios de água, e a sua probabilidade de ocorrência.

Figura 4.1 – Fluxograma geral da metodologia dessa tese de doutorado



(i) Modelagem estocástica: esta etapa objetiva a geração das séries sintéticas de dados hidrossedimentológicos, a partir das séries históricas existentes, como: vazão e concentração de sedimento em suspensão. Inicialmente, como base na série histórica de dados, foi

determinada a curva-chave de sedimentos para o rio Paraopeba, a qual foi convertida, a partir de escalas de semelhança hidráulica, para representar a curva-chave de sedimentos do modelo reduzido. Por fim, usando um modelo estocástico, foram geradas as séries sintéticas dos dados hidrossedimentológicos.

(ii) Acoplamento do modelo estocástico ao determinístico: depois da geração estocástica das séries de dados, utilizou-se um modelo matemático determinístico de transporte de sedimento para estimar o assoreamento no reservatório do modelo reduzido da PCH. Esse modelo determinístico foi alimentado com as séries sintéticas geradas na etapa anterior. Para isso, foi necessário o desenvolvimento de um código computacional que permitiu o acoplamento automático do modelo estocástico ao determinístico.

(iii) Modelagem física: no Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), desenvolveu-se um procedimento para simular o assoreamento no modelo reduzido da PCH.

Posteriormente, o resultado do assoreamento do modelo físico foi comparado com o obtido numericamente via simulação estocástica. Com isso, validou-se o método estocástico desenvolvido. A seguir, essas três partes serão detalhadas.

4.2 Obtenção dos dados hidrossedimentológicos

Os parâmetros relacionados com o fluido e o sedimento são essenciais ao estudo do transporte de sedimentos. Para simular estocasticamente os dados hidrossedimentológicos foram considerados de interesse os seguintes parâmetros: (i) vazão média anual afluente ao reservatório, denominada de vazão anual; e (ii) descarga sólida total média anual. Esses parâmetros foram considerados estocásticos, pois possuem variabilidade espaço-temporal, além de incertezas nos seus valores, devido aos métodos de medições desses valores e a outros fatores.

Outros parâmetros poderiam ser considerados estocásticos, como o peso específico e a granulometria dos sedimentos. Entretanto, esses parâmetros não foram simulados estocasticamente, pois no modelo reduzido, o qual serviu para validar o método estocástico desenvolvido, não foi possível a variação desses parâmetros, ou seja, em todos os experimentos no modelo reduzido esses parâmetros foram mantidos constantes. Mais detalhes

sobre os procedimentos no modelo reduzido estão descritos no Tópico 4.3. O coeficiente de rugosidade de Manning também poderia ser um parâmetro estocástico, entretanto, não foram gerados valores para ele, pois não se dispunha desses dados para a PCH. Outro parâmetro não utilizado foi a profundidade da água, devido à sua relação com a vazão, ou seja, à medida que a vazão variava automaticamente a profundidade também era alterada.

Primeiramente, os dois parâmetros estocásticos citados foram determinados para o rio Paraopeba, que é o rio no qual está instalada a PCH. Posteriormente, esses valores foram convertidos para o modelo reduzido. Tentou-se junto à CEMIG, que é a detentora da PCH, acesso aos dados dos parâmetros estocásticos. Entretanto, a companhia não possuía essas séries históricas, pois ela assumiu a PCH há pouco tempo. Assim, foi realizado um inventário das estações hidrossedimentométricas situadas à montante e à jusante do reservatório da PCH, a partir do banco de dados públicos da Agência Nacional das Águas (ANA), o qual é encontrado no *website* HidroWeb.

Para isso, foram levantadas todas as estações pertencentes ao rio Paraopeba com pelo menos uma campanha de medição simultânea de vazão diária e concentração de sedimentos em suspensão, avaliando-se a posição de cada uma delas, seja de montante ou jusante, e as respectivas distâncias até a PCH. As estações encontradas para o rio são apresentadas na **Tabela 4.1**.

Tabela 4.1 – Inventário das estações do rio Paraopeba

Código	Nome	Município	Responsável	Posição em relação à PCH	Distância aproximada até a PCH (km)
40740000	Alberto Flores	Brumadinho	ANA	Jusante	70,0
40710000	Belo Vale	Belo Vale	ANA	Jusante	15,0
40700002	Jeceaba	Jeceaba	ANA	Jusante	5,0
40540000	Jurema	São Brás do Suaçuí	ANA	Montante	> 150
40720002	Melo Franco	Brumadinho	ANA	Jusante	95,0
40850000	Ponte da Taquara	Paraopeba	ANA	Jusante	> 150
40800001	Ponte Nova do Paraopeba	Juatuba	ANA	Jusante	> 150
40845000	Santa Cruz	Papagaios	ANA	Jusante	> 150
40550000	São Brás do Suaçuí	São Brás do Suaçuí	ANA	Montante	30,0
40550002	São Brás do Suaçuí Jusante	São Brás do Suaçuí	ANA	Jusante	29,0
40549998	São Brás do Suaçuí Montante	São Brás do Suaçuí	ANA	Montante	30,0
40718000	Toca	Brumadinho	ANA	Jusante	86,0

De posse das séries históricas das estações supracitadas, analisou-se o período compreendido pelas medições dos seus dados e a presença ou não de falhas, de forma que estações com poucos dados registrados foram descartadas. Dessa maneira, obteve-se que apenas quatro estações possuíam séries longas (em torno de 50 anos), a saber: São Brás do Suaçuí à Jusante (40550002), São Brás do Suaçuí à Montante (40549998), Belo Vale (40710000) e Alberto Flores (40740000), sendo que as duas primeiras foram unidas, uma vez que seus períodos de medição são complementares e não se sobrepõem.

Definidas as estações com potencial para servir de apoio na obtenção dos dados hidrossedimentológicos da PCH, examinou-se a correlação das vazões mensais existentes entre elas, duas a duas, de modo a prosseguir os estudos com o par que apresentou maior coeficiente de correlação (R). Para isso, as séries de médias mensais foram geradas utilizando-se o *software* estatístico R, o qual é de domínio público livre e apresenta código fonte aberto, podendo assim ser programado. As vazões médias foram submetidas à análise e os resultados são mostrados na **Tabela 4.2**. Pela tabela, percebe-se que o par de estações cujas séries históricas de vazões mensais apresentaram maior correlação entre os dados foi Alberto Flores e Belo Vale. Assim, elas serviram de apoio na obtenção dos dados hidrossedimentológicos da PCH. Essas estações estão apresentadas na **Figura 4.2**.

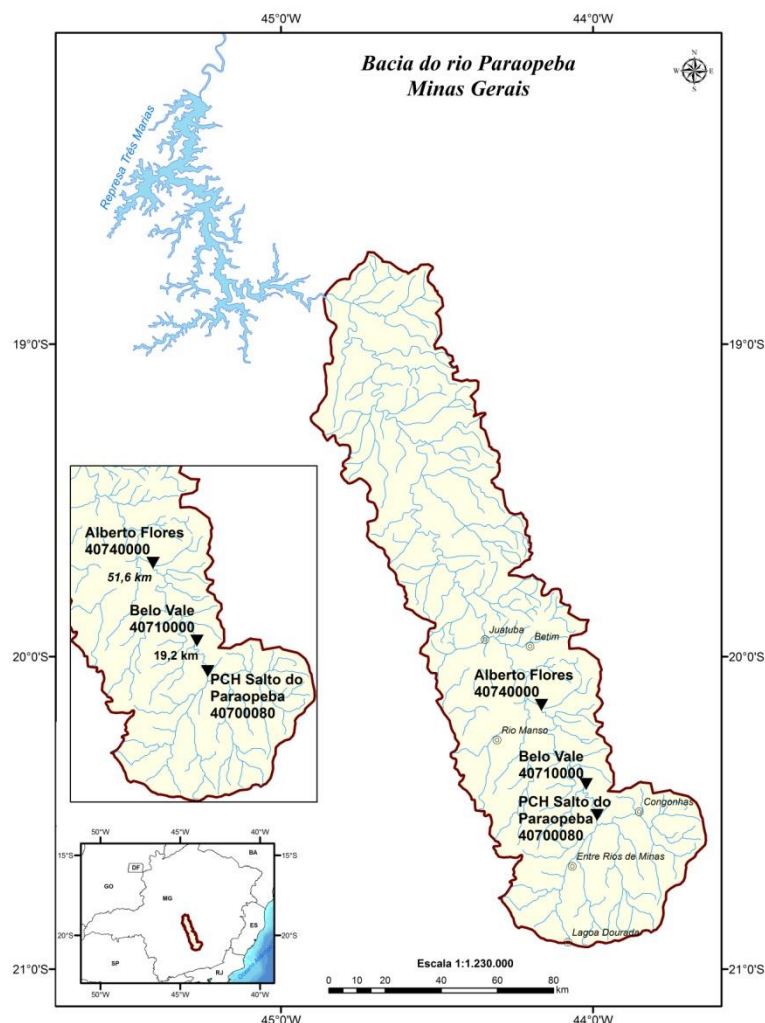
Tabela 4.2 – Correlação entre as vazões médias mensais das estações fluviométricas mais próximas à PCH Salto do Paraopeba (1965 a 2017)

Estações correlacionadas	Coeficiente de correlação (R)
Alberto Flores com Belo Vale	0,97
Alberto Flores com São Brás do Suaçuí	0,92
Belo Vale com São Brás do Suaçuí	0,93

Foram analisadas preliminarmente as séries históricas de vazões diárias das duas estações, observando inconsistências, descontinuidades e fazendo o preenchimento das falhas daquela mais próxima à PCH, a qual é Belo Vale e está a aproximadamente 15,0 km de distância.

A série histórica de vazões da estação de Belo Vale é compreendida entre 1965 a 2017. As falhas observadas nas vazões mensais foram preenchidas usando o método da regressão linear, tomando a estação de Alberto Flores como apoio, sendo que essa estação está a aproximadamente 55,0 km de Belo Vale, apresenta dados diários de vazões entre 1963 e 2017 e possui 4.120,0 km² de área de drenagem.

Figura 4.2 – Estações fluviométricas próximas à PCH Salto do Paraopeba

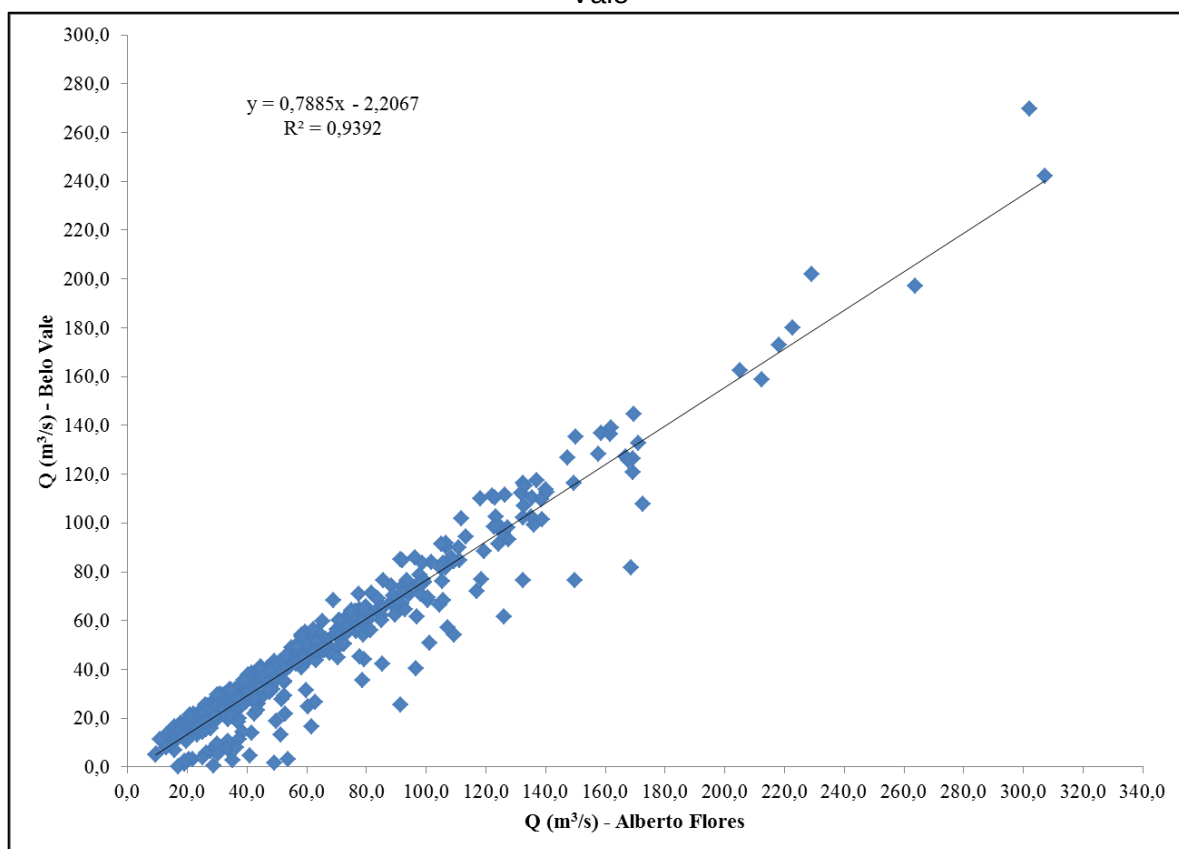


A regressão linear utilizada está apresentada na **Figura 4.3**, onde se tem o valor de, aproximadamente, 0,94 para o coeficiente de determinação (R^2). Alguns autores nacionais, como Barbosa (2004), Santos *et al.* (2015) e Vieira *et al.* (2016), apresentam que o valor mínimo de R^2 deve ser 0,7, para que a equação de regressão explique de maneira satisfatória o comportamento dos dados da série. Sendo assim, a equação encontrada pôde ser usada com certo grau de confiança para preencher os dados faltantes de Belo Vale.

Preenchidas as falhas na série de vazões mensais de Belo Vale, utilizou-se essa série para determinar as vazões mensais da PCH. Para isso, devido à proximidade entre Belo Vale e a PCH, foi feita proporção das áreas de drenagem, conforme metodologia da Eletrobrás (1985), sendo que a área de drenagem da PCH é 2485,0 km² e de Belo Vale é 2770,0 km². Assim, tem-se que a vazão da PCH é cerca de 90% da vazão de Belo Vale.

Moreira e Silva (2014) analisaram métodos para estimativa das vazões da bacia do rio Paraopeba, sendo que um dos métodos é o da proporcionalidade entre as áreas de drenagem. Eles concluíram que na estimativa da vazão média de longa duração não foram observadas diferenças expressivas entre os métodos avaliados. Assim, o método aqui utilizado para se determinar as vazões anuais da PCH tende a não influenciar no resultado final desse trabalho.

Figura 4.3 – Regressão linear para as vazões mensais das estações Alberto Flores e Belo Vale



Eletrobrás (1985) ressalta que não se deve aplicar a proporcionalidade entre as áreas de drenagem quando a relação entre a área do posto fluviométrico em análise (Belo Vale) e a seção de interesse (PCH) for superior a três, o que também não ocorre nesse caso.

Posteriormente, de posse das vazões mensais da PCH, no *software* R, foram feitas as médias dessas vazões, obtendo-se, assim, as vazões anuais (Q) (**Tabela 4.3**) de cada ano hidrológico, o qual foi considerado entre outubro de um ano e setembro do ano seguinte.

A partir da escala de vazão entre o modelo reduzido e o protótipo (PCH), sendo que essa escala será apresentada no item 4.3.2, foram encontradas as vazões anuais a serem aplicadas no modelo reduzido da PCH, as quais estão na **Tabela 4.4**.

Tabela 4.3 – Série de vazões anuais da PCH Salto do Paraopeba

Ano Hidrológico	Q (m³/s)	Ano Hidrológico	Q (m³/s)	Ano Hidrológico	Q (m³/s)
1967 - 1968	37,29	1983 - 1984	45,47	1999 - 2000	35,50
1968 - 1969	29,08	1984 - 1985	61,11	2000 - 2001	26,52
1969 - 1970	33,26	1985 - 1986	41,27	2001 - 2002	33,68
1970 - 1971	19,77	1986 - 1987	42,07	2002 - 2003	35,42
1971 - 1972	44,29	1987 - 1988	37,70	2003 - 2004	43,75
1972 - 1973	47,27	1988 - 1989	33,15	2004 - 2005	48,21
1973 - 1974	40,37	1989 - 1990	30,66	2005 - 2006	33,27
1974 - 1975	33,15	1990 - 1991	55,75	2006 - 2007	32,25
1975 - 1976	29,22	1991 - 1992	58,45	2007 - 2008	35,19
1976 - 1977	45,67	1992 - 1993	57,93	2008 - 2009	58,05
1977 - 1978	40,31	1993 - 1994	41,75	2009 - 2010	26,75
1978 - 1979	65,51	1994 - 1995	39,41	2010 - 2011	21,40
1979 - 1980	53,53	1995 - 1996	43,81	2011 - 2012	44,70
1980 - 1981	46,16	1996 - 1997	56,82	2012 - 2013	23,50
1981 - 1982	58,80	1997 - 1998	27,21	2013 - 2014	9,66
1982 - 1983	76,04	1998 - 1999	31,66		

Tabela 4.4 – Série de vazões anuais do modelo reduzido

Ano Hidrológico	Q (L/s)	Ano Hidrológico	Q (L/s)	Ano Hidrológico	Q (L/s)
1967 - 1968	3,00	1983 - 1984	3,66	1999 - 2000	2,86
1968 - 1969	2,34	1984 - 1985	4,92	2000 - 2001	2,14
1969 - 1970	2,68	1985 - 1986	3,32	2001 - 2002	2,71
1970 - 1971	1,59	1986 - 1987	3,39	2002 - 2003	2,71
1971 - 1972	3,57	1987 - 1988	3,04	2003 - 2004	3,52
1972 - 1973	3,81	1988 - 1989	2,67	2004 - 2005	3,88
1973 - 1974	3,25	1989 - 1990	2,47	2005 - 2006	2,68
1974 - 1975	2,67	1990 - 1991	4,49	2006 - 2007	2,60
1975 - 1976	2,35	1991 - 1992	4,71	2007 - 2008	2,83
1976 - 1977	3,68	1992 - 1993	4,67	2008 - 2009	5,10
1977 - 1978	3,25	1993 - 1994	3,36	2009 - 2010	2,15
1978 - 1979	5,28	1994 - 1995	3,17	2010 - 2011	1,72
1979 - 1980	4,31	1995 - 1996	3,53	2011 - 2012	3,60
1980 - 1981	3,72	1996 - 1997	4,58	2012 - 2013	1,89
1981 - 1982	4,74	1997 - 1998	2,19	2013 - 2014	0,78
1982 - 1983	6,12	1998 - 1999	2,55		

O segundo parâmetro estocástico (descarga sólida total média anual) foi obtido de forma indireta a partir da concentração de sedimentos em suspensão, sendo os valores para a PCH obtidos a partir dos dados de Belo Vale, já que, assim como a vazão, esses dados não estavam disponíveis para a PCH. Os dados de concentração de sedimentos em suspensão de Belo Vale foram obtidos no *website* HidroWeb. A série de dados está compreendida entre 1975 e 2017, sendo que, na maioria das vezes, há dois dados de concentração de sedimentos em suspensão por ano, os quais são advindos de campanhas de medições em campo feitas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

De posse da concentração de sedimentos em suspensão (C_{SS}) de Belo Vale, foi obtida de forma indireta a descarga sólida em suspensão (Q_{SS}), sendo ela estimada a partir da Equação 4.1.

$$Q_{SS} = 0,0864 Q_t C_{SS} \quad 4.1$$

Em que,

- C_{SS} está em mg/L;

- Q_t é a vazão, em m³/s, observada no momento da medição de C_{SS} .

Vale (2014) promoveu a reconstituição da calha natural do reservatório da PCH Salto do Paraopeba. O autor utilizou os dados de concentração de sedimentos de Belo Vale para estimar os da PCH. Para determinação da descarga sólida de arraste (Q_{SA}), ele utilizou a metodologia proposta em Eletrobrás (1992), a qual apresentou boa aderência entre os valores calculados por essa metodologia e os advindos de três campanhas de medições feitas na PCH.

Eletrobrás (1992) apresenta um diagnóstico de vários rios brasileiros, entre eles o rio Paraopeba. É apresentado que, para esse rio, a relação entre Q_{SA} e Q_{SS} varia entre 1 e 0,5. Vale (2014) encontrou que o melhor ajuste aos pontos resultantes das campanhas realizadas à montante do reservatório da PCH se dá quando a relação Q_{SA}/Q_{SS} é 0,5. Assim, obtida a Q_{SS} a partir da Equação 4.1, obtém-se a Q_{SA} .

De posse de Q_{SS} e Q_{SA} , obteve-se a descarga sólida total (Q_{ST}) de Belo Vale, a qual foi estimada utilizando-se a Equação 4.2.

$$Q_{ST} = Q_{SS} + Q_{SA} = 1,5 Q_{SS} \quad 4.2$$

A Q_{ST} para a PCH foi obtida a partir dos dados de Belo Vale fazendo-se proporção entre as áreas de drenagem. Utilizando-se os valores das Q_{ST} e as suas referentes descargas líquidas, obteve-se a curva-chave de sedimentos (Q_t versus Q_{ST}) para a PCH (**Figura 4.4**).

Na **Figura 4.4** estão apresentados também os valores encontrados por Vale (2014) a partir de três campanhas de medições de sedimentos em suspensão e de arraste no reservatório da PCH, sendo que a soma das duas resulta no valor da Q_{ST} . Observa-se que a metodologia da

Eletrobrás (1992) se ajustou bem aos dados da série, visto que os valores encontrados para a PCH, utilizando-se esse procedimento, foram próximos dos obtidos por Vale (2014).

A curva-chave de sedimentos da PCH foi convertida para o modelo reduzido, de acordo com as escalas de vazão e de descarga sólida (item 4.3.2). Ela está apresentada na **Figura 4.5**.

Figura 4.4 – Curva-chave de sedimentos para a PCH Salto do Paraopeba

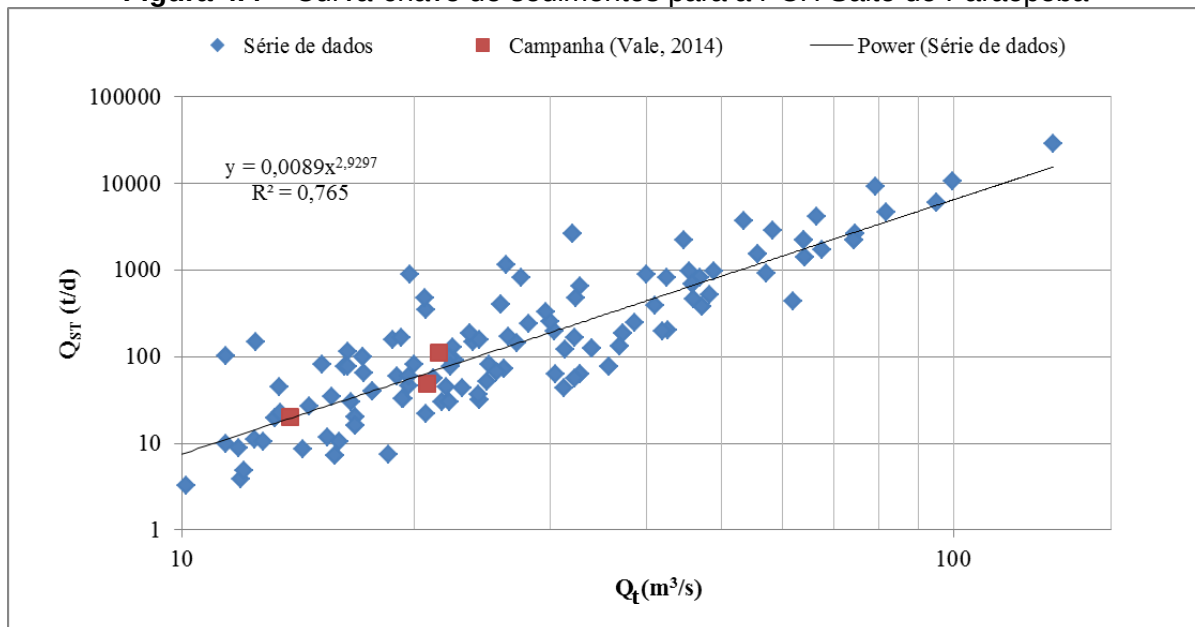
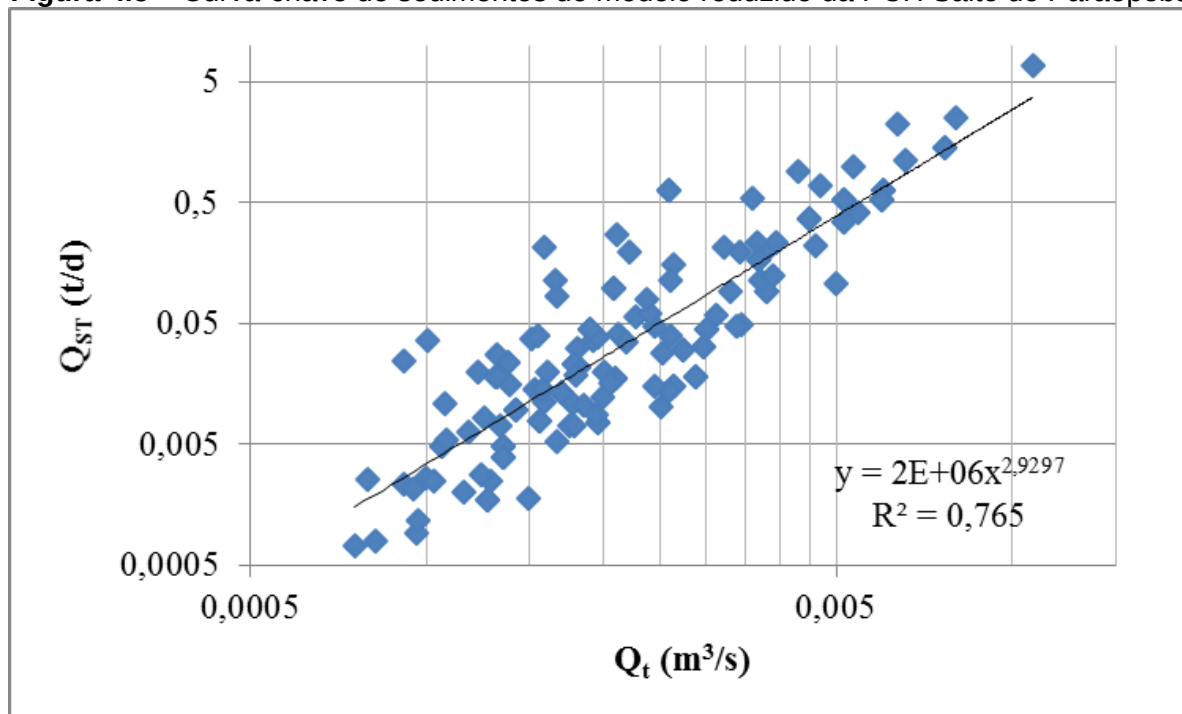
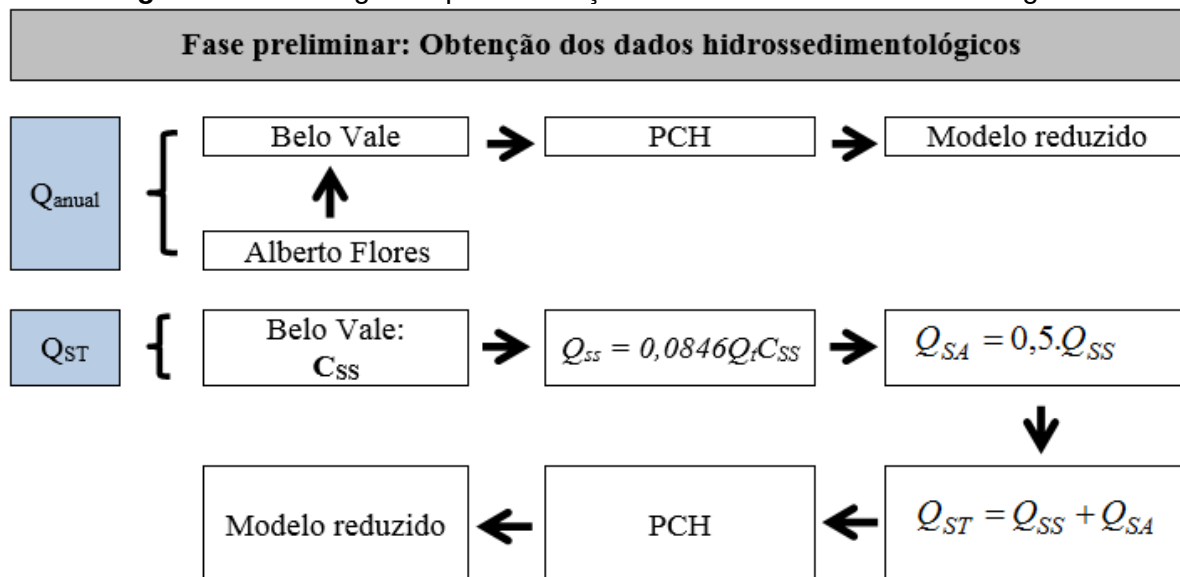


Figura 4.5 – Curva-chave de sedimentos do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba



A **Figura 4.6** apresenta um fluxograma que resume a etapa para obtenção dos dois parâmetros estocásticos do processo de assoreamento do modelo reduzido da PCH. Todas as funções elaboradas para geração estocástica estão apresentadas no Apêndice A.

Figura 4.6 – Fluxograma para obtenção dos dados hidrossedimentológicos



4.3 Modelagem física do assoreamento na PCH Salto do Paraopeba

4.3.1 Descrição da PCH Salto do Paraopeba

A PCH Salto do Paraopeba (**Figura 4.7**) teve sua barragem construída na década de 50, no rio Paraopeba, afluente da margem direita do rio São Francisco. A usina entrou em operação em 1956 com duas unidades geradoras, sendo a primeira composta por gerador de 1.500 kW e turbina do Tipo Francis, e a segunda constituída por gerador de 970 kW e turbina tipo Francis geminada (SPEC, 2011).

A CEMIG assumiu a operação dessa usina por volta do ano 2000, sendo que nessa época a operação já se dava com bastante interferência do depósito dos sedimentos (**Figura 4.8**), até ser paralisada, situação em que se encontra hoje. Em 2011, foi desenvolvido um projeto básico de repotenciação dessa usina, com vistas a retomar a sua operação. Nesse projeto, previu-se a inclusão de um reforço no maciço, algo que foi executado no 2º semestre de 2017, e de uma descarga de fundo, com ampliação de sua capacidade de geração para 12 MW de potência instalada. Foi também verificada a segurança do extravasor, concluindo-se pela sua segurança para cheias de até 1000 anos de recorrência, desde que operando com os vãos livres, por isso, foi retirada uma passarela que atravessava a barragem, bem como também foram retirados os pilares de sustentação dessa passarela. Nas **Tabela 4.5** e **Tabela 4.6** estão

apresentadas características e vazões notáveis da PCH. Na **Figura 4.9** está apresentado um arranjo do seu vertedor.

Figura 4.7 - Vista de jusante da PCH Salto do Paraopeba

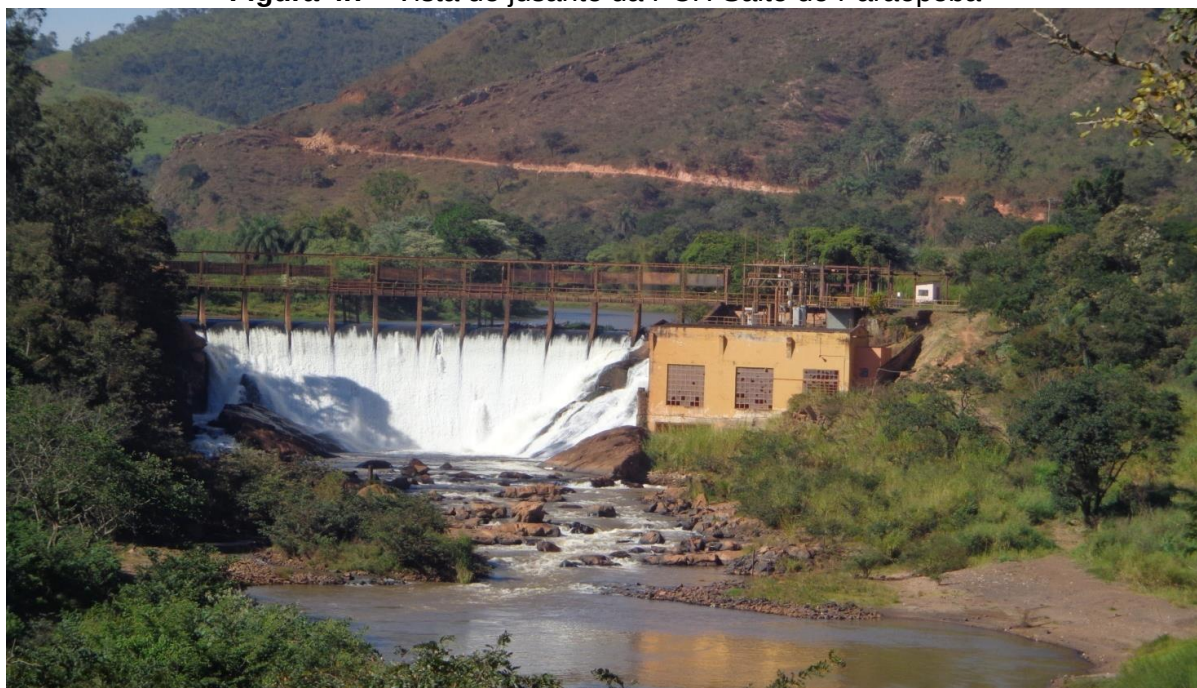


Figura 4.8 - Assoreamento do reservatório da PCH Salto Paraopeba



Fonte: Vale, 2014.

Tabela 4.5 - Detalhes da PCH Salto do Paraopeba

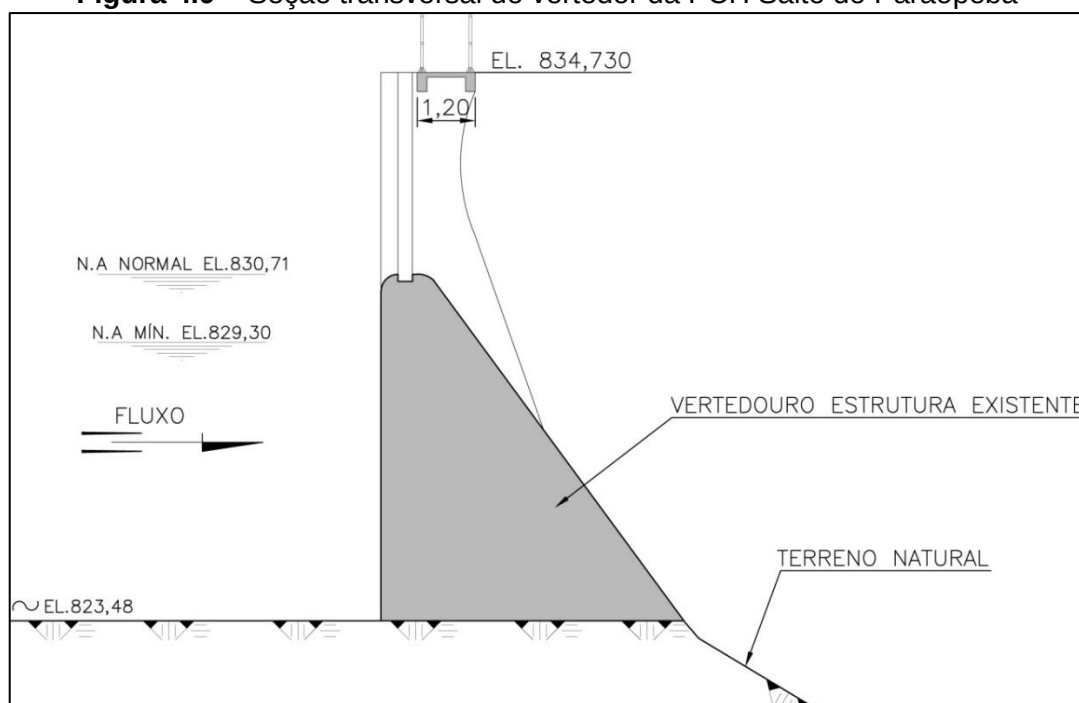
Item	Valor
Área de drenagem (km ²)	2.485
Tempo de concentração (h)	12,10
Nível de água máximo normal no reservatório (m)	830,71
Nível de água máximo normal de jusante (m)	812,05

Tabela 4.6 - Vazões afluentes e respectivos níveis de água (NA) previstos no vertedor da PCH Salto Paraopeba

Dados de mínimas									
	Histórica			Q _{7,10}		Q ₉₅		Média	
Vazão (m³/s)	5,6			10,5		13,8		47,8	
Cota do NA (m)	830,83			830,89		830,92		831,20	
Dados de máximas									
Ano de recorrência	2	5	10	25	50	100	500	1000	10000
Vazão (m³/s)	378,7	606,1	778,2	1005,6	1177,7	1349,7	1749,3	1921,3	2492,9
Cota do NA (m)	832,66	833,38	833,87	834,46	834,87	835,27	836,13	836,48	837,57

Fonte: Adaptado de SPEC, 2011.

Figura 4.9 – Seção transversal do vertedor da PCH Salto do Paraopeba



Fonte: Adaptado de SPEC, 2011.

4.3.2 Projeto do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba

O modelo reduzido da PCH encontra-se no Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH) da UFMG e é um produto do convênio de pesquisa e desenvolvimento entre a UFMG e a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Os projetos básico e executivo desse modelo foram desenvolvidos pela TEC3 Geotecnia e Recursos Hídricos Ltda (TEC3). Mais detalhes desse projeto podem ser consultados em Carvalho *et al.* (2014), sendo que aqui nesse texto serão apresentados apenas os mais importantes, já que o projeto do modelo reduzido não configura um dos objetivos dessa tese.

O modelo reduzido representa até 200 m à sua jusante do barramento e a 1000 m à sua montante, pois esse ponto se trata de uma seção de controle hidráulico (escoamento crítico) e também limita uma zona de sedimentação.

Para o dimensionamento do modelo, a TEC3 utilizou os princípios da semelhança hidráulica (item 3.5.1, para a condição de $d_{*r} = \tau_{*r} = 1$ e $m = 1/6$), os quais envolvem obter semelhança em aspectos geométricos, cinemáticos e dinâmicos. Segundo Julien (2002), modelos em que a escala vertical (z) é diferente das escalas do plano (xy) são usualmente necessários quando se aborda o problema de transporte de sedimentos. Por isso, o modelo reduzido foi construído em escala distorcida, como apresentado na **Tabela 4.7**.

Tabela 4.7 - Grandezas e escalas admitidas no projeto do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba

Grandezas	Símbolo	Escala	Valor real	Valor no modelo
Geométricas				
Comprimento	x_r	99,3	1200 m	12,1 m
Largura	y_r	99,3	600 m	6,0 m
Profundidade	z_r	25,0	30 m	1,2 m
Diâmetro do grão	d_{s_r}	0,40	0,45 mm	1,13 mm
Área da Seção	A_r	2.500	398 m ²	0,159 m ²
Volume	V_r	246.635	197.174 m ³	0,79 m ³
Cinemáticas				
Tempo (escoamento)	t_r	19,86	5 anos	0,25 anos
Tempo (leito)	tb_r	2.483	5 anos	18 h
Velocidade	v_r	5,0	5,0 m/s	1 m/s
Velocidade cisalhante	v_{*r}	2,5	2,5 m/s	1 m/s
Velocidade de sedimentação	ω_r	2,5	7,9 cm/s	3,1 cm/s
Vazão	Q_r	12.416	47,8 m ³ /s (média) 2.492,9 m ³ /s (10.000 anos)	3,8 L/s 200,8 L/s
Dinâmicas				
Massa	M_r	246.635	2085723,5 kg	8,4 kg
Pressão	p_r	25	25 m.c.a.	1 m.c.a
Tensão de cisalhamento	τ_{0r}	6,3	6,3 Pa	1 Pa
Força	F_r	246.635	246,6 kN	1 N

Tabela 4.7 - Grandezas e escalas admitidas no projeto do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba (continuação)

Grandezas	Símbolo	Escala	Valor real	Valor no modelo
Adimensionais				
Declividade	S_r	0,25	0,25%	1%
Coeficiente de Darcy-Weisbach	f_r	0,25	0,25	1
N° de Froude	Fr_r	1	1	1
N° de Reynolds	Re_r	125	2.000	16,0
Parâmetro de Shields	τ_r	1	1	1
N° de Reynolds do grão	Re_{*r}	1	1	1
Diâmetro adimensional do grão	ds_{*r}	1	1	1
Densidade dos sedimentos	$(G-1)_r$	15,8	1,650	1,105

Fonte: TEC3, 2015.

A superfície primitiva do reservatório foi obtida em Vale (2014), sendo que as suas seções transversais estão apresentadas no Apêndice D. A partir delas, o modelo reduzido foi construído pela usinagem da superfície em blocos de isopor de alta densidade, com dimensões de 1,60 m x 1,00 m x 0,50 m, que foram alinhados lado a lado e sobre os quais foi aplicada fibra de vidro. Estes blocos foram dispostos sobre platibandas posicionadas em níveis a 1,50 m de altura a partir do piso do laboratório. Estas platibandas foram compostas por estruturas metálicas basculáveis.

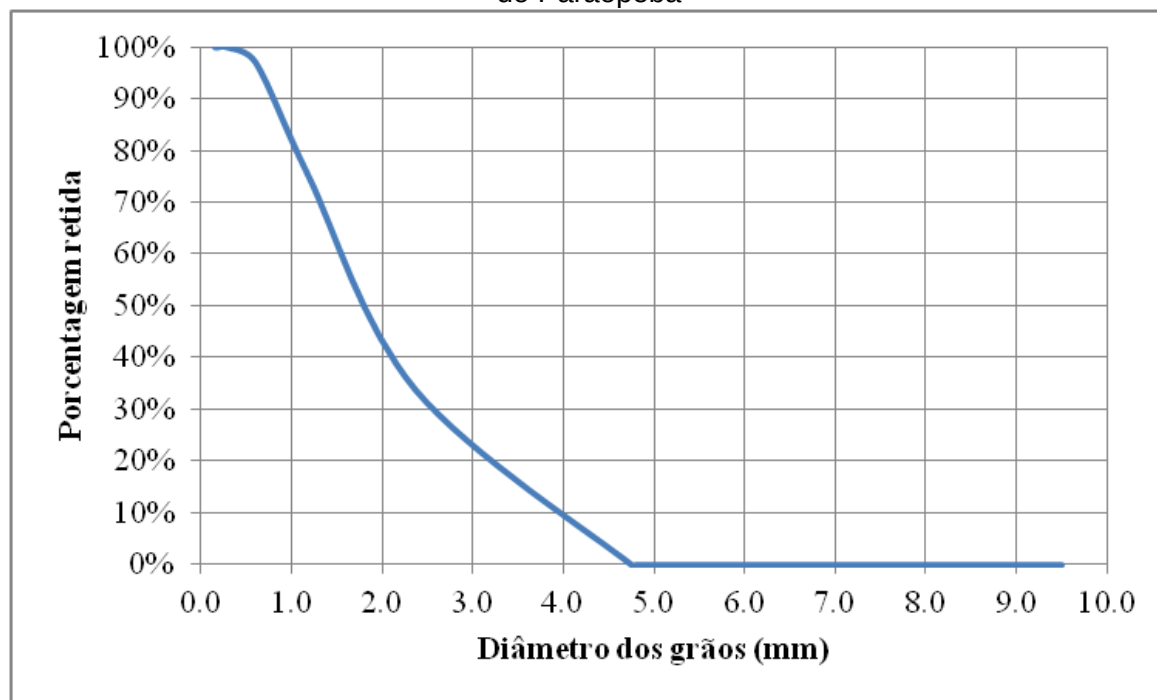
Na **Figura 4.10** está apresentado o modelo construído. Está apresentada também a barragem, a qual foi construída com um traço de cinco latas de borracha de PVC (material utilizado como sedimento, o que será descrito a seguir) para duas latas e meia de argamassa, sendo que as camadas da barragem foram alteadas de 5 a 7,0 cm, para que a massa não escorregasse, além disso, esperou-se a camada anterior secar para colocar a próxima.

O sedimento utilizado para simular o assoreamento é 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. A granulometria da borracha é apresentada na **Figura 4.11**. Segundo Campello (2017), para o d_{50} de 1,7 mm, a velocidade média de queda dessa borracha é 2,7 cm/s.

Figura 4.10 – Vista do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba



Figura 4.11 – Curva granulométrica da borracha usada no modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba



À princípio, a alimentação dos sedimentos seria feita através de um equipamento dosador de sólidos (**Figura 4.12**), 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, antes de se realizar os experimentos, elaborou-se a curva de calibração (frequência x descarga sólida), a partir da qual se verificou que, mesmo na menor rotação, a mínima descarga sólida do equipamento era maior que as descargas sólidas do período a ser simulado o assoreamento (esse período será apresentado no item 4.3.3). Ocorre que no período 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 circuito hidráulico disponível para realização dos testes no modelo reduzido é composto por uma bomba modelo EHF 150-25, existente no CPH. A água recalçada ia para um reservatório (**Figura 4.13**), o qual está imediatamente antes da entrada do modelo reduzido. A variação das vazões produzidas pela bomba foi realizada com uso de inversor de frequência, sendo acoplado ao sistema um medidor de vazões eletromagnético.

Figura 4.12 – Dosador de sólidos responsável por alimentar o modelo reduzido

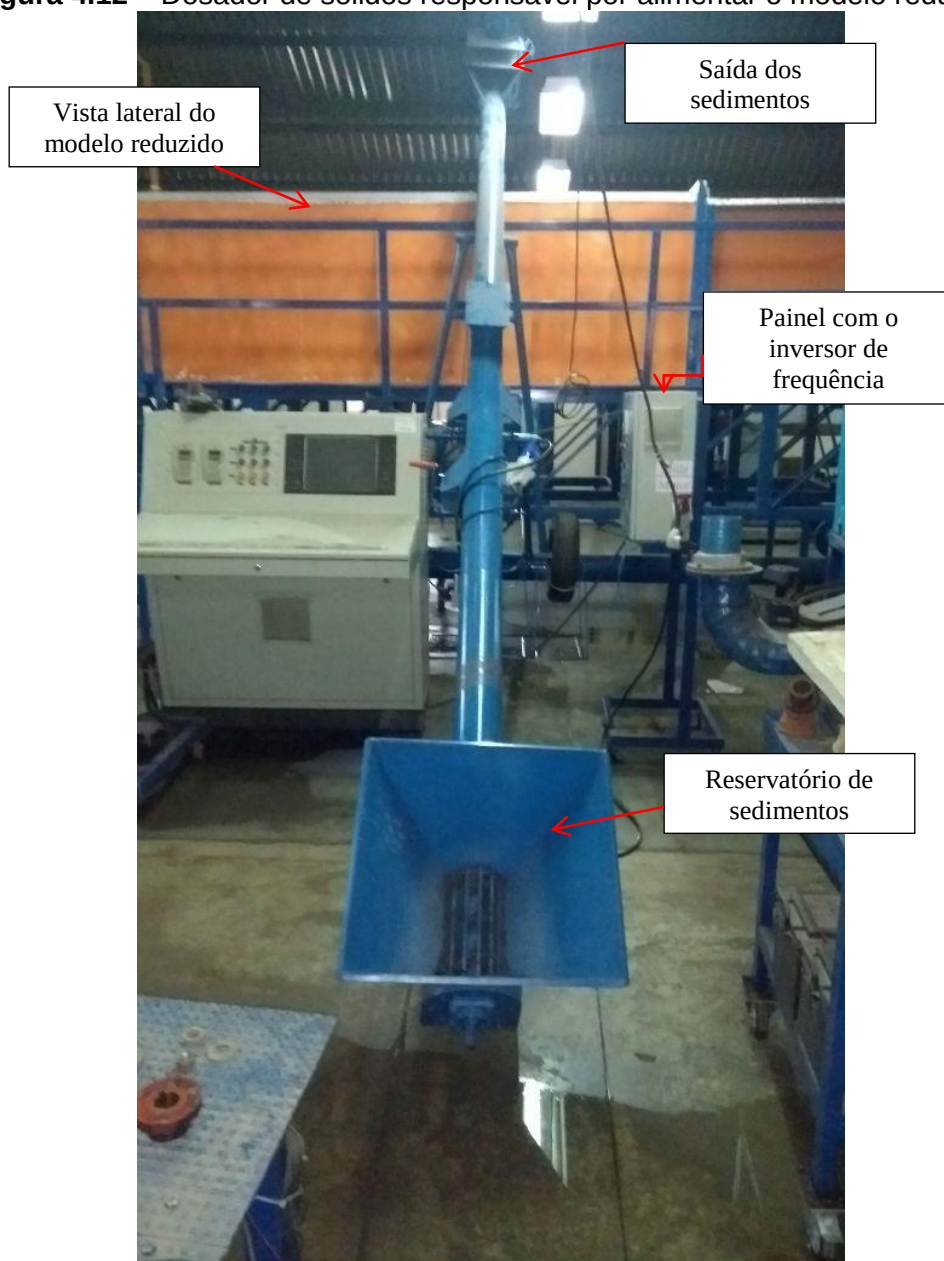


Figura 4.13 – Reservatório de água que alimentou o modelo reduzido

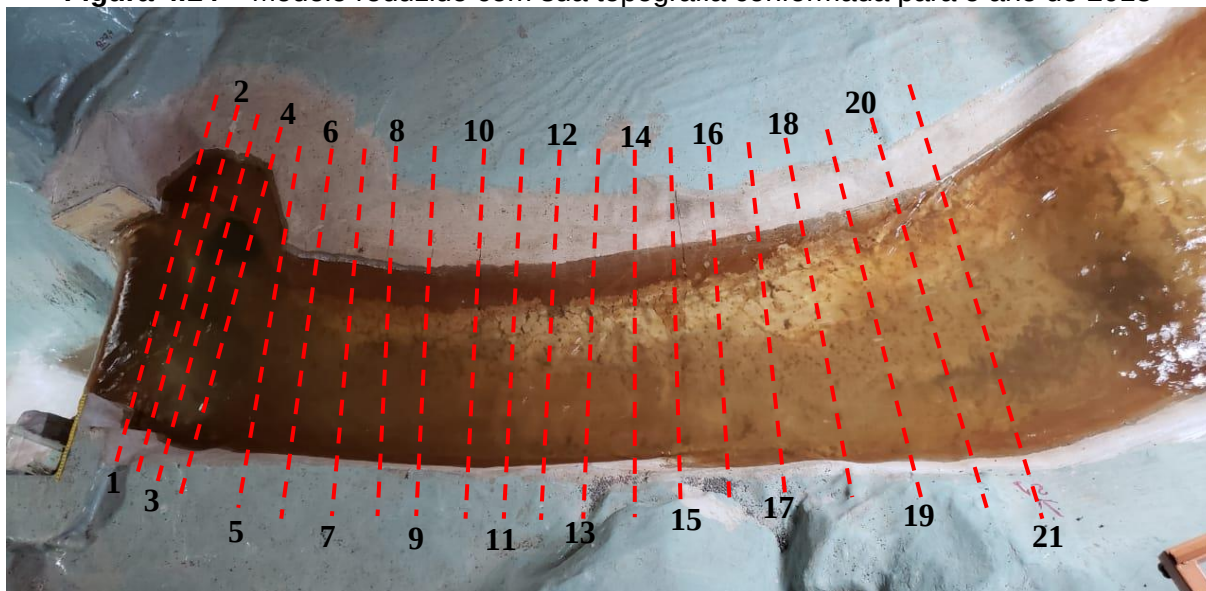


4.3.3 Simulação do assoreamento no modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba

Com o modelo físico já construído, primeiramente, avaliou-se sua eficiência para simular o assoreamento ocorrido no protótipo. Para isso, foi necessário se conhecer a batimetria da PCH em data posterior a 1956, que é a data da geometria inicial da usina, para a qual foi construído o modelo. Foram obtidas duas batimetrias, as quais são de 2013 e 2017, sendo as suas seções transversais apresentadas no Apêndice D. Ressalta-se que nesses anos o reservatório já estava totalmente assoreado.

A simulação do assoreamento ocorrido entre os anos de 1956 e 2013, ou seja, 57 anos, no modelo reduzido equivale a 201,0 horas, segundo a escala de tempo do leito (**Tabela 4.7**), a qual é 1:2.483. Realizar o experimento de forma ininterrupta nesse intervalo de tempo era inviável e impraticável operacionalmente. Por isso, a simulação do assoreamento para se verificar a eficiência do modelo reduzido em representar o real foi feita entre os anos de 2013 e 2017, ou seja, cinco anos de escoamento no protótipo, o que equivale a, aproximadamente, 18,0 horas no modelo reduzido. Porém, como a topografia do modelo reduzido representava a do ano de 1956, ela precisou ser conformada para 2013 (**Figura 4.14**, onde a numeração 1 a 21 representam as seções transversais modeladas).

Figura 4.14 – Modelo reduzido com sua topografia conformada para o ano de 2013



Para se representar as 21 seções transversais apresentadas no Apêndice D, fizeram-se suas concordâncias com as seções de 1956 localizadas nas mesmas posições, de forma a se conhecer como era a seção em 1956 e como ela estava em 2013, ou seja, quanto foi a

elevação do fundo devido ao assoreamento. No modelo reduzido, essa elevação foi feita colocando no seu fundo a mistura pó de cimento e borracha de PVC (material utilizado como sedimento para simular o assoreamento). Ressalta-se que o modelo reduzido simula um trecho de 1000,0 m à montante do vertedor da PCH, mas a batimetria de 2013 compreende apenas os últimos 300,0 m do reservatório. Assim, o assoreamento foi simulado apenas nesse trecho menor, o qual está situado entre as seções de números “1” a “21” da **Figura 4.14**.

Além da conformação da topografia do modelo, 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, primeiramente, tentou-se 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 4.8** estão apresentadas as vazões anuais (Q), as descargas sólidas ($Q_{STanual}$) determinadas a partir delas, utilizando-se a curva-chave de sedimentos (**Figura 4.5**), 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 4.8 – Dados utilizados para simulação do assoreamento ocorrido entre 2013 e 2017 (1ª tentativa)

Ano	Q (m ³ /h)	$Q_{STanual}$ (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 em um único ponto – na seção mais à montante do trecho simulado (seção “21” da **Figura 4.14**). Isso foi feito, pois é o mesmo procedimento adotado pelo programa hidráulico determinístico utilizado nessa tese (o programa será detalhado posteriormente). Além disso, como o assoreamento está sendo simulado num trecho de 300,0m do reservatório, tem-se que a contribuição principal de sedimento é a que vem de montante, ou seja, a contribuição lateral é pequena, sendo que, em visita à PCH, não se constatou erosões nas margens ao longo desse trecho.

Entretanto, os anos de 2013 a 2017 compreenderam um período de estiagem na região da PCH, de forma que essas baixas vazões anuais não provocaram movimentação de sedimento no modelo reduzido, ou seja, o sedimento se acumulou na seção de montante onde foi colocado. Assim, para se determinar o hidrograma que seria utilizado no modelo físico, optou-se por realizar uma simulação numérica do assoreamento ocorrido entre 2013 e 2017 e se observar o comportamento do processo ao longo dos anos. Para isso, foi utilizado o *software Hydrologic Engineering Center's River Analysis System* (HEC-RAS 5.0.3). Esse *software* foi escolhido, pois também foi utilizado na simulação estocástica desenvolvida, o que será descrito no item 4.5.

No programa, foram inseridos os dados da série histórica de vazões diárias da PCH, os quais foram convertidos para o modelo reduzido, e a curva-chave de sedimentos do modelo reduzido (**Figura 4.5**). No HEC-RAS também foram inseridas as seções transversais referentes a 2013 (Apêndice D), a granulometria do sedimento (**Figura 4.11**) e o coeficiente de Manning, sendo o seu valor determinado como será descrito no item 4.3.4. As etapas para realização da modelagem numérica do assoreamento usando o HEC-RAS estão apresentadas no Apêndice C.

A partir da simulação numérica, percebeu-se que a movimentação de sedimento ocorria apenas nos períodos que compreendiam as vazões máximas anuais. Porém, essas vazões ocorrem em um ou dois dias, e, como descrito anteriormente, operacionalmente era inviável se trabalhar com vazões diárias. Diante disso, optou-se por trabalhar com a vazão média da onda que abrangia a vazão máxima anual, sendo essas ondas apresentadas nas figuras a seguir.

Nas **Figuras 4.15 a 4.19** estão apresentados os hidrogramas de cada ano hidrológico. A partir deles, foram encontradas as vazões médias das ondas de cheia que compreendiam as vazões máximas (Q_{MM}). Percebe-se que as ondas têm períodos de durações de, aproximadamente, 50 dias nos três primeiros anos e, aproximadamente, 30 dias nos últimos dois. No modelo reduzido, 50 e 30 dias equivalem, respectivamente, a 30 e a 20 minutos.

Figura 4.15 – Hidrograma do ano hidrológico 2012-2013 (outubro a setembro). Entre as linhas tracejadas está a onda que compreende a vazão máxima

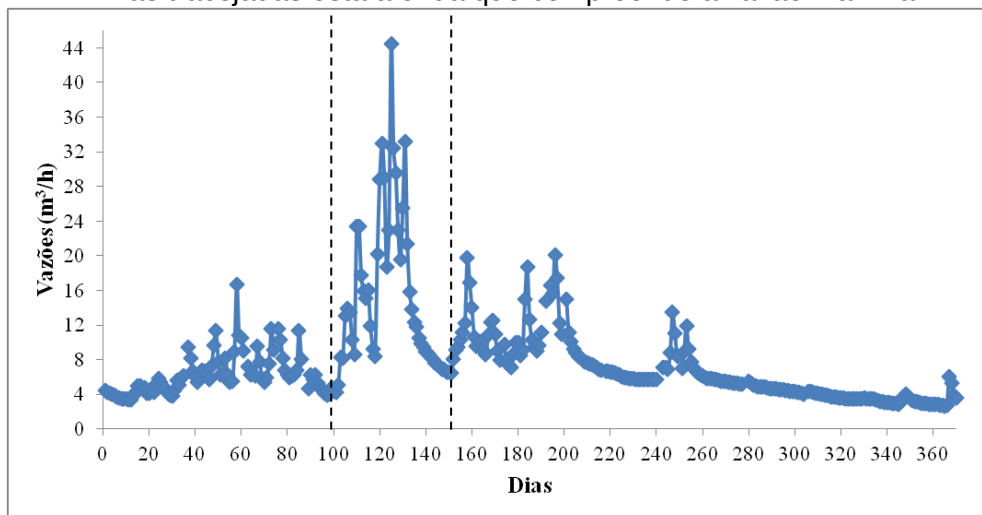


Figura 4.16 – Hidrograma do ano hidrológico 2013-2014 (outubro a setembro). Entre as linhas tracejadas está a onda que compreende a vazão máxima

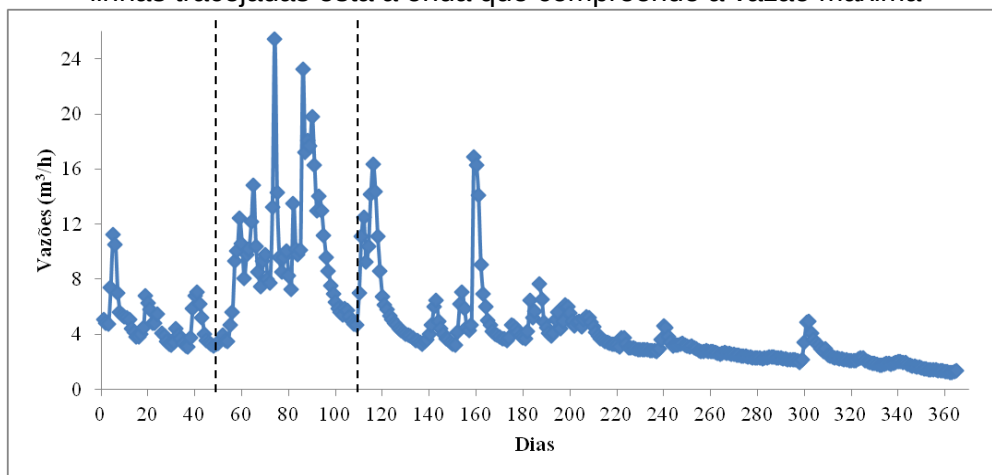


Figura 4.17 – Hidrograma do ano hidrológico 2014-2015 (outubro a setembro). Entre as linhas tracejadas está a onda que compreende a vazão máxima

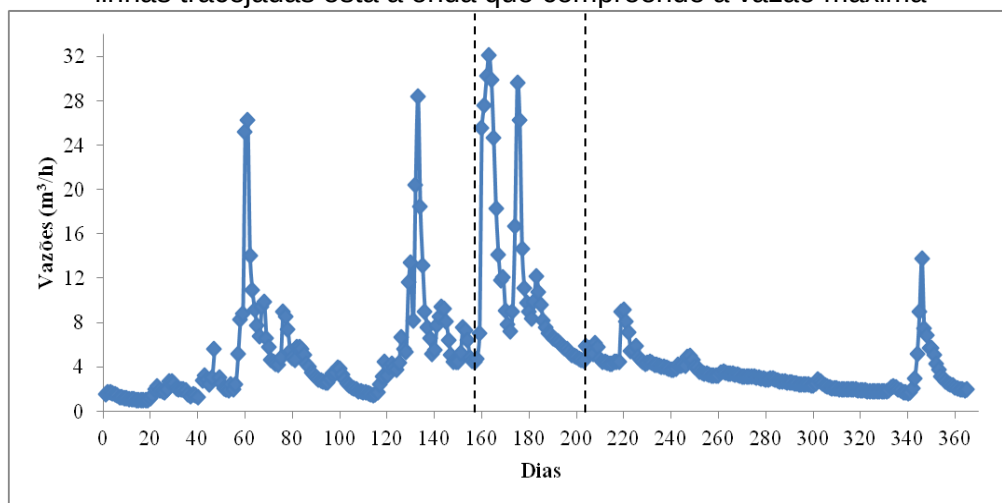


Figura 4.18 – Hidrograma do ano hidrológico 2015-2016 (outubro a setembro). Entre as linhas tracejadas está a onda que compreende a vazão máxima

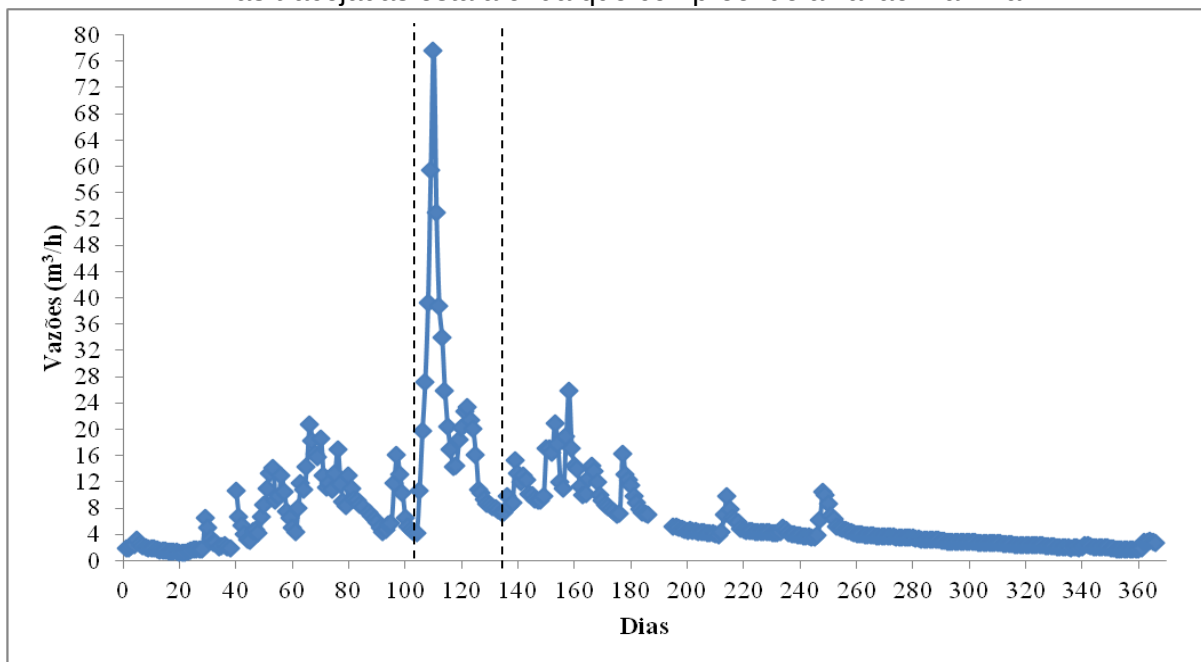
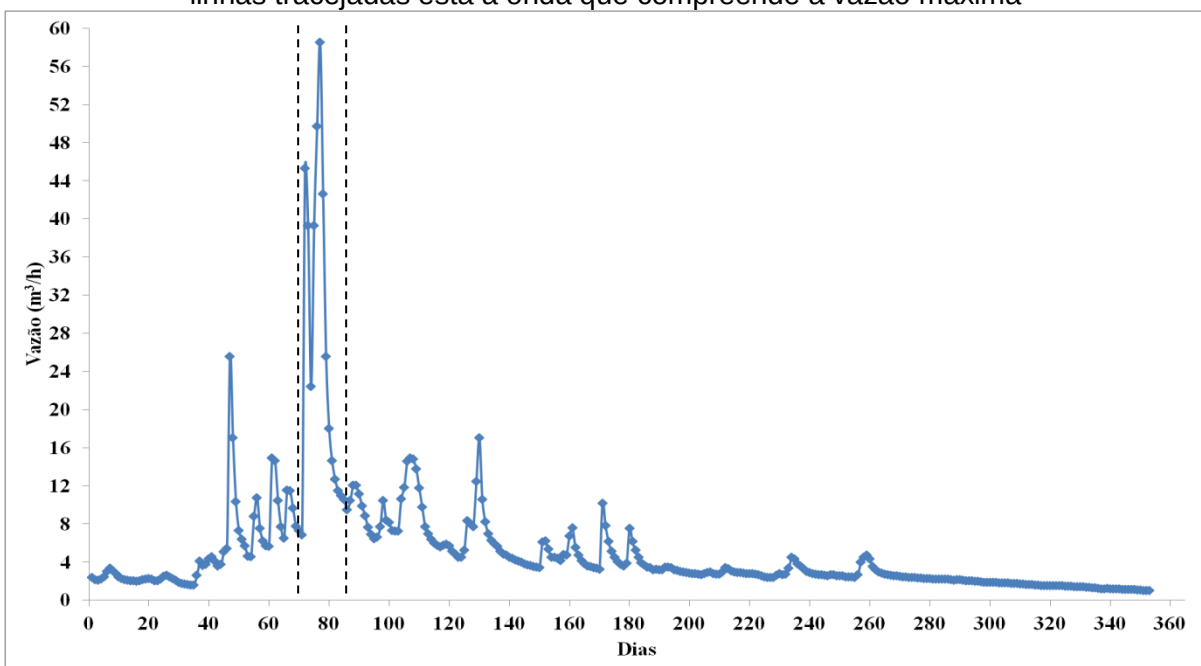


Figura 4.19 – Hidrograma do ano hidrológico 2016-2017 (outubro a setembro). Entre as linhas tracejadas está a onda que compreende a vazão máxima



Além da determinação das vazões a serem simuladas, também foi necessário se determinar os períodos de duração de escoamento de cada uma. A partir de testes realizados no modelo reduzido, conclui-se que o sedimento deveria ser inserido de forma menos concentrada, ou seja, certa massa deveria ser inserida gradativamente num tempo maior possível. Percebeu-se que ao se inserir uma grande quantidade num curto intervalo de tempo, existiam atrações

entre as partículas da borracha que dificultavam o seu transporte. Assim, apesar das ondas que compreendem as máximas possuírem durações diferentes, optou-se por simular todos os anos com a mesma duração de 30 minutos (50 dias), pois se verificou que a duração de 20 minutos não favorecia a simulação do assoreamento. Com isso, ao se optar por trabalhar com a duração de 30 minutos, simulou-se o assoreamento entre 2013 e 2017 por um período ininterrupto de 2,5 h.

Apesar das vazões anuais apresentadas na **Tabela 4.8** não produzirem transporte de sedimento, optou-se por inserir no modelo reduzido as quantidades de sedimentos produzidas por essas vazões (essas quantidades também estão na **Tabela 4.8**). Ao se comparar as batimetrias de 2013 e 2017 da PCH, obteve-se que a quantidade de sedimento acumulada entre esses anos foi 2.085.723,5 kg, o que equivale a 8,4 kg no modelo (de acordo com o fator de escala da **Tabela 4.7**). Somando-se as massas de sedimentos apresentadas na **Tabela 4.8**, tem-se um total de 9,2 kg. Essa quantidade é maior que o acumulado real (8,4 kg), porém, no modelo reduzido, parte desse sedimento vertia, de forma que, ao final do experimento, a massa retida era muito próxima da esperada.

Caso fossem utilizadas as descargas sólidas referentes às vazões médias das ondas que compreendiam as máximas ($Q_{STmédiamáx}$ da **Tabela 4.9**), ao final de 2,5 h deveria ser inserido um acumulado de 41,0 kg de sedimento, valor bem acima do acumulado real. Foi observado no modelo reduzido que vazões da ordem de 40 m³/h, ou seja, maiores que as médias dos períodos de máximas, provocam elevado vertimento de sedimento. Assim, possivelmente no protótipo, para o período em questão, ocorreu uma alta carga de sedimento, porém, ela não ficou acumulada, visto que as vazões diárias mais elevadas promoveram o seu transporte e, consequentemente, o vertimento dos sedimentos. Entretanto, no modelo reduzido era inviável se trabalhar com toda essa massa de borracha (41,0 kg), visto que não foram simuladas vazões diárias. Assim, ao final do período do experimento, haveria elevada quantidade acumulada, visto que as vazões médias dos períodos de máximas não são capazes de promover excessivo vertimento de sedimentos.

Na **Tabela 4.9** estão apresentados os valores utilizados para simular o assoreamento ocorrido entre 2013 e 2017, onde as vazões foram as médias dos períodos de máximas (Q_{MM}), as durações foram constantes e iguais a 30 minutos e as descargas sólidas ($Q_{STanual}$) foram as

obtidas a partir das vazões anuais. As vazões foram variadas alterando-se a rotação do inversor de frequência acoplado à bomba.

Tabela 4.9 – Dados utilizados na operação do modelo físico para simulação do assoreamento ocorrido entre 2013 e 2017 (Procedimento final)

Ano	Q_{MM} (m ³ /h)	$Q_{STmédiamáx}$ (t/d)	$Q_{STanual}$ (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

A distribuição e desenvolvimento do assoreamento no modelo reduzido ao longo do intervalo de tempo (2,5 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 2,5 h, o modelo reduzido foi esvaziado cuidadosamente para não se alterar a topografia dos sedimentos e foram medidos vários pontos ao longo de cada uma das 21 seções transversais de interesse.

Posteriormente, depois de verificada a eficiência do modelo reduzido, com intuito de se validar o método estocástico desenvolvido, simulou-se o assoreamento para o período de 2008 a 2012, variando os mesmos dois parâmetros considerados estocásticos: vazão e descarga sólida total. O procedimento foi o mesmo adotado anteriormente, ou seja, vazões médias dos períodos de máximas, 30 minutos de duração do escoamento e descargas sólidas referentes às vazões anuais. A **Tabela 4.10** apresenta os valores do procedimento operacional.

Tabela 4.10 – Dados utilizados para simulação do assoreamento ocorrido entre 2008 e 2012

Ano	Q_{MM} (m ³ /h)	$Q_{STanual}$ (t/d)	Massa (kg) de sedimento inserida
2008	34,5	0,017	2,5
2009	38,1	0,026	3,8
2010	33,1	0,037	5,4

Tabela 4.10 – Dados utilizados para simulação do assoreamento ocorrido entre 2008 e 2012 (continuação)

Ano	Q_{MM} (m ³ /h)	$Q_{STanual}$ (t/d)	Massa (kg) de sedimento inserida
2011	32,9	0,016	2,3
2012	33,5	0,031	4,6

O resultado foi comparado com o assoreamento obtido via simulação estocástica, sendo que o procedimento operacional da modelagem estocástica será descrito no item 4.4. Ressalta-se que o período de 2008 a 2012 foi escolhido por ser próximo do simulado anteriormente (2013 a 2017), de forma que, se um período muito antigo tivesse sido escolhido, as condições do reservatório da PCH poderiam ser muito diferentes das atuais, visto que em períodos antigos a PCH ainda funcionava e seu reservatório passava por processos de limpezas.

4.3.4 Calibração do coeficiente de Manning do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba

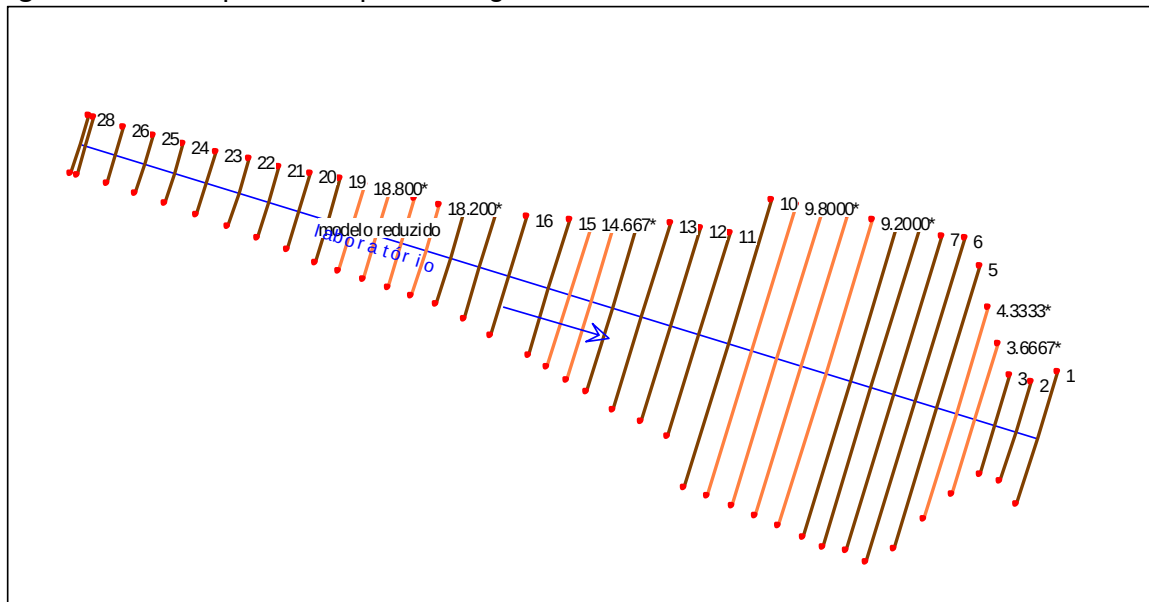
Uma característica importante para simulação numérica do escoamento e do assoreamento no modelo reduzido é o Coeficiente de Manning (n). Por isso, ele foi determinado para o modelo reduzido. Para isso, mediram-se quatro vazões e suas respectivas profundidades em três seções ao longo do modelo reduzido.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

No programa HEC-RAS 5.0.3, inseriu-se a geometria do reservatório do modelo (conforme as seções transversais apresentadas no Apêndice D), sendo que as seções onde foram medidas as profundidades da água são a 28, 19 e 10, apresentadas na **Figura 4.20**. Essas seções estão distantes aproximadamente 4,0 m uma da outra. Foram arbitrados coeficientes de rugosidades de Manning até se estabelecer profundidades simuladas próximas das lidas no modelo. Promoveram-se simulações para as quatro vazões ensaiadas adotando-se regime permanente de escoamento. Adotou-se escoamento crítico como condição de contorno tanto para a seção de montante, por nessa seção no protótipo ocorrer um estrangulamento natural, quanto para a de jusante (vertedor).

Esse procedimento de calibração foi realizado antes da construção do vertedor do modelo reduzido. Após a construção dessa estrutura, tentou-se observar se o valor de Manning havia variado. Porém, não foi possível calibrá-lo novamente utilizando os níveis d'água, como feito

anteriormente, pois nesse caso o controle da profundidade é feito pelo vertedor e não mais devido às forças atuantes no escoamento. Diante disso, optou-se por utilizar outro procedimento para calibração do Manning, o qual está explicado a seguir.

Figura 4.20 – Esquema em planta da geometria do modelo reduzido inserida no HEC-RAS



A calibração se deu a partir dos níveis de assoreamento ocorridos no reservatório entre os anos de 2013 e 2017. No HEC-RAS, trabalhando-se nas escalas do modelo reduzido, inseriram-se a geometria do reservatório da PCH (Apêndice D), as vazões diárias da série histórica e a curva-chave de sedimentos (**Figura 4.5**). Foram arbitrados valores de Manning até se obter um assoreamento simulado igual ao ocorrido na PCH, no período utilizado.

Os resultados encontrados a partir dos dois procedimentos (um utilizando-se os níveis d'água e o outro os níveis de assoreamento) foram diferentes. Assim, na modelagem estocástica foi utilizado o Manning obtido no segundo procedimento, visto que nesse caso, para se obter o valor do coeficiente, foi considerado o assoreamento e a influência do vertedor.

4.4 Modelagem estocástica dos dados hidrossedimentológicos

Conforme apresentado no item 4.2, os parâmetros considerados como estocásticos nessa pesquisa foram: vazão anual afluente e descarga sólida total média anual. Tem-se que primeiramente foram geradas as vazões anuais e, a partir delas, gerou-se o outro parâmetro.

As séries sintéticas de vazões anuais foram geradas com base na série histórica de vazões da PCH e utilizando-se o modelo estocástico AR(1), apresentado no item 3.4.3, na Equação 3.22 a qual é apresentada novamente, porém, agora colocada em termos da vazão (Q).

$$Q_t = \bar{Q} + \phi(Q_{t-1} - \bar{Q}) + \sigma_x \varepsilon_t \sqrt{1 - \phi_1^2} \quad 4.3$$

Em que,

Q_t é a vazão anual para o tempo t de interesse, em “m³/s”;

$\bar{Q}$ é a média dos dados observados da série temporal de vazões, em “m³/s”;

ϕ é o coeficiente de autocorrelação *lag* 1 da série temporal de vazões;

σ_x é o desvio padrão da série temporal de vazões;

ε_i é a componente de aleatoriedade gerada a partir da distribuição Normal $\sim N(0,1)$.

Uma das premissas para utilização do modelo estocástico AR(1) é que os dados sejam estacionários, ou seja, que eles se desenvolvam no tempo aleatoriamente ao redor de uma média constante, refletindo alguma forma de equilíbrio estável. Por isso, verificou-se a estacionariedade da série de vazões anuais da PCH utilizando-se o teste não paramétrico de *Spearman*, conforme recomendado em Naghettini e Pinto (2007). O teste foi aplicado utilizando-se o *software* estatístico R, ao nível de significância de 5%.

Como cada teste estatístico tem seu poder, ou seja, ele pode não rejeitar a hipótese nulidade sendo ela falsa, para reforçar a resposta do teste de *Spearman*, também se testou a estacionariedade dos dados de vazões anuais pelo teste de *Mann-Kendall* *apud* Naghettini e Pinto (2007), por meio do *software* Trend, ao nível de significância de 5%.

Outra premissa que deve ser observada para utilização do modelo AR(1) é se os dados estão normalmente distribuídos. Assim, de posse da série de vazões anuais da PCH, no *software* estatístico R, foi construído um histograma, o qual ajuda numa inspeção visual da distribuição de probabilidade. Complementando tal análise, aplicou-se o teste de Normalidade, também chamado de teste de *Shapiro-Wilk* (1965), ao nível de significância de 5%, para verificar se os dados testados são de uma população normalmente distribuída. Para isso, utilizou-se a função “*shapiro.test()*”, no programa R.

Observando-se a Equação 4.3, percebe-se que os parâmetros do modelo estocástico são a média, o desvio padrão e o coeficiente de autocorrelação *lag 1* da série de vazões anuais. No *software* R, esses parâmetros foram obtidos, sendo que para se verificar as autocorrelações dos dados, construiu-se o seu correlograma, a partir do qual se obteve o valor do coeficiente de autocorrelação *lag 1*.

Testadas as premissas do modelo estocástico e obtidos os seus parâmetros, no R, foram geradas 1000 séries sintéticas de vazões anuais, a partir da Equação 4.3. Para essas séries, verificaram-se suas estatísticas (média, variância e autocorrelação *lag 1*), sendo esses valores comparados com os da série histórica de vazões anuais da PCH, a fim de se verificar se o modelo AR(1) se ajustou bem aos dados originais. Ressalta-se que foram geradas 1000 séries, pois para essa quantidade as estatísticas dos dados gerados convergiram para as da série original.

Outra análise feita para se observar o ajuste do modelo AR(1) aos dados é a partir dos resíduos das séries sintéticas. Por isso, no programa R, utilizando-se a Equação 4.4, calculou-se os resíduos de cada série sintética gerada.

$$e_t = X_t - Y_t \quad 4.4$$

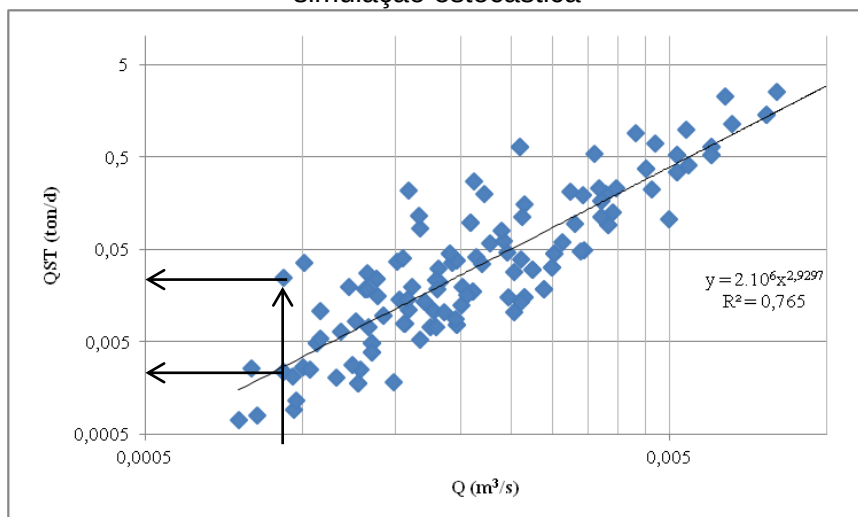
Em que:

X_t é o valor da vazão da série sintética no ano t ;

Y_t é o valor correspondente ao mesmo ano na série original.

Para cada vazão média anual gerada pelo modelo AR(1), gerou-se o seu respectivo valor de descarga sólida total, utilizando-se a curva-chave de sedimentos, a qual foi obtida conforme o item 4.2. Entretanto, como os parâmetros estocásticos possuem grau de incerteza e aleatoriedade, não se admitiu que a relação entre eles fosse unívoca. Ou seja, para uma mesma vazão (Q) pode se ter mais de um valor observado da descarga sólida total (Q_{ST}), como apresentado pelas setas na **Figura 4.21**.

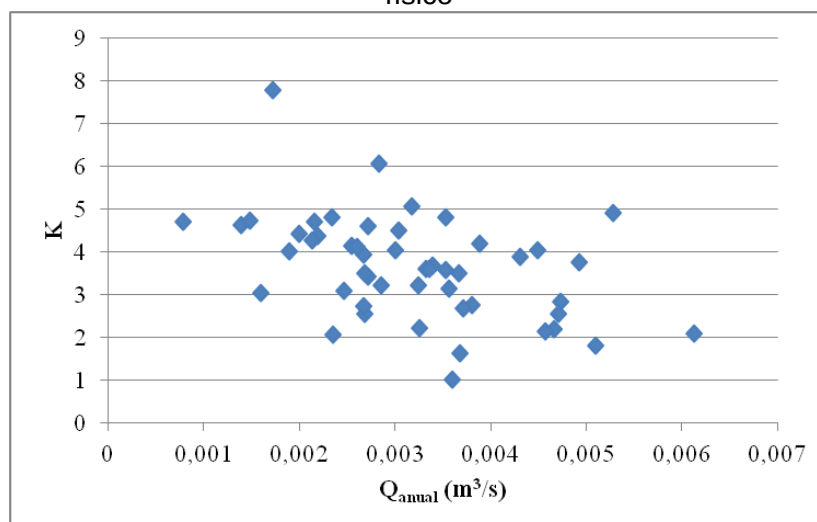
Figura 4.21 - Curva-chave de sedimentos utilizada para obtenção da descarga sólida na simulação estocástica



Assim, cada valor da descarga sólida referente à vazão anual ($Q_{ST\text{anual}}$) foi gerado a partir de uma distribuição Normal, cuja média é igual à descarga sólida total encontrada pela equação da regressão, para um valor de Q , e o desvio padrão foi fixo e igual ao valor do desvio padrão dos resíduos da regressão, o qual é 0,006 t/d. Por exemplo, utilizando-se o modelo estocástico, gerou-se um Q de 0,0064 m³/s. Entrando com esse valor na equação da curva-chave de sedimentos (**Figura 4.21**), encontra-se uma descarga sólida total de 0,74 t/d, aproximadamente. No programa R, utilizando-se a função “*rnorm*”, gerou-se, aleatoriamente, uma Q_{ST} seguindo uma distribuição Normal, cuja média é 0,74 t/d e o desvio padrão é 0,006 t/d. Com isso, para cada vazão anual gerada estocasticamente, sorteou-se sua respectiva Q_{ST} .

Porém, como apresentado no item 4.3.3, no modelo reduzido foi observado que as vazões anuais não movimentavam o sedimento. Assim, as vazões ensaiadas foram as médias das ondas que continham as vazões máximas. Com isso, também foi necessária essa correção no modelo estocástico. Para série histórica de vazões da PCH, a qual é de 1967 a 2017, estipulou-se todas as vazões médias das ondas de cheia. Os valores dessas médias foram divididos pelas vazões anuais apresentadas na **Tabela 4.3**, ou seja, observou-se quanto as médias eram maiores que as vazões anuais. Na **Figura 4.22** está apresentada a relação entre as vazões anuais, já convertidas para o modelo reduzido, e a razão entre as vazões médias das ondas de máximas e as vazões anuais, sendo essa relação denominada de K .

Figura 4.22 – Relação entre as vazões anuais e os valores de K , referentes ao modelo físico

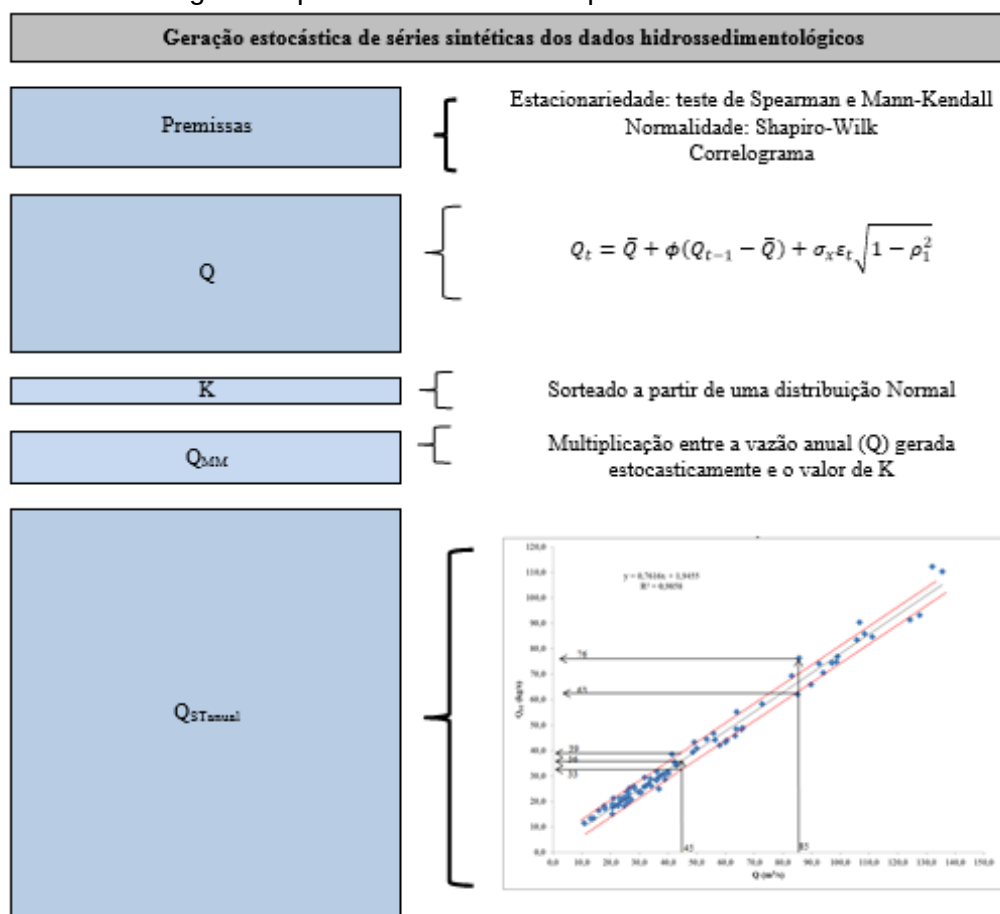


Pela **Figura 4.22**, percebe-se que a relação entre essas variáveis é aleatória. Então, para obtenção das vazões médias das ondas de máximas a partir das vazões anuais geradas estocasticamente, utilizou-se o seguinte procedimento: geraram-se as vazões anuais, a partir do modelo AR(1), e as multiplicou por valores de K , sendo os K obtidos aleatoriamente a partir de uma distribuição Normal, cuja a média e o desvio padrão são referentes aos valores da **Figura 4.22**. Ressalta-se que, no programa R, aplicou-se à série dos valores de K da figura o teste de *Shapiro-Wilk*, ao nível de 5% de significância, para identificar se eles seguiam distribuição Normal de probabilidade, o que foi confirmado pelo teste. Também foram aplicados os testes do Número de Inflexões proposto por NERC (1975) *apud* Naghettini e Pinto (2007), para verificação da aleatoriedade dos dados, o teste de independência indicado por Wald e Wolfowitz (1943) *apud* Naghettini e Pinto (2007), o teste de homogeneidade de Mann e Whitney (1947) *apud* Naghettini e Pinto (2007) e o teste de *Spearman* para a estacionariedade, sendo todos eles aplicados a 5% de significância.

Na **Figura 4.23** é apresentado um fluxograma resumindo as etapas para geração dos parâmetros estocástico, sendo que todas elas foram implementadas a partir de funções desenvolvidas no programa R, as quais estão no Apêndice A. Depois de verificadas as premissas do modelo AR(1), as vazões anuais foram geradas e multiplicadas por valores sorteados de K , gerados aleatoriamente, para que fossem encontradas as vazões médias das ondas de máximas. A partir das vazões anuais (Q), de posse da curva-chave de sedimentos, foram gerados os valores da descarga sólida total ($Q_{ST\text{anual}}$), a partir da distribuição Normal de probabilidade. Ressalta-se que os valores de Q e a curva-chave utilizada para geração de

$Q_{STanual}$ foram referentes ao modelo reduzido. Ao final da geração estocástica, foram obtidas 1000 séries de vazões (Q_{MM}) médias dos períodos de máximas, já convertidas para o modelo reduzido, 1000 séries de vazões anuais (Q) e igual número de séries de descargas sólidas totais ($Q_{STanual}$), sendo que a quantidade de valores de cada série dependia do número de anos que se queria simular o assoreamento. Nesse trabalho foram simulados cinco anos, por ser o período entre as duas batimetrias consecutivas que se teve acesso, como apresentado no item 4.3.3. Assim, cada série de dados tinha cinco valores de Q , Q_{MM} e $Q_{STanual}$, visto que se está trabalhando com valores anuais.

Figura 4.23 - Fluxograma apresentando como os parâmetros estocásticos foram obtidos



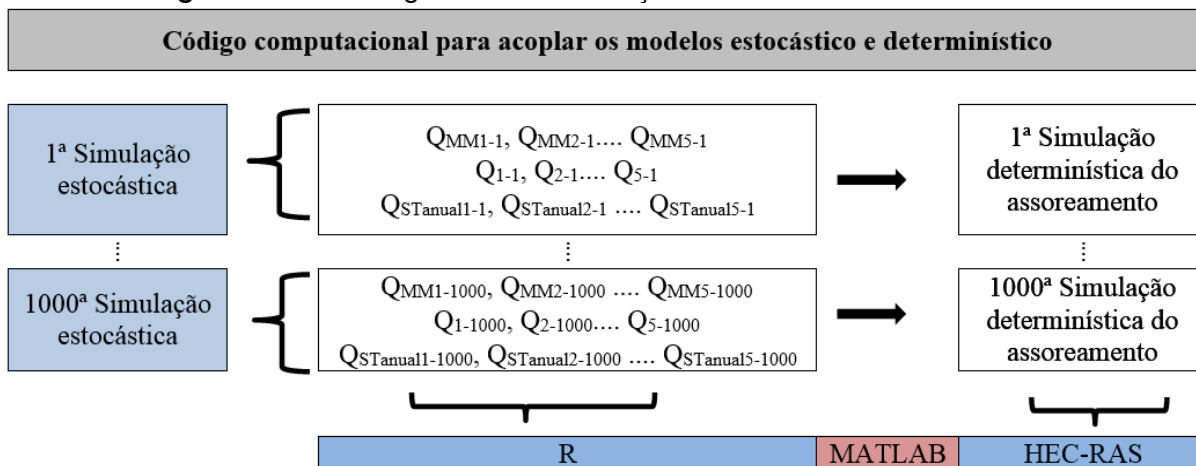
4.5 Automatização do modelo determinístico e simulação estocástica do assoreamento para o modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba

As séries sintéticas geradas estocasticamente foram introduzidas em um modelo matemático determinístico, o qual possui equações hidrodinâmicas e de transporte de sedimentos. Nesse projeto, utilizou-se o *software* HEC-RAS 5.0.3, devido à sua consolidada aplicação nessa área, por ser um *software* livre e, principalmente, por ser possível o seu acoplamento ao

software R, que foi usado na simulação estocástica dos dados hidrossedimentológicos. O acoplamento se deu a partir de códigos computacionais desenvolvidos no *software* MathWorks (MATLAB).

Os arquivos gerados via simulação estocástica, descrita no item 4.4, foram introduzidos no HEC-RAS, para que esse *software* simulasse o assoreamento ocorrido no modelo reduzido. Na **Figura 4.24** está apresentado um fluxograma das etapas estocástica e determinística de simulação do assoreamento. O 1º subscrito representa a ordem do valor gerado, enquanto o segundo é a ordem da simulação. Por exemplo, para a simulação em cinco anos foram geradas cinco vazões médias (Q_{MM}) dos períodos de máximas, cinco vazões anuais (Q) e igual número de descargas sólidas totais ($Q_{STanual}$), sendo “ Q_{2-1} ” a 2ª vazão gerada na 1ª simulação estocástica; “ Q_{2-1000} ” a 2ª vazão gerada na 1000ª simulação estocástica e assim por diante, sendo esse raciocínio válido para as outras duas variáveis. Ressalta-se que foram feitas 1000 simulações do assoreamento, pois foram gerados 1000 arquivos com as variáveis estocásticas, conforme explicado no item 4.4. O resultado obtido a partir de todas as simulações estocásticas foi a probabilidade de determinadas alturas de assoreamento ocorrerem ao longo do reservatório do modelo reduzido da PCH, no intervalo de tempo analisado.

Figura 4.24 - Fluxograma das simulações estocástica e determinística



Ocorre que até então era inviável a realização de milhares de simulações, pois para cada simulação deveria se inserir manualmente no HEC-RAS os dados de Q_{MM} , Q e $Q_{STanual}$, o que era impraticável. Assim, foi necessário automatizar esse processo de inserção de dados. Por isso, foi desenvolvido um código computacional no MATLAB, o qual apresenta uma linguagem de alto desempenho para computação técnica que integra computação, visualização e programação em um ambiente fácil de usar (MATHWORKS, 2015).

O código computacional desenvolvido fez a leitura dos arquivos gerados no *software* R contendo os dados dos parâmetros estocásticos e os converteu para uma extensão compatível à do HEC-RAS. Automaticamente esses dados foram inseridos no HEC-RAS, a simulação do assoreamento foi feita e os resultados foram extraídos do programa. Para isso, alocaram-se valores através de matrizes no MATLAB, para que a leitura e armazenamento da série estatística do R fosse feita. Ressalta-se que os códigos foram desenvolvidos com base em Leon e Goodell (2016), os quais desenvolveram um controlador do HEC-RAS utilizando o MATLAB. Ao final, o resultado no MATLAB foram *scripts* (Apêndice B) que possibilitaram escrever arquivos de entrada, ler arquivos de saída e executar funções totalmente automatizadas do HEC-RAS.

Porém, para que os códigos do MATLAB fossem executados, primeiramente foi necessário que se criasse um projeto no HEC-RAS, o qual continha:

- a geometria do reservatório do modelo reduzido da PCH referente ao ano de 2013 (Apêndice D);
- o coeficiente de Manning das seções (item 4.3.4) e a granulometria do sedimento (**Figura 4.11**);
- a equação de transporte do sedimento: dentre as contidas no programa, a que melhor se ajustou para situação do reservatório do modelo físico foi a de Wilcock e Crowe (2003), sendo essa equação indicada para sedimento na faixa de 0,5 a 4,0 mm, portanto, abrange o diâmetro mediano ($d_{50} = 1,7$ mm) da borracha utilizada. Além disso, ressalta-se que nenhuma das equações incorporadas no HEC-RAS se baseou nesse tipo de sedimento para ser determinada. Por isso, todas foram avaliadas, obtendo-se um melhor resultado utilizando-se a equação de Wilcock e Crowe (2003). Tem-se também que na literatura não há consenso quanto à utilização de uma equação em detrimento a outra. Por exemplo, Yang (1996) apresenta que a equação de Meyer-Peter e Müller (1948) deve ser utilizada para material mais grosso que 5,0 mm, já Carvalho (2008) diminui esse valor para 0,4 mm. Ou seja, assim como o recomendado pelo manual do programa, devem-se testar as equações e se observar o melhor ajuste.
- o método para cálculo da velocidade de queda dos sedimentos: o método de Report 12 é o padrão indicado pelo *software*; o método de *Exner* 5 para calcular a espessura da camada

ativa: esse método é o indicado para leitos que têm limite de erosão, como é o caso da PCH, de acordo com Vale (2014); e os dados de temperatura da água durante o período simulado: foi adotado 21°C para todo o período.

Assim, nem todas as etapas de simulação no HEC-RAS foram automáticas. Foi automatizada apenas a inserção das vazões e da curva-chave de sedimentos, por serem os parâmetros variáveis para cada simulação.

Foram feitas 1000 simulações automáticas do assoreamento ocorrido entre 2013 e 2017, visto que foram geradas 1000 séries sintéticas contendo os parâmetros estocásticos. Após as simulações, os códigos computacionais extraíram os resultados do HEC-RAS e os converteram para um arquivo de texto. Além de acessar o ambiente onde estão os resultados, os códigos também selecionaram o perfil de assoreamento que se tinha interesse, sendo nesse caso o referente ao assoreamento do ano de 2017. Ressalta-se que o perfil de assoreamento selecionado foi considerando a escala de tempo do modelo reduzido.

Todo o procedimento da modelagem de transporte de sedimentos no HEC-RAS é apresentado no Apêndice C, pois é difícil de encontrar na literatura um tutorial sobre isso, até mesmo o manual do programa não é claro quanto a esse assunto. Além disso, foram apresentadas com clareza quais etapas são automáticas, por terem dados variáveis em cada simulação, e quais são manuais, por possuírem dados fixos durante as 1000 simulações.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Modelagem física do assoreamento na PCH Salto do Paraopeba

5.1.1 Calibração do coeficiente de Manning do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba

Após a construção do modelo reduzido, a primeira etapa realizada antes do início da modelagem física do assoreamento na PCH foi a determinação do coeficiente de rugosidade de Manning (n) do curso d'água no modelo reduzido, antes de se instalar a barragem. Isso se faz necessário, pois, ao se usar o HEC-RAS para estimativa do assoreamento no reservatório, o coeficiente de Manning deve ser inserido no programa, como descrito no item 4.3.4.

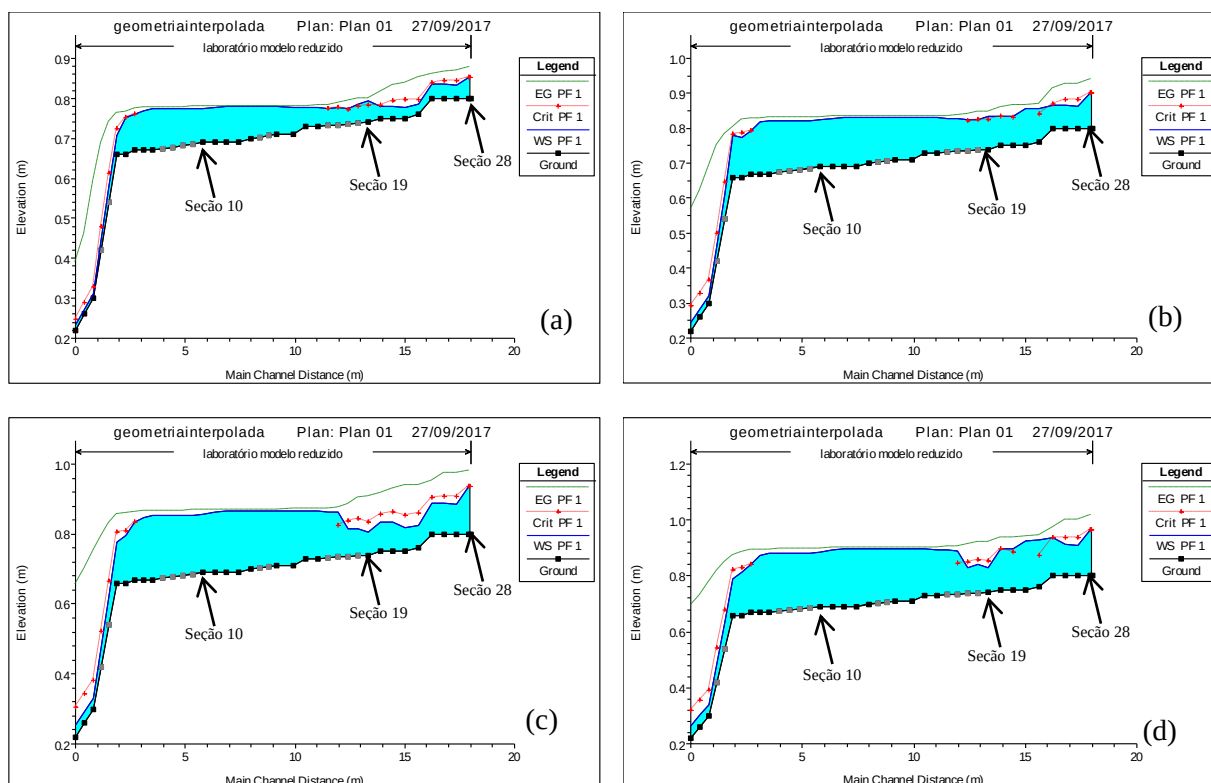
Utilizando-se o próprio HEC-RAS, por tentativa e erro, obteve-se que o melhor resultado foi alcançado para um valor de n igual a 0,012, sendo que na **Tabela 5.1** estão apresentados os resultados para esse valor. Nela é possível se comparar a diferença entre as profundidades lidas (y_{lida}) no modelo reduzido e as encontradas (y_{HEC}) a partir da simulação feita para as quatro vazões de escoamento ensaiadas. Observa-se que em alguns casos as maiores diferenças entre as profundidades lidas e as simuladas ocorreram nas seções 28 e 19. Tem-se que nessas seções o escoamento possuía maior velocidade, o que dificultava às leituras, assim, as profundidades lidas podem não estar exatamente corretas.

Tabela 5.1 – Comparações entre as profundidades lidas e simuladas no HEC-RAS para um n de 0,012

Seção	Q (m³/s)	y_{lida} (m)	y_{HEC} (m)	Fr
28	0,0038	0,070	0,060	0,95
19		0,060	0,050	0,56
10		0,095	0,090	0,41
28	0,0111	0,110	0,110	0,96
19		0,080	0,090	0,59
10		0,125	0,140	0,41
28	0,0194	0,160	0,140	0,99
19		0,100	0,070	2,02
10		0,165	0,170	0,45
28	0,0278	0,200	0,170	0,99
19		0,110	0,090	1,69
10		0,190	0,190	0,47

Na **Figura 5.1** estão apresentados, para as quatro vazões ensaiadas, os perfis da linha d'água ao longo do modelo reduzido. Observa-se que no primeiro trecho, o qual está entre a primeira (seção 28) e a segunda (seção 19) seções utilizadas nas medições, o escoamento é prioritariamente supercrítico, algo que também foi observado no modelo reduzido. Já no segundo trecho, entre a segunda e a terceira seção (seção 10), o escoamento é subcrítico, também de acordo com o ocorrido no modelo físico.

Figura 5.1 – Perfis da linha d'água ao longo do modelo reduzido – (a) vazão de 0,0038 m³/s; (b) 0,011 m³/s; (c) 0,019 m³/s e (d) 0,028 m³/s

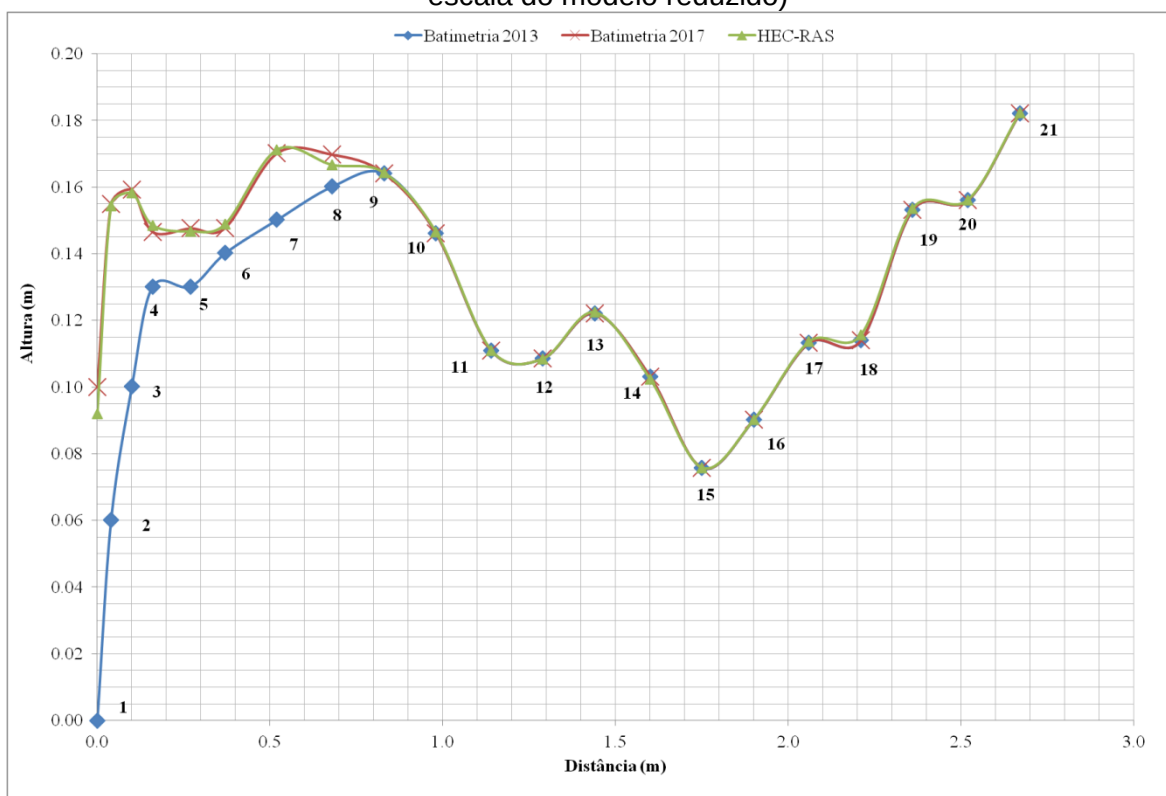


Entretanto, após a calibração do coeficiente de rugosidade de Manning, construiu-se o vertedor do modelo reduzido e ele passou a controlar o escoamento. Assim, foi necessário repetir o processo de calibração. Porém, não mais utilizando os níveis d'água do escoamento, mas as alturas do assoreamento ocorrido entre 2013 e 2017. Utilizando-se as vazões diárias e a curva-chave de sedimentos do período, buscou-se um valor de n que reproduzisse o assoreamento simulado no HEC-RAS próximo ao real, sendo o melhor valor médio encontrado de 0,035. Esse novo valor foi superior ao encontrado no procedimento anterior de calibração ($n = 0,012$). Isso se deve à construção do vertedor, à nova topografia – no procedimento anterior foi utilizada a topografia primitiva da PCH, a qual é de 1956, já no

segundo utilizou-se a de 2013 – e também ao fato de ter sido necessário revestir o modelo com argamassa e impermeabilizante, visto que havia muitos vazamentos.

Na **Figura 5.2** estão apresentados o assoreamento simulado, utilizando-se n médio igual a 0,035, e a batimetria de 2017 da PCH. Os valores já foram convertidos para a escala do modelo reduzido. Percebe-se que o assoreamento modelado está praticamente igual ao real, indicando boa calibração do valor de n .

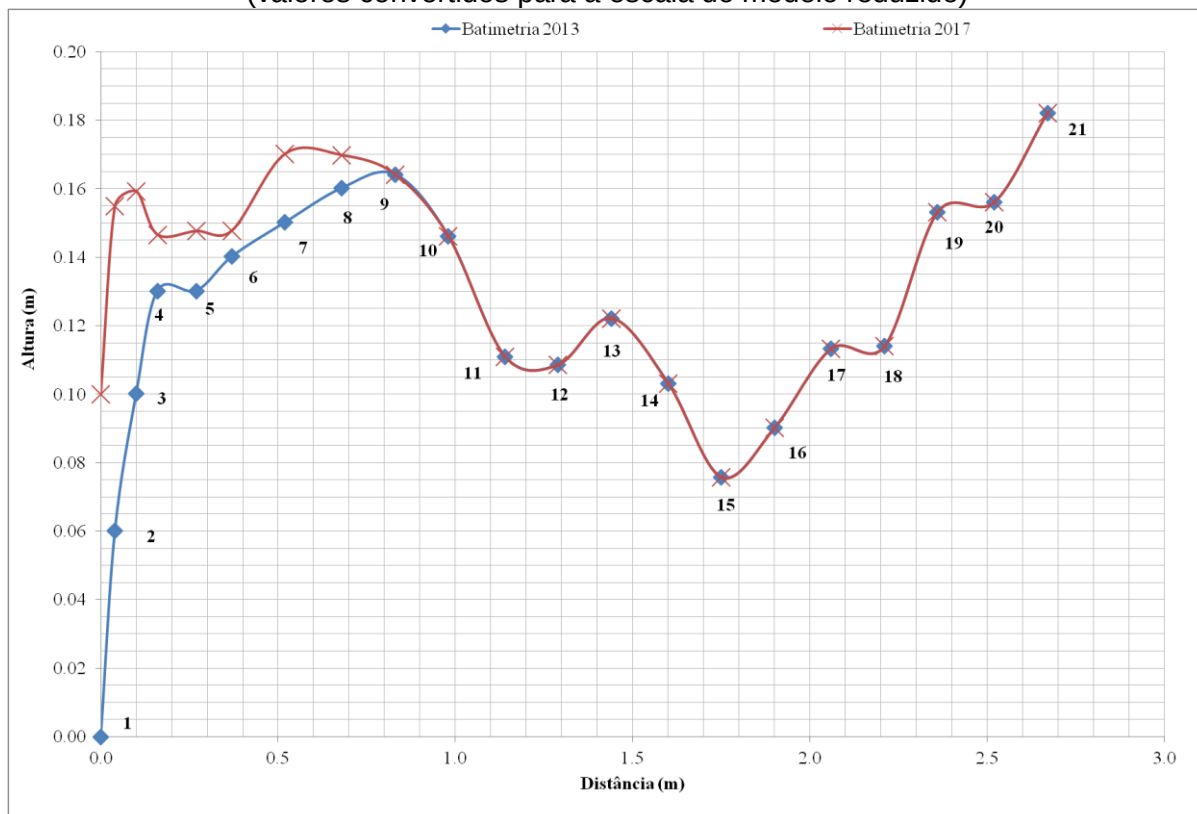
Figura 5.2 – Perfil longitudinal do assoreamento real da PCH e o simulado no HEC-RAS, utilizando-se as vazões diárias, para os anos 2013 e 2017 (valores convertidos para a escala do modelo reduzido)



5.1.2 Validação do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba

Para validação do modelo reduzido foram utilizadas as batimetrias de 2013 e 2017, as quais foram convertidas para o modelo físico, cujos perfis estão apresentados na **Figura 5.3**. Para cada uma das 21 seções transversais utilizadas na simulação estocástica, determinou-se o seu ponto de menor cota para compor esse perfil longitudinal. Esse procedimento é o mesmo adotado pelo HEC-RAS, o qual foi utilizado na simulação de milhares de resultados de assoreamento. A seção “1” é a mais próxima do vertedor e a “21”, conseqüentemente, a mais à montante dele. Pela **Figura 5.3**, percebe-se que o assoreamento entre 2013 e 2017 se deu entre as seções “1” e “9”, ou seja, ocorreu mais próximo ao vertedor.

Figura 5.3 – Perfil longitudinal do fundo do reservatório da PCH para os anos 2013 e 2017 (valores convertidos para a escala do modelo reduzido)



Conforme descrito no item 4.3.3, a primeira tentativa de simulação do assoreamento do modelo reduzido da PCH, entre os anos 2013 e 2017, foi utilizando-se as vazões anuais, pelo fato de se estar utilizando o modelo anual AR(1) na geração estocástica (item 5.2). Porém, essas vazões eram baixas e não provocaram transporte de sedimento, como apresentado na **Figura 5.4**, ou seja, o sedimento permaneceu próximo à seção 21 onde foi inserido, sendo ela a mais à montante do reservatório. Por isso, o procedimento adotado mostrou-se incapaz de reproduzir o assoreamento real ocorrido na PCH, observado na **Figura 5.3**.

Um procedimento utilizado em hidráulica fluvial para se verificar o movimento ou não de partículas junto ao leito é o ábaco de Shields, o qual relaciona o início de movimento das partículas a parâmetros adimensionais, sendo que eles foram apresentados na Equação 3.41 e 3.42. Utilizando-se esse ábaco, observou-se para as vazões 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 HEC-RAS, encontraram-se as tensões cisalhantes das 21 seções, para as cinco vazões anuais. Essas tensões estão apresentadas na **Tabela 5.2**. Utilizando-as, foram calculadas as tensões de

arraste adimensionais ($\bar{\tau}$) e os números de Reynolds de arraste (Re^*), os quais estão na Tabela 5.3.

Figura 5.4 – Assoreamento próximo à seção “21”, a qual é a seção onde o sedimento era inserido no modelo reduzido



Tabela 5.2 – Tensões cisalhantes para as 21 seções transversais, referentes às vazões anuais

Seções	Vazões (m³/h)				
	6,77	2,78	4,97	7,12	5,28
	τ_0 (Pa)				
21	0,022	0,005	0,012	0,023	0,014
20	0,024	0,006	0,013	0,025	0,015
19	0,022	0,005	0,013	0,023	0,014
18	0,024	0,006	0,014	0,026	0,015
17	0,022	0,005	0,012	0,023	0,014
16	0,027	0,006	0,015	0,028	0,017
15	0,022	0,005	0,012	0,023	0,013
14	0,022	0,005	0,012	0,023	0,014
13	0,024	0,005	0,013	0,025	0,015
12	0,027	0,006	0,015	0,029	0,017
11	0,026	0,006	0,014	0,028	0,016
10	0,027	0,006	0,015	0,029	0,017
9	0,059	0,013	0,032	0,062	0,036
8	0,019	0,005	0,012	0,022	0,013
7	0,017	0,004	0,009	0,018	0,011
6	0,020	0,005	0,011	0,021	0,012
5	0,017	0,004	0,009	0,018	0,010
4	0,015	0,003	0,008	0,016	0,009
3	0,010	0,002	0,005	0,010	0,006
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,002	0,000	0,001	0,002	0,001

Tabela 5.3 – Valores dos parâmetros do ábaco de Shields para as 21 seções transversais, referentes às vazões anuais

Seção	Vazões (m³/h)									
	6,77		2,78		4,97		7,12		5,28	
	$\bar{\tau}$	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

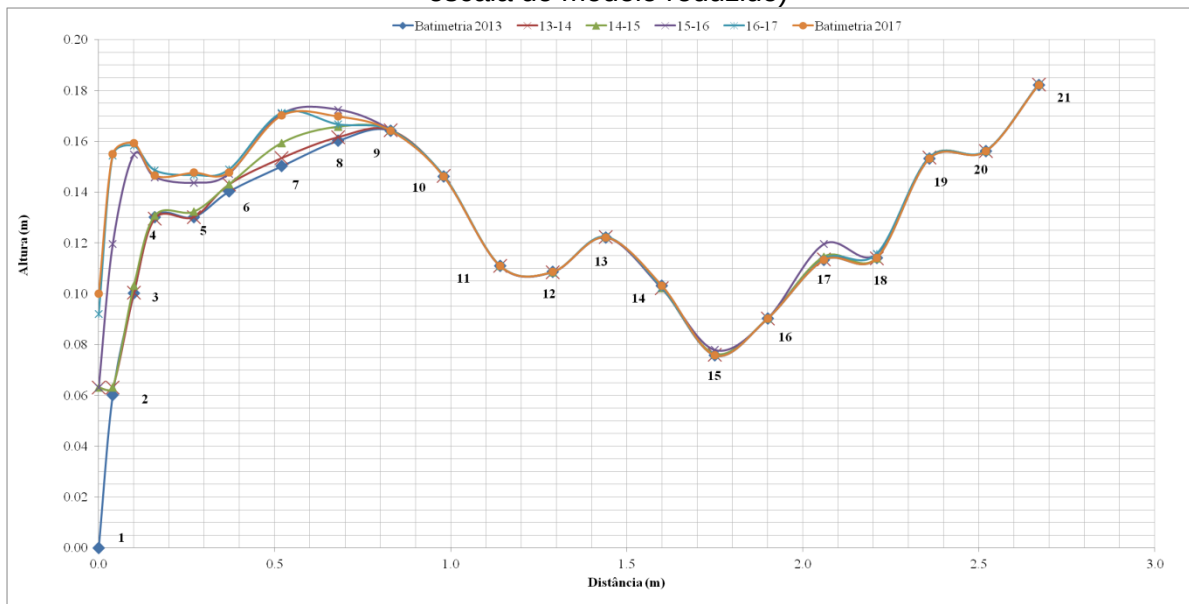
De acordo com a **Tabela 5.3**, os valores de $\bar{\tau}$ e Re^* variam de 0 a 0,026 e 0,987 a 14,132, respectivamente. Ou seja, no ábaco de Shields (**Figura 3.7**) todos eles estão abaixo da curva, o que indica repouso dos sedimentos. Assim, esse resultado numérico corrobora com o observado no modelo reduzido, ou seja, as vazões anuais são pequenas para produzir transporte das partículas sólidas.

Para se observar os valores de vazões que provocavam o transporte e a deposição de partículas sólidas, analisou-se o comportamento do assoreamento no período 2013-2017 utilizando-se as vazões diárias da série histórica da PCH e o “n” calibrado ($n = 0,035$), por meio do HEC-RAS (**Figura 5.2**). Verificaram-se que as movimentações de sedimentos ocorriam apenas nos períodos chuvosos que compreendiam as vazões máximas de cada ano.

Na **Figura 5.5** está apresentada a evolução do assoreamento para os períodos chuvosos dos anos hidrológicos (2013-2014, 2014-2015, 2015-2016 e 2016-2017). Observa-se que a cada período de máxima, de cada ano hidrológico, o assoreamento foi se acumulando até se ter um resultado, para o último ano (2016-2017), próximo ao real (batimetria de 2017). A altura assoreada sofreu maior variação do ano hidrológico 2014-2015 para o ano 2015-2016, isso se

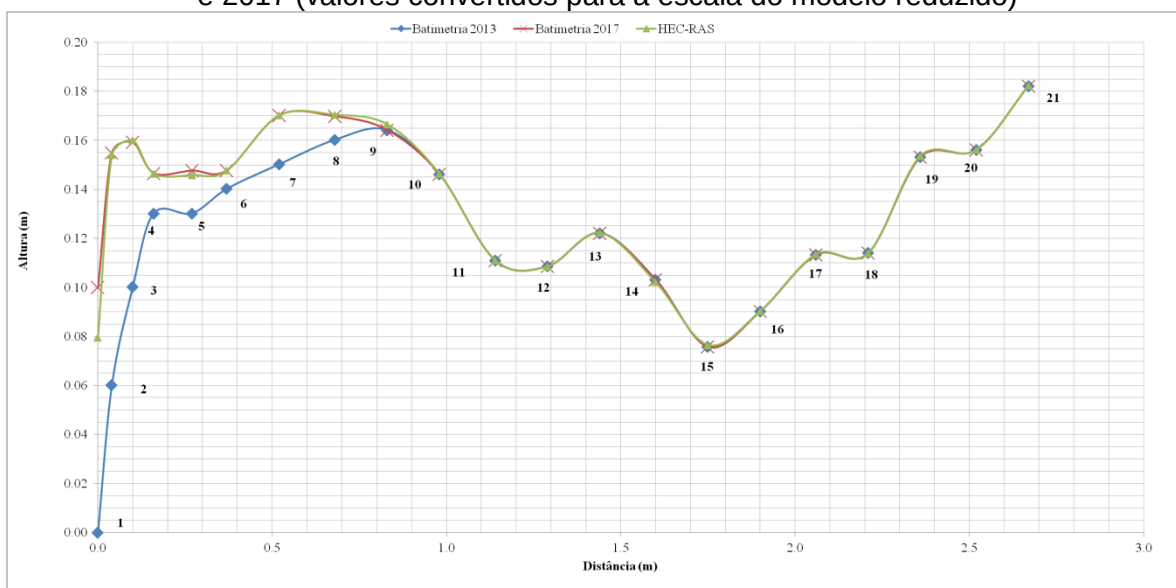
deve ao fato do ano 2014-2015 ter possuído dois picos de vazões máximas, como apresentado na **Figura 4.17**.

Figura 5.5 – Simulação, no HEC-RAS, da evolução do assoreamento para os períodos que compreendiam as vazões máximas de cada ano hidrológico (valores convertidos para a escala do modelo reduzido)



Diante disso, promoveu-se nova simulação no HEC-RAS, porém, ao invés de se utilizar as vazões diárias, como na anterior (**Figura 5.2**), utilizaram-se as vazões médias dos períodos que compreendiam as máximas de cada ano hidrológico. O resultado é apresentado na **Figura 5.6**.

Figura 5.6 – Perfil longitudinal do assoreamento real da PCH (batimetria 2017) 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)



Observa-se na **Figura 5.6** que o assoreamento simulado no HEC-RAS é semelhante ao da batimetria de 2017 para quase todas as seções, tendo uma diferença maior, 2,0 cm, na seção “1”, o que representa 50,0 cm no protótipo. Possivelmente, essa seção foi afetada devido à sua proximidade com o vertedor, visto que ela está apenas a 2,5 cm dessa estrutura (valor para o modelo reduzido). Dessa forma, as linhas de correntes que saem do fundo dessa seção e atravessam o vertedor podem promover a ressuspensão dos sedimentos e o seu consequente vertimento.

Como na simulação no HEC-RAS as vazões médias dos períodos de máximas resultaram em um assoreamento com boa concordância com o real, no modelo reduzido também se utilizou essas vazões para simular o ocorrido entre 2013 e 2017. O procedimento descrito no item 4.3.3 foi repetido duas vezes, para se verificar a eficiência de sua execução, sendo o resultado apresentado na **Figura 5.7**. Percebe-se que o assoreamento ocorreu nas dez últimas seções transversais (seção “1” a “10”), enquanto que no protótipo foi entre as nove últimas seções. Entretanto, o sedimento acumulado na seção “10” consiste em uma fina camada da ordem de 1,0 mm, o que representa 2,5 cm na PCH, ou seja, um valor muito pequeno. Assim, apesar de ter ocorrido assoreamento nessa seção, tem-se que o procedimento utilizado representou bem o real, como será descrito a seguir.

A **Figura 5.8** apresenta o perfil longitudinal do assoreamento, resultado das medições feitas nas seções apresentadas na **Figura 5.7**. Ressalta-se que as medições da altura assoreada foram feitas no ponto de menor cota da seção transversal. Percebe-se que o assoreamento do modelo físico se aproximou do real, indicando que ele reproduziu de forma eficiente o que ocorreu no protótipo no período de 2013 a 2017. As duas repetições do procedimento apresentaram resultados similares, por isso, na figura está apresentada apenas a média do assoreamento ocorrido no modelo físico.

Pela **Figura 5.8**, observa-se que as duas seções onde o resultado do assoreamento no modelo reduzido mais se distanciou da batimetria de 2017 foram a três e a quatro, mas pode-se notar que o excesso de sedimento na seção quatro é praticamente igual ao que falta na três. Foi observado durante a execução do procedimento de simulação do assoreamento no modelo reduzido, que se o tempo de escoamento fosse um pouco maior, possivelmente a altura dos depósitos de sedimentos nessas seções tenderia a se igualar ao real. Porém, optou-se por

manter o tempo estabelecido anteriormente como forma de compatibilizar o procedimento do modelo físico com o estocástico.

Figura 5.7 – Assoreamento obtido no modelo reduzido utilizando-se as vazões médias dos períodos de máximas, para o período entre 2013 e 2017

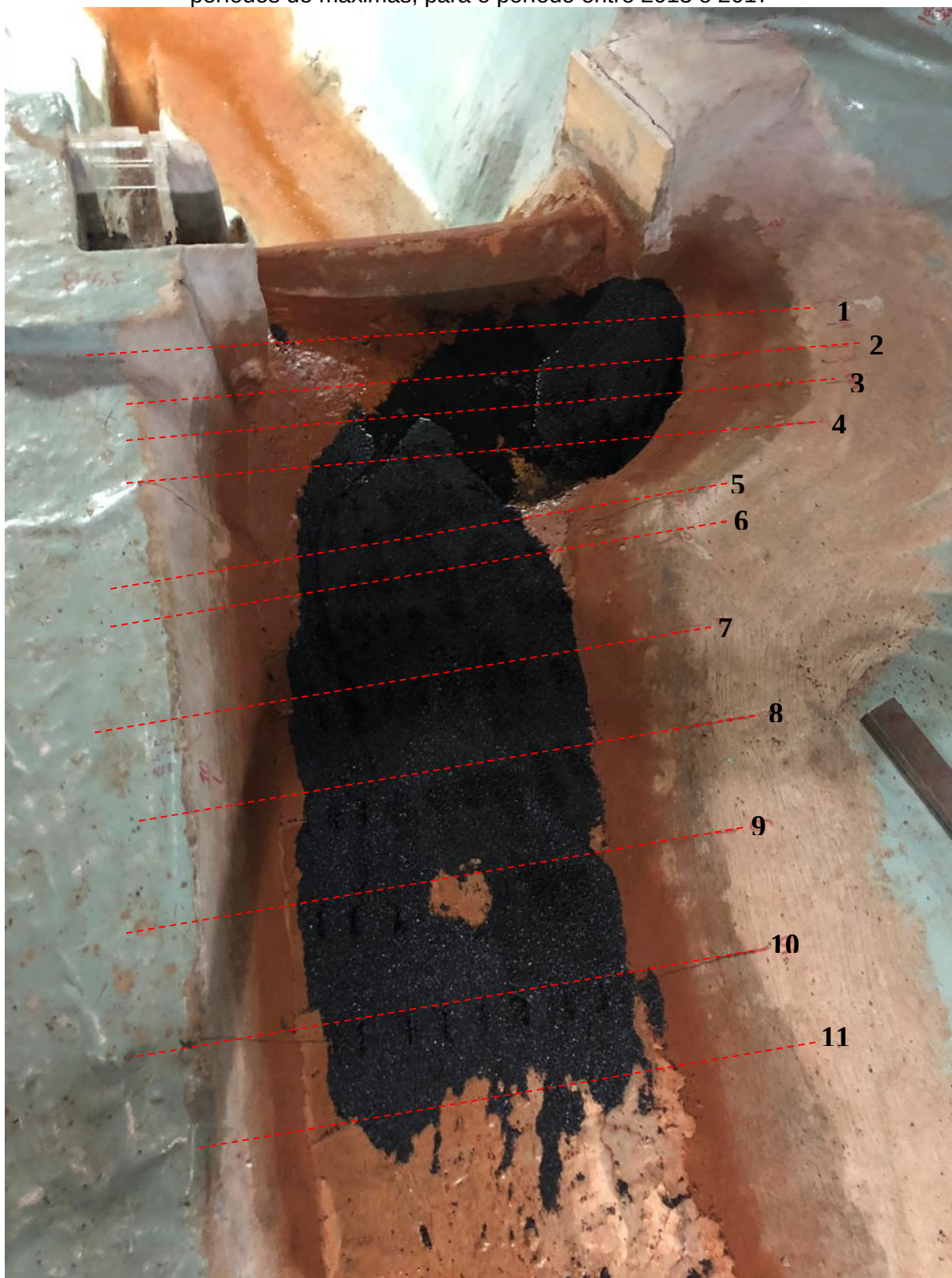
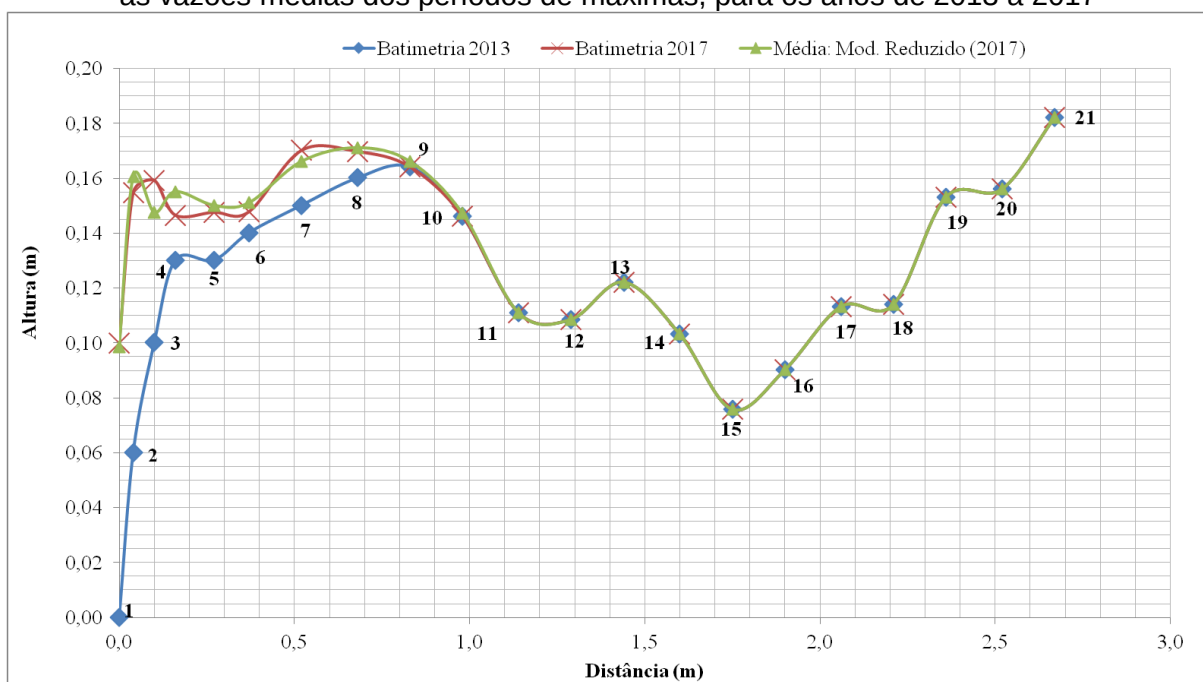


Figura 5.8 – Perfil longitudinal do assoreamento real da PCH (batimetria de 2017) e o observado no modelo reduzido (média das duas repetições do experimento), utilizando-se as vazões médias dos períodos de máximas, para os anos de 2013 a 2017



Simulação do assoreamento no modelo físico para validação do método estocástico

Para se validar o método estocástico desenvolvido, foi simulado outro período de assoreamento no modelo reduzido, o qual foi de 2008 a 2012. Nesse procedimento também foram utilizadas as vazões médias dos períodos de máximas, de cada ano. Como não se tinha a batimetria de 2008 da PCH, manteve-se, no modelo reduzido, a batimetria de 2013, ou seja, apenas os dados hidrossedimentológicos são referentes ao período 2008-2012. Ressalta-se que o interesse era apenas comparar o assoreamento do modelo físico com o do estocástico, de forma que se utilizar a batimetria de 2013 não interferiu nesse objetivo. O assoreamento do período em questão está apresentado na **Figura 5.9** e na **Figura 5.10** está o perfil longitudinal desse assoreamento.

Na **Figura 5.9** observa-se que o assoreamento ocorreu entre as seções “1” e “11”, entretanto, nessa última seção a camada de sedimento era muito fina e não estava no local de medição, o qual é o ponto de menor cota da seção transversal. Por isso, pela **Figura 5.10**, percebe-se que os depósitos de sedimentos medidos ocorreram nas dez últimas seções transversais (seção “1” a “10”), assim como no período 2013-2017. Porém, as alturas assoreadas foram maiores, como deveriam ser, visto que as vazões do período 2008-2012 foram maiores que a do período analisado anteriormente, consequentemente, as descargas sólidas também foram

maiores. Na figura está apresentado apenas o assoreamento resultante da média das duas repetições do experimento, visto que os resultados foram similares.

Figura 5.9 – Assoreamento obtido utilizando-se as vazões médias dos períodos de máximas, para o período entre 2008 e 2012

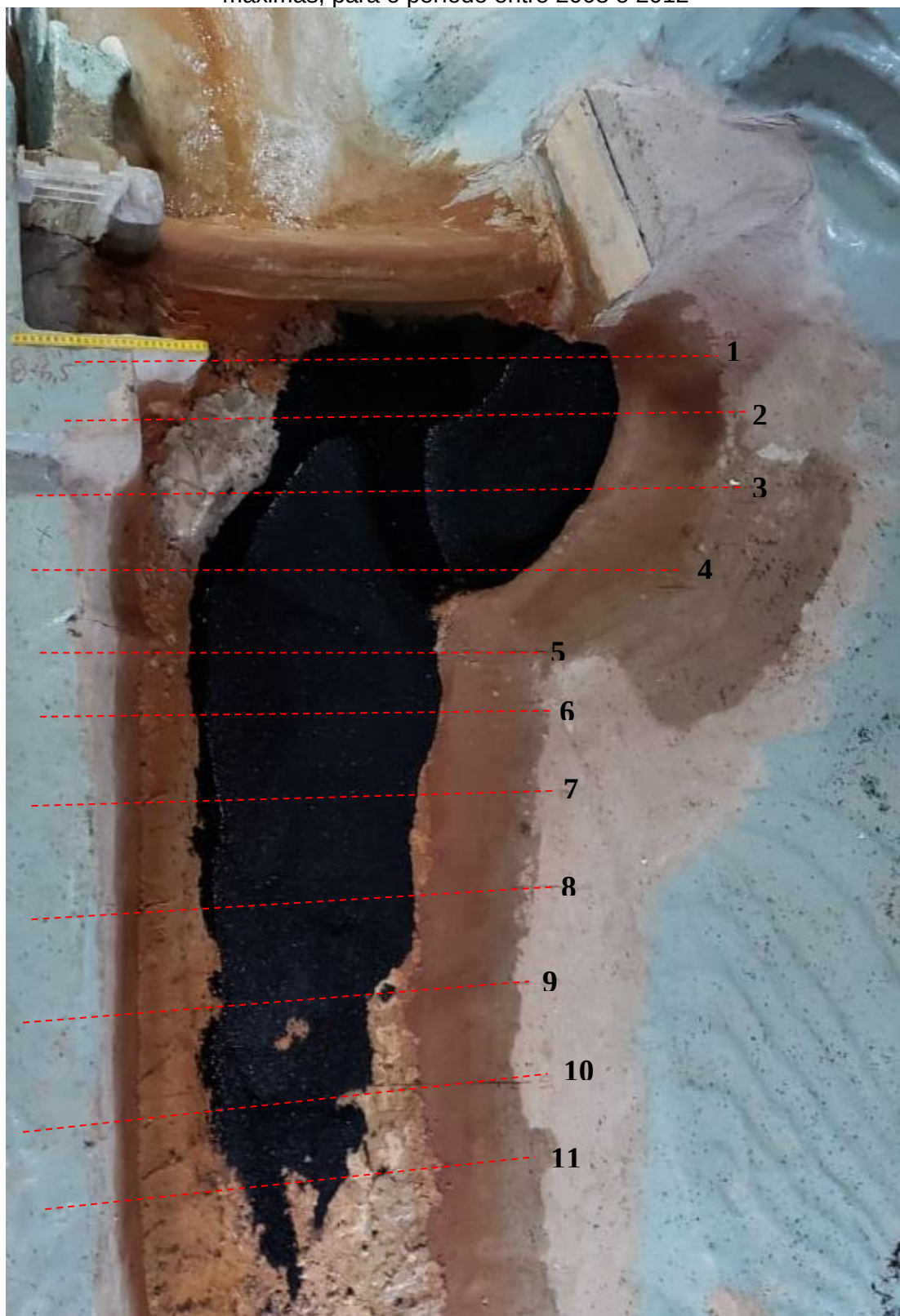
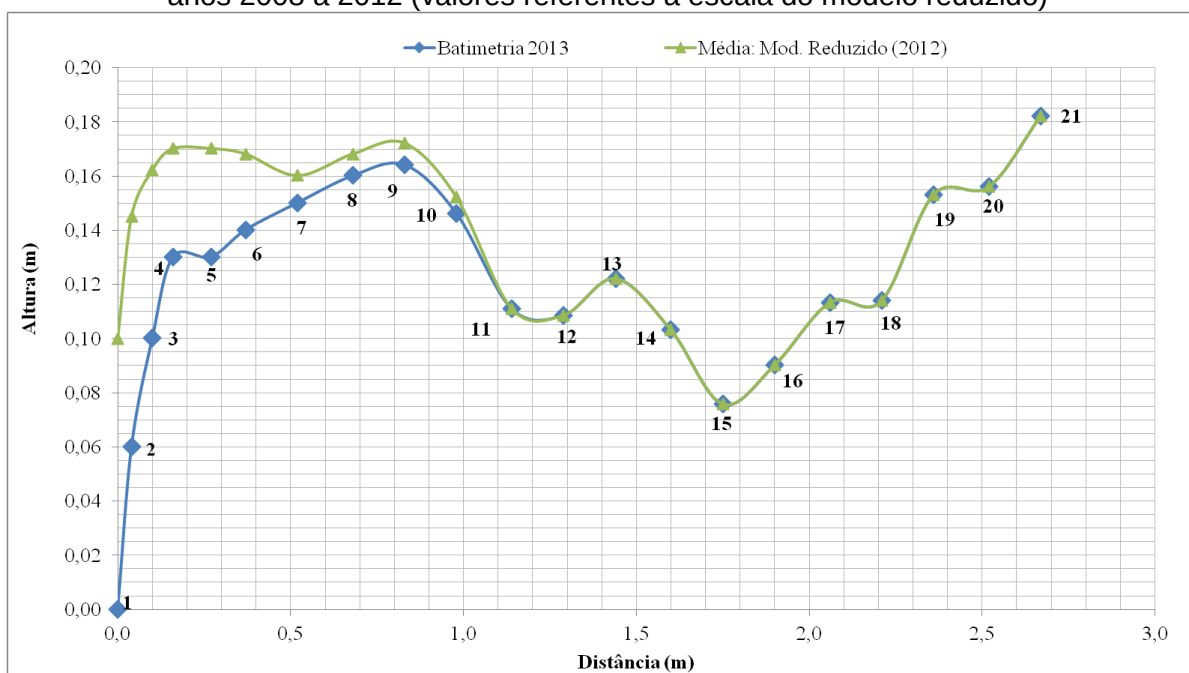


Figura 5.10 – Perfil longitudinal do assoreamento observado no modelo reduzido (média das duas repetições), utilizando-se as vazões médias dos períodos de máximas, para os anos 2008 a 2012 (valores referentes à escala do modelo reduzido)

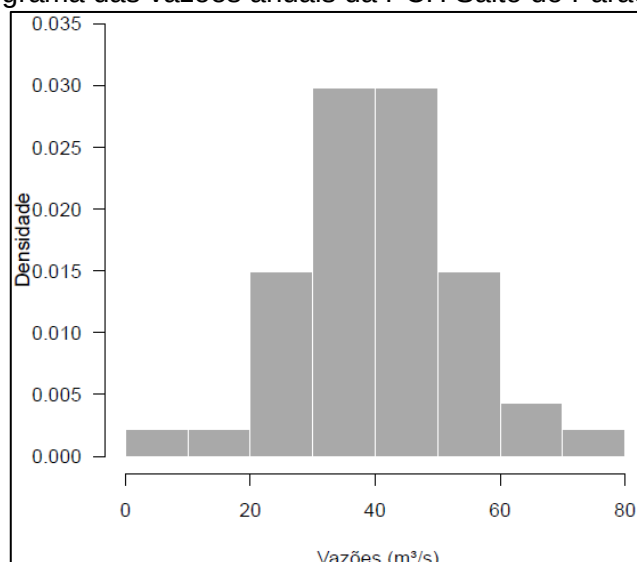


5.2 Modelagem estocástica dos dados hidrossedimentológicos

Antes de se utilizar o modelo estocástico AR(1), no programa R, testaram-se as suas premissas, sendo uma delas é que a série de dados seja estacionária (no Apêndice A estão as funções desenvolvidas no programa). Ao se aplicar os teste não-paramétricos de *Spearman* e de *Mann-Kendall*, ambos a 5% de nível de significância, obteve-se que a série histórica de vazões anuais é estacionária, ou seja, não existe tendência temporal, atendendo, assim, a um dos requisitos do modelo AR(1).

Utilizando-se novamente o R, fez-se o histograma (**Figura 5.11**) da série anual (1967 a 2017) de vazões da PCH para se verificar a tendência dos dados. A média encontrada foi de 40,68 m³/s, a mediana foi 40,31 m³/s e o desvio padrão 13,15 m³/s. Pela **Figura 5.11**, nota-se uma pequena assimetria nos dados, com maior ocorrência de valores no lado direito do bloco de maior frequência. Complementando a análise visual do histograma, aplicou-se o teste de *Shapiro-Wilk*, ao nível de 5% de significância, também pelo programa R, e obteve-se que a amostra provém de uma população Normal.

Figura 5.11 - Histograma das vazões anuais da PCH Salto do Paraopeba (1967 a 2017)



Para se verificar as autocorrelações dos dados de vazões anuais, fez-se o seu correlograma, o qual está apresentado na **Figura 5.12** e sua função de autocorrelação parcial (FACP) (**Figura 5.13**). O resultado obtido apresenta uma autocorrelação (ACF) significativa de, aproximadamente, 0,35 para o atraso 1 (*Lag* 1), sendo essa a única correlação significativa, de acordo com o intervalo de confiança (linha azul tracejada na **Figura 5.12**). No caso de modelos AR, se a série for estacionária, o correlograma cai rapidamente para os limites de autocorrelação igual a zero, como está acontecendo. No gráfico da FACP existe uma correlação significativa no *Lag* 1 seguido por correlações que não são significativas. Este padrão indica um modelo autorregressivo de ordem 1.

Figura 5.12 – Correlograma das vazões anuais da PCH Salto do Paraopeba (1967 a 2017)

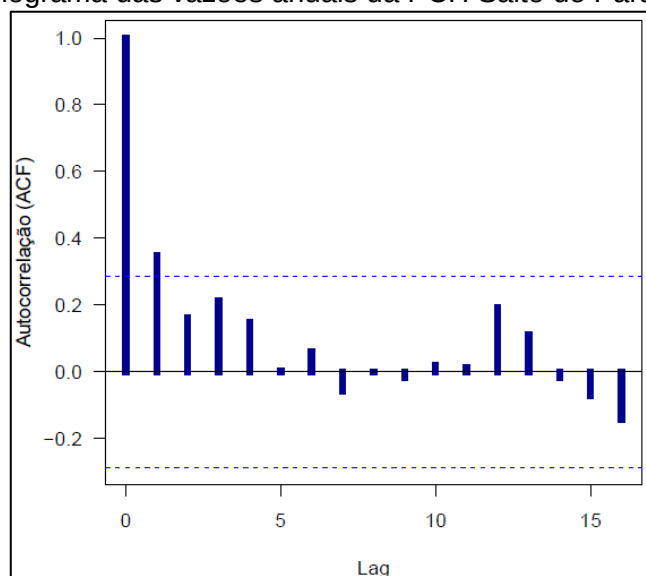
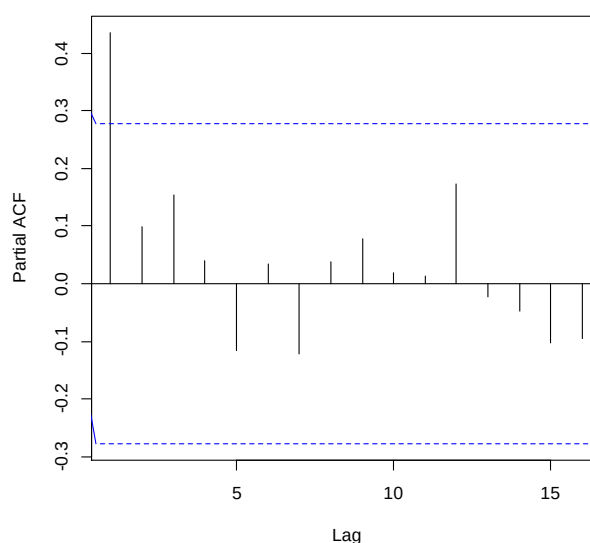


Figura 5.13 – Função de autocorrelação parcial das vazões anuais da PCH Salto do Paraopeba (1967 a 2017)



Atendidas as premissas de estacionariedade e normalidade para utilização do modelo estocástico autorregressivo AR(1), foram geradas 1000 séries sintéticas de vazões anuais da PCH seguindo o processo explicitado pela Equação 4.3, a qual garante, por meio do seu termo aleatório, que todas elas sejam diferentes. Para a geração, foi necessário desenvolver um código na plataforma do *software* R, o qual recebeu a série histórica anual de vazões, aplicou os testes de estacionariedade e de normalidade e, como as premissas foram validadas, geraram-se as séries sintéticas de vazões em um arquivo externo ao programa. O código encontra-se no Apêndice A.

De posse das 1000 séries sintéticas geradas, analisaram-se suas principais características estatísticas de maneira a compará-las às da série original. Os resultados são apresentados na **Tabela 5.4**, sendo que para as séries sintéticas os resultados são resultantes de todas as 1000 séries.

Tabela 5.4 – Principais parâmetros estatísticos da série original e das séries sintéticas

Parâmetro	Série original da PCH	Séries sintéticas			Variação média (%)
		Limite inferior	Média	Limite superior	
Vazão (m ³ /s)	40,68	37,30	40,67	44,01	-0,02%
Des. Padr. (m ³ /s)	13,15	10,78	12,98	14,87	-2,53%
Autocorrelação	0,35	-0,01	0,30	0,45	-17,14%

Conforme se verifica na **Tabela 5.4**, houve pequena variação média entre a série histórica e os parâmetros estatísticos das séries sintéticas, o que sugere que a média dos dados gerados em

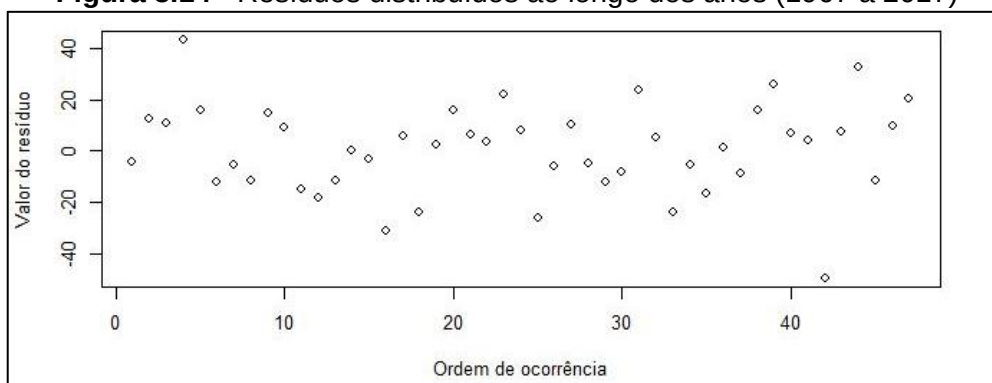
relação a cada item analisado pode ser considerada constante. A variação da autocorrelação, entretanto, foi maior, o que se deve à parcela aleatória do modelo AR(1). Porém, a autocorrelação de 0,30 das séries sintéticas continua sendo significativa, uma vez que ainda encontra-se acima do limite de 0,28.

Foram analisados também os resíduos das 1000 séries sintéticas, especificamente a média, a autocorrelação e a dispersão dos dados. Os resultados são mostrados na **Tabela 5.5** e na **Figura 5.14**. Os resíduos das vazões das séries sintéticas, com valor médio quase nulo, indicam que o modelo AR(1) se ajustou bem aos dados, de acordo com Chatfield (2000), desconsiderando-se a dimensão dos seus valores. Entretanto, a autocorrelação média dos resíduos, com valor próximo ao da série original, não indicou a independência dos dados. Ademais, os resíduos se dispersaram bastante ao longo do período representado pelos dados das séries sintéticas, conforme se verifica na **Figura 5.14**.

Tabela 5.5 – Principais parâmetros estatísticos dos resíduos das séries sintéticas

Parâmetro	Resíduos das séries sintéticas
Vazão (m ³ /s)	-0,006
Autocorrelação	0,319

Figura 5.14 - Resíduos distribuídos ao longo dos anos (1967 a 2017)



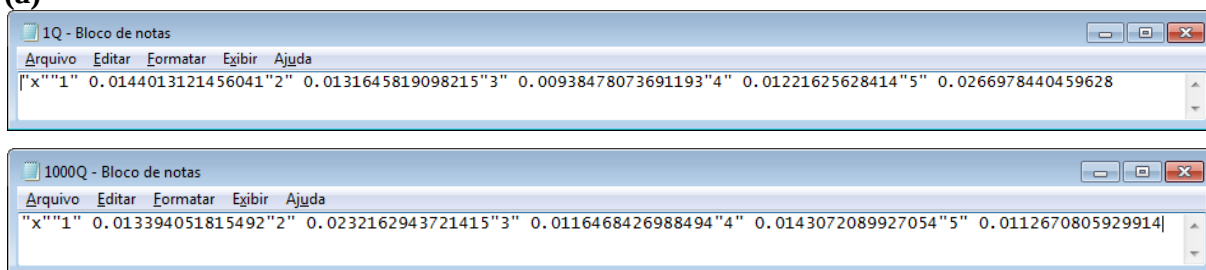
Verificado que o modelo AR(1) se ajustou bem aos dados, as vazões anuais geradas para a PCH foram multiplicadas pelo fator K , sendo ele obtido aleatoriamente a partir de uma distribuição Normal, conforme explicado no item 4.4. Isso se fez necessário para conversão das vazões anuais em vazões médias dos períodos de máximas, visto que são essas vazões que provocam transporte de sedimento no reservatório da PCH, como apresentado no item 5.1.2. Ressalta-se que os testes estatísticos aplicados, a 5% de significância, os quais foram indicados no item 4.4, apresentaram que o conjunto de dados contendo o fator K (**Figura 4.22**) é homogêneo, independente, aleatório e não estacionário. Porém, foi observado que o

conjunto é não estacionário devido a dois altos valores discrepantes, os quais ocorreram em anos atípicos, em que a vazão anual foi baixa, mas as vazões máximas foram elevadas. Além disso, o *p-value* de 2,2 encontrado no teste de estacionariedade é próximo ao esperado de 2,0 para que a série fosse estacionária. Assim, optou-se por continuar trabalhando com esse conjunto.

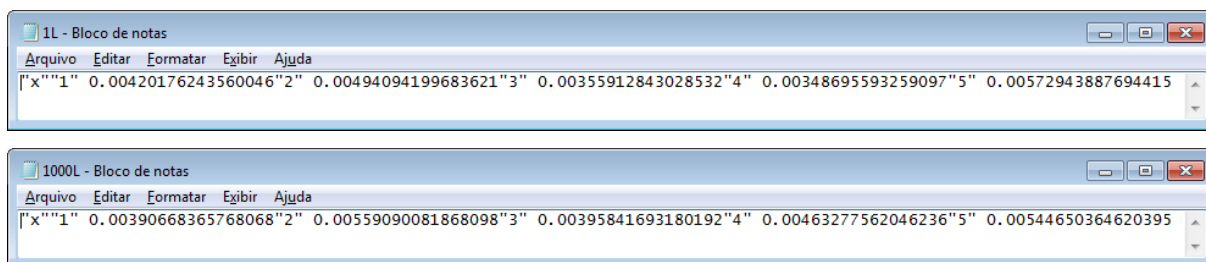
Apesar de não provocarem transporte de sedimento, as vazões anuais foram úteis para a geração das descargas sólidas totais, as quais propiciaram quantidade de sedimento acumulado próxima da real. Assim, foram geradas 1000 séries contendo as vazões médias dos períodos de máximas, 1000 contendo as vazões anuais e outras 1000 com as descargas sólidas totais. Optou-se por salvar as séries em arquivos separados para facilitar a inserção automática desses dados no programa HEC-RAS. Para ilustrar o resultado da geração estocástica, na **Figura 5.15** estão apresentadas algumas séries geradas.

Figura 5.15 – Séries com os dados hidrossedimentológicos gerados estocasticamente

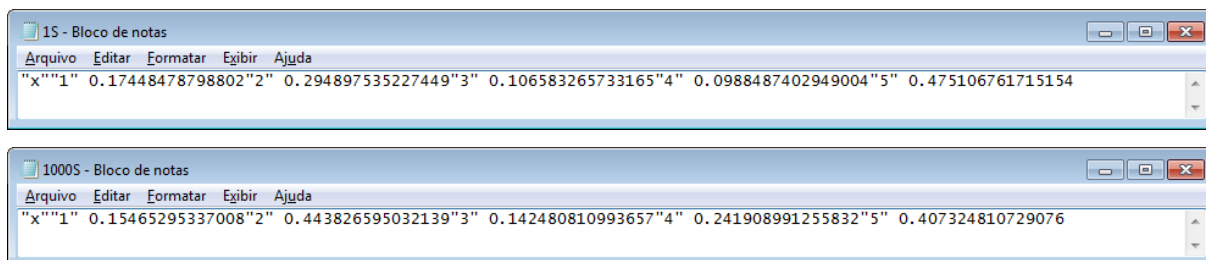
(a)



(b)



(c)



Na figura, foram apresentadas a primeira e a milésima série gerada para cada parâmetro estocástico, de forma a se evidenciar que as 1000 séries são diferentes umas das outras. Na **Figura 5.15(a)** estão as vazões médias dos períodos de máximas. A **Figura 5.15(b)** apresenta as vazões anuais utilizadas para gerar as descargas sólidas totais (**Figura 5.15(c)**). Nos arquivos estão apresentados cinco valores para cada parâmetro, já que foram simulados cinco anos de assoreamento no modelo reduzido da PCH (2013 a 2017). Ressalta-se que os valores apresentados já estão na escala do modelo reduzido. Diante do apresentado na **Figura 5.15**, tem-se que os códigos desenvolvidos no R funcionaram e permitiram a geração das séries sintéticas de dados hidrossedimentológicos, visto que, como apresentado, as estatísticas médias das séries sintéticas se aproximaram das reais.

5.3 Automatização do modelo determinístico e simulação estocástica do assoreamento no modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba

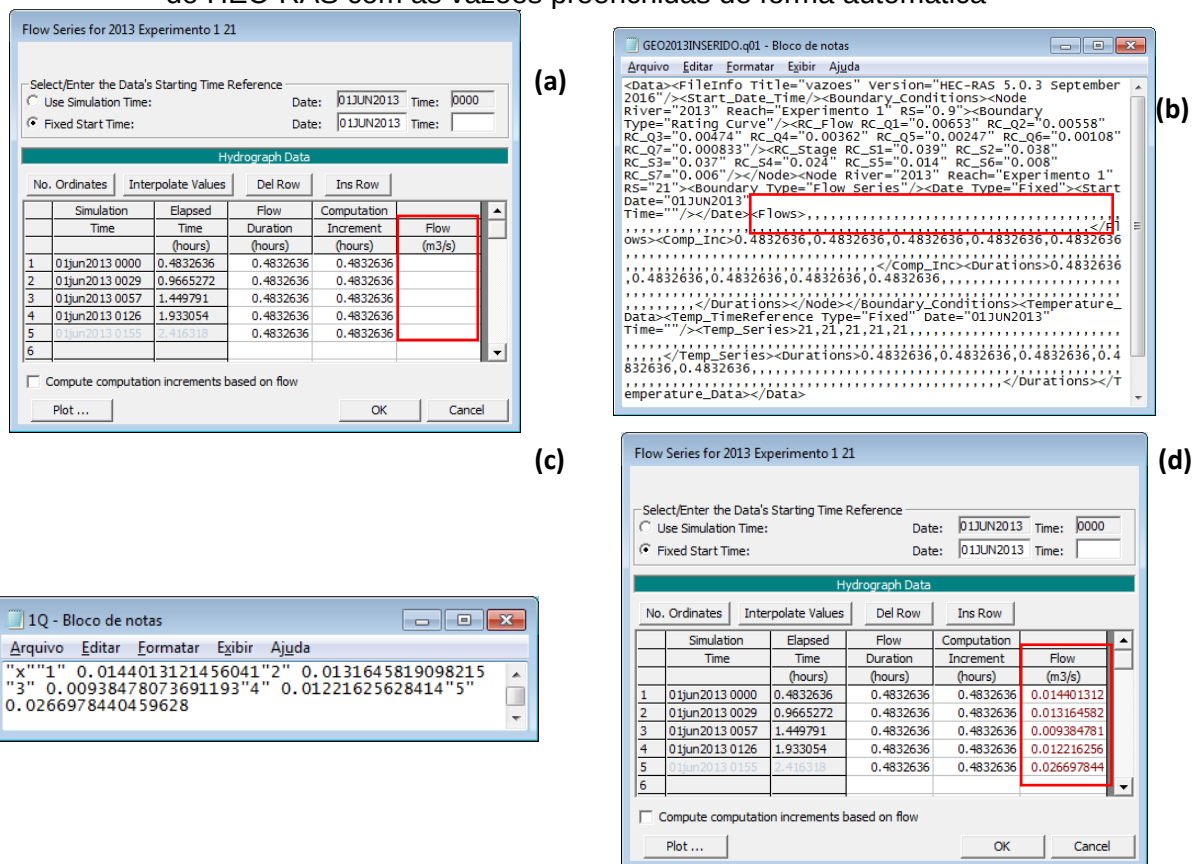
As 1000 séries de dados hidrossedimentológicos (vazões médias dos períodos de máximas, vazões anuais e descargas sólidas totais) geradas no R foram introduzidas automaticamente no HEC-RAS. Para fazer esse controle automático do programa hidráulico, foram desenvolvidos códigos no MATLAB, os quais estão apresentados no Apêndice B.

A partir deles, foi possível fazer a leitura de um arquivo contendo um projeto criado no HEC-RAS (arquivo com extensão “prj”. Nele há a geometria do reservatório e as características dos sedimentos), identificar os 3000 arquivos (extensão “txt”) com os dados hidrossedimentológicos (1000 arquivos para cada parâmetro), transferi-los para o HEC-RAS, fazer a simulação do assoreamento e extrair o seu resultado final. Na **Figura 5.16** estão apresentados os arquivos em branco, quando criados no HEC-RAS, e os preenchidos a partir da execução dos códigos computacionais desenvolvidos no MATLAB.

Quando se pretende simular o assoreamento no HEC-RAS, deve-se preencher a série de vazões no regime “*quasi-unsteady*”, sendo que na **Figura 5.16(a)** está apresentada a janela do programa referente a esse regime de escoamento, onde se percebe que não há vazões informadas. Quando se salva o arquivo da **Figura 5.16(a)**, o HEC-RAS gera um arquivo com extensão reconhecida por ele. Esse arquivo está apresentado na **Figura 5.16(b)**, onde se percebe que não há vazões preenchidas, há apenas espaços entre as vírgulas, sendo que são neles que ficaram as vazões preenchidas. Na **Figura 5.16(c)**, têm-se as vazões geradas a partir do modelo estocástico AR(1). Estão apresentados apenas cinco valores, pois foram simulados

cinco anos de assoreamento, mas podem-se preencher no HEC-RAS quantas vazões forem necessárias. Após executar os códigos no MATLAB, os valores da **Figura 5.16(c)** foram inseridos automaticamente no HEC-RAS, o que pode ser visto na **Figura 5.16(d)**. Ressalta-se que os códigos do MATLAB fazem o preenchimento das vazões no arquivo apresentado na **Figura 5.16(b)**, ou seja, eles preenchem o arquivo de texto (“txt”), o qual quando aberto no HEC-RAS apresenta a interface da **Figura 5.16(d)**.

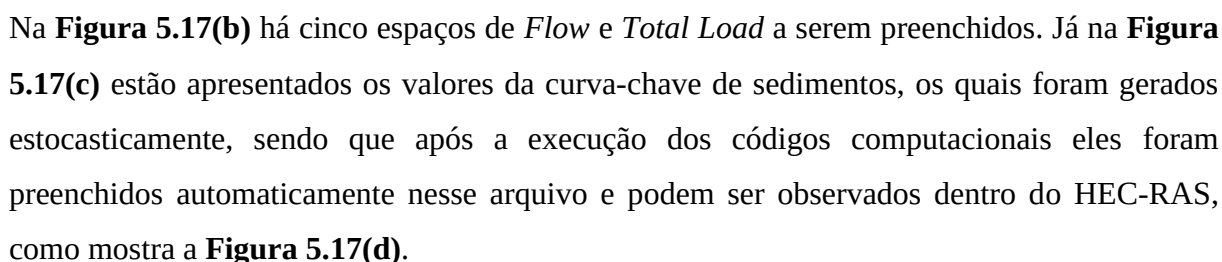
Figura 5.16 – Sequência de preenchimento de vazões de forma automática no HEC-RAS: (a) Arquivo do HEC-RAS sem dados de vazões; (b) Arquivo criado quando se salva um arquivo de vazões no HEC-RAS; (c) Vazões geradas a partir do modelo AR(1); (d) Arquivo do HEC-RAS com as vazões preenchidas de forma automática



Outra informação que deve ser fornecida ao HEC-RAS para que ele simule o assoreamento de um reservatório é a curva-chave de sedimentos, ou seja, a relação entre vazão (*Flow*) e a descarga sólida total (*Total load*), a qual também foi preenchida automaticamente a partir dos códigos computacionais (**Figura 5.17**).

Na **Figura 5.17(a)** está apresentada, para o HEC-RAS, a curva-chave de sedimentos sem nenhum dado. Ressalta-se que estão apresentados apenas dois campos a serem preenchidos por questão de espaço na figura, mas foram selecionados cinco campos (5 sets) referentes aos

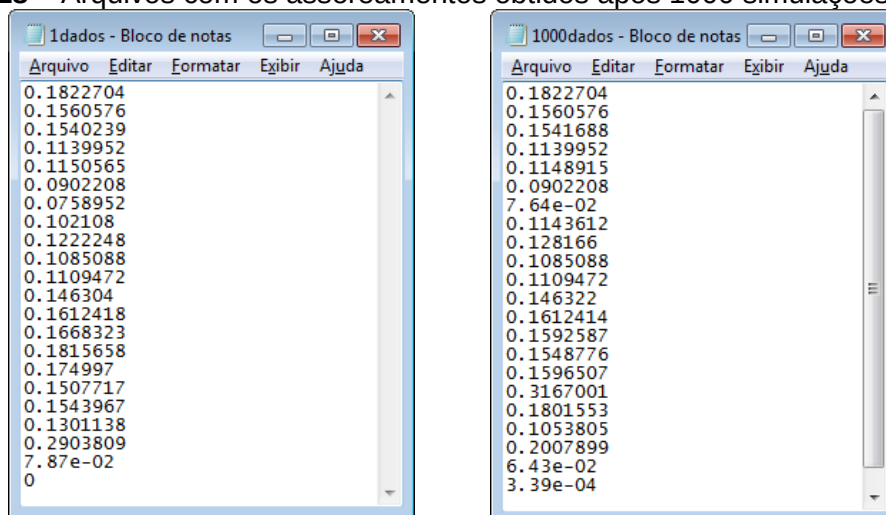
Figura 5.17 – Sequência de preenchimento da curva-chave de sedimentos de forma automática no HEC-RAS: (a) Arquivo do HEC-RAS sem dados de vazões e descargas sólidas totais; (b) Arquivo criado quando se salva um arquivo de curva-chave de sedimentos no HEC-RAS; (c) Curva-chave de sedimentos gerada estocasticamente; (d) Arquivo do HEC-RAS com a curva-chave de sedimentos preenchida de forma automática



Terminados os preenchimentos automáticos necessários, os códigos promoveram 1000 simulações do assoreamento e extraíram os resultados em arquivos de texto, como

apresentado na **Figura 5.18**. Na figura, para as 21 seções transversais, estão as alturas assoreadas, com relação ao ponto de menor cota da seção transversal, ocorridos na primeira e na milésima simulação, sendo os valores já convertidos para a escala do modelo reduzido.

Figura 5.18 – Arquivos com os assoreamentos obtidos após 1000 simulações no HEC-RAS



No programa R, desenvolveu-se um *script*, o qual está apresentado no Apêndice A, para ler os 1000 arquivos contendo os resultados do assoreamento obtidos via simulação estocástica e transformá-los em um único arquivo, que continha 21 colunas (uma coluna para cada uma das 21 seções transversais) e 1000 linhas (uma linha para cada resultado de assoreamento para a seção transversal de interesse). Esse mesmo *script* promoveu a determinação das estatísticas dos resultados: mediana, desvio padrão, máximo, mínimo e os quartis de probabilidade. Assim, a partir da simulação estocástica foi possível obter respostas mais completas ao se analisar o assoreamento em 21 seções transversais do reservatório da PCH, levando-se em consideração as incertezas envolvidas no processo e a variabilidade dos parâmetros usados no modelo.

Na **Tabela 5.6** estão apresentados os resultados do assoreamento após 1000 simulações estocásticas, para as 21 seções transversais, no período entre 2013 e 2017. Nela estão as principais estatísticas obtidas, sendo o 1º quartil referente a 25% e o 3º referente a 75%. Está apresentado também o assoreamento obtido a partir da batimetria realizada na PCH em 2017. Os valores correspondem às elevações em relação ao fundo de cada seção transversal.

Tabela 5.6 – Principais estatísticas da simulação estocástica para o assoreamento ocorrido na PCH Salto do Paraopeba (valores, em “m”, convertidos para o modelo reduzido)

Seção	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo	Desvio Padrão	Batimetria (2017)
1	0,085	0,093	0,100	0,106	0,125	0,009	0,100
2	0,060	0,117	0,196	0,261	0,294	0,076	0,155
3	0,097	0,114	0,142	0,182	0,281	0,046	0,159
4	0,126	0,134	0,141	0,150	0,174	0,012	0,147
5	0,127	0,134	0,140	0,148	0,170	0,014	0,148
6	0,140	0,144	0,147	0,152	0,165	0,011	0,148
7	0,150	0,156	0,162	0,170	0,189	0,011	0,170
8	0,158	0,165	0,169	0,175	0,191	0,010	0,170
9	0,161	0,164	0,165	0,168	0,174	0,017	0,165
10	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,000	0,146
11	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,000	0,111
12	0,109	0,109	0,109	0,109	0,109	0,000	0,109
13	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122	0,000	0,122
14	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,000	0,103
15	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076	0,000	0,076
16	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,000	0,090
17	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113	0,000	0,113
18	0,114	0,114	0,114	0,114	0,114	0,000	0,114
19	0,154	0,154	0,154	0,154	0,154	0,000	0,153
20	0,156	0,156	0,156	0,156	0,156	0,000	0,156
21	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,000	0,182

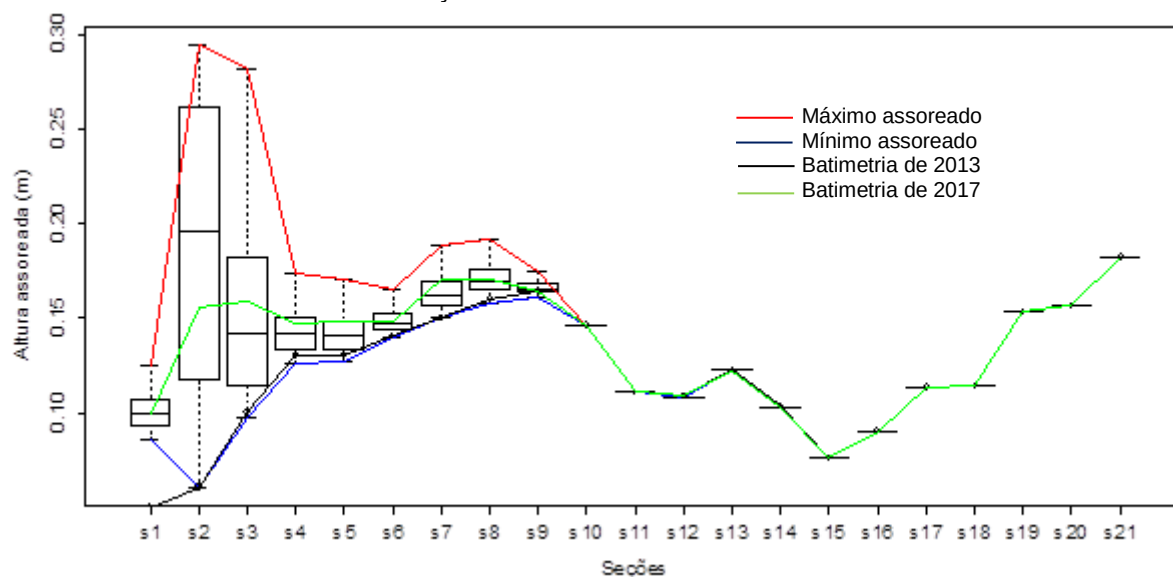
Na **Figura 5.19** está apresentada a dispersão dos resultados das 1000 simulações do assoreamento, em que a linha vermelha indica o máximo assoreamento obtido estocasticamente para cada seção, a azul o mínimo, a verde a batimetria de 2017 e a preta com pontos a batimetria de 2013. O traço grosso horizontal nos retângulos representa o valor mediano do assoreamento, já os limites inferior e superior representam, respectivamente, o 1º e o 3º quartil.

Pela **Figura 5.19**, observa-se que o método estocástico representou bem as seções onde ocorreu assoreamento, ou seja, assim como a batimetria de 2017, o assoreamento via simulação estocástica também só ocorreu entre as nove primeiras seções transversais (“s1” a “s9”). Assim, de acordo com o resultado do método estocástico, para 1000 combinações diferentes de vazões e curvas-chave de sedimento, a probabilidade de assoreamento entre as seções “10” e “21” é praticamente nula.

Ainda de acordo com a **Figura 5.19**, o assoreamento real sempre esteve entre os limites máximos e mínimos da simulação estocástica, restringindo-se entre o e 1º e 3º quartil, para todas as nove seções onde houve assoreamento. Tem-se que em quase todas as seções, exceto

a seção “2” (s2), a altura de sedimento apresentada pela batimetria de 2017 esteve entre o assoreamento mediano e o do 3º quartil de probabilidade, o que indica que o assoreamento real esteve entre 50 e 75% dos maiores valores simulados estocasticamente.

Figura 5.19 – Resultado da simulação estocástica para o assoreamento ocorrido entre 2013 e 2017, nas 21 seções transversais, e as batimetrias de 2013 e 2017



Com a simulação estocástica é possível estimar a probabilidade de ocorrência de determinada altura de assoreamento numa seção transversal, levando-se em consideração as incertezas e a variabilidade dos fatores que interferem nesse fenômeno. Assim, pode-se melhorar a tomada de decisão em projetos de reservatórios e promover sua operação dentro de margens de segurança, de forma que, ao se conhecer as chances de ocorrências de certos níveis de assoreamento, o funcionamento do reservatório não possa ser comprometido e/ou até inviabilizado.

Por exemplo, o resultado da simulação estocástica do assoreamento em reservatórios pode auxiliar num melhor dimensionamento do seu volume morto e também na escolha da cota da sua tomada d’água. Supondo que a tomada d’água do reservatório da PCH Salto do Paraopeba fosse posicionada no mesmo plano vertical da seção transversal “1” (s1) e a sua soleira estivesse na cota 0,10 m (valor da mediana nessa seção, estando ele na escala do modelo reduzido), tem-se que em 50% das simulações, ou seja, em 500 combinações diferentes de vazões e descargas sólidas totais, o assoreamento atingiria uma cota superior a 0,10 m, de forma que a tomada d’água seria assoreada nesse cenário. Obviamente, para a mesma suposição de cota, nas outras 500 simulações a tomada d’água não seria atingida pelo

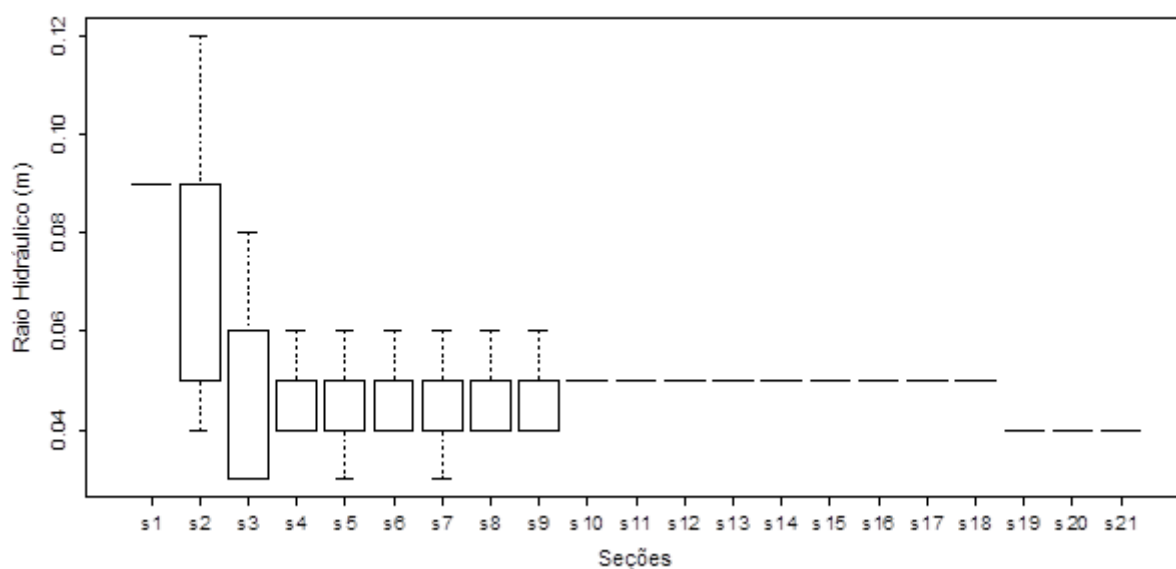
sedimento. Com isso, tem-se que a decisão da cota das estruturas hidráulicas caberá ao projetista, mas a simulação estocástica pode auxiliá-lo, apresentando-lhe os riscos, associados à sua decisão, de que a estrutura seja assoreada. Tem-se que a PCH foi paralisaada devido ao assoreamento na sua tomada d'água, sendo que essa estrutura está posicionada justamente entre as seções “2” e “3”, nas quais se poderia ter maior altura assoreada, sendo maior a incerteza na cota assoreada, como discutido a seguir.

De acordo com a **Figura 5.19**, nas seções “2” e “3” ocorreram as maiores dispersões dos resultados de assoreamento. A **Tabela 5.6** também apresenta que os maiores desvios padrões foram nessas seções. Durante as 1000 simulações, foram utilizadas vazões e descargas sólidas totais diferentes em cada simulação, porém, eram os mesmos valores para todas as seções, ou seja, a vazão que escoava na seção “1” obviamente era a mesma da seção “21”, o mesmo acontecia para a curva-chave de sedimento. A granulometria dos sedimentos também foi a mesma para todas as seções transversais. Os dois únicos parâmetros físicos diferentes entre as seções foram o coeficiente de rugosidade de Manning e a geometria da seção. Porém, a variação do primeiro não pode explicar a alta dispersão dos resultados nessas duas seções, visto que os valores de Manning calibrados são diferentes, mas muito próximos. Por exemplo, a dispersão dos resultados na seção “3” é bem maior que na “4”, mas os Manning são muito próximos, enquanto na “3” tem-se valor de 0,0352, na “4” o valor é de 0,0357. Assim, o principal motivo para os altos desvios padrões nas seções “2” e “3” é a geometria dessas seções.

Para comprovar a afirmação anterior, observaram-se os raios hidráulicos das 21 seções, sendo esse parâmetro afetado pela geometria da seção transversal e pelo seu nível d'água. Entretanto, não foi possível observar esse parâmetro para as 1000 simulações estocásticas, visto que os códigos computacionais desenvolvidos não permitiam isso. Assim, no HEC-RAS, obtiveram-se os raios hidráulicos das 21 seções transversais, para a simulação do assoreamento feita com as vazões diárias da série histórica da PCH (o resultado dessa simulação foi apresentado na **Figura 5.2**), sendo o período simulado compreendido entre 2013 e 2017. Como a simulação foi feita com vazões diárias para cinco anos, foram utilizadas 1825 vazões, consequentemente, foi obtido o mesmo número de raios hidráulicos, os quais foram plotados e estão apresentados na **Figura 5.20**.

Observa-se na **Figura 5.20** que a dispersão dos raios hidráulicos é semelhante à do assoreamento obtido via simulação estocástica, ou seja, as seções “2” e “3” apresentaram as maiores dispersões de raios hidráulicos e de assoreamento. Assim, tem-se que pequenas variações nas vazões, consequentemente, nos níveis d’água, provocaram grandes variações nos raios hidráulicos das seções “2” e “3”, devido às suas geometrias. Ocorre que ao se variar o raio hidráulico, varia-se a tensão cisalhante e a capacidade de transporte de sedimento, visto que o cisalhamento é um dos parâmetros da equação de Wilcock e Crowe (2003), a qual foi utilizada para simular o assoreamento no HEC-RAS. Além disso, tem-se que entre essas seções ocorre um vórtice, o que contribuiu para a variação do raio hidráulico.

Figura 5.20 – Raios hidráulicos, das 21 seções transversais, obtidos a partir das vazões diárias ocorridas entre 2013 e 2017 (valores convertidos para o modelo reduzido)



O tempo computacional para se gerar 1000 simulações estocásticas variou em torno de cinco horas, sendo que alguns interferentes podem afetar esse tempo, como a capacidade do processador do computador, a sua memória e até mesmo a temperatura local. Como se utilizou um aparelho antigo nas simulações, pode ser que computadores modernos diminuam o tempo das simulações. Tem-se que foram feitas 1000 simulações, pois foi gerado mesmo número de arquivos de vazões e curvas-chave de sedimentos. Porém, poderia ter ocorrido que em quantidade menor o assoreamento já convergisse para um resultado. Dessa forma, para as primeiras nove seções transversais, nas quais ocorreu assoreamento, compararam-se os resultados obtidos para diferentes quantidades de simulações (100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 e 1000 simulações), sendo que essas comparações estão apresentadas nas

Figura 5.21 e Figura 5.22. Nessas figuras estão apresentadas linhas tracejadas, as quais estão ligadas as principais estatísticas do resultado referente a 1000 simulações (s1000), sendo as seguintes estatísticas: mínimo, máximo, 1º e 3º quartis e mediana. As linhas foram traçadas para ajudar na visualização da conversão ou não dos resultados, de acordo com a quantidade de simulações realizadas.

Figura 5.21 – Comparações das estatísticas dos assoreamentos obtidos para diferentes quantidades de simulações: seções 1 e 6

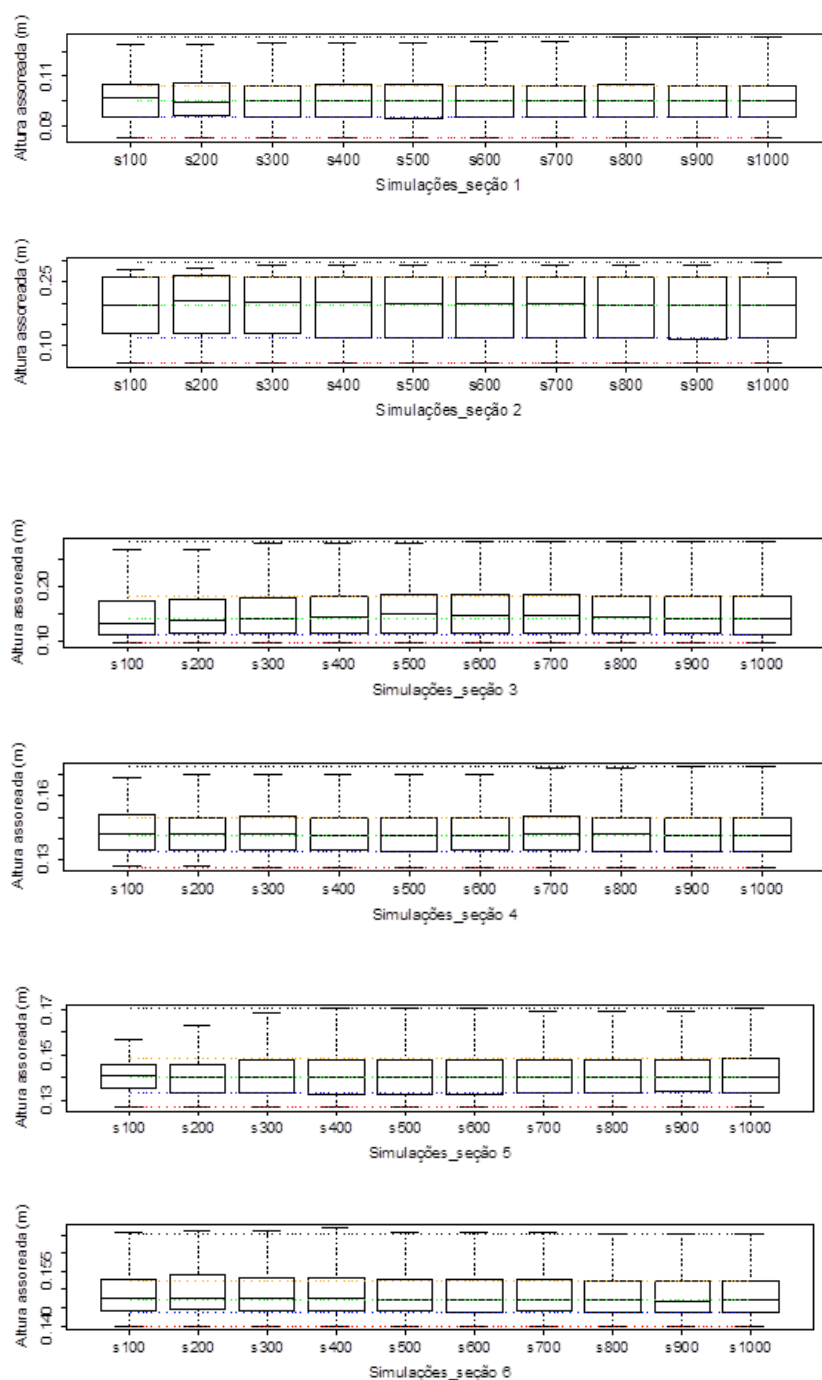
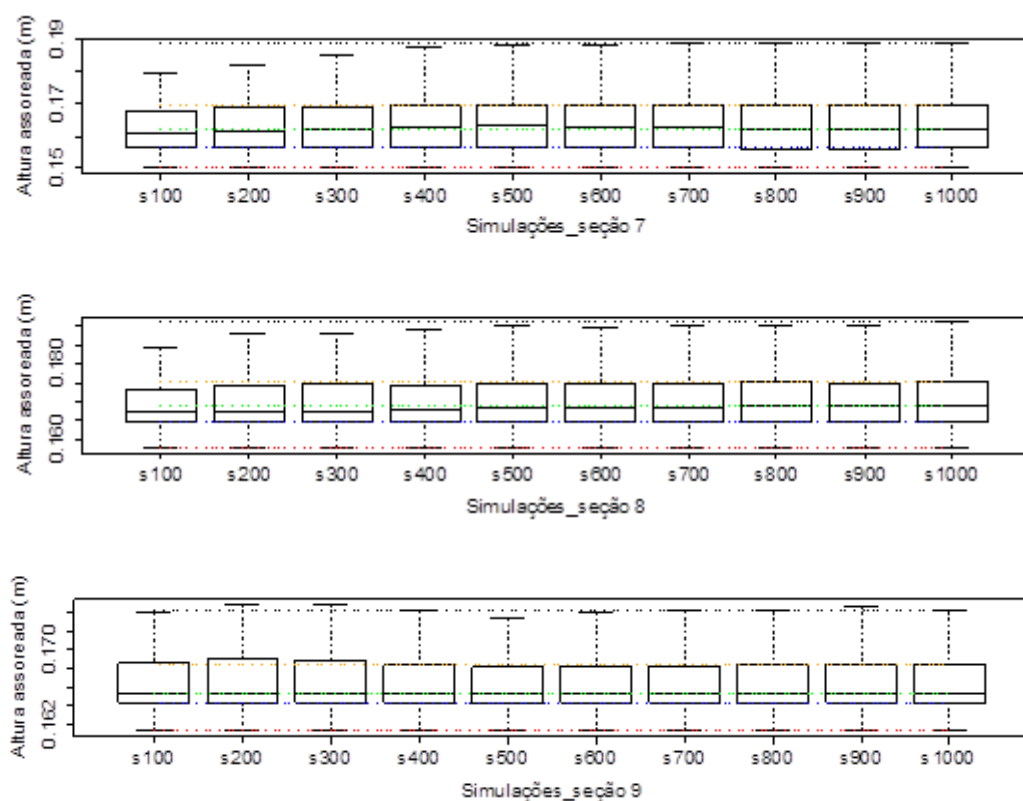


Figura 5.22 – Comparações das estatísticas dos assoreamentos obtidos para diferentes quantidades de simulações: seções 7 a 9

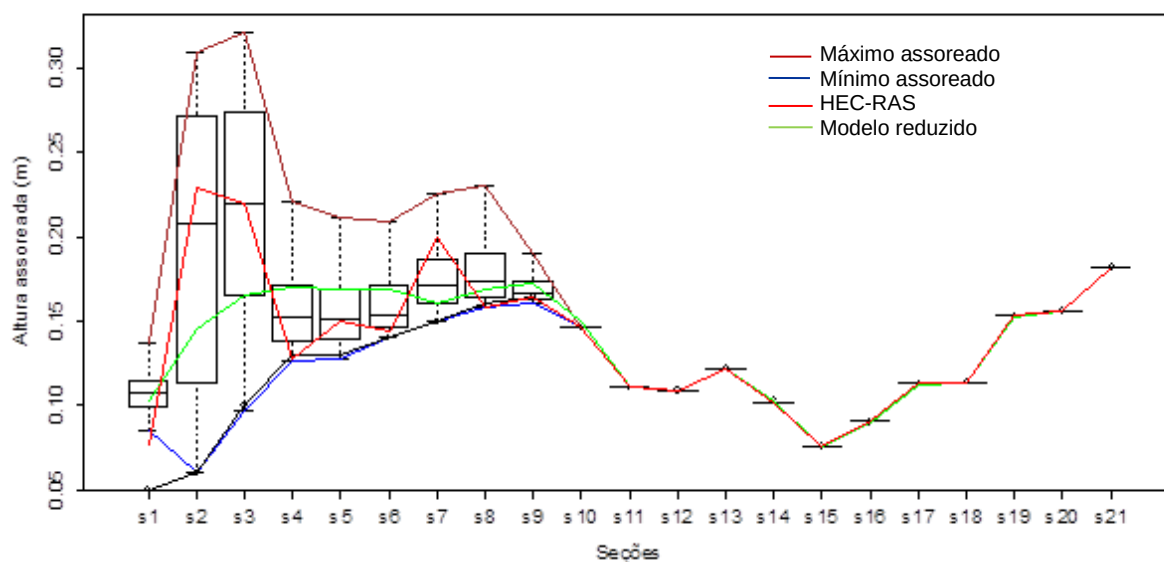


Comparando-se a **Figura 5.21** e **Figura 5.22**, percebe-se, observando as principais estatísticas dos resultados, que em cada seção a quantidade de simulações que levava a conversão dos resultados é diferente, por exemplo, enquanto na seção “1” as estatísticas tendem a convergir entre 800 e 900 simulações, na “2” não houve conversão. Por isso, para simular o assoreamento no período 2008-2012 também foram feitas 1000 simulações, sendo essa a quantidade que levou a convergência das estatísticas das vazões das séries sintéticas às estatísticas da série histórica.

As simulações para o período 2008 a 2012 foram realizadas visando validar o método estocástico desenvolvido, sendo a dispersão dos resultados apresentada na **Figura 5.23**, em que a altura assoreada foi medida com relação ao ponto mais baixo de cada seção transversal. A linha marrom indica o máximo assoreamento obtido estocasticamente para cada seção, a azul indica o mínimo, a verde o assoreamento real obtido no modelo reduzido, a preta com ponto o fundo do modelo reduzido no início do experimento, e a vermelha representa o assoreamento simulado no HEC-RAS, utilizando-se os valores de vazões diárias e a curva-chave de sedimentos da série histórica da PCH, para o período 2008-2012. Ressalta-se que na simulação no HEC-RAS foi utilizado o Manning calibrado anteriormente ($n = 0,035$) e a

geometria do reservatório no ano de 2013, visto que não se obteve a de 2008. Na figura também está apresentada a mediana para cada seção, sendo ela representada pelo traço grosso horizontal em cada retângulo, já os limites inferior e superior dos retângulos representam, respectivamente, o 1º e o 3º quartil.

Figura 5.23 – Resultado da simulação estocástica para o assoreamento ocorrido entre 2008 e 2013, nas 21 seções transversais, do simulado no HEC-RAS e no modelo reduzido



Verifica-se na **Figura 5.23** que a simulação estocástica indicou a tendência de não ocorrer assoreamento entre as seções “10” e “21” (s10 a s21), o que também foi observado no modelo reduzido. Entre as seções “1” e “9” (s1 a s9), o assoreamento obtido no modelo físico sempre esteve entre os extremos máximos e mínimos das 1000 simulações, o que indica que a simulação estocástica, ao permitir a simulação de 1000 combinações diferentes dos dados hidrossedimentológicos, abrangeu o cenário ocorrido, ou seja, abrangeu a combinação de vazão e curva-chave de sedimentos utilizada no modelo reduzido. Assim, tem-se que o método estocástico desenvolvido também foi válido para outro período, além do anterior (2013-2017) utilizado para a sua calibração.

Já quando se utilizou os dados da série histórica do período 2008-2012 para simular o assoreamento no HEC-RAS, o resultado obtido (linha vermelha da **Figura 5.23**), comparado ao ocorrido no modelo físico, indicou que não houve assoreamento entre as seções “10” e “21”, como o ocorrido. Porém, o assoreamento foi subestimado nas seções “1”, “5”, “6” e “9” e superestimado na “2”, “3” e “7”. Nas seções “4” e “8” o resultado do programa apresentou que houve erosão, o que não ocorreu no real. Assim, tem-se que o assoreamento simulado no

HEC-RAS não foi o que ocorreu no modelo reduzido em nenhuma das seções em que houve depósito de sedimentos (seções “1” a “9”).

Com isso, percebe-se a contribuição que a simulação estocástica pode oferecer aos projetos de reservatórios, visto que atualmente as decisões são tomadas com base em modelos determinísticos, como o HEC-RAS, os quais, por fornecerem apenas um resultado, podem sub ou superestimar o assoreamento, ou até mesmo erodir o leito do reservatório, enquanto num cenário de 1000 simulações estocásticas o assoreamento ocorrido será abrangido. Além disso, pela **Figura 5.23**, percebe-se que o assoreamento real sempre esteve entre o 1º e 3º quartil de probabilidade, fato que representa outro auxílio ao projetista. Ou seja, não é possível se prever com exatidão o assoreamento, visto que ele é um fenômeno complexo, variável no tempo e no espaço, com parâmetros que apresentam incertezas em seus valores e requerem estimativas para cenários futuros. Porém, pode ser ter as suas probabilidades de ocorrência nas seções transversais de interesse, sendo que as variabilidades dos resultados nas 1000 simulações indicam os locais de maior problema na predição do assoreamento, o que induzi o projetista a um comportamento mais conservador no posicionamento de algumas estruturas.

6 CONCLUSÕES

Ao longo desse trabalho foram apresentados os fundamentos que nortearam o desenvolvimento dessa pesquisa, qual teve por objetivo apresentar um método estocástico para estimativa de assoreamento em reservatórios. Para tanto, foi utilizado um modelo estocástico para geração de dados hidrossedimentológicos e se propôs uma metodologia de simulação do assoreamento num modelo reduzido, cujo protótipo é a PCH Salto Paraopeba, para validar o método estocástico. Com base nos resultados obtidos, tem-se que:

- O modelo estocástico AR(1) para geração de vazões anuais para a PCH Salto do Paraopeba se ajustou bem aos dados, sendo eles estacionários e distribuídos normalmente. Além disso, a curva-chave de sedimentos pôde ser obtida a partir das vazões geradas pelo modelo AR(1). Assim, houve a geração de milhares de séries sintéticas contendo os dados dos dois parâmetros hidrossedimentológicos considerados estocásticos: vazão anual e curva-chave de sedimentos;
- A partir dos códigos computacionais desenvolvidos foi possível ler os milhares de arquivos com as séries sintéticas, inseri-los no programa hidráulico HEC-RAS, promover as milhares de simulações do assoreamento e extrair esses resultados em arquivos externos. Ou seja, a partir dos códigos desenvolvidos foi possível automatizar a simulação de assoreamento no programa determinístico, fazendo com que ele funcionasse de forma estocástica. Ressalta-se que algumas etapas continuaram manuais, sendo automatizado apenas a inserção dos parâmetros considerados estocásticos;
- 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. Diante disso, simulou-se no modelo reduzido o assoreamento para um novo período, com base nos dados hidrossedimentológicos ocorridos entre 2008-2012, sendo que o assoreamento obtido para esse período foi utilizado para validar o método estocástico desenvolvido, o qual sempre gerou resultados abrangendo o assoreamento medido no modelo físico, ou seja, o assoreamento do período esteve entre os 1000 resultados gerados estocasticamente;

- Foram realizadas 1000 simulações estocásticas do assoreamento, sendo essa quantidade foi necessária, pois menos simulações não promoveram a convergência dos resultados, em todas as seções transversais, ou seja, as principais estatísticas do resultado não se tornaram constantes a partir de uma quantidade inferior a 1000. Além disso, percebeu-se que a geometria influencia no resultado do assoreamento da simulação estocástica, visto que nas seções “2” e “3”, nas quais os raios hidráulicos sofreram grandes variações, também houve maior dispersão das alturas assoreadas. A partir da simulação estocástica, para as seções transversais de interesse, foi possível se obter: a dispersão, a mediana, o máximo, o mínimo e os quartis de probabilidade do assoreamento. Assim, observou-se que os assoreamentos simulados no modelo físico nos dois períodos avaliados (2008-2012 e 2013-2017) sempre estiveram entre o 1º e 3º quartil de probabilidade dos resultados gerados estocasticamente, ou seja, o assoreamento real sempre foi maior que 25% dos resultados gerados via simulação estocástica e menor que 75% deles. Dessa forma, pode-se notar que o resultado estocástico abrangeu o cenário real (vazão e curva-chave de sedimentos) ocorrido.

Portanto, mesmo não sendo possível fornecer com exatidão o assoreamento que ocorre num determinado período, numa seção transversal qualquer, a simulação estocástica indica a probabilidade de ocorrência de determinada altura de assoreamento, levando-se em consideração as incertezas e a variabilidade dos fatores que interferem no depósito de sedimentos, sendo que as variabilidades dos resultados nas simulações indicam os locais de maior problema na predição do assoreamento. Induzindo o projetista a um comportamento mais conservador no posicionamento de algumas estruturas. Com isso, será possível projetar e operar um reservatório dentro de margens de segurança, conhecendo-se as chances de ocorrência de certos níveis de assoreamento. Além disso, poderá se conhecer as seções que

possuem maior probabilidade de assoreamento, de forma que medidas preventivas e corretivas, como dragagens, poderão ser melhores planejadas e executadas.

7 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Os códigos computacionais desenvolvidos no MATLAB extraem apenas o perfil longitudinal do assoreamento, por isso, recomenda-se que projetos futuros continuem desenvolvendo os códigos para extração dos resultados dos depósitos de sedimentos das seções transversais.

Por questão operacional, foram consideradas como estocásticas as vazões médias dos períodos de máximas e as descargas sólidas totais referentes às vazões anuais. Porém, outros parâmetros devem ser investigados, devido às incertezas existentes nas suas determinações e suas variações espaço-temporal, como o coeficiente de rugosidade Manning e a granulometria dos sedimentos.

O método estocástico desenvolvido foi aplicado utilizando-se os dados hidrossedimentológicos e topobatimétricos da PCH Salto do Paraopeba. Por isso, seria interessante aplicá-lo em outros reservatórios, de forma a continuar a verificação da sua eficiência em representar cenários de assoreamentos ocorridos. Porém, talvez seja necessária a utilização de outro modelo estocástico de geração de vazões, visto que o modelo AR(1) pode não se ajustar aos dados de outra localidade.

Para simular o assoreamento no modelo reduzido da PCH, foram utilizadas as vazões médias dos períodos de máximas, pois o período que se dispunha de batimetrias (2013-2017) foi de baixas vazões anuais, as quais não promoveram transporte de sedimentos. Assim, deveria se conhecer outras batimetrias para se verificar se a metodologia desenvolvida também se aplica a períodos de menor escassez. Além disso, seria considerável a aplicação em outro reservatório, o que, consequentemente, exige outro modelo reduzido.

No modelo reduzido se tem controle da quantidade de material que é inserida no reservatório e a quantidade que sai, consequentemente, se tem a quantidade retida. Assim, é possível desenvolver um trabalho para se avaliar a eficiência de retenção desse reservatório e se comparar com os métodos numéricos existentes.

O modelo determinístico utilizado é 1D, assim, outro estudo pode avaliar o fenômeno em um modelo 2D. Além disso, no HEC-RAS foi utilizada a equação de transporte de sedimento de Wilcock e Crowe. Outras equações poderiam ser analisadas, de forma a se verificar suas influências no resultado final.

Para simulação do assoreamento, tanto no modelo físico quanto no numérico, foram utilizadas vazões na escala anual, também se poderia avaliar simulações na escala mensal.

REFERÊNCIAS

- ABDERREZZAK, K. E. K.; MORAN, A. D.; MOSSELMAN, E.; BOUCHARD, J. P.; HABERSACK, H.; AELBRECHT, D. A physical, movable-bed model for non-uniform sediment transport, fluvial erosion and bank failure in rivers. *Journal of Hydro-environment Research*, n. 8, p. 95-114, 2014.
- 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.
- ADAM, N.; ERPICUM, S.; ARCHAMBEAU, P.; PIROTTON, M.; DEWALS, B. Stochastic modeling of reservoir sedimentation in a semi-arid watershed. *Water Resour Manage*, v. 29, p. 785–800, 2015.
- ALBERTIN, L. L.; MATOS, A. J. S.; MAUAD, F. F. Cálculo do volume e análise da deposição de sedimentos do reservatório de três irmãos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 15, n.4, p. 57-67, 2010.
- ALMEIDA, L. M. Análise de metodologias para o cálculo da descarga de fundo, aplicada ao rio Doce, ES. 2012. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.
- ANDERSON, A. C. Comparison of direct and indirect method of measuring suspended sediment transport. St, Anthony Falls Hydr. Lab., University of Minnesota, USA, 1975.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. *Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios*. Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas. Brasília, DF. 2000.
- ANNANDALE, G. Going full circle. *Internacional Water Power Dam Construction*, v. 63, n.4, p. 30–34, 2011.
- ARMANINI, A.; SARTORI, F.; TOMIO, G.; CERCHIA, F.; VERGNANI, M. Analysis of a fluvial groynes system on hydraulic scale model. In: PROC. INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLUVIAL HYDRAULICS RIVERFLOW, 2010.
- BAPTISTA, M. P.; COELHO, M. M. L. P. *Fundamentos de Engenharia Hidráulica*. Belo Horizonte, Editora UFMG, 2010. 480p.

BARBOSA, S. E. S. *Análise de dados hidrológicos e regionalização de vazões da bacia do Rio do Carmo*, 2004. 188f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

BENNETT, S.J.; WU, W.; ALONSO, C.V.; WANG, S.S.Y. Modeling fluvial response to in-stream woody vegetation: implications for stream corridor restoration. *Earth Surf Process Land*, v. 33, p. 890-909, 2008.

BIALIK, R. J. Numerical study of saltation of non-uniform grains. *Journal of Hydraulic Research*, v. 49, n. 5, p. 697-701, 2011.

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.

BIERI, M. D; MULLER, M.; BOILLAT, J. L.; SCHLEISS, A. J. Modeling of sediment management for the Lavey Run-of-River HPP in Switzerland. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 138, n. 4, p. 340-347, 2012.

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

BONAMO, E. J.; CRANWELL, R. M. Treatment of uncertainties in the performance assessment of geologic high level radioactive waste repositories. *Mathematical Geology*, v. 2, n.5, 1988.

BORLAND, W. M.; MILLER, C. R. Distribution of sediment in large reservoirs. *Transactions of the ASCE*, v. 125, p. 166-180, 1960.

BORLAND, W. M. *River mechanics*. Water Resources Publications, 1971.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M.; REINSEL, G. C. *Time series analysis - forecasting and control*. 3.ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Ed. Prentice Hall, 1994. 587p.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. *Time series analysis forecasting and control*. San Francisco: Holden-Day, 1970, 537p.

BRITO, G. M. *Determinação do assoreamento do reservatório da PCH Cachoeirão*. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. 2013.

BROMLEY, C. *The Morphodynamics of Sediment Movement through a reservoir during Dam Removal*. PhD Thesis. University of Nottingham, Nottingham. 2008.

BRUNE, G. M. Trap efficiency of reservoirs. *Trans. Am. Geophysical Union*, v. 34 n. 3, p. 407-418, 1953.

BRUNE, R. A. Métodos de estimativa de descarga sólida em rios - análise comparativa. 2014. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

BRUNNER, G. W. **HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual**. Davis/USA: US Army Corps of Engineers, 2010.

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

CÂMARA, R. K. C.; ROCHA, E. J. P.; PROTÁZIO, J. M. B.; QUEIROZ, J. C.; RIBEIRO, W. M. N.; SIQUEIRA, I. S.; LIMA, A. M. M. Modelagem hidrológica estocástica aplicada ao rio Tocantins para a cidade de Marabá-PA. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 1, p. 11-23, 2016.

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.

CAMPOS, R. *Three-dimensional reservoir sedimentation model*. University of Newcastle, Newcastle, UK. [S.l.]. 2001.

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.

CHATFIELD, C. *Time-series forecasting*. London: Chapman and Hall, 2000. 265p.

CHAVES, P.; MOREIRA, J. C.; XAVIER, M. C. R.; DOMINGUES, N. R. Modelagem hidrossedimentológica com o modelo Hec-Ras 4.0: Caso de estudo do rio Macaé. In: VIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, ENES, 2008.

CHELA, M. R. *Simulação física do transporte de sedimentos e assoreamento em reservatórios – Caso da usina hidrelétrica Melissa*. 2002. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR. 2002.

CHURCHILL, M. A. Discussion of analysis and use of reservoir sedimentation data. In: PROC. FEDERAL INTER-AGENCY SEDIMENTATION CONF, Denver, pp. 139-140, 1948.

COPELAND, R. R.; THOMAS, W. A. Corte madera 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.

COSTA, F.S.; DAMÁZIO, J. M.; RAUPP, I. P. *Modelo de simulação estocástica para operação de controle de cheias em sistemas hidroelétricos*. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

DAVINROY, R.D.; GORDON, D.; RHOADS, A.; ABBOTT, J. Sedimentation study of the Missouri river, Copeland Bend, Miles 569 to 564.5. Hydraulic Micro Model Investigation. *Technical Report M10. US Army Corps of Engineers*. 1999.

DILL, P. R. J. Assoreamento do reservatório do Vacacaí-Mirim e sua relação com a deterioração da bacia hidrográfica contribuinte. 2002. 125p.

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

ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Manual de minicentraís hidrelétricas. Rio de Janeiro, 1985.

ELETROBRÁS. *Diagnóstico das condições sedimentológicas dos principais rios brasileiros*. Rio de Janeiro, RJ: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992.

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

ESTIGONI, M. V. Uso de modelagem de transporte de sedimentos e técnicas de hidrologia estatística para redução de incertezas nos estudos de assoreamento de reservatórios: estudo de caso do reservatório da PCH Mogi-Guaçu – SP. 2016. 239 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2016.

FAN, S. S. Twelve selected computer stream sedimentation models developed in the United States. *Interagency Advisory Committee on Water Data, Subcommittee on Sedimentation, Federal Energy Regulatory Commission*. Washington, D.C. 1988.

FIGUEIREDO, N. M.; BLANCO C. J. C. Simulação de vazões e níveis de água médios mensais para o rio Tapajós usando modelos ARIMA. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 3, p. 111-126, 2014.

FREITAS, M. A. S. Geração de vazão em rios de regiões semi-áridas. In: IV DIÁLOGO INTERAMERICANO DE GERENCIAMENTO DAS ÁGUAS, Foz do Iguaçu, 2001.

GAINES, R.A.; MAYNORD, S.T. Microscale loose-bed hydraulic models. *Journal Hydraulic Engineering*, v. 127, p. 335-338, 2001.

GARCÍA, R. G. *Analysis y evaluación del transporte de sedimentos en cuencas mediterraneas*. Escuela De Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, COM, 2002.

GARG, V.; JOTHIPRAKASH, V. Estimation of useful life of a reservoir using sediment trap efficiency. *Journal of Spatial Hydrology*, v.8, n.2, p. 1-14, 2008.

GIBSON, R. E.; ENGLAND, G. L.; HUSSEY, M. J. L. The theory of one- dimensional consolidation of saturated clays, I. Finite nonlinear consolidation of thin homogeneous layers. *Geotechnique*, v. 17, p. 261-273, 1967.

GRAY, J. R; SIMÕES, F. J. M. Estimating sediment discharge. In: *SEDIMENTATION ENGINEERING. PROCESSES, MEASUREMENTS, MODELING, AND PRACTICE – ASCE, AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, Virginia. 2008.*

HEALEY, M.O. *Investigation of flood risk e erosion mitigation on the Rangitata river at Klondyke*. PhD Thesis. Lincoln University, 1997.

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

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Evaluating the reliability of predictions made using environmental transfer models, 1989. (IAEA-SS-100).

JACOMINO, V. M. F. *Implementação de uma metodologia para avaliação das incertezas associadas às previsões feitas por um modelo de transporte de sedimentos e poluentes em bacias hidrográficas*. 1997. 189 f. Tese (Doutorado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

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.

KOENIGSDORF, M. A. L. *Avaliação de projetos de exploração e produção de petróleo via opções reais: Abordagem por mínimos quadrados de Monte Carlo*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

LANE, E. W.; KOELZER, V. A. Density of sediments deposited in reservoirs. In: *A STUDY OF METHODS USED IN MEASUREMENT AND ANALYSIS OF SEDIMENT LOAD IN STREAMS*. University of Iowa. [S.l.]. 1943.

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.

LAQUINI, J. P. *Modelagem determinístico-estocástica da dinâmica de sedimentos em reservatórios de água e de rejeitos de mineração*. 2009. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. 2009.

LEE, S. H. Determination of stage-discharge relations by hydraulic channel routing and stage measurement. *Journal of Korea Water Resources Association*, v. 34, n. 5, p.551-560, 2001.

LENHARDT, M.; MARKOVIC, G.; GASIC, Z. Decline in the Index of Biotic Integrity of the Fish Assemblage as a Response to Reservoir Aging. *Water Resour Manage*, v. 23, p. 1713–1723, 2009.

LEON, A. S.; GOODELL, C. Controlling HEC-RAS using MATLAB. *Journal of Environmental Modelling and Software*, v. 84, pp. 339–348, 2016.

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.

LÚCIO, P. S.; SILVA, F. D. S.; GUIMARÃES, L. T. F.; SANTOS, L. A. R.; FERREIRA, D. B.; SALVADOR, M. A.; BALBINO, H. T.; SARMANHO, G. F.; SANTOS, L. S. F. C.; LUCAS, E. M. W.; BARBOSA, T. F.; DIAS, P. L. S. Um Modelo Estocástico Combinado de Previsão Sazonal para a Precipitação no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, n.1, p.70-87, 2010.

MAIA, A. G. *As consequências do assoreamento na operação de reservatórios formados por barragens*. 2006. 271 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – área de concentração em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

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.

MANN, H. B. e WHITNEY, D. R. On the test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Annals of Mathematical Statistics*, 18, pp. 50-60, 1947.

MARR, J. D. G.; HILL, C.; JOHNSON, S.; GRANT, G.; CAMPBELL, K.; MOHSENI, O. Physical model study of marmot dam removal: Cofferdam notch location and resulting fluvial responses. *Report to Portland General Electric*, Portland, Oregon. 2007.

MATHWORKS. *MATLAB version 8.6.0.267246 (R2015b)*. The Mathworks, 460 Inc. Natick, Massachusetts, 2015.

MAYNORD, S.T. Evaluation of the micromodel: an extremely small-scale movable bed model. *Journal Hydraulic Engineering*, v. 132, p. 343-353, 2006.

MEFFORD, B.; STOWELL, H.; HEINJE, C. Robles diversion dam high flow and sediment bypass structure, Ventura, California e Physical model study. U.S. *Department of the Interior, Bureau of Reclamation. Hydraulic Laboratory Report HL-2008-7*. 2008.

MEFFORD, B.; GILL, T. 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.

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

MIKASA, M. The consolidation of soft clay. A new consolidation theory and its application. *Japanese Society of Civil Engineering*, p. 21-26, 1965.

MINHONI, R. T. A. *Estimativa do assoreamento do reservatório da PCH Pipoca, Minas Gerais*. 2013. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. 2013.

MIRANDA, R. B. *A influência do assoreamento na geração de energia elétrica: estudo de caso na usina hidrelétrica de Três Irmãos – SP*. 2011. 132p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2011.

MIRANDA, R. B. *Ferramenta computacional para a estimativa de parâmetros hidrossedimentológicos em reservatório: Estudo de caso da PCH de Mogi-Guaçu SP*. 2015. 226 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

MOLL, J. R.; SCHIELPEROOT, T.; LEEUW, A. J. Stochastic analysis of bedform dimensions. *Journal of Hydraulic Research*, v. 25, n. 4, p. 465-479, 1987.

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.

MOREIRA, M. C.; SILVA, D. D. Análise de Métodos para Estimativa das Vazões da Bacia do Rio Paraopeba. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 2, pp. 313 – 324, 2014.

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.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia Estatística*. 1ª ed. Belo Horizonte: CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Superintendência Regional de Belo Horizonte, 2007. 552 p

NERC. *Flood Studies Report*, Vol. 1. London: National Environmental Research Council, 1975.

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

OH, J.; TSAI, C. W.; CHOI, S. Quantifying the uncertainty associated with estimating sediment concentrations in open channel flows using the stochastic particle tracking method. *Journal Hydraulic Engineering*, v. 141, n. 12, p. 1-10, 2015.

PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D.; REINERT, D. J. Estimativa do assoreamento do reservatório do DNOS, em Santa Maria – RS. In: XVII CONGRESSO NACIONAL DEL ÁGUA, II SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DEL CONOSUR, Santa Fé – Argentina, 1998.

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

PUGH, C.A. Sediment transport scaling for physical models. In: GARCIA, M.H. (Ed.), *Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice*, 2008, p. 1057-1065.

RIBEIRO, J. C.; SALOMÃO, F. X. T. A Morfopedologia aplicada ao diagnóstico e prevenção dos processos erosivos lineares da bacia hidrográfica do alto rio da Casca. In: VII SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, Goiânia – GO, 2001.

RIGHETTO, A. M. *Hidrologia e Recursos Hídricos*. Ed. EESC/USP. São Carlos – SP, 1998, 840 p.

RODGERS, M. T.; LAMM, D. M.; RIIFF, E. H.; DAVINROY, R. D. Sedimentation study of the middle Mississippi river at Herculaneum, Missouri River Miles 156.3 to 149.7 - Hydraulic erroMicro Model Investigation. U.S. Army Corps of Engineers (USACE). Technical Report MXX. 2003.

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.; DELLEUR, J. W.; YEVJEVICH, V.; LANE, W. L. *Applied modeling of hydrologic time series*. Water Resources Publications, Littleton. Colorado. 1980, 484p.

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

SANTOS, F. A. A; ROLIM, P. A. M; RIBEIRO, N. C. C.; SANTOS, E. M. Avaliação do uso de dados de precipitação gerados pelo CPC/NCEP na modelagem hidrológica em uma região hidrográfica do rio Araguaia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, João Pessoa, PB, Brasil, 2015.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An Analysis of variance test for normality (Complete Samples). *Biometrika*, v.52, p.591-611, 1965.

SIMONETT, S.; WEITBRECHT, V. 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, 2011. p. 275-286.

SONG, C. C. S.; YANG, C. T. Modeling of river with sediment transport. IN: PROC. SPECIAL CONFERENCE ON CONSERVATION AND UTILIZATION OF WATER AND ENERGY RESOURCES, San Francisco, 1979.

SOUZA, L. B. S. *Estudo experimental e modelagem numérica do escoamento e do assoreamento em uma armadilha de sedimentos*. 2006. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2006.

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.

SUGUIO, K; BIGARELLA, J. J. *Ambientes Fluviais*. 2ª Ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1990. 183p.

THAKKAR, H.; BHATTACHARYYA, S. Reservoir siltation in India: Latest Studies – A Wake up Call, *South Asia Network on Dams, Rivers and People*, 2006.

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.

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

TERZAGHI, K.; FROHLICH, O. K. Theorie der stizung von tonschichten; eine einfuhrung in die analytische tannechanik. Leipzig, Deuticke: [s.n.], 1936.

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.

VAN RIJN, L. C. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua Publications. Amsterdam. Netherlands. 1993.

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

VIEIRA, J.P.B., ALMEIDA, R.C. Regionalização de Vazões com o Emprego de Redes Neurais Artificiais RBF. In: SIMPÓSIO DE MÉTODOS NUMÉRICOS EM ENGENHARIA, Curitiba, PR, Brasil, 2016.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. *Hidrologia aplicada*. São Paulo, McGraw-Hill, 1975. 245p.

VILHENA, R. M.; ROIG, H. L.; MENESES, P. R. Determinação do assoreamento de reservatório utilizando técnicas de geoprocessamento, o caso do reservatório de Funil (RJ). In: ANAIS SBSR, Belo Horizonte – MG, 2003.

WALD, A. e WOLFOWITZ, J. An exact test for randomness in the non-parametric case based on serial correlation. *Annals of Mathematical Statistics*, 14, pp. 378-388, 1943.

WALDRON, R. L. *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.

WEI, B. Q.; UCHIJIMA, K.; HAYAKAWA, H. A study on similarity laws of a distorted river model with a movable bed. *Journal Hydrodyn.* v. 13, n. 1, p. 86-91, 2001.

WERNER, L.; RIBEIRO, J. L. D. Previsão de Demanda: uma aplicação dos modelos Boxjenkins na área de assistência técnica de computadores pessoais. *Revista Gestão & Produção*, v.10, n.1, p.47-67, 2003.

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.

WOIDT, J.; COX, A.; THORNTON, C. Evaluation of sedimentation and erosion trends in the Sacramento river near the M&T/Llano seco pump station. In: PROC. AGU HYDROLOGY DAYS, APRIL 2E5. COLORADO STATE UNIVERSITY, Fort Collins, CO. 2001.

WU, F.; SHEN, H. W. First-order estimation of stochastic parameters of a sediment transport model. *Journal of Hydraulic Research*, v. 37, n. 2, p. 213-227, 1999.

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.; WAN, S. Comparisons of selected bed-material load formulas. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 117, n. 8, p. 973-989, 1991.

YANG, C. T. *Sediment transport: theory and practice*. New York: McGraw-Hill. 1996. 396 p.

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.

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

YOUNG, W.; WARBURTON, J. Principles and practice of hydraulic modeling of braided gravel bed rivers. *Journal Hydrology*, v. 35, p. 175-198, 1996.

APÊNDICE A – FUNÇÕES PARA GERAÇÃO DAS SÉRIES SINTÉTICAS

Verificação das premissas do modelo AR(1) e o seu ajuste à série histórica de vazões anuais
O usuário deverá chamar a função QSN
O parâmetro “vazoes” é a série original, já com os valores faltantes preenchidos
O parâmetro “Nseries” é o número de séries sintéticas que o usuário deseja gerar

```
QSN<-function(vazoes,Nseries)

{

  Qsinteticamatriz<-matrix(nrow=length(vazoes),ncol=Nseries)
  Qsinteticamedia<-matrix(nrow=1,ncol=Nseries)
  Qsinteticavariancia<-matrix(nrow=1,ncol=Nseries)
  QsinteticaACF<-matrix(nrow=1,ncol=Nseries)
  QsinteticaACFresiduos<-matrix(nrow=1,ncol=Nseries)
  Qsinteticamediaresiduos<-matrix(nrow=1,ncol=Nseries)

  for (contador in 1:Nseries)
  {

    medanual<-vazoes
    N<-length(medanual)

    # Prepara os dados para a aplicação dos testes

    dados<-matrix(nrow=N,ncol=3)
    for (i in 1:N)
    {
      dados[i,1]<-i
      dados[i,2]<-medanual[i]
    }

    matriz1<-order(dados[,2])

    dados1<-matrix(nrow=N,ncol=3)
    for (i in 1:N)
    {
      dados1[i,1]<-dados[matriz1[i],1]
      dados1[i,2]<-dados[matriz1[i],2]
      dados1[i,3]<-i
    }

    matriz2<-order(dados1[,1])
    for (i in 1:N)
    {
      dados[i,1]<-dados1[matriz2[i],1]
      dados[i,2]<-dados1[matriz2[i],2]
```

```

        dados[i,3]<-dados1[matriz2[i],3]
    }

{

#Início do teste de estacionariedade

soma<-0
  for (i in 1:N)
  {
      soma<-soma+(((dados[i,3])-(dados[i,1]))**2)
  }

  rs<-(1-((6*soma)/((N**3)-N)))
  E.rs<-0
  Var.rs<-((1)/(N-1))
  T<-((rs)/(sqrt(Var.rs)))
  alfa<-0.05
  z <- qnorm(1-alfa/2,0,1)

  if (N<10)
  {
      print("ATENCAO! Os dados disponiveis nao sao suficientes para realizar um
teste de estacionariedade confiavel (N<10).")
  }

  else
  {
      if (abs(T)>z)
      {

          N<-length(vazoes)
          ACF<-c(acf(vazoes))
          ACFLAG1<-c(ACF$acf)

      }
      else
      {

# Sendo a série estacionária, gera-se quantas séries sintéticas de vazões o usuário solicitar

          N<-length(vazoes)

          ACF<-c(acf(vazoes))
          ACFLAG1<-c(ACF$acf)

          N<-length(vazoes);
          aleat2<-rnorm(N+10,0,1)
          M<-mean(vazoes)
          dp<-sd(vazoes)

```

```

Var<-var(QAH)

matrizsintetica<-matrix(nrow=N+10,ncol=1)
Qdado1<-matrix(M)
Qdado2<-M+ACFLAG1[2]*(M-M)+aleat2[1]*dp*((1-
ACFLAG1[2]**2)**0.5)
Qdados1e2<-matrix(nrow=2,ncol=1)
Qdados1e2[1,1]<-Qdado1
Qdados1e2[2,1]<-Qdado2
Qdados123<-rbind(Qdados1e2,M+ACFLAG1[2]*(Qdados1e2[2]-
M)+aleat2[2]*dp*((1-ACFLAG1[2]**2)**0.5))
Qproxdado<-rbind(Qdados123,M+ACFLAG1[2]*(Qdados123[3]-M)+
aleat2[3]*dp*((1-ACFLAG1[2]**2)**0.5))
for (k in 4:(N+9))
{
Qproxdado<-rbind(Qproxdado,M+ACFLAG1[2]*(Qproxdado[k]-M)+
aleat2[k]*dp*((1-ACFLAG1[2]**2)**0.5))
}
Qsintetica<-Qproxdado[11:(N+10)]

# Atribuição de todas as séries geradas a uma matriz, cada série em uma coluna

for (i in 1:N)
{
Qsinteticamatriz[i,contador]<-Qsintetica[i]
}

# Determinação da média de cada série e a atribui a uma matriz, cada coluna com uma média

Qsinteticamedia[1,contador]<-mean(Qsintetica)

# Determinação da variância de cada série e a atribui a uma matriz, cada coluna com uma #
#variância

Qsinteticavariancia[1,contador]<-var(Qsintetica)

NQsintetica<-length(Qsintetica);
ACFQsintetica<-c(acf(Qsintetica))
ACFLAG1Qsintetica<-c(ACFQsintetica$acf)

# Atribuição da autocorrelação média de cada série a uma matriz, cada coluna com um dado

QsinteticaACF[1,contador]<-ACFLAG1Qsintetica[2]

# Início da geração da série de resíduos

residuos<-(Qsintetica-QAH)
Nresiduos<-length(residuos);
ACFresiduos<-c(acf(residuos))
ACFLAG1residuos<-c(ACFresiduos$acf)

```

```

QsinteticaACFresiduos[1,contador]<-ACFLAG1residuos[2]
Qsinteticamediaresiduos[1,contador]<-mean(residuos)

    }
    }
}
}

# Apresentação dos resultados das séries sintéticas geradas e dos seus resíduos

print("Vazao media; desvio percentual (%) em relacao a media da serie original QAH")
print(mean(Qsinteticamedia))
print((((mean(Qsinteticamedia)-M)/M)*100))

print("Variancia media; desvio percentual (%) em relacao a variancia da serie original QAH")
print(mean(Qsinteticavariancia))
print((((mean(Qsinteticavariancia)-Var)/Var)*100))

print("ACF para Lag 1 medio das series sinteticas")
print(mean(QsinteticaACF))

print("Media geral de residuos")
print(mean(Qsinteticamediaresiduos))

print("Media geral de ACF para Lag 1 dos residuos")
print(mean(QsinteticaACFresiduos))

par(mfrow=c(2,2))

acf(residuos,main="Correlograma dos resíduos da série sintética\nAno hidrológico: outubro a
setembro",xlab="Lag",ylab="Autocorrelação (ACF)")
plot(residuos, main="Resíduos distribuídos ao longo dos anos",xlab="Ordem de
ocorrência",ylab="Valor do resíduo")

# Exportação das séries e os resultados para arquivos do Excel

write.csv2(Qsinteticamatriz,"Qsinteticamatriz.csv",row.names=FALSE)
write.csv2(Qsinteticamedia,"Qsinteticamedia.csv",row.names=FALSE)
write.csv2(Qsinteticavariancia,"Qsinteticavariancia.csv",row.names=FALSE)
write.csv2(QsinteticaACF,"QsinteticaACF.csv",row.names=FALSE)
write.csv2(Qsinteticamediaresiduos,"Qsinteticamediaresiduos.csv",row.names=FALSE)
write.csv2(QsinteticaACFresiduos,"QsinteticaACFresiduos.csv",row.names=FALSE)

for (j in 1:Nseries)
{
    mat<-Qsinteticamatriz[,j]
    form<-sprintf('Qsintetica_%s.csv',j)
    write.csv2(mat,file=form,row.names=FALSE)
}

```

```

    }
}

# Verificada as premissas do modelo AR(1), segue a geração dos dados
#hidrossedimentológicos estocásticos
# Descrição dos parâmetros de entrada da função:
# vazoes são os dados originais de vazões
# Nseries é o número de séries a serem geradas
# ano0 - ano inicial dos dados a serem estudados
# anof - ano final dos dados a serem estudados
# No caso de serem estudados todos os dados: ano0 = 1967 e anof = 2016
# No caso dos cinco últimos anos: ano0 = 2012 e anof = 2016
# Os anos devem ser os anos iniciais do ano hidrológico
# Ao final, os valores são convertidos para o modelo reduzido (prop)
# Ao final, as vazões anuais serão majoradas através da matriz QNmajor

QSN<-function(vazoes,Nseries,ano0,anof)
{

# Raiz do erro médio quadrático da curva-chave de sedimentos (não convertido para o
#modelo)

erro<-74.1965917536406

# Relação de escala entre as vazões do protótipo e do modelo reduzido

prop<-12416

# Número de dados a serem estudados

Nanos<-anof-ano0+1

# Matriz dos dados de vazões que serão geradas

Qsinteticamatriz<-matrix(nrow=length(vazoes),ncol=Nseries)

# Matriz dos dados de descargas sólidas totais que serão calculadas

Qsolidos<-matrix(nrow=length(vazoes),ncol=Nseries)

# Dados de vazões dos anos de estudo

QNsintetica<-matrix(nrow=Nanos,ncol=Nseries)

# Dados de descargas sólidas totais dos anos de estudo

QNsolidos<-matrix(nrow=Nanos,ncol=Nseries)

# Matriz com os K gerados pelo rnorm para majorar as vazões anuais

```

```

QNmajor<-matrix(nrow=Nanos,ncol=Nseries)

# Número total de dados da série histórica de vazões anuais

N<-length(vazoes)

# Média dos dados

M<-mean(vazoes)

# Desvio padrão dos dados

dp<-sd(vazoes)

# Variância dos dados

Var<-var(vazoes)

# Autocorrelação dos dados

ACF<-c(acf(vazoes))

# Lag 1 dos dados

ACFLAG1<-c(ACF$acf)

# Geração dos dados de vazão através do modelo AR(1)

  for (contador in 1:Nseries)
  {

    aleat2<-rnorm(N+10,0,1)
    matriz sintetica<-matrix(nrow=N+10,ncol=1)
    Qdado1<-matrix(M)
    Qdado2<-M+ACFLAG1[2]*(M-M)+aleat2[1]*dp*((1-
ACFLAG1[2]**2)**0.5)
    Qdados1e2<-matrix(nrow=2,ncol=1)
    Qdados1e2[1,1]<-Qdado1
    Qdados1e2[2,1]<-Qdado2
    Qdados123<-rbind(Qdados1e2,M+ACFLAG1[2]*(Qdados1e2[2]-
M)+aleat2[2]*dp*((1-ACFLAG1[2]**2)**0.5))
    Qproxdado<-rbind(Qdados123,M+ACFLAG1[2]*(Qdados123[3]-M)+
aleat2[3]*dp*((1-ACFLAG1[2]**2)**0.5))

    for (k in 4:(N+9))
    {
      Qproxdado<-rbind(Qproxdado,M+ACFLAG1[2]*(Qproxdado[k]-M)+
aleat2[k]*dp*((1-ACFLAG1[2]**2)**0.5))
    }
  }

```

```

Qsintetica<-Qproxdado[11:(N+10)]

while (any(Qsintetica<0)==TRUE)
{
  aleat2<-rnorm(N+10,0,1)
  matrizsintetica<-matrix(nrow=N+10,ncol=1)
  Qdado1<-matrix(M)
  Qdado2<-M+ACFLAG1[2]*(M-M)+aleat2[1]*dp*((1-
ACFLAG1[2]**2)**0.5)
  Qdados1e2<-matrix(nrow=2,ncol=1)
  Qdados1e2[1,1]<-Qdado1
  Qdados1e2[2,1]<-Qdado2
  Qdados123<-rbind(Qdados1e2,M+ACFLAG1[2]*(Qdados1e2[2]-
M)+aleat2[2]*dp*((1-ACFLAG1[2]**2)**0.5))
  Qproxdado<-rbind(Qdados123,M+ACFLAG1[2]*(Qdados123[3]-M)+
aleat2[3]*dp*((1-ACFLAG1[2]**2)**0.5))

  for (k in 4:(N+9))
  {
    Qproxdado<-
rbind(Qproxdado,M+ACFLAG1[2]*(Qproxdado[k]-M)+ aleat2[k]*dp*((1-
ACFLAG1[2]**2)**0.5))
  }

  Qsintetica<-Qproxdado[11:(N+10)]

}

# Geração dos dados de descargas sólidas totais a partir das vazões geradas anteriormente

for (i in 1:N)
{
  Qsinteticamatriz[i,contador]<-Qsintetica[i]

# Calcula a descarga sólida total com base na regressão (não convertida para o modelo
#reduzido)

Qst<-0.0089*(Qsinteticamatriz[i,contador]**2.9297)

# Gera um novo valor de descarga sólida total

  Qsolidos[i,contador]<-rnorm(1,Qst,erro)
  while(Qsolidos[i,contador]<0)
  {
    Qsolidos[i,contador]<-rnorm(1,Qst,erro)
  }
}

# Armazenamento dos dados nas matrizes finais e geração dos dados de vazões majoradas
#através da multiplicação pelo K (gerado pelo rnorm)

```

```

l<-1
for (j in (N-Nanos+1):N)
{
  QNsintetica[l,contador]<-Qsinteticamatriz[j,contador]
  QNmajor[l,contador]<-rnorm(1,3.71,1.16)
  QNsolidos[l,contador]<-Qsolidos[j,contador]
  l<-l+1
}
}

```

Conversão dos dados para a escala do modelo reduzido e exportação dos arquivos com os resultados

```

for (w in 1:Nseries)
{
  maj<-QNmajor[,w]
  form<-sprintf('%sM.txt',w)
  write.table(maj,file=form)
  mat1<-QNsintetica[,w]*QNmajor[,w]/prop
  form<-sprintf('%sQ.txt',w)
  write.table(mat1,file=form)
  mat2<-QNsintetica[,w]/prop
  form<-sprintf('%sL.txt',w)
  write.table(mat2,file=form)
  mat3<-QNsolidos[,w]/prop
  form<-sprintf('%sS.txt',w)
  write.table(mat3,file=form)
}
}

```

Ler os 1000 arquivos com os resultados do assoreamento obtido via modelo estocástico e junta todos em único arquivo, a partir do qual é feita as estatísticas dos resultados

Assoreamento<-function(qtd,secoes)

qtd é a quantidade de arquivos a serem lidos (linhas)

secoes é o numero de seções analisadas (colunas)

```

{
# Matriz que vai receber os dados de seções

matrizsecoes<-matrix(nrow=qtd,ncol=secoes)
for(i in 1:qtd)
{
  imput<-sprintf('%sdados.txt',i)
  dado<-read.table(imput)
  for(j in 1:secoes)
  {

```

```

matrizsecoes[i,j]<-dado[j,1]
}
}
write.table(matrizsecoes,'Tabela.txt',row.names = FALSE,col.names = FALSE)
}

# Lê os dados do arquivo Tabela.txt, o qual contém o resultado das 1000 simulações do
#assoreamento

imput<-sprintf("Tabela.txt")

# Armazena os dados na matriz

dados<-read.table(imput)

stats<-matrix(nrow=4,ncol=ncol(dados))

# Cria as estatísticas e armazena na matriz stats

for(i in 1:ncol(dados))
{

# Linha 1: média

stats[1,i]<-mean(dados[,i])

# Linha 2: mediana

stats[2,i]<-median(dados[,i])

# Linha 3: desvio padrão

stats[3,i]<-sd(dados[,i])

# Linha 4: variância

stats[4,i]<-var(dados[,i])

}

# Apresenta na tela os resultados das estatísticas

for(j in 1:ncol(dados))
{
cat("Coluna ",j,"- media: ",stats[1,j],"\n")
cat("Coluna ",j,"- mediana: ",stats[2,j],"\n")
cat("Coluna ",j,"- desvio padrao: ",stats[3,j],"\n")
cat("Coluna ",j,"- variancia: ",stats[4,j],"\n")
}

```

APÊNDICE B – CÓDIGOS COMPUTACIONAIS PARA ACOPLAMENTO DO MODELO ESTOCÁSTICO AO DETERMINÍSTICO

Os códigos a seguir apresentam a definição do nome do projeto “base” que deverá ser criado para que “n” simulações do assoreamento possam ser realizadas:

```
nomprojet = 'Insira o nome do projeto';  
endereco = 'Insira endereço onde está o arquivo do projeto';
```

As linhas de códigos abaixo descrevem o processo de leitura dos arquivos dos “n” projetos “base”:

```
simun = 1000;  
  
for ccc=1:simun  
  
    cc = num2str(ccc);  
    ig01 = strcat(nomprojet,'.g01');  
    ig01hdf = strcat(nomprojet,'.g01.hdf');  
    ig02 = strcat(nomprojet,'.g02');  
    ig02hdf = strcat(nomprojet,'.g02.hdf');  
    ig04 = strcat(nomprojet,'.g04');  
    ig04hdf = strcat(nomprojet,'.g04.hdf');  
    ip01 = strcat(nomprojet,'.p01');  
    ip02 = strcat(nomprojet,'.p02');  
    iprj = strcat(nomprojet,'.prj');  
    iq01 = strcat(nomprojet,'.q01');  
    is01 = strcat(nomprojet,'.s01');  
  
    g01 = strcat(cc,'.g01');  
    g01hdf = strcat(cc,'.g01.hdf');  
    g02 = strcat(cc,'.g02');  
    g02hdf = strcat(cc,'.g02.hdf');  
    g04 = strcat(cc,'.g04');  
    g04hdf = strcat(cc,'.g04.hdf');  
    p01 = strcat(cc,'.p01');  
    p02 = strcat(cc,'.p02');  
    prj = strcat(cc,'.prj');  
    q01 = strcat(cc,'.q01');  
    s01 = strcat(cc,'.s01');
```

A próxima etapa é a realização de uma cópia de todos os arquivos do projeto “base” para cada uma das simulações. Tal passo de cópia dos arquivos é importante, pois foi necessário que os arquivos do projeto “base” fossem preservados originais, para todas as simulações feitas. A

realização de uma simulação no arquivo original o alteraria e modificaria os resultados das simulações posteriores:

```
copyfile (ig01, g01, 'f');
copyfile (ig01hdf, g01hdf, 'f');
copyfile (ig02, g02, 'f');
copyfile (ig02hdf, g02hdf, 'f');
copyfile (ig04, g04, 'f');
copyfile (ig04hdf, g04hdf, 'f');
copyfile (ip01, p01, 'f');
copyfile (ip02, p02, 'f');
copyfile (iprj, prj, 'f');
copyfile (iq01, q01, 'f');
copyfile (is01, s01, 'f');
```

Inicia-se agora o processo de leitura de cada um dos arquivos de vazões médias dos períodos de máximas. Neste processo, os arquivos foram tratados da forma que eles foram inseridos no HEC-RAS. Para isto os valores foram salvos temporariamente:

```
q = strcat(cc,'Q.txt');
arquivo1 = fopen(q, 'r');
arquivo2 = fopen('temp1.txt', 'w');
cont=-1;
while ~feof(arquivo1)
    line = fgetl(arquivo1);
    string = regexp(line, '', 'split');
    title = string(2);
    flow = string(3);
    fprintf(flow{1}, '\n');
    fprintf(arquivo2, '%s', flow{1});
    cont=cont+1;
end
fclose(arquivo1);
fclose(arquivo2);

arquivo3 = fopen('temp1.txt', 'r');
arquivo4 = fopen('temp2.txt', 'w');
while ~feof(arquivo3)
    pesq = fscanf(arquivo3, '%char');
    if pesq == ','
        pesq = fscanf(arquivo3, '%s');
        fprintf(arquivo4, pesq);
    end
    if pesq ~= ','
        fprintf(arquivo4, pesq);
    end
end
end
```

```
fclose(arquivo3);
fclose(arquivo4);
```

Após o tratamento dos dados de vazão médias dos períodos de máximas, os valores foram inseridos no arquivo do HEC-RAS. Para isto, as seguintes linhas de código mostram como foi identificada a posição exata para que o preenchimento dos dados começasse a ser feito em tal arquivo:

```
arquivo5=fopen('temp2.txt','r');
arquivo6=fopen(q01,'r');
ArqBase=fgets(arquivo6);
PesqFlows=strfind(ArqBase,'<Flows>');
PosNum1=PesqFlows+6;
ExclZero1=PosNum1+1;
TamArq=length(ArqBase);
arquivo7=fopen(q01,'w');
for c=1:PosNum1
    fprintf(arquivo7,ArqBase(c));
end
ArqVaz=fgetl(arquivo5);
fprintf(arquivo7,ArqVaz);
for c=ExclZero1:TamArq
    fprintf(arquivo7,ArqBase(c));
end
fclose('all');
delete('temp1.txt','temp2.txt');
```

Iniciou-se o processo de leitura de cada um dos arquivos de descargas sólidas totais referentes às vazões anuais. Neste processo de leitura, os arquivos foram tratados da forma que eles foram inseridos no HEC-RAS. Para isto, os valores foram salvos temporariamente:

```
s = strcat(cc,'S.txt');
arquivo1 = fopen(s, 'r');
arquivo2 = fopen('temp1.txt', 'w');
cont=-1;
while ~feof(arquivo1)
    line = fgetl(arquivo1);
    string = regexp(line, '', 'split');
    title = string(2);
    flow = string(3);
    fprintf(flow{1}, '\n');
    fprintf(arquivo2, '%s', flow{1});
    cont=cont+1;
end
fclose(arquivo1);
fclose(arquivo2);
```

```

arquivo3 = fopen('temp1.txt', 'r');
arquivo4 = fopen('temp2.txt', 'w');
while ~feof(arquivo3)
    pesq = fscanf(arquivo3,'%char');
    if pesq == ','
        pesq = fscanf(arquivo3,'%s');
        fprintf(arquivo4,pesq);
    end
    if pesq ~= ','
        fprintf(arquivo4,pesq);
    end
end
fclose(arquivo3);
fclose(arquivo4);

```

Etapa de inserção dos arquivos com as vazões anuais da curva-chave de sedimentos. Neste processo de leitura, os arquivos foram tratados da forma que eles foram inseridos no HEC-RAS. Para isto, os valores foram salvos temporariamente:

```

l = strcat(cc,'L.txt');
arquivo5 = fopen(l, 'r');
arquivo6 = fopen('temp3.txt', 'w');
cont=-1;
while ~feof(arquivo5)
    line = fgetl(arquivo5);
    string = regexp(line, '', 'split');
    title = string(2);
    load = string(3);
    fprintf(load{1}, '\n');
    fprintf(arquivo6, '%s,', load{1});
    cont=cont+1;
end
fclose(arquivo5);
fclose(arquivo6);

arquivo7 = fopen('temp3.txt', 'r');
arquivo8 = fopen('temp4.txt', 'w');
while ~feof(arquivo7)
    pesq = fscanf(arquivo7,'%char');
    if pesq == ','
        pesq = fscanf(arquivo7,'%s');
        fprintf(arquivo8,pesq);
    end
    if pesq ~= ','
        fprintf(arquivo8,pesq);
    end
end
end

```

```
fclose(arquivo7);
fclose(arquivo8);
```

Após o tratamento dos dados de descargas sólidas totais, os valores foram inseridos no arquivo do HEC-RAS. Para isto, as seguintes linhas de código mostram como foi identificada a posição exata para que o preenchimento dos dados fosse feito em tal arquivo:

```
arquivo9=fopen('temp2.txt', 'r');
arquivo10=fopen(s01, 'r');
arquivo11=fopen('temp5.txt', 'w');
ArqBase=fgets(arquivo10);
PesqFlow=strfind(ArqBase,'Flow="');
TamArq=length(ArqBase);
j=1;
i=1;
for c=1:TamArq
    fprintf(arquivo11,ArqBase(c));
    if (j<=5)
        if(c==PesqFlow(j)+5)
            pes=fscanf(arquivo9,'%f');
            virg=fscanf(arquivo9,'%char');
            pesq=num2str(pes);
            fprintf(arquivo11, pesq);
            j=j+1;
        end
    end
end
fclose('all');
```

Após o tratamento dos dados de vazão anuais, os valores foram inseridos no arquivo do HEC-RAS. Para isto, as seguintes linhas de código mostram como foi identificada a posição exata para que o preenchimento dos dados fosse feito em tal arquivo:

```
arquivo12=fopen('temp4.txt', 'r');
arquivo13=fopen('temp5.txt', 'r');
arquivo14=fopen(s01, 'w');
ArqBase=fgets(arquivo13);
PesqLoad=strfind(ArqBase,'Load="');
TamArq=length(ArqBase);
j=1;
i=1;
for c=1:TamArq
    fprintf(arquivo14,ArqBase(c));
    if (i<=5)
        if(c==PesqLoad(i)+5)
            pes=fscanf(arquivo12,'%f');
```

```

        virg=fscanf(arquivo12,'%char');
        pesq=num2str(pes);
        fprintf(arquivo14, pesq);
        i=i+1;
    end
end
end
fclose('all');

```

Com a realização dos preenchimentos, os arquivos temporários foram excluídos:

```
delete('temp1.txt','temp2.txt','temp3.txt','temp4.txt','temp5.txt');
```

Posteriormente, a simulação no HEC-RAS foi feita de acordo com o seguinte código:

```

caminho = strcat(endereco, prj);
h=actxserver('RAS503.HECRASCONTROLLER');
h.Project_Open(caminho);
h.Compute_CurrentPlan(0,0);
h.Project_Close;
delete(h);

```

Após a realização da simulação, foi gerado o arquivo “.p02” da tipologia “.hdf”, onde foram armazenados os dados dos resultados gerados pelo HEC-RAS. Posteriormente, fez-se a leitura desse arquivo e os valores contidos nele foram separados e salvos em um arquivo “.txt”, de acordo com o número de seções configuradas no HEC-RAS:

```

fp02 = strcat(cc,'.p02.hdf');
idado = strcat(cc, 'dados.txt');
dado = fopen(idado, 'w');
pause (15);
hinfo = hdf5info(fp02);
dset
hdf5read(hinfo.GroupHierarchy.Groups(4).Groups(1).Groups(2).Groups.Groups.Groups.Data
sets(7));
idat1 = dset(1,5);
idat2 = dset(2,5);
idat3 = dset(3,5);
idat4 = dset(4,5);
idat5 = dset(5,5);
idat6 = dset(6,5);
idat7 = dset(7,5);
idat8 = dset(8,5);
idat9 = dset(9,5);
idat10 = dset(10,5);

```

```

idat11 = dset(11,5);
idat12 = dset(12,5);
idat13 = dset(13,5);
idat14 = dset(14,5);
idat15 = dset(15,5);
idat16 = dset(16,5);
idat17 = dset(17,5);
idat18 = dset(18,5);
idat19 = dset(19,5);
idat20 = dset(20,5);
idat21 = dset(21,5);
idat22 = dset(22,5);
dat1 = num2str(idat1);
fprintf(dado, '%s', dat1);
fprintf(dado, '\n');
dat2 = num2str(idat2);
fprintf(dado, '%s', dat2);
fprintf(dado, '\n');
dat3 = num2str(idat3);
fprintf(dado, '%s', dat3);
fprintf(dado, '\n');
dat4 = num2str(idat4);
fprintf(dado, '%s', dat4);
fprintf(dado, '\n');
dat5 = num2str(idat5);
fprintf(dado, '%s', dat5);
fprintf(dado, '\n');
dat6 = num2str(idat6);
fprintf(dado, '%s', dat6);
fprintf(dado, '\n');
dat7 = num2str(idat7);
fprintf(dado, '%s', dat7);
fprintf(dado, '\n');
dat8 = num2str(idat8);
fprintf(dado, '%s', dat8);
fprintf(dado, '\n');
dat9 = num2str(idat9);
fprintf(dado, '%s', dat9);
fprintf(dado, '\n');
dat10 = num2str(idat10);
fprintf(dado, '%s', dat10);
fprintf(dado, '\n');
dat11 = num2str(idat11);
fprintf(dado, '%s', dat11);
fprintf(dado, '\n');
dat12 = num2str(idat12);
fprintf(dado, '%s', dat12);
fprintf(dado, '\n');
dat13 = num2str(idat13);
fprintf(dado, '%s', dat13);

```

```

fprintf(dado, '\n');
dat14 = num2str(idat14);
fprintf(dado, '%s', dat14);
fprintf(dado, '\n');
dat15 = num2str(idat15);
fprintf(dado, '%s', dat15);
fprintf(dado, '\n');
dat16 = num2str(idat16);
fprintf(dado, '%s', dat16);
fprintf(dado, '\n');
dat17 = num2str(idat17);
fprintf(dado, '%s', dat17);
fprintf(dado, '\n');
dat18 = num2str(idat18);
fprintf(dado, '%s', dat18);
fprintf(dado, '\n');
dat19 = num2str(idat19);
fprintf(dado, '%s', dat19);
fprintf(dado, '\n');
dat20 = num2str(idat20);
fprintf(dado, '%s', dat20);
fprintf(dado, '\n');
dat21 = num2str(idat21);
fprintf(dado, '%s', dat21);
fprintf(dado, '\n');
% dat22 = num2str(idat22);
% fprintf(dado, '%s', dat22);
fclose all;
end

```

APÊNDICE C – SIMULAÇÃO DO ASSOREAMENTO NO HEC-RAS

Nesta seção é apresentado como os dados foram inseridos no HEC-RAS para que ele simule o assoreamento. Também são apresentados os dados e as equações utilizadas, além das etapas de simulação do assoreamento que são manuais e as preenchidas automaticamente, via códigos do MATLAB.

O HEC-RAS é um *software* que não apresenta uma estrutura muito complexa, sendo sua tela inicial mostrada na **Figura 6.1**. Primeiramente, foi criado, manualmente, um novo projeto, o que foi feito selecionando o menu *File/New Project* e escolhendo o local onde o arquivo foi salvo, assim como seu nome, conforme mostrado na **Figura 6.2**.

Figura 6.1 – Interface inicial do HEC-RAS 5.0.3

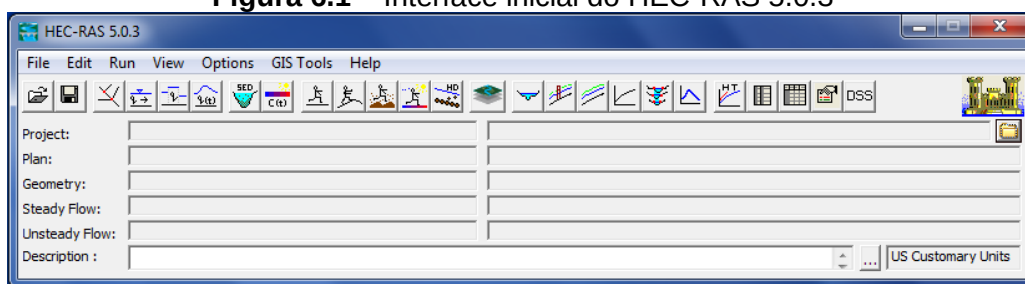
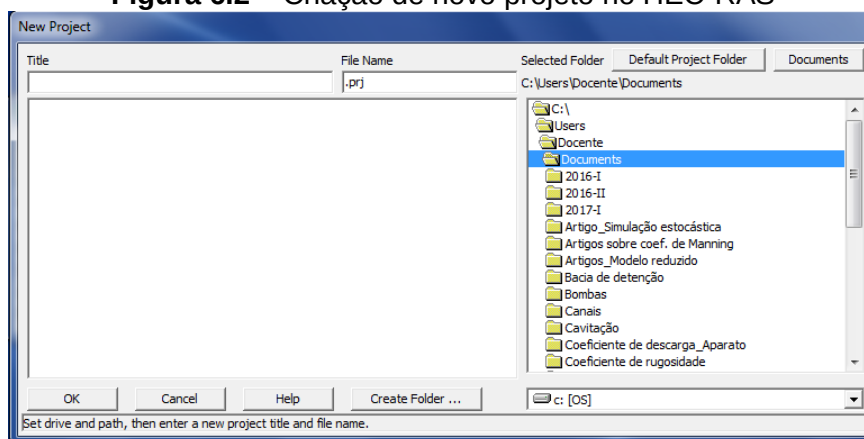


Figura 6.2 – Criação de novo projeto no HEC-RAS



Também se escolheu as unidades que foram utilizadas como entrada no *software*, através do menu *Options/Unit system*, sendo que nessa tese se escolheu como as unidades de entrada o Sistema Internacional.

Inserção da geometria

Após ser criado um novo projeto, inseriram-se manualmente os dados das 21 seções transversais do reservatório em estudo (Apêndice D). Para isso, selecionou-se na barra de ferramentas o menu *Edit/Geometric Data*, mas também se pode selecionar o ícone *Enter geometric data*. Posteriormente, selecionou-se o ícone *River Reach* para desenhar os trechos do canal, conforme mostrado na **Figura 6.5**. *A posteriori* foram inseridas as coordenadas das seções transversais disponíveis, selecionando-se o ícone *Cross Section*. Inseriu-se a seção de acordo com as coordenadas *Station* e *Elevation*, sendo elas os eixos representados por x e y no plano cartesiano, respectivamente. A **Figura 6.4** mostra uma seção transversal onde as coordenadas foram preenchidas.

Figura 6.3 – Exemplo de inserção da geometria do reservatório

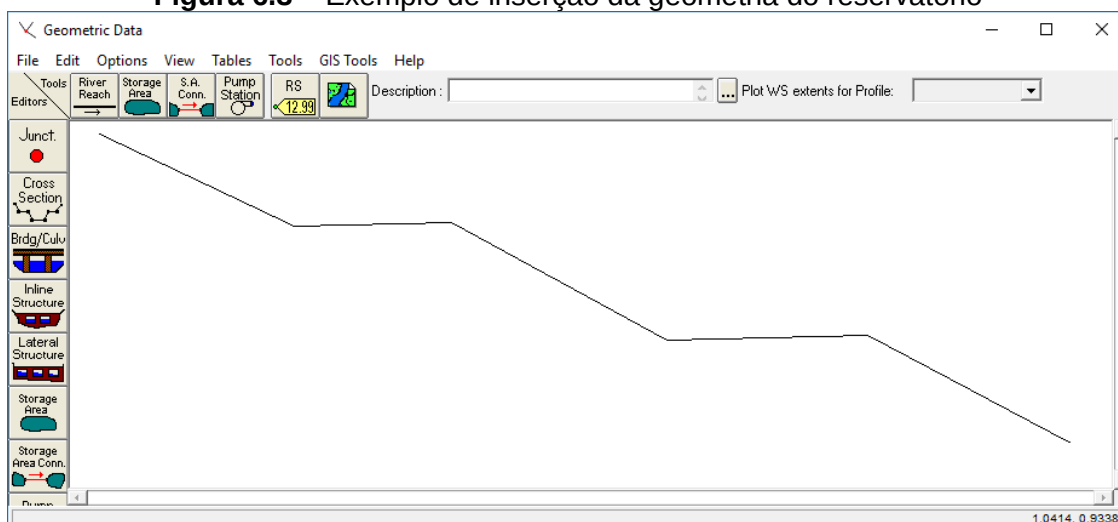
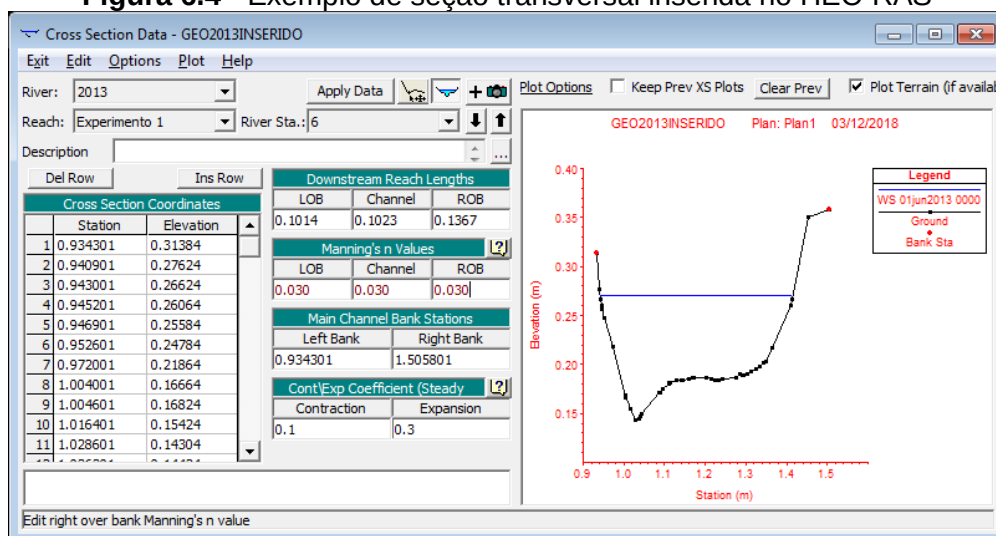
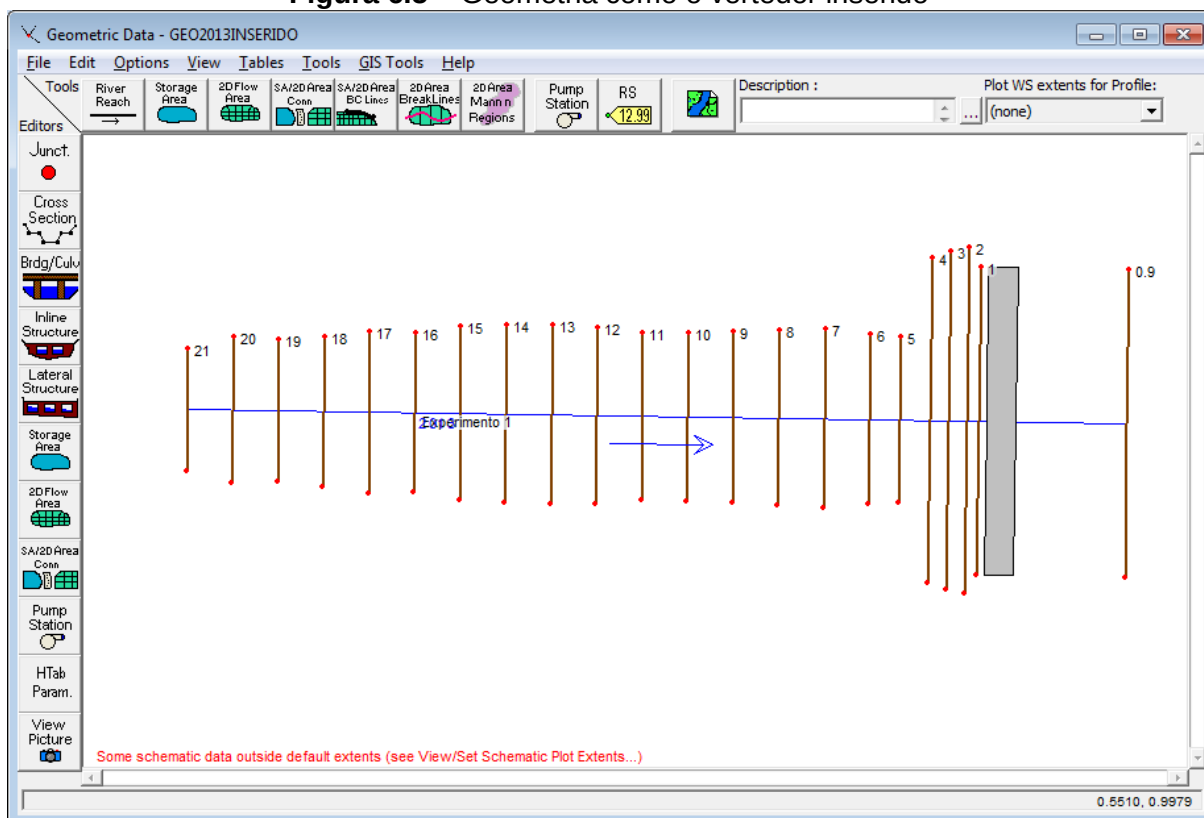


Figura 6.4 - Exemplo de seção transversal inserida no HEC-RAS



O preenchimento das seções deve ser feito de jusante para montante. Portanto, além das coordenadas da seção, inseriram-se também na caixa *Downstream Reach Lengths* as distâncias do lado direito, eixo central e lado esquerdo da seção em que está se inserindo até a seção anterior a ela. O vertedor foi adicionado no campo *Incline Structure*, sendo sua altura de 0,3 m. Ele aparece como o retângulo cinza na **Figura 6.5**.

Figura 6.5 – Geometria como o vertedor inserido



Preencheram-se os valores do Coeficiente de Manning na caixa *Manning's n Values*, podendo os valores ser inseridos também para a margem esquerda, eixo central e margem direita, respectivamente. O coeficiente de Manning também pode ser inserido por faixas, sendo elas na vertical ou na horizontal, bastando selecionar uma das três opções do menu *Options*. Ressalta-se que a forma com a qual foi obtido o valor do Coeficiente de Manning foi apresentada no item 4.3.4.

Na caixa *Main Channel Bank Stations* foram inseridas as coordenadas, no eixo x, da largura do leito do reservatório. No exemplo da **Figura 6.4** a largura do leito é representada pelos dois pontos em vermelho. Além desses valores, inseriram-se os valores dos coeficientes de

contração e expansão, na caixa *Cont/Exp Coefficient*. Esses valores são encontrados na **Tabela 6.1**.

Tabela 6.1 - Coeficientes de expansão e contração que podem ser utilizados no HEC-RAS

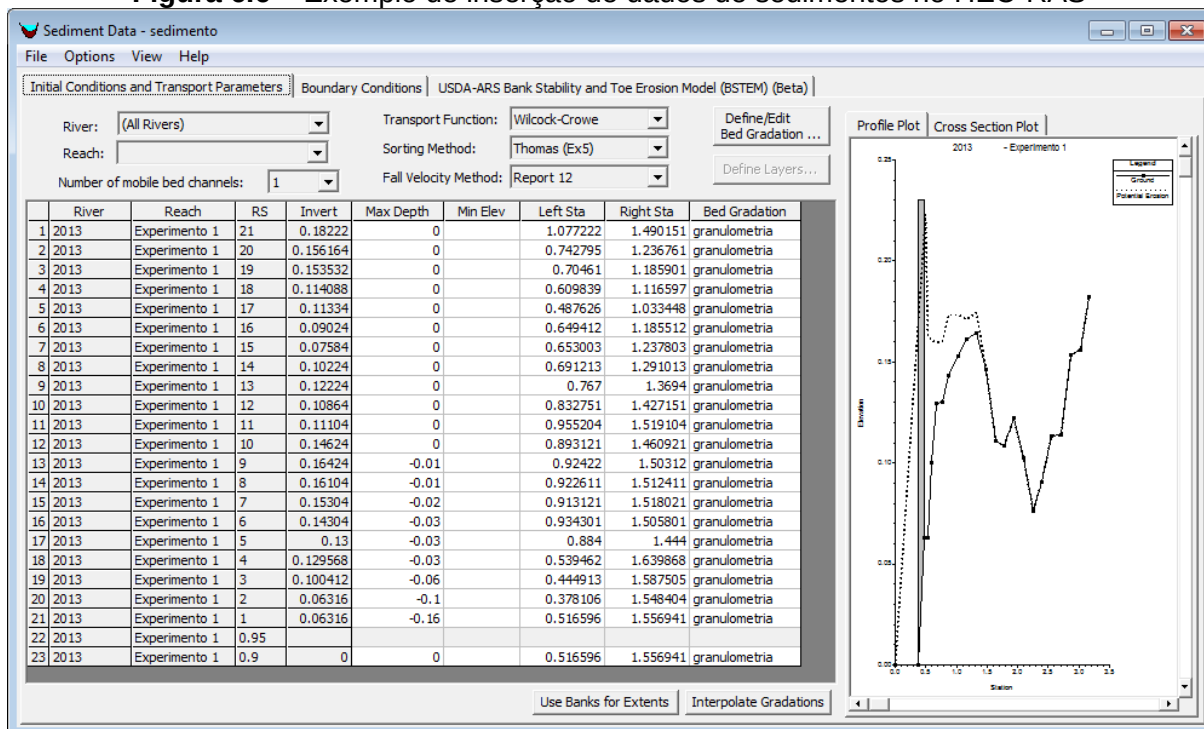
	Contração	Expansão
Sem perda calculada na transição	0,0	0,0
Transição gradual	0,1	0,3
Seção de ponte típica	0,3	0,5
Transição abrupta	0,6	0,8

Fonte: Brunner, 2010.

Inserção de dados de sedimentos

Após inserir os dados de geometria, foram inseridos manualmente os dados referentes ao sedimento. Isso foi feito selecionando-se a barra de ferramentas *Edit/Sediment Data*, mas também é possível selecionar o ícone *Enter sediment boundary conditions*. A **Figura 6.6** mostra um exemplo com dados de sedimentos preenchidos para algumas seções transversais, com visualização da Seção 1.

Figura 6.6 – Exemplo de inserção de dados de sedimentos no HEC-RAS



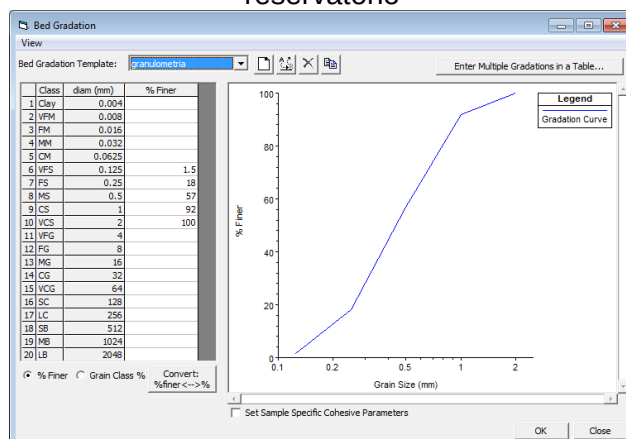
Escolheu-se a função do transporte de sedimentos utilizada na modelagem, para isso, selecionou-se a caixa *Transport Function*. O software possui as seguintes funções: Ackers-White (1973), England-Hansen (1967), Laursen e Copeland (1988, 1989), Meyer, Peter e

Muller (1948), Toffaleti (1968), yang (1973) e Wilcock (2001). Todas as funções foram testadas, sendo que Wilcock (2001) apresentou melhor resultado.

Foi necessário selecionar manualmente o método de classificação para calcular a espessura da camada ativa, na caixa *Sorting Method*, tendo-se duas opções de escolha, *Exner 5* e *Active Layer*. O primeiro inclui a capacidade do leito de formar uma camada de superfície que limita a erosão do leito, já o segundo é indicado apenas para camadas de cascalho, sendo mais indicada para ser utilizada quando se utilizar a função de Wilcock para o transporte de sedimentos (BRUNNER, 2010). Por fim, escolheu-se o parâmetro para a velocidade de queda dos sedimentos, tendo os seguintes métodos disponíveis no *software*: Ruby, Toffaleti, Van Rijn e Report 12, sendo este último o método padrão indicado pelo *software*. Assim, nas análises foram utilizados o *Exner 5* para o cálculo da camada ativa e *Report 12* para a velocidade de queda.

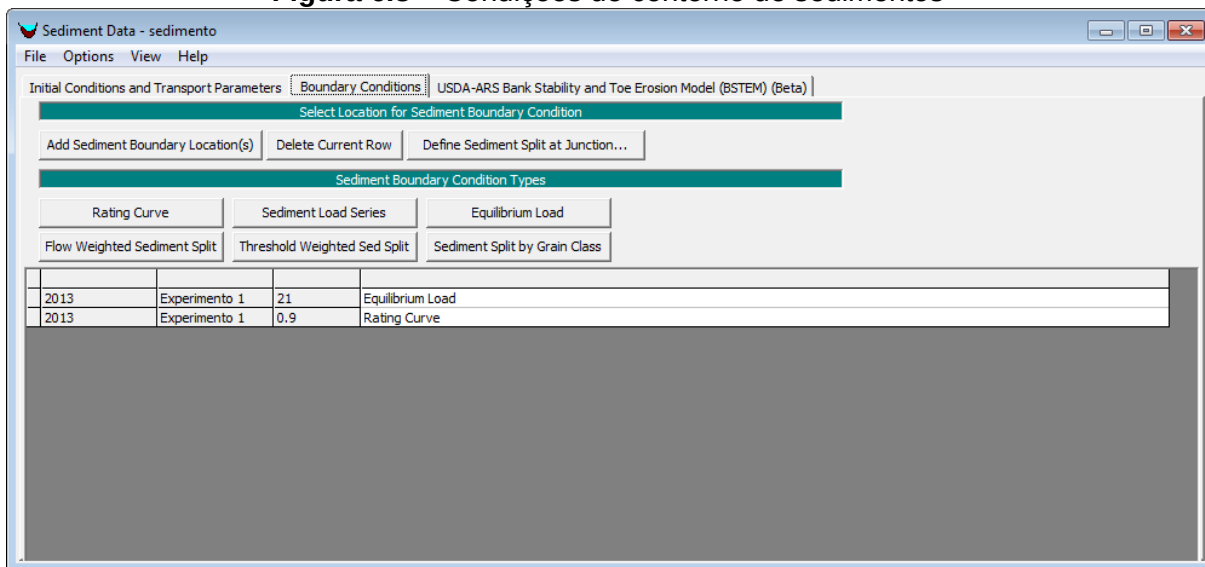
Também se inseriu manualmente a curva granulométrica do material de leito, que preenche a coluna *Bed Gradation* mostrada na **Figura 6.6**. Para inseri-la, selecionou-se a caixa *Define/Edit Bed Gradation*. Há duas formas diferentes de valores que podem ser inseridos: se optar pela opção *% Finer*, insere-se a curva acumulada, em porcentagem, da média de cada porcentagem da classe granulométrica; caso se utilize a opção *Grain Class Fractions/Weight*, deve-se inserir a fração de cada uma das classes com base em seu peso específico. Os diâmetros listados na coluna *diam (mm)* podem ser alterados em *Options/User Defined Grain Classes*. A **Figura 6.7** mostra a curva granulométrica do material de leito, sendo que foi utilizada a opção *% Finer*.

Figura 6.7 – Exemplo de inserção da curva granulométrica do material do leito do reservatório



Por fim, acrescentaram-se aos dados de sedimentos as condições de contorno na opção *Boundary Conditions*, cuja aba é mostrada na **Figura 6.8**, sendo três as condições de contorno: *Rating Curve*, *Sediment Load Series* ou *Equilibrium Load*. É permitido inserir os dados de carga de sedimentos para diferentes estações, bastando apenas selecionar a caixa *Add Sediment boundary locations* e selecionar os perfis que se têm os dados de carga de sedimentos.

Figura 6.8 – Condições de contorno de sedimentos



Na condição de contorno *Rating Curve* (curva de descarga, que nesse caso é a curva-chave de sedimentos), cada coluna tem um valor inserido de vazão anual e uma descarga sólida total de sedimentos, em massa por unidade de tempo (t/dia). O preenchimento da curva-chave de sedimentos foi automático, via código do MATLAB, pois foram geradas 1000 séries de dados, consequentemente, 1000 curvas-chave. A **Figura 6.9** mostra um exemplo onde os dados da curva-chave de sedimentos estão vazios, ou seja, criou-se esse arquivo apenas para alocar espaços para receber, automaticamente, os arquivos vindos do programa R. Na caixa *Number of flow-load points* selecionou-se a quantidade de par de dados que foram inseridos. Os outros dados que aparecem na figura são referentes à curva granulométrica da borracha.

A opção de contorno *Sediment Load Series* é utilizada quando existem incrementos de sedimentos que não estão relacionados com o aumento da vazão. Nesse caso, inserem-se os valores de duração e peso dos sedimentos, além de frações decimais não cumulativas da carga de sedimentos.

Figura 6.9 – Exemplo de inserção da curva-chave de sedimentos

	Flow (m³/s)	Total Load (tonnes/day)				
1	Clay (0.002-0.004)					
2	VFM (0.004-0.008)					
3	FM (0.008-0.016)					
4	MM (0.016-0.032)					
5	CM (0.032-0.0625)					
6	VFS (0.0625-0.125)	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
7	FS (0.125-0.25)	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165
8	MS (0.25-0.5)	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
9	CS (0.5-1)	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
10	VCS (1-2)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
11	VFG (2-4)					
12	FG (4-8)					
13	MGS (8-16)					
14	CG (16-32)					
15	VCG (32-64)					
16	SC (64-128)					

A última possibilidade de condição de contorno é a *Equilibrium Load*, sendo que ela é utilizada quando não há sedimentação ou erosão na seção (GARCÍA, 2002). O *software* admite essa condição para a seção mais a montante.

Regime de escoamento

Para a simulação do transporte de sedimentos, escolheu-se para os dados de vazão o regime não permanente. Para isso, selecionou-se na barra de ferramentas o comando *Edit/Quasi Unsteady Flow* ou o ícone *Enter quasi-unsteady flow data*. A janela inicial com os dados de vazão é mostrada na **Figura 6.10**.

Figura 6.10 – Exemplo de seleção do regime de escoamento

	River	Reach	RS	Boundary Condition Type
1	2013	Experimento 1	21	Flow Series
2	2013	Experimento 1	0.9	Rating Curve

Na **Figura 6.10**, pode-se observar que existem sete condições de contorno diferentes que podem ser utilizadas: *Flow Series*, *Lateral Flow Series*, *Uniform Lateral Flow*, *Normal*

Depth, Stage Series, Rating Curve e T.S. Gate Openings. Para a primeira seção (a montante) sempre se deve utilizar a opção *Flow Series*. Ressalta-se que devem ser inseridas, no mínimo, duas condições de contorno, uma na primeira seção e outra na última. É permitido inserir as condições de contorno para diversas estações, bastando selecionar a caixa *Add Flow Change Locations(s)* e selecionar os perfis que se têm os dados de vazão.

Na condição *Flow Series* (séries de vazão), escolheu-se a quantidade de dados que foram inseridos (nesse caso foram cinco), sendo necessário o preenchimento de três colunas (**Figura 6.11**): *Duration*, *Increment* e *Flow*. Entretanto, esse preenchimento foi automático via código do MATLAB, por isso, a coluna de vazões está vazia, ou seja, criou-se o arquivo apenas para receber os dados vindos do programa R.

Figura 6.11 – Exemplo de preenchimento da série de vazões

The dialog box is titled "Flow Series for 2013 Experimento 1 21". It contains the following elements:

- Select/Enter the Data's Starting Time Reference:**
 - ☐ Use Simulation Time: Date: 01JUN2013 Time: [empty]
 - ☒ Fixed Start Time: Date: 01JUN2013 Time: [empty]
- Hydrograph Data:**
 - Buttons: No. Ordinates, Interpolate Values, Del Row, Ins Row
 - Table:

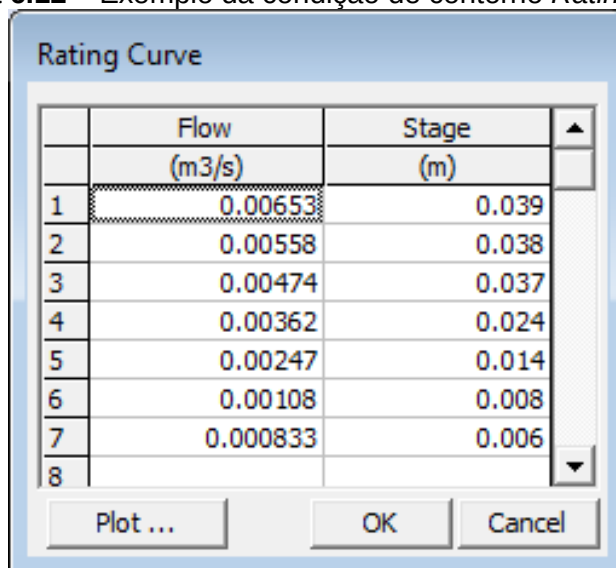
	Simulation Time	Elapsed Time (hours)	Flow Duration (hours)	Computation Increment (hours)	Flow (m3/s)
1	01jun2013 0000	0.4832636	0.4832636	0.4832636	
2	01jun2013 0029	0.9665272	0.4832636	0.4832636	
3	01jun2013 0057	1.449791	0.4832636	0.4832636	
4	01jun2013 0126	1.933054	0.4832636	0.4832636	
5	01jun2013 0155	2.416318	0.4832636	0.4832636	
6					
- ☐ Compute computation increments based on flow
- Buttons: Plot ..., OK, Cancel

Na coluna *Duration* está o tempo de duração durante o qual a vazão é constante. Nesse caso, conforme descrito no item 4.3.3, a duração é de, aproximadamente, 30 minutos. A coluna *Increment* representa a duração pela qual ocorreria alteração na geometria do leito durante o fluxo em série, sendo também admitida de, aproximadamente, 30 minutos. Na parte superior

da janela, inseriu-se a data e hora de simulação (é também preenchida automaticamente após se fazer a simulação) e a data e hora de início da série histórica, respectivamente. A data deve ser preenchida em formato militar. Caso queira se obter o gráfico de vazão *versus* tempo, seleciona-se a opção *Plot* no canto inferior esquerdo da janela.

Na condição de contorno *Rating Curve* são inseridos os dados de vazões e suas respectivas profundidade, conforme mostrada na **Figura 6.12**, sendo que nesse trabalho esses dados foram medidos no modelo reduzido, na seção imediatamente a jusante do vertedor. As demais condições de contorno não foram utilizadas neste trabalho, portanto, não serão descritas.

Figura 6.12 – Exemplo da condição de contorno *Rating Curve*



	Flow (m3/s)	Stage (m)
1	0.00653	0.039
2	0.00558	0.038
3	0.00474	0.037
4	0.00362	0.024
5	0.00247	0.014
6	0.00108	0.008
7	0.000833	0.006
8		

Por fim, inseriram-se manualmente os dados de temperatura, selecionando-se a janela *Set Temperature*. Assim, como em *Flow Series*, escolheu-se a quantidade de dados que foram inseridos selecionando-se a janela *No Ordinates*. Duas colunas precisaram ser preenchidas: *Duration* e *Temp*. Na coluna *Duration*, inseriu-se o tempo de duração durante o qual a temperatura é constante (admitiu-se o período de, aproximadamente, 30 minutos) e na coluna *Temp* inseriu-se o valor da temperatura, em °C. Na parte superior da janela, inseriu-se a data de simulação (também preenchida automaticamente após se fazer a simulação) e a data de início da série histórica, respectivamente. A **Figura 6.13** mostra um exemplo com os dados inseridos.

Figura 6.13 – Exemplo de inserção da temperatura da simulação

Temperature Series

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

☐ Use Simulation Time: Date: 01JUN2013 Time: Date:

☒ Use Fixed Start Time: Date: 01JUN2013 Time:

Temperature Data

No. Ordinates Interpolate Missing Values Del Row Ins Row

	Simulation Time	Elapsed Time (hours)	Duration (hours)	Temp (C)
1	31mai2013 2400	0.4832636	0.4832636	21
2	01jun2013 0029	0.9665272	0.4832636	21
3	01jun2013 0058	1.449791	0.4832636	21
4	01jun2013 0127	1.933054	0.4832636	21
5	01jun2013 0156	2.416318	0.4832636	21
6	01jun2013 0225			

OK Cancel

Simulação do assoreamento

Para fazer a simulação do assoreamento, selecionou-se na barra de ferramentas o comando *Run/Sediment Analysis* ou o ícone *Perform a sediment transport simulation*. A **Figura 6.14** mostra a janela principal para a simulação de sedimentos.

Figura 6.14 – Tela principal de simulação do assoreamento

Sediment Transport Analysis

File Options Help

Plan: Plan1 Short ID: Plan1

Geometry File: GEO2013INSERIDO

Quasi-Unsteady Flow: vazoes

Sediment Data: sedimento

Simulation Time Window

Starting Date: 01JUN2013 Starting Time:

Ending Date: 01JUN2017 Ending Time:

Plan Description:

Compute

Nas Janelas *Geometry File*, *Quasi-Unsteady Flow* e *Sediment Data* selecionaram-se os arquivos de Geometria, Vazão e Sedimentos, respectivamente, os quais foram explicados

anteriormente. Na janela *Simulation Time Window* inseriu-se a data e a hora de início e fim da simulação. As horas foram inseridas no formato militar (relógio de 24 horas). Por fim, selecionou-se *Compute* para a computação dos dados.

Ressalta-se que toda essa etapa de simulação foi automática, via código do MATLAB, pois foram geradas 1000 séries de dados de vazões e descargas sólidas totais, consequentemente, foram feitas 1000 simulações, de forma que era inviável fazer essa etapa manualmente.

APÊNDICE D – SEÇÕES TRANSVERSAIS DO MODELO REDUZIDO

Nas figuras a seguir estão apresentadas as 21 seções transversais representadas no modelo reduzido e no numérico. Pode-se observar a geometria primitiva (1957) e as das batimetrias de 2013 e 2017.

Figura 7.1 – Seção transversal 1. Distância ao vertedor: 0,0254 m

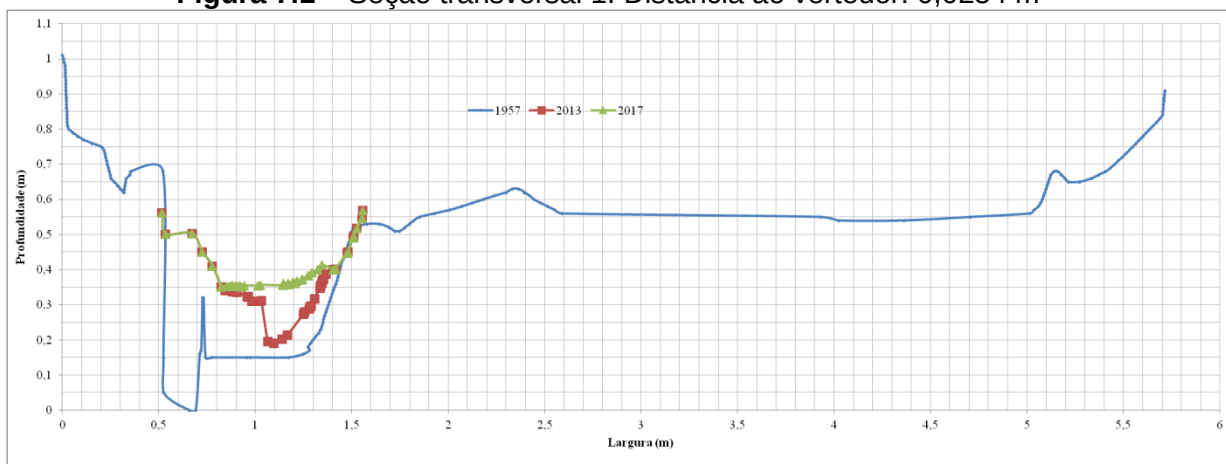


Figura 7.2 – Seção transversal 2. Distância à seção anterior: 0,0409 m

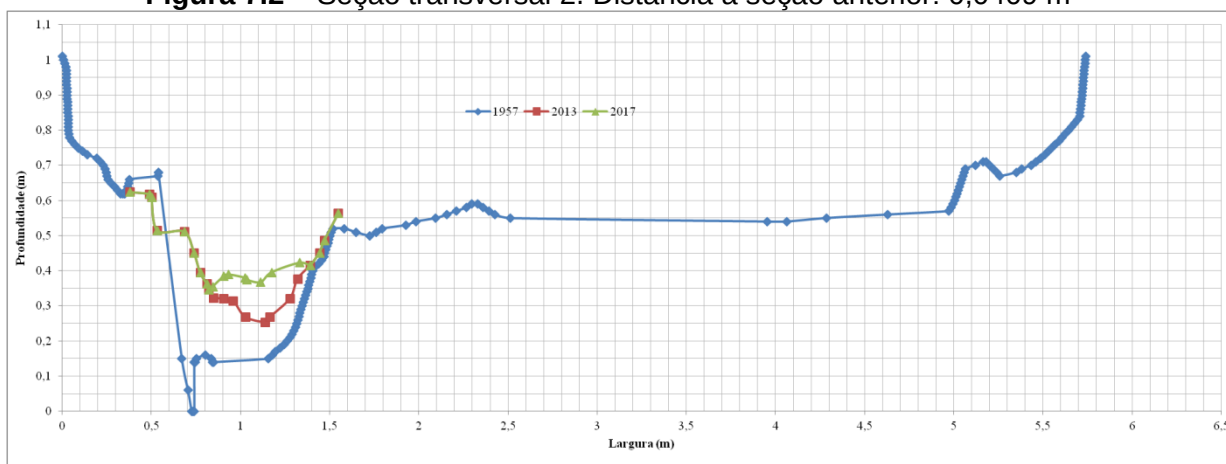


Figura 7.3 – Seção transversal 3. Distância à seção anterior: 0,0614 m

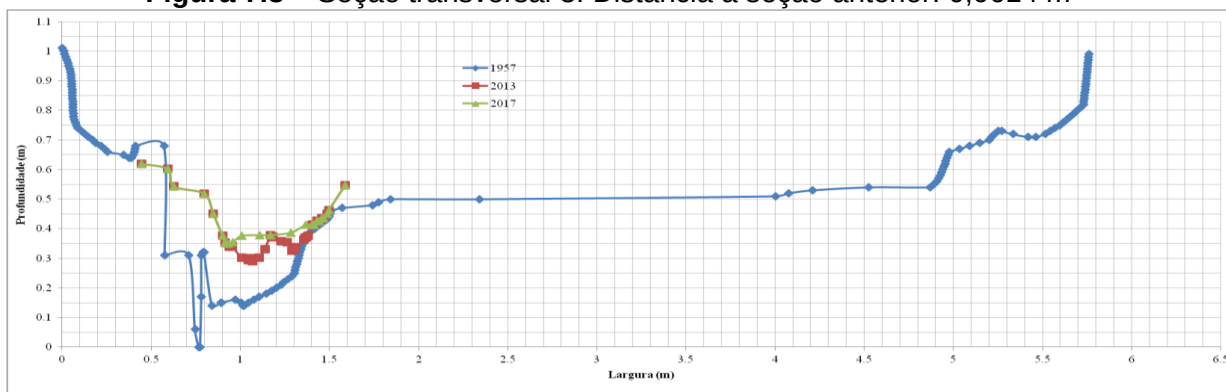


Figura 7.4 – Seção transversal 4. Distância à seção anterior: 0,0614 m

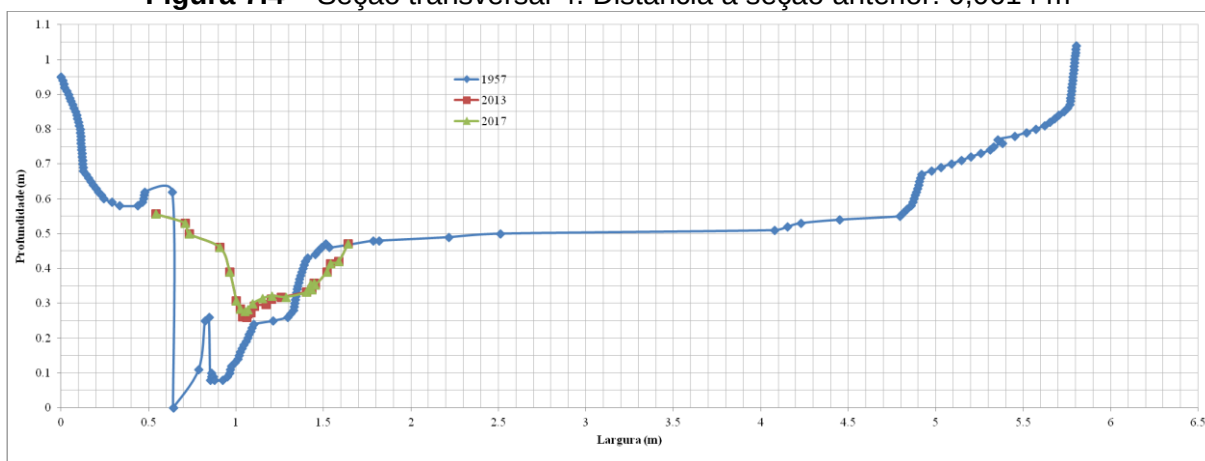


Figura 7.5 – Seção transversal 5. Distância à seção anterior: 0,1023 m

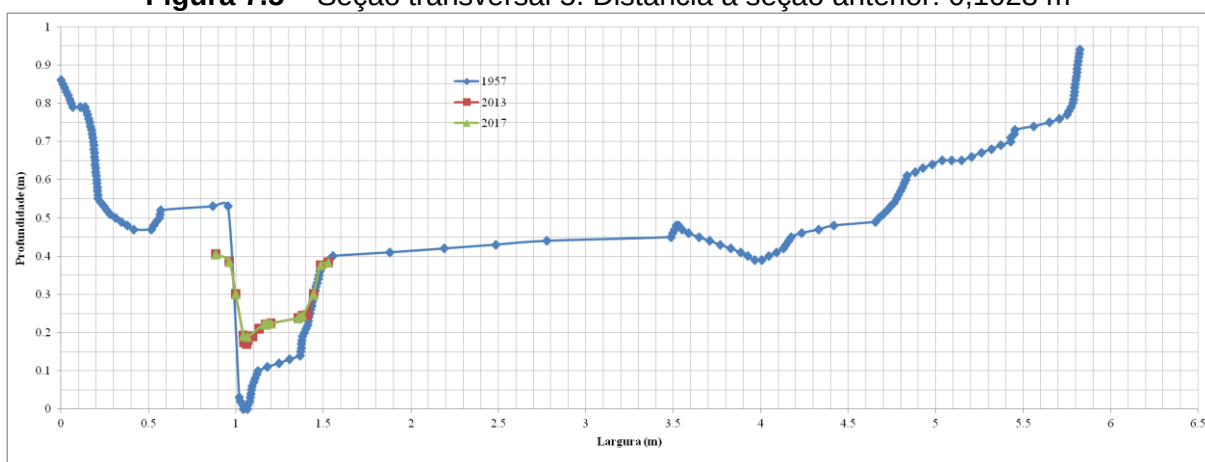


Figura 7.6 – Seção transversal 6. Distância à seção anterior: 0,1023 m

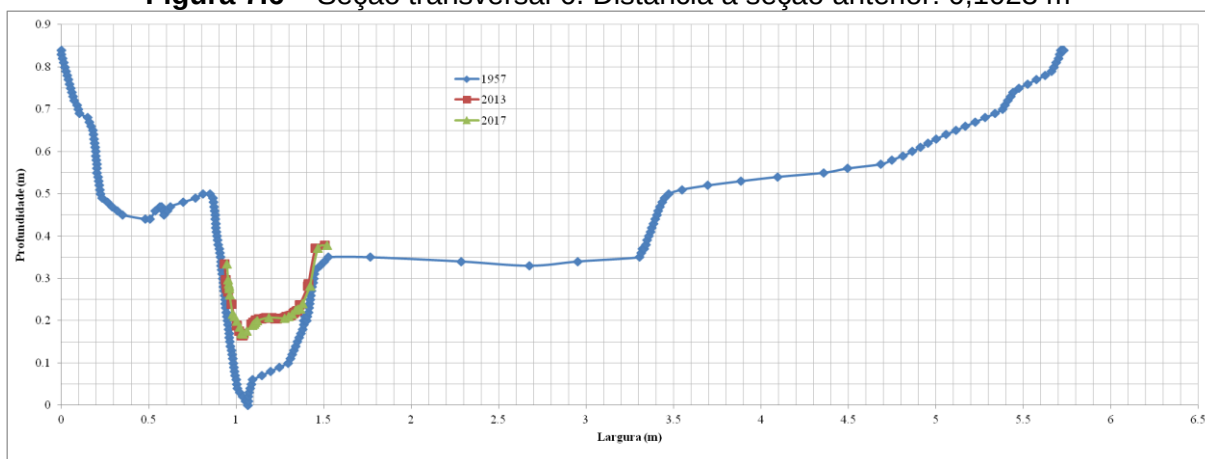


Figura 7.7 – Seção transversal 7. Distância à seção anterior: 0,1534 m

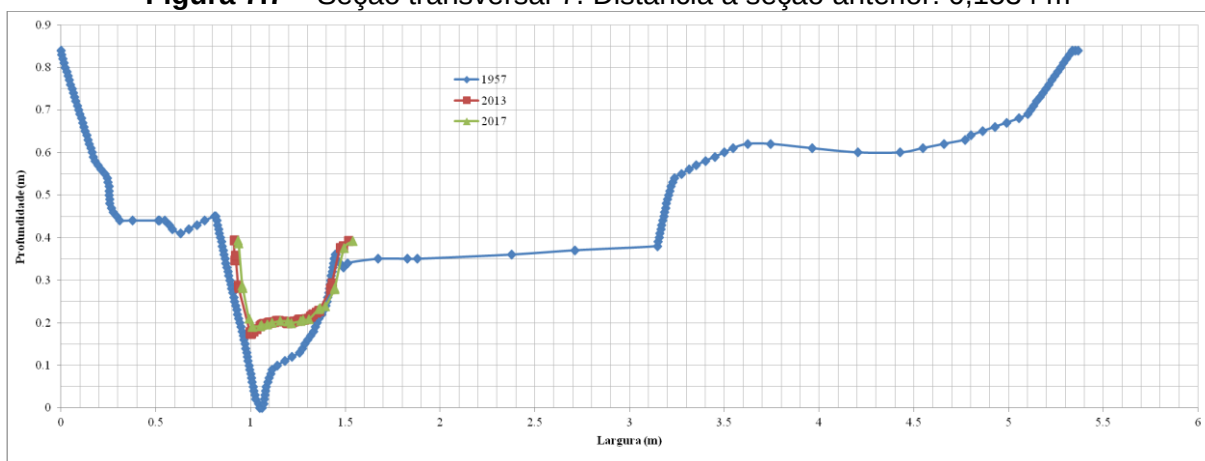


Figura 7.8 – Seção transversal 8. Distância à seção anterior: 0,1534 m

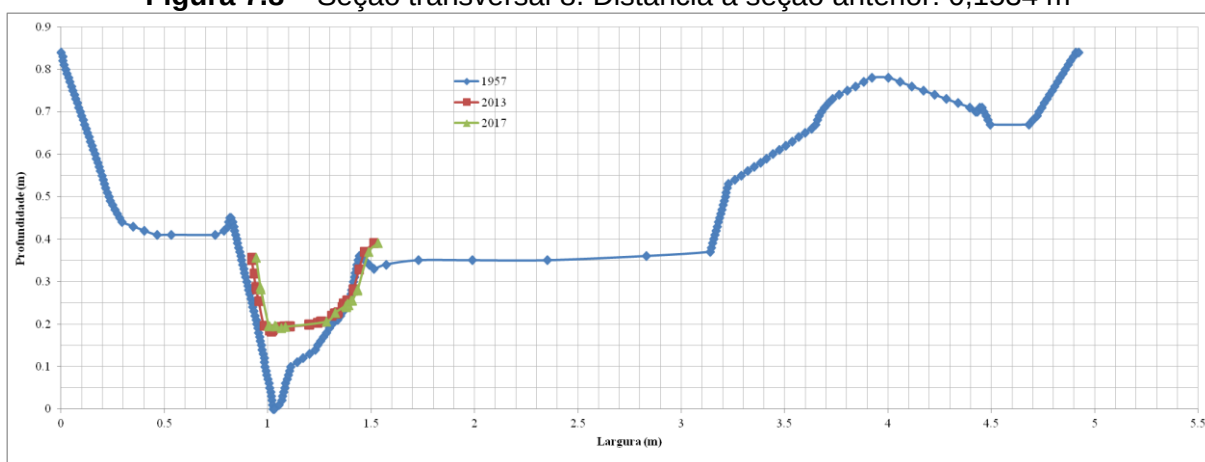


Figura 7.9 – Seção transversal 9. Distância à seção anterior: 0,1534 m

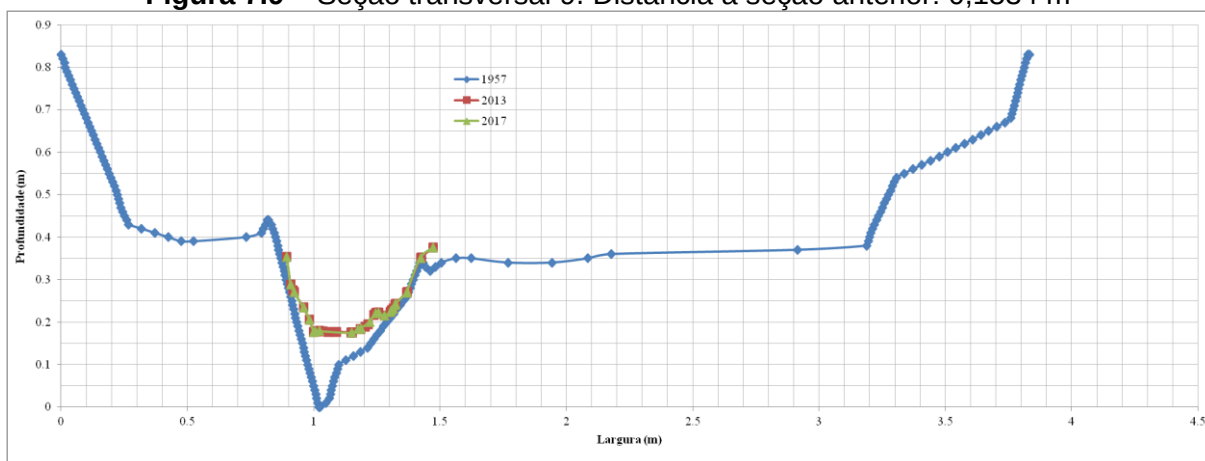


Figura 7.10 – Seção transversal 10. Distância à seção anterior: 0,1534 m

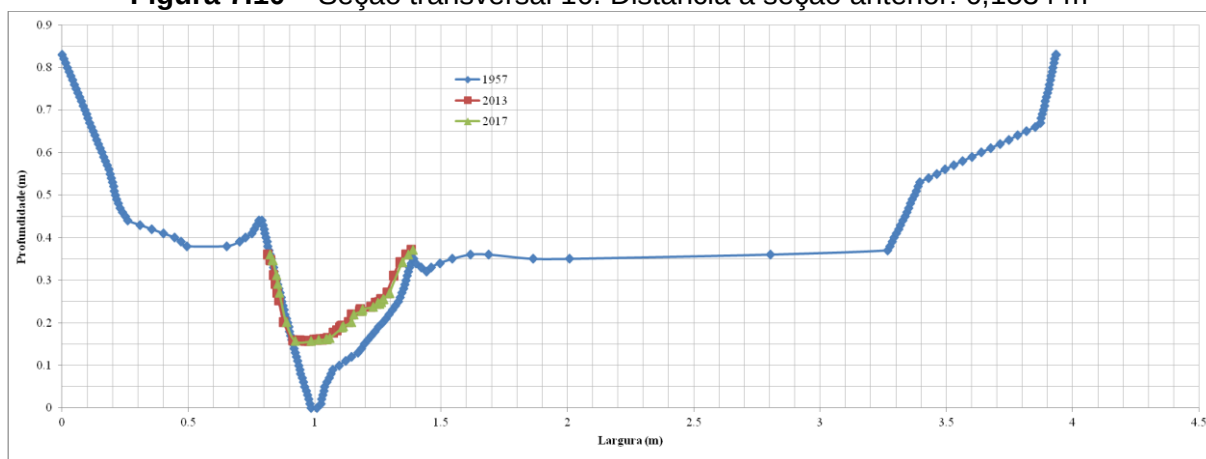


Figura 7.11 – Seção transversal 11. Distância à seção anterior: 0,1534 m

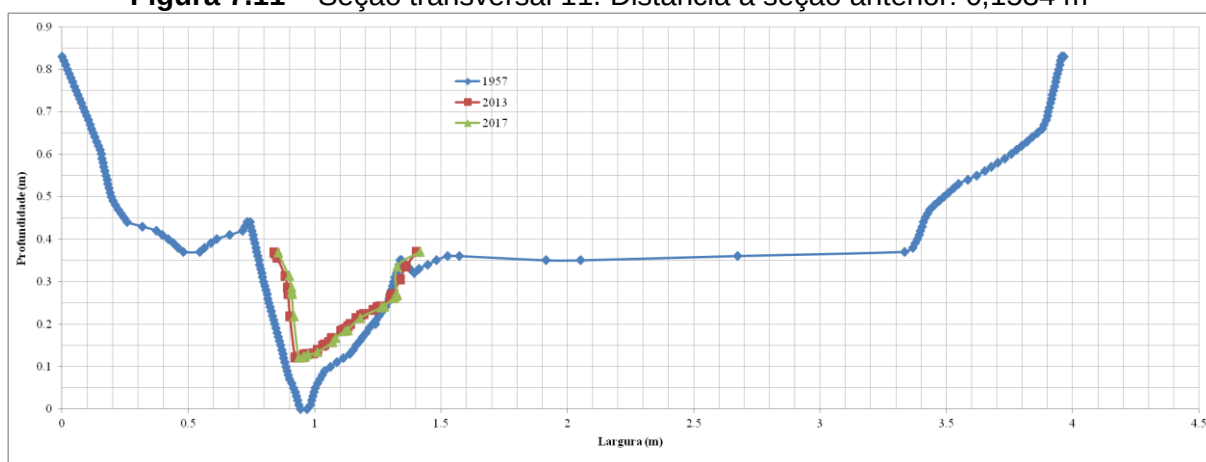


Figura 7.12 – Seção transversal 12. Distância à seção anterior: 0,1023 m

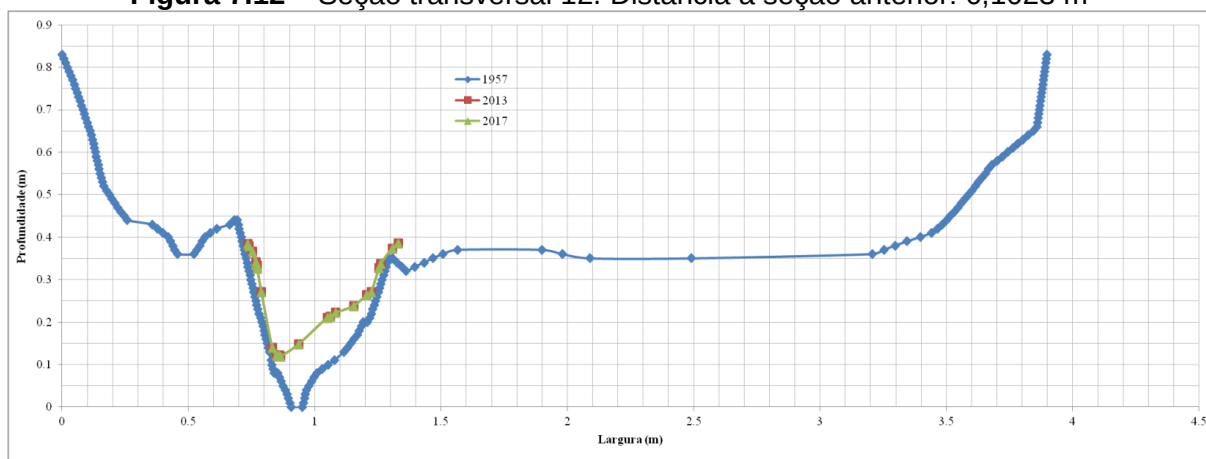


Figura 7.13 – Seção transversal 13. Distância à seção anterior: 0,1534 m

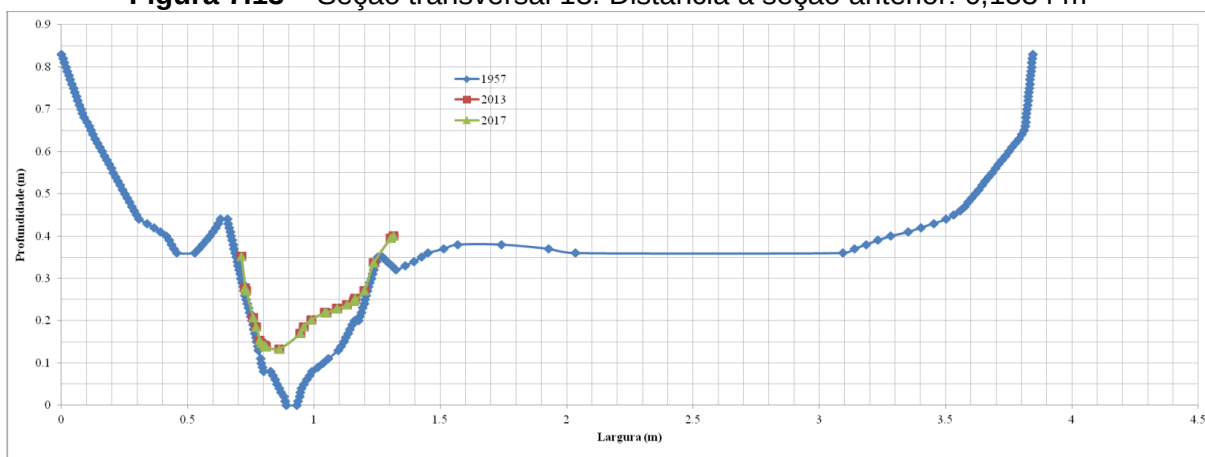


Figura 7.14 – Seção transversal 14. Distância à seção anterior: 0,1534 m

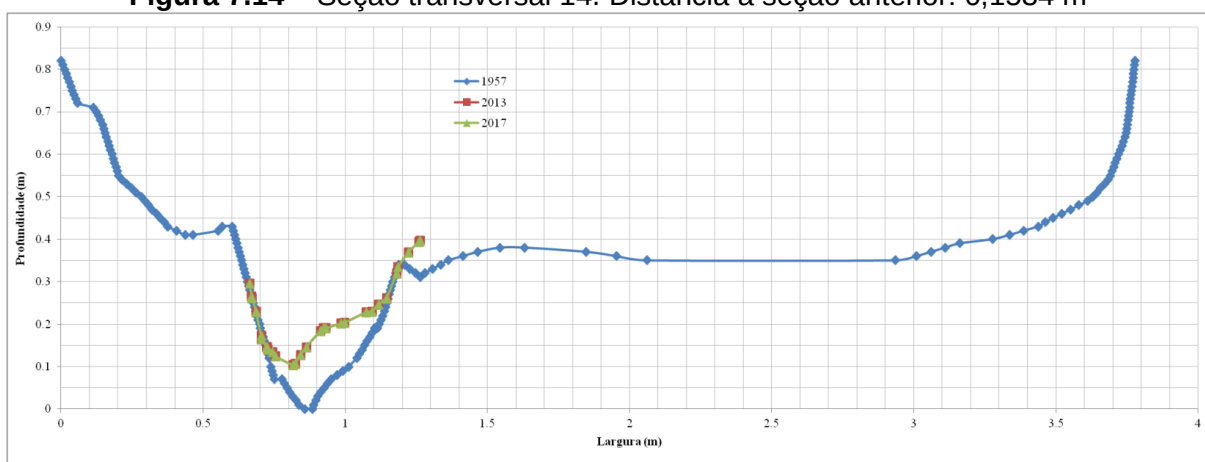


Figura 7.15 – Seção transversal 15. Distância à seção anterior: 0,1534 m

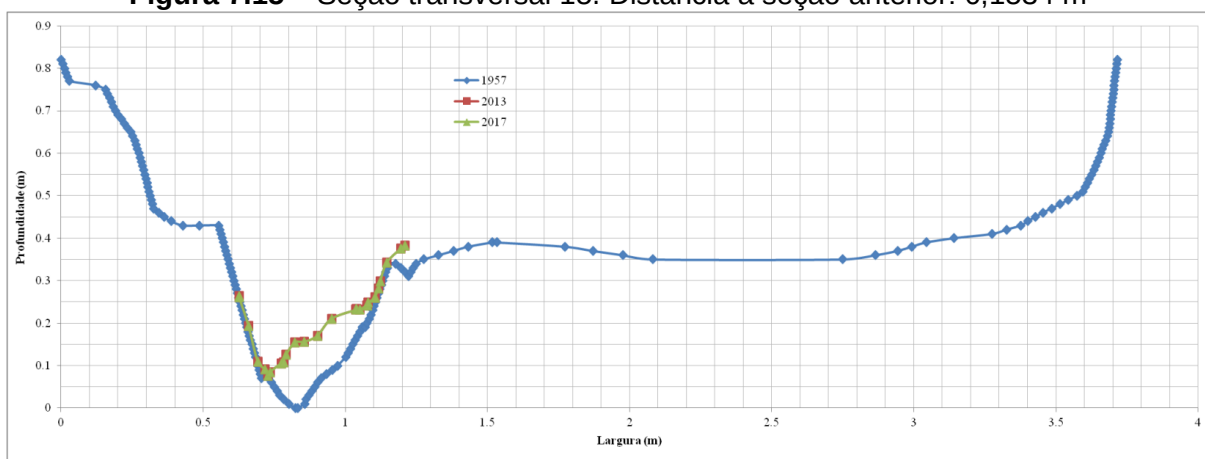


Figura 7.16 – Seção transversal 16. Distância à seção anterior: 0,1534 m

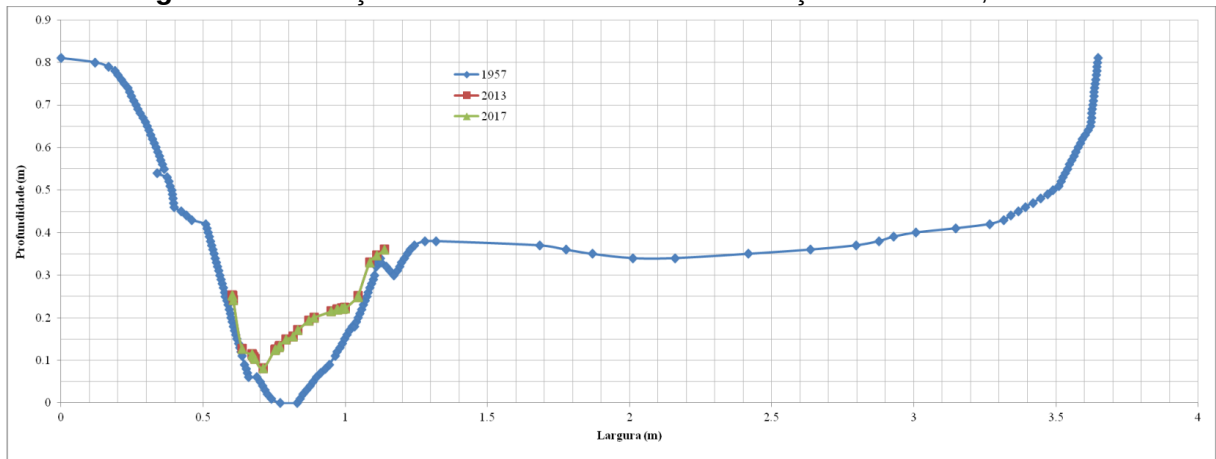


Figura 7.17 – Seção transversal 17. Distância à seção anterior: 0,1534 m

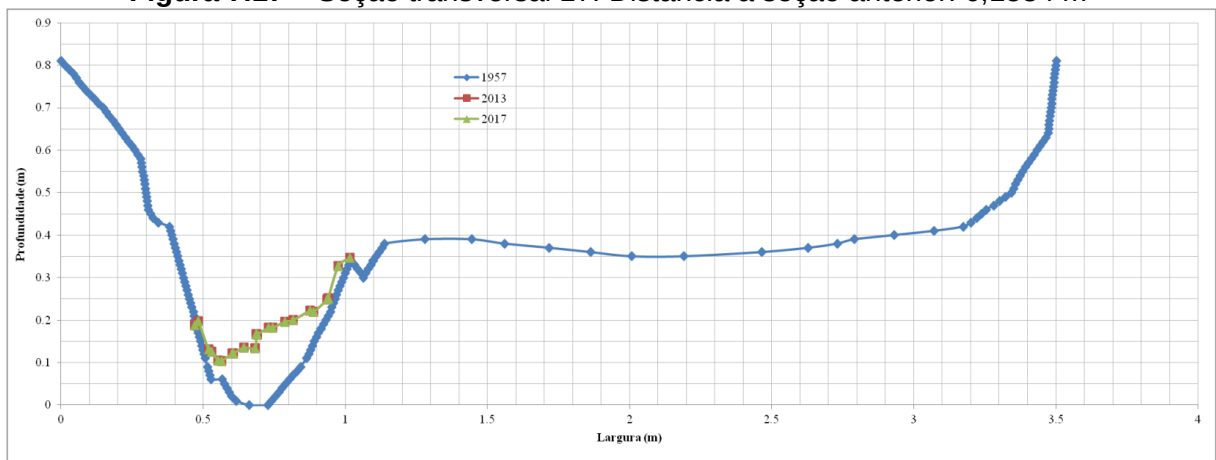


Figura 7.18 – Seção transversal 18. Distância à seção anterior: 0,1534 m

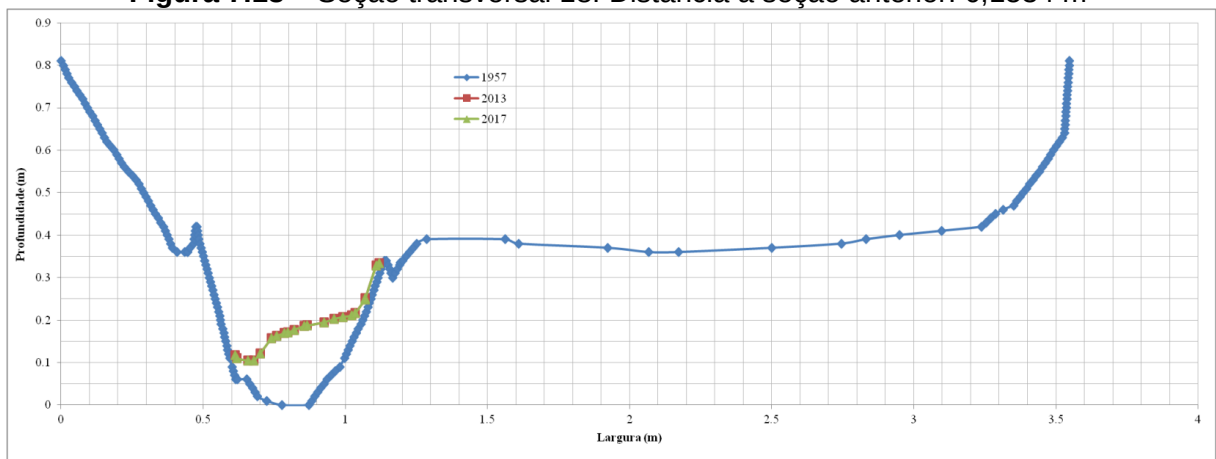


Figura 7.19 – Seção transversal 19. Distância à seção anterior: 0,1534 m

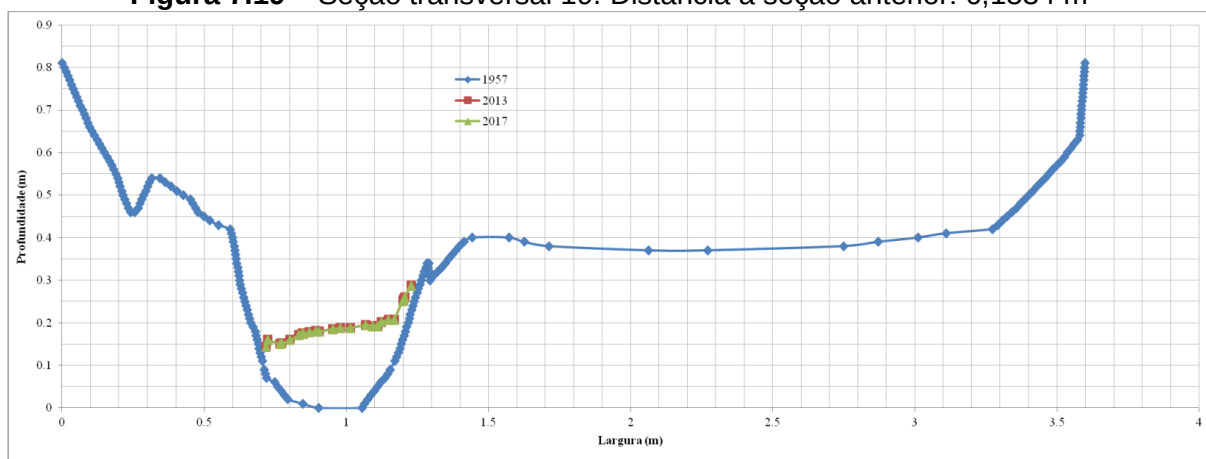


Figura 7.20 – Seção transversal 20. Distância à seção anterior: 0,1534 m

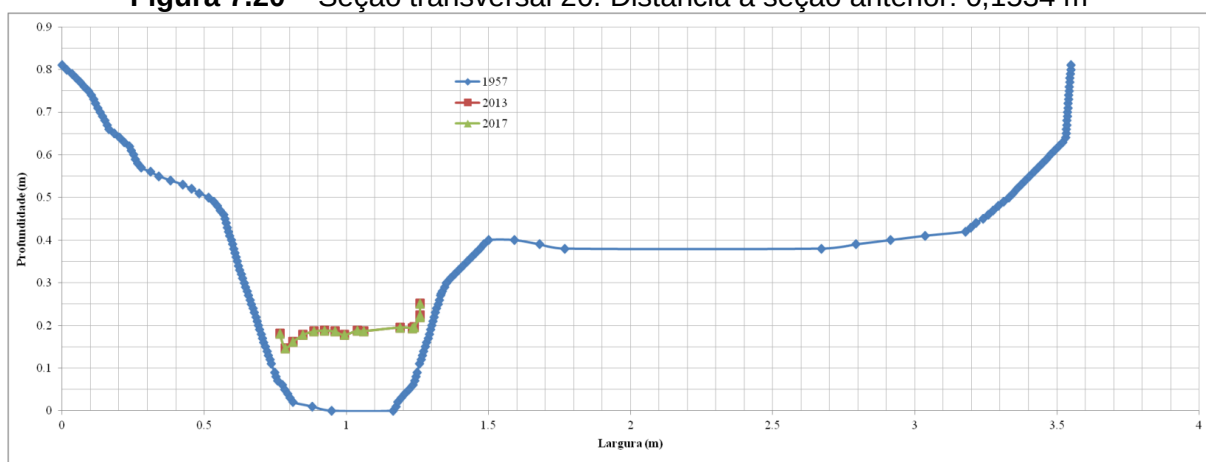


Figura 7.21 – Seção transversal 21. Distância à seção anterior: 0,1534 m

