

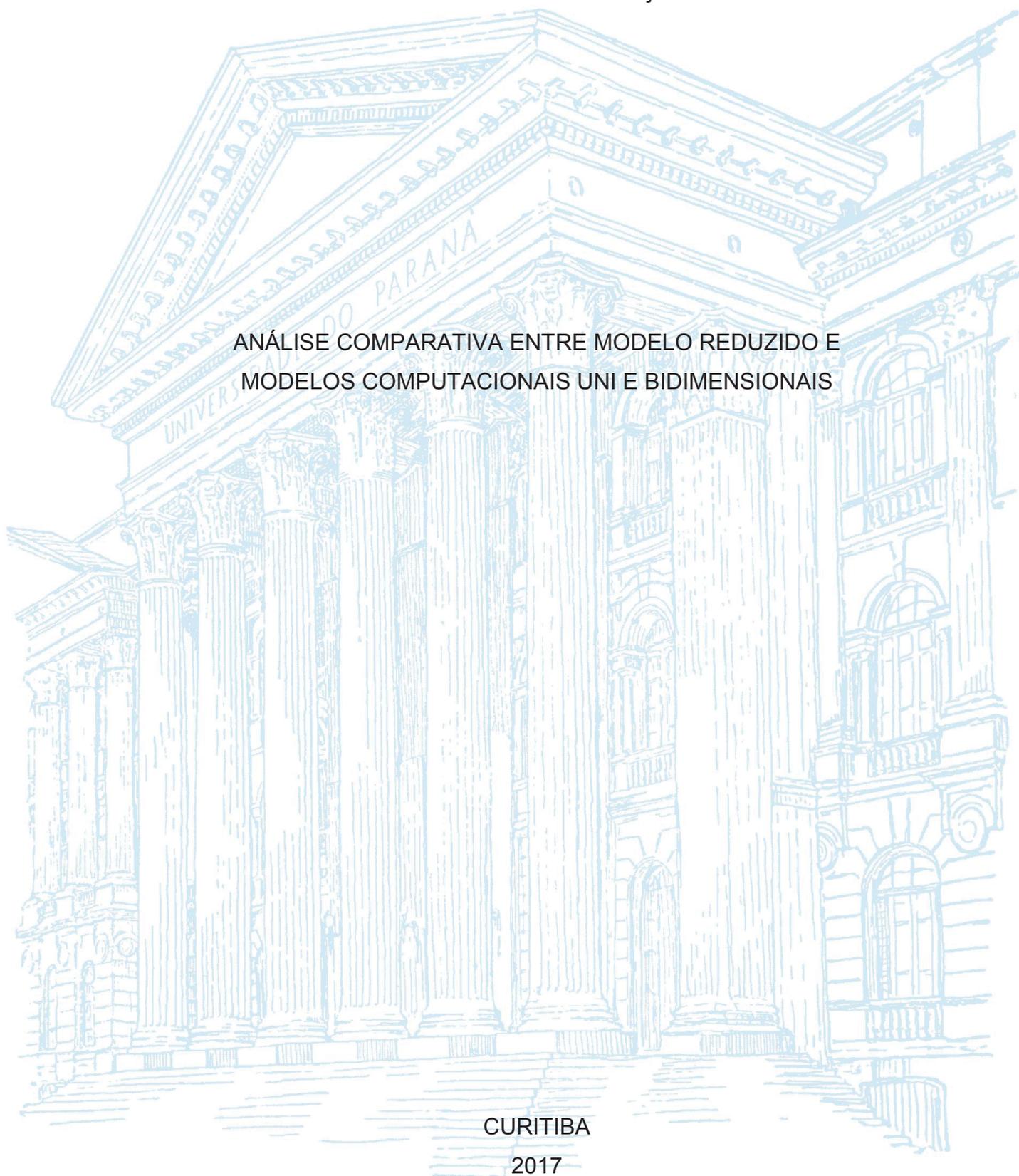
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MURILO DE OLIVEIRA GONÇALVES

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELO REDUZIDO E
MODELOS COMPUTACIONAIS UNI E BIDIMENSIONAIS

CURITIBA

2017



MURILO DE OLIVEIRA GONÇALVES

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELO REDUZIDO E
MODELOS COMPUTACIONAIS UNI E BIDIMENSIONAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA), Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná (UFPR), como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Junji Ota.

CURITIBA

2017

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

G635a

Gonçalves, Murilo de Oliveira

Análise comparativa entre modelo reduzido e modelos computacionais uni e bidimensionais [recurso eletrônico] / Murilo de Oliveira Gonçalves. – Curitiba, 2019.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2019.

Orientador: José Junji Ota .

1. Modelos hidráulicos. 2. Engenharia hidráulica. 3. Hidrologia. 4. Modelos computacionais. I. Universidade Federal do Paraná. II. Ota, José Junji. III. Título.

CDD: 621.26

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



TERMO DE APROVAÇÃO

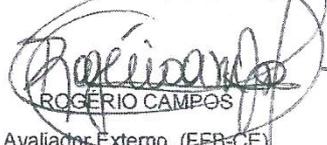
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **MURILO DE OLIVEIRA GONÇALVES** intitulada: **Análise comparativa entre modelo reduzido e modelos computacionais uni e bidimensionais**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

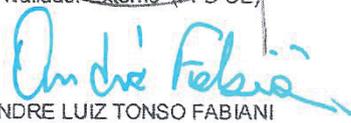
Curitiba, 15 de Setembro de 2017.


JOSÉ JUNJI OTA

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


ROGÉRIO CAMPOS

Avaliador Externo (EFB-CE)


ANDRÉ LUIZ TONSO FABIANI

Avaliador Interno (UFPR)

AGRADECIMENTOS

Agradeço pela colaboração de todas as pessoas envolvidas, que ajudaram direta e indiretamente para a realização desta dissertação. Agradeço também a todos que participaram de minha formação acadêmica, e que estiveram ao meu lado durante todos os momentos bons e ruins.

Em especial, gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. Dr. José Junji Ota, pela paciência e pelo conhecimento cedido não só durante esta dissertação, mas durante todo o curso de graduação e pós-graduação. Agradeço também todo seu apoio, junto ao Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza, para obtenção de todas as informações necessárias para elaboração desta dissertação.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental e à Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade de estudar em uma das universidades mais tradicionais e renomadas do país e permitir me tornar Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Agradeço a minha querida esposa, Rafaela Rover, por toda cumplicidade, amor e apoio incondicional em quaisquer situações. Obrigado por compartilhar comigo diariamente todos os momentos dessa jornada, se eu não desisti desse sonho foi porque você esteve ao meu lado me dando força para continuar.

Agradeço aos meus queridos pais e irmã, respectivamente, Almir Gonçalves, Débora Gonçalves e Marjorie Gonçalves, por todo amor, carinho e incentivo em todos esses anos de vida. Obrigado por todo esforço e preocupação em oferecer educação e ensino de qualidade, pois esta é a maior contribuição que poderia receber para o meu crescimento.

Agradeço aos meus queridos amigos, Andreas Leopoldino, Cristian Stocker, Ícaro Ribeiro e José Luiz Kepel Filho, por toda amizade, preocupação e apoio mesmo com toda a distância entre nós. Não importa o tempo que fiquemos sem nos encontrar, o sentimento de irmandade estará sempre presente.

A todos, meu muito obrigado.

RESUMO

Os modelos hidráulicos reduzidos são utilizados para complementar e/ou confirmar os cálculos realizados em projeto, além de possibilitar o estudo, em escala reduzida, dos fenômenos físicos. Mas devido ao elevado custo de investimento, os modelos reduzidos são executados apenas em grandes e complexas obras. Por conta disto, tem-se tornado cada vez mais frequente a utilização e aceitação de modelos computacionais, sejam eles, unidimensionais, bidimensionais ou, até mesmo, tridimensionais. Este é o resultado da crescente evolução da capacidade de processamento dos hardwares, que nos permitem o acesso à ferramentas tão poderosas. Diante desta evolução, torna-se necessária a análise comparativa das grandezas entre modelo físico e o modelo computacional, confrontando a precisão dos resultados entre os modelos para que, assim, permita-se uma adequação do uso de modelos computacionais em diferentes etapas de complexos projetos hidráulicos, bem como cotejar a precisão dos resultados com o tempo de simulação em cada modelagem computacional. Neste sentido, esta dissertação tratará de uma análise comparativa dos resultados obtidos das modelagens computacionais unidimensional e bidimensional, respectivamente, utilizando os softwares HEC-RAS (U. S. Army Corps of Engineers) e RiverFlow2D© (Hydronia LLC), com os dados observados em campo e os dados obtidos do modelo hidráulico reduzido realizado pelo Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR) da Universidade Federal do Paraná. Para esta análise comparativa, escolheu-se um trecho de rio de nível complexo, contendo uma ilha, divisor físico das águas do rio em braço esquerdo e direito, respectivamente, em 5,1 e 5,7 km de extensão. Apresentando diversas corredeiras e controles hidráulicos ao longo do domínio estudado, além da existência de afloramentos rochosos, bancos de areia e pequenas ilhas. A qualidade dos resultados apresentados pelas modelagens está diretamente relacionada ao modelo digital de terreno utilizado, oriundo de detalhado levantamento topográfico a laser, LiDAR (Light Detection And Ranging) e de pontos provenientes do levantamento batimétrico. Por conta disto, foi possível a utilização de um modelo unidimensional com 1.565 seções espaçadas em apenas 5 metros e para modelo bidimensional a geração de uma malha densa, com 1.940.892 elementos triangulares de apenas 4 metros.

Palavras-chave: Análise Comparativa de Modelos Hidráulicos. Modelo Hidráulico Reduzido. Modelo Hidráulico Computacional. Modelo Computacional Unidimensional. Modelo Computacional Bidimensional. Software HEC-RAS. Software RiverFlow2D©.

ABSTRACT

The reduced hydraulic models are used to complement and confirm the calculations carried out in the design, besides making it possible to study, in a reduced scale, the physical phenomena. But because of the high cost of investment, the reduced models are only executed in large and complex works. Because of this, the use and acceptance of computational models, either unidimensional, two-dimensional or even three-dimensional, has become increasingly frequent. This is the result of the increasing evolution of the hardware processing capacity, which currently allows us access to such powerful tools. In view of this evolution, it is necessary to compare the magnitudes between the physical model and the computational model, comparing the precision of the results between the models so as to allow an adequate use of computational models in different stages of complex projects, as well as to compare the accuracy of the results with the simulation time in each computational modeling. In this sense, this dissertation will deal with a comparative analysis of the results obtained from one-dimensional and two-dimensional computational models, respectively, using the HEC-RAS (US Army Corps of Engineers) and RiverFlow2D© (Hydronia LLC) software, with the data observed in the field and the data obtained from the reduced hydraulic model performed by the Hydraulic and Hydrology Center Professor Parigot de Souza (CEHPAR) of the Federal University of Paraná. For this comparative analysis, a stretch of river of complex level was chosen, containing an island, physical divisor of the waters of the river in left and right arm, respectively, in 5,1 and 5,7 km of extension. Featuring several rapids and hydraulic controls along the studied domain, besides the existence of rocky outcrops, sand banks and small islands. The quality of the results presented by the modeling is directly related to the digital terrain model used, derived from a detailed topographic survey of the laser, LiDAR (Light Detection And Ranging) and points from the bathymetric survey. Because of this, it was possible to use a unidimensional model with 1,565 sections spaced in only 5 meters and for the two-dimensional model the generation of a dense mesh, with 1,940,892 triangular elements of only 4 meters.

Keywords: Comparative Analysis of Hydraulic Models. Reduced Hydraulic Model. Computational Hydraulic Model. Computational One-Dimensional Model. Two-dimensional Computational Model. HEC-RAS software. RiverFlow2D© software.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO DOS TERMOS NA EQUAÇÃO DE ENERGIA – BERNOULLI.....	36
FIGURA 2 – MÉTODO PADRÃO DE SUBDIVISÃO DO HEC-RAS.....	40
FIGURA 3 – MÉTODO ALTERNATIVO DE SUBDIVISÃO DO HEC-RAS.....	40
FIGURA 4 - ESBOÇO DA DISCRETIZAÇÃO DA ESTRUTURA NUMÉRICA BIDIMENSIONAL.....	48
FIGURA 5 – EXEMPLO DE CONDIÇÕES DE CONTORNO ABERTAS E FECHADAS.....	49
FIGURA 6 – CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO DE INTERESSE DO RIO.....	52
FIGURA 7 – AFLORAMENTOS ROCHOSOS CARACTERÍSTICOS	53
FIGURA 8 – CARACTERÍSTICAS DA VEGETAÇÃO DA ILHA.	54
FIGURA 9 – CORREDEIRAS A MONTANTE DA ENTRADA DO BRAÇO ESQUERDO.....	55
FIGURA 10 – CORREDEIRAS A MONTANTE DA ILHA.	55
FIGURA 11 – AFLORAMENTO ROCHOSO NA ENTRADA DO BRAÇO DIREITO..	56
FIGURA 12 – CORREDEIRA NO BRAÇO ESQUERDO, CURVA PARA A ESQUERDA.....	56
FIGURA 13 – CORREDEIRA NO BRAÇO DIREITO.	57
FIGURA 14 – CORREDEIRAS A JUSANTE.....	57
FIGURA 15 – PONTOS GNSS LEVANTADOS NA ÁREA DE ESTUDO.	58
FIGURA 16 – BATIMETRIA LEVANTADA EM CAMPO.....	59
FIGURA 17 – CONSOLIDAÇÃO DO MODELO DIGITAL DO TERRENO	60
FIGURA 18 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS PARA LEITURA DOS NÍVEIS DE ÁGUA.....	61
FIGURA 19 – BATIMETRIA SOBREPOSTA A UMA IMAGEM DO TRECHO DO RIO.	69
FIGURA 20 – REGISTROS DE AFLORAMENTOS ROCHOSOS NA REGIÃO DO BRAÇO DIREITO DA ILHA.	71
FIGURA 21 – REGISTROS DE VEGETAÇÃO DENSA AO LONGO DA ÁREA DE ESTUDO.....	72
FIGURA 22 – COMPOSIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO MODELO DE TERRENO PARA O TRECHO ESTUDADO.....	73

FIGURA 23 – ARRANJO GERAL DO MODELO REDUZIDO – VISTA DE JUSANTE.	75
FIGURA 24 – ARRANJO GERAL DO MODELO REDUZIDO – VISTA DE MONTANTE.....	76
FIGURA 25 – SEÇÕES TRANSVERSAIS COM ESPAÇAMENTO DE 30 METROS.	76
FIGURA 26 – PREENCHIMENTO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS COM BRITA E ARGAMASSA.	77
FIGURA 27 – MACRO RUGOSIDADE PARA SIMULAR VEGETAÇÃO DENSA.	78
FIGURA 28 – DIVISÃO DA VAZÃO DOS BRAÇOS ESQUERDO E DIREITO DO RIO.....	79
FIGURA 29 – RUGOSIDADE CARACTERIZADA POR PEDRISCO COM DIÂMETRO DE 2,8 MM A 4,8 MM.....	79
FIGURA 30 – RUGOSIDADE CARACTERIZADA POR PEDRISCO COM DIÂMETRO DE 4,8 MM A 9,5 MM.....	80
FIGURA 31 – RASPAGEM DE RUGOSIDADE E REBAIXAMENTO DO LEITO	80
FIGURA 32 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – MODELO REDUZIDO.....	82
FIGURA 33 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – MODELO REDUZIDO.....	83
FIGURA 34 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – TERCEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – MODELO REDUZIDO.....	85
FIGURA 35 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – TERCEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – MODELO REDUZIDO.....	85
FIGURA 36 – LIMITE DE MARGENS E SEÇÕES AO LONGO DO MODELO.	87
FIGURA 37 – LOCALIZAÇÃO DAS SEÇÕES AO LONGO DO MODELO.....	88
FIGURA 38 – DETALHE PARA DISTÂNCIA ENTRE AS SEÇÕES E AS JUNÇÕES.	89
FIGURA 39 – DETALHE PARA DISTÂNCIA ENTRE AS SEÇÕES E AS JUNÇÕES.	90
FIGURA 40 – CONDIÇÕES DE CONTORNO UTILIZADAS NA ETAPA DE CALIBRAÇÃO.....	91
FIGURA 41 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – PRIMEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS.....	93

FIGURA 42 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – PRIMEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS	93
FIGURA 43 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS	96
FIGURA 44 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS	96
FIGURA 45 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS	98
FIGURA 46 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS	99
FIGURA 47 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – QUARTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS	101
FIGURA 48 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – QUARTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS	101
FIGURA 49 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – QUINTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS	103
FIGURA 50 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – QUINTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS	104
FIGURA 51 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – ANÁLISE ENTRE MODELO REDUZIDO E MODELO UNIDIMENSIONAL	105
FIGURA 52 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – ANÁLISE ENTRE MODELO REDUZIDO E MODELO UNIDIMENSIONAL	106
FIGURA 53 – SEÇÕES DISTANCIADAS EM 10 METROS – PRIMEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS	107
FIGURA 54 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – PRIMEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS	108
FIGURA 55 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – PRIMEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS	108
FIGURA 56 – SEÇÕES DISTANCIADAS EM 20 METROS – SEGUNDA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS	109
FIGURA 57 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – SEGUNDA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS	110
FIGURA 58 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – SEGUNDA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS	111

FIGURA 59 – SEÇÕES DISTANCIADAS EM 50 METROS – TERCEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS	112
FIGURA 60 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – TERCEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS	113
FIGURA 61 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – TERCEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS	113
FIGURA 62 – LIMITE DO DOMÍNIO MODELADO NO RIVERFLOW2D®.....	115
FIGURA 63 – DOMÍNIO PARA GERAÇÃO DA MALHA TRIANGULAR ESPAÇADA DE 4 EM 4 METROS.	115
FIGURA 64 – DETALHE PARA MALHA COM ELEMENTOS TRIANGULARES (JUSANTE ILHA).	116
FIGURA 65 – MODELO DIGITAL DO TERRENO DA REGIÃO DE INTERESSE...	116
FIGURA 66 – MODELO DIGITAL DO TERRENO (VISTA GERAL).....	117
FIGURA 67 – MODELO DIGITAL DO TERRENO (VISTA DE JUSANTE DA ILHA).	117
FIGURA 68 – MODELO DIGITAL DO TERRENO (VISTA DE MONTANTE DA ILHA).	118
FIGURA 69 – MODELO DIGITAL DO TERRENO DA REGIÃO DE INTERESSE (VISTA DE JUSANTE).	118
FIGURA 70 – CONDIÇÕES DE CONTORNO UTILIZADAS NA ETAPA DE CALIBRAÇÃO.....	119
FIGURA 71 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – PRIMEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.	121
FIGURA 72 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – PRIMEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.	122
FIGURA 73 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.	124
FIGURA 74 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.	125
FIGURA 75 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – TERCEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.	127
FIGURA 76 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – TERCEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.	127

FIGURA 77 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – QUARTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®	129
FIGURA 78 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – QUARTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®	130
FIGURA 79 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – QUINTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®	132
FIGURA 80 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – QUINTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®	132
FIGURA 81 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – SEXTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®	134
FIGURA 82 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – SEXTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®	135
FIGURA 83 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – ANÁLISE ENTRE MODELO REDUZIDO E MODELO BIDIMENSIONAL.....	137
FIGURA 84 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – ANÁLISE ENTRE MODELO REDUZIDO E MODELO BIDIMENSIONAL.....	137
FIGURA 85 – MALHA TRIANGULAR DE 10 METROS – PRIMEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.....	138
FIGURA 86 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – PRIMEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.....	140
FIGURA 87 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – PRIMEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.....	140
FIGURA 88 – MALHA TRIANGULAR DE 20 METROS – SEGUNDA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.....	141
FIGURA 89 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – SEGUNDA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.....	142
FIGURA 90 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – SEGUNDA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.....	143
FIGURA 91 – MALHA TRIANGULAR DE 50 METROS – TERCEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.....	144
FIGURA 92 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – TERCEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.....	145
FIGURA 93 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – TERCEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.....	146

FIGURA 94 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MODELO REDUZIDO E MODELOS COMPUTACIONAIS UNI E BIDIMENSIONAIS.....	149
FIGURA 95 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MODELO REDUZIDO E MODELOS COMPUTACIONAIS UNI E BIDIMENSIONAIS.	150
FIGURA 96 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – CALIBRAÇÃO E SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS.	152
FIGURA 97 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – CALIBRAÇÃO E SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D©.	152
FIGURA 98 – ETAPA DE CALIBRAÇÃO NO MODELO BIDIMENSIONAL - MALHA COM ELEMENTOS DE 4 METROS.	153
FIGURA 99 – ETAPA DE SIMULAÇÃO NO MODELO BIDIMENSIONAL - MALHA COM ELEMENTOS DE 50 METROS	153
FIGURA 100 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – ANÁLISE DA SIMULAÇÃO 1 – MODELOS UNI E BIDIMENSIONAIS.	154
FIGURA 101 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – ANÁLISE DA SIMULAÇÃO 1 – MODELOS UNI E BIDIMENSIONAIS.	154
FIGURA 102 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – ANÁLISE DA SIMULAÇÃO 2 – MODELOS UNI E BIDIMENSIONAIS.	155
FIGURA 103 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – ANÁLISE DA SIMULAÇÃO 2 – MODELOS UNI E BIDIMENSIONAIS.	155
FIGURA 104 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – ANÁLISE DA SIMULAÇÃO 3 – MODELOS UNI E BIDIMENSIONAIS.	156
FIGURA 105 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – ANÁLISE DA SIMULAÇÃO 3 – MODELOS UNI E BIDIMENSIONAIS.	156

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS DE ESCALAS.....	33
TABELA 2 – COMPILAÇÃO DE VALORES DO COEFICIENTE DE MANNING ($M^{1/3}.S^{-1}$).....	38
TABELA 3 – VALORES TÍPICOS DE COEFICIENTES PARA CONTRAÇÃO E EXPANSÃO	43
TABELA 4 – CONDIÇÕES DE CONTORNO OBRIGATÓRIAS.....	50
TABELA 5 – TIPOS DE CONDIÇÕES DE CONTORNO HIDRODINÂMICAS DISPONÍVEL NO RIVERFLOW2D®.....	50
TABELA 6 – PERFIL DA LINHA D'ÁGUA NO BRAÇO DIREITO– 1ª LEITURA – 22/03/2016	62
TABELA 7 – PERFIL DA LINHA D'ÁGUA NO BRAÇO DIREITO – 2ª LEITURA – 22/03/2016	62
TABELA 8 – PERFIL DA LINHA D'ÁGUA NO BRAÇO ESQUERDO – 1ª LEITURA – 22/03/2016	63
TABELA 9 – PERFIL DA LINHA D'ÁGUA NO BRAÇO ESQUERDO – 2ª LEITURA – 22/03/2016	63
TABELA 10 – PERFIL DA LINHA D'ÁGUA – ADOTADO PARA CALIBRAÇÃO DOS MODELOS.....	64
TABELA 11 – RESUMO DAS TRAVESSIAS COM EQUIPAMENTO ACÚSTICO - M9 - 20 E 21/03/2016.....	65
TABELA 12 – RESUMO DAS TRAVESSIAS COM EQUIPAMENTO ACÚSTICO - M9 - 22/03/2016.....	66
TABELA 13 – LEITURA DE COTAS NA RÉGUA JI (JUSANTE ILHA) – 22/03/2016	68
TABELA 14 – RESUMO DOS RESULTADOS – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – MODELO REDUZIDO	82
TABELA 15 – RESUMO DOS RESULTADOS – TERCEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – MODELO REDUZIDO	84
TABELA 16 – COEFICIENTES DE MANNING – PRIMEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS.....	91
TABELA 17 – RESUMO DOS RESULTADOS – PRIMEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS.....	92

TABELA 18 – COEFICIENTES DE MANNING – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS	94
TABELA 19 – RESUMO DOS RESULTADOS – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS	95
TABELA 20 – COEFICIENTES DE MANNING – TERCEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS	97
TABELA 21 – RESUMO DOS RESULTADOS – TERCEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS	98
TABELA 22 – COEFICIENTES DE MANNING – QUARTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS	100
TABELA 23 – RESUMO DOS RESULTADOS – QUARTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS	100
TABELA 24 – COEFICIENTES DE MANNING – QUINTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS	102
TABELA 25 – RESUMO DOS RESULTADOS – QUINTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS	103
TABELA 26 – RESUMO DOS RESULTADOS – PRIMEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS	107
TABELA 27 – RESUMO DOS RESULTADOS – SEGUNDA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS	109
TABELA 28 – RESUMO DOS RESULTADOS – TERCEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS	112
TABELA 29 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – CALIBRAÇÃO E SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS	114
TABELA 30 – COEFICIENTES DE MANNING – PRIMEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®	120
TABELA 31 – RESUMO DOS RESULTADOS – PRIMEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®	120
TABELA 32 – COEFICIENTES DE MANNING – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®	123
TABELA 33 – RESUMO DOS RESULTADOS – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®	123
TABELA 34 – COEFICIENTES DE MANNING – TERCEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®	126

TABELA 35 – RESUMO DOS RESULTADOS – TERCEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®	126
TABELA 36 – COEFICIENTES DE MANNING – QUARTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®	128
TABELA 37 – RESUMO DOS RESULTADOS – QUARTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®	129
TABELA 38 – COEFICIENTES DE MANNING – QUINTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®	131
TABELA 39 – RESUMO DOS RESULTADOS – QUINTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®	131
TABELA 40 – COEFICIENTES DE MANNING – SEXTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®	133
TABELA 41 – RESUMO DOS RESULTADOS – SEXTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®	134
TABELA 42 – RESUMO DOS RESULTADOS – PRIMEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®	139
TABELA 43 – RESUMO DOS RESULTADOS – SEGUNDA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®	141
TABELA 44 – RESUMO DOS RESULTADOS – TERCEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®	144
TABELA 45 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – CALIBRAÇÃO E SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®	146
TABELA 46 – ANÁLISE DOS COEFICIENTES DE MANNING – MODELOS UNIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL	147
TABELA 47 – ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MODELO REDUZIDO E MODELOS COMPUTACIONAIS	148
TABELA 48 – CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS UNIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL	151
TABELA 49 – ANÁLISE DOS TEMPOS DE SIMULAÇÃO – MODELOS UNIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL	151

LISTA DE SIGLAS

ADCP	-	Medição de Vazão pelo Método Acústico Doppler
ArcGIS	-	Sistema de Informação Geográfica (GIS)
CEHPAR	-	Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza
CFL	-	Número de Courant-Friederich-Lewy
ESRI	-	Environmental Systems Research Institute, Inc. Instituto de Pesquisa de Sistemas Ambientais
GNSS	-	<i>Global Navigation Satellite Systems</i> Sistemas Globais de Navegação por Satélites
HEC-RAS	-	Centro de Engenharia Hidrológica - Sistema de Análise de Rios <i>Hydrologic Engineering Center's - River Analysis System</i>
LiDAR	-	Sistema de Varredura a Laser / Sistema de Perfilamento a Laser
MDT	-	Modelo Digital de Terreno
MultiSpec	-	<i>Multispectral Image Data Analysis System</i> Sistema Multispectral de Análise de Dados de Imagem
PEC	-	Padrão de Exatidão Cartográfico, Decreto Lei 89.817, 1984
REMQ	-	Raiz do Erro Médio Quadrático
RiverFlow2D [®]	-	Modelo bidimensional hidráulico e hidrológico <i>South American Datum</i>
SAD69	-	Sistema Geodésico Regional para a América do Sul do ano 1969
SGR	-	Sistema Geodésico de Referência
SIRGAS 2000	-	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas do ano 2000
SWE / EAR	-	<i>Theory of the Shallow Water Equations</i> Teoria das Equações das Águas Rasas
USACE	-	<i>U.S. Army Corps of Engineers</i> Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos
UTM	-	Projeção Universal Transversa de Mercator

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	-	escala geométrica do modelo
Δ_h	-	perda de carga
$\frac{\alpha_1 U_1^2}{2g}, \frac{\alpha_2 U_2^2}{2g}$	-	energia ou carga de velocidade cinética
ρ	-	densidade da água
τ_{bx}, τ_{by}	-	termos de atrito do leito
A	-	área de fluxo da seção
C	-	coeficiente de perda por expansão ou contração
Fr_m, Fr_p	-	critério de semelhança de Froude entre modelo e protótipo
g	-	aceleração da gravidade
h	-	profundidade da água
I	-	profundidade
k	-	comprimento das bordas dos elementos
l_k	-	comprimento de cada borda dos elementos
L	-	comprimento pela descarga ponderada
$L_{lob}; L_{ch}; L_{rob}$	-	comprimentos entre as seções, respectivamente, para fluxo na margem esquerda, o canal principal e margem direita
m, p	-	índice que se refere a valores de modelo e protótipo
n	-	elevação da superfície de água
η	-	coeficiente de rugosidade de Manning
n_i e n_o	-	vetores normais para as condições de contorno
NE	-	número de bordas do elemento
$\frac{P_1}{\gamma}, \frac{P_2}{\gamma}$	-	energia ou carga de pressão
Q	-	descarga total
Q_I e Q_o	-	descarga total nas condições de entrada e saída, respectivamente
$\bar{Q}_{lob}; \bar{Q}_{ch}; \bar{Q}_{rob}$	-	média aritmética dos fluxos entre as seções, respectivamente, para fluxo na margem esquerda, o canal principal e margem direita
R_h	-	raio hidráulico (área / perímetro molhado)

S_f	- declividade longitudinal da linha de energia
\bar{S}_f	- atrito por inclinação representativo entre duas seções
t	- tempo
u, v	- velocidade da profundidade média na direção x e y
$U, F(U), G(U)$	- vetores para os fluxos nas direções x e y
ν	- viscosidade total
V	- velocidade do escoamento (m/s)
χ_i	- distância relevante em cada elemento da malha
x, y	- coordenadas horizontais
y_1, y_2	- profundidade da água na seção transversal
Z_1, Z_2	- energia ou carga de posição
$Z + \frac{P}{\gamma}$	- corresponde à linha piezométrica efetiva (L.P.E)
$Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha U^2}{2g}$	- corresponde à linha de carga efetiva (L.C.E)
$Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha U^2}{2g} + \Delta_h$	- corresponde ao plano de carga efetivo (P.C.E)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	22
1.2 OBJETIVOS	23
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO	29
2.1.1 Análise Dimensional e Semelhança Dinâmica	29
2.1.1.1 Análise Dimensional	30
2.1.1.2 Semelhança Dinâmica	30
2.1.2 Critério de Semelhança de Modelos	31
2.2 MODELO COMPUTACIONAL UNIDIMENSIONAL (HEC-RAS)	33
2.2.1 Equações Governantes	34
2.2.1.1 Equações de Energia	34
2.2.1.2 Capacidade de Escoamento	37
2.2.1.3 Coeficiente de Manning	37
2.2.1.4 Subdivisão da Seção Transversal	39
2.2.1.5 Avaliação da Perda por Atrito	41
2.2.1.6 Avaliação de Perdas por Contração e Expansão	42
2.3 MODELO COMPUTACIONAL BIDIMENSIONAL (RIVERFLOW2D®).....	43
2.3.1 Equações Governantes	44
2.3.1.1 Coeficiente de Manning	47
2.3.1.2 Região de Estabilidade	47
2.3.1.3 Condições de Contorno	49
2.3.1.4 Modelo Seco ou Molhado	51
3 MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1 DOMÍNIO ESTUDADO	52
3.2 LEVANTAMENTOS DE CAMPO	58
3.2.1 Levantamento Topográfico	58
3.2.2 Levantamento Batimétrico	59
3.2.3 Consolidação do Modelo Digital do Terreno	60
3.2.4 Perfil da Linha d'água	61
3.2.5 Medições de Vazão	65

3.2.6 Vazão Total para Calibração	67
3.3 QUALIDADE DOS LEVANTAMENTOS TOPOBATIMÉTRICOS	68
3.4 CLASSIFICAÇÃO E COMPOSIÇÃO DO MODELO DE TERRENO	69
4 RESULTADOS.....	75
4.1 MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO	75
4.1.1 Características do Modelo Hidráulico Reduzido.....	75
4.1.2 Calibração do Modelo Hidráulico Reduzido.....	77
4.1.2.1 Primeira Tentativa de Calibração.....	81
4.1.2.2 Segunda Tentativa de Calibração.....	81
4.1.2.3 Terceira Tentativa de Calibração.....	83
4.1.3 Resultados da Calibração do Modelo Hidráulico Reduzido.....	86
4.2 MODELO COMPUTACIONAL UNIDIMENSIONAL (HEC-RAS)	87
4.2.1 Características do Modelo Unidimensional	87
4.2.2 Calibração do Modelo Unidimensional	90
4.2.2.1 Primeira Tentativa de Calibração.....	91
4.2.2.2 Segunda Tentativa de Calibração.....	94
4.2.2.3 Terceira Tentativa de Calibração.....	97
4.2.2.4 Quarta Tentativa de Calibração	99
4.2.2.5 Quinta Tentativa de Calibração	102
4.2.3 Resultados da Calibração do Modelo Unidimensional	104
4.2.4 Simulações do Modelo Unidimensional.....	106
4.2.4.1 Primeira Simulação do Modelo - Seções distanciadas em 10 metros	106
4.2.4.2 Segunda Simulação do Modelo - Seções distanciadas em 20 metros	109
4.2.4.3 Terceira Simulação do Modelo - Seções distanciadas em 50 metros	111
4.2.5 Resultados das Simulações do Modelo Unidimensional	114
4.3 MODELO COMPUTACIONAL BIDIMENSIONAL (RIVERFLOW2D®).....	114
4.3.1 Características do Modelo Bidimensional.....	114
4.3.2 Calibração do Modelo Bidimensional	119
4.3.2.1 Primeira Tentativa de Calibração.....	120
4.3.2.2 Segunda Tentativa de Calibração.....	123
4.3.2.3 Terceira Tentativa de Calibração.....	125
4.3.2.4 Quarta Tentativa de Calibração	128
4.3.2.5 Quinta Tentativa de Calibração	130
4.3.2.6 Sexta Tentativa de Calibração.....	133

4.3.3 Resultados da Calibração do Modelo Bidimensional	135
4.3.4 Simulações do Modelo Bidimensional	138
4.3.4.1 Primeira Simulação do Modelo - Malha com elementos de 10 metros	138
4.3.4.2 Segunda Simulação do Modelo - Malha com elementos de 20 metros	141
4.3.4.3 Terceira Simulação do Modelo - Malha com elementos de 50 metros	143
4.3.5 Resultados das Simulações do Modelo Bidimensional	146
5 ANÁLISES DOS RESULTADOS	147
6 CONCLUSÕES	157
6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	159
REFERÊNCIAS.....	160

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O uso de modelos para a solução de problemas de engenharia tornou-se um procedimento padrão aceito em muitas áreas. Além dos problemas clássicos da hidráulica, surge uma série de áreas que se utilizam da experiência em modelos reduzidos, tais como, ensaios de carga de vento, hidráulica marítima, modelos hidráulicos de hidrelétricas e barragens. Estas áreas requerem técnicas cada vez mais modernas e considerações ainda mais sofisticadas sobre similaridade hidráulica.

Analisando o ponto de vista experimental, obtiveram-se importantes avanços em equipamentos de medição em laboratório e em escala real, com avançados sistemas de aquisição e tratamento de dados, tornando-se possível uma abordagem mais refinada dos fenômenos hidráulicos, incrementando cada vez mais as possibilidades e reduzindo prazos e custos da modelagem física (BAPTISTA e COELHO, 2010).

Nos últimos 20 anos, as modelagens computacionais tornaram-se cada vez mais famosas devido ao aumento das capacidades dos computadores para execução de modelos complexos e com alta velocidade de cálculo. Considerando uma modelagem, seja unidimensional, bidimensional ou tridimensional, com alguns milhões de elementos pode gerar tamanhos de arquivo de resultados com vários GB (Gigabytes), pode-se afirmar que um gerenciamento desses dados se tornou viável apenas na última década (OERTEL, 2015).

Os modelos computacionais revolucionaram completamente a capacidade do engenheiro de entender e prever o comportamento do escoamento de água. Esse desenvolvimento tecnológico permite a liberação do engenheiro dos cálculos demorados e permite que ele se concentre na solução do problema em si. Essas vantagens, no entanto, não são obtidas sem custos. É necessário investimento em máquinas, módulos disponibilizados pelos softwares de simulação e principalmente, treinamento da equipe técnica para aprender a aplicar todas as funções.

As modelagens computacionais unidimensional e bidimensional, utilizadas de forma isolada ou complementarmente, representam soluções do estado da arte na engenharia hidráulica, sendo muito utilizadas em empresas de consultoria e usadas como ferramentas básicas para responder a várias questões de estudos de

escoamentos. Devido às condições de contorno complexas e requisitos de cálculo elevados, as modelagens tridimensionais são ferramentas para universidades, instituições de pesquisa e empresas de consultoria com alto investimento tecnológico (OERTEL, 2015).

Pode-se destacar pontos positivos em relação aos recursos computacionais atuais, tais como, a redução de tempos de processamento e incremento das possibilidades de cálculo. A evolução nos softwares permite a criação de grandes e refinados modelos numéricos, tornando-se possível a modelagem matemática para os mais variados e complexos sistemas hidráulicos. As capacidades dos modelos computacionais são constantemente modificadas para acomodar novos recursos, ou seja, apresenta-se a necessidade de investimento em novos softwares ou sistemas operacionais para se manter atualizado no mercado, mas os benefícios obtidos superam os custos investidos.

É possível analisar um grande crescimento na complementaridade entre as modelagens físicas e computacionais. Percebe-se o investimento em técnicas cada vez mais avançadas e sofisticadas para levantamento de dados, o que auxilia a suprir muitas das informações necessárias para os modelos computacionais, permitindo-se a representação de fenômenos físicos de grande complexidade e condições de contorno das mais diversificadas (BAPTISTA e COELHO, 2010).

1.2 OBJETIVOS

Realizar uma análise comparativa entre dados observados em campo, resultados de modelo hidráulico reduzido e modelos computacionais unidimensional e bidimensional. Visando-se a comparação das grandezas entre modelo físico e o modelo computacional, permitindo tecer considerações sobre a adequação do uso de um modelo computacional em obras hidráulicas complexas, bem como cotejar a precisão dos resultados com o tempo de simulação em cada modelagem computacional.

Pontos que motivaram a elaboração desta dissertação e que serão analisados:

- a) Comparativo do tempo de simulação computacional necessário para estabilização de cada modelo computacional;

- b) Detecção de facilidades e dificuldades encontradas em cada modelo computacional;
- c) Identificação de limitações, vantagens e desvantagens computacionais encontradas em cada modelo selecionado;
- d) Verificação se os resultados das simulações na modelagem unidimensional realmente tornam-se inferiores quando comparados às modelagens bidimensionais;
- e) Verificação se a aplicação unidimensional atende às necessidades de um projeto e, conseqüentemente, quando ela se torna limitada e é necessário partir para uma aplicação de modelos bidimensionais.

Para a realização desta análise comparativa, foram utilizados os seguintes modelos:

- Modelo Hidráulico Reduzido
Produzido pelo Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR) na Universidade Federal do Paraná (UFPR).
Modelo construído e calibrado em fevereiro de 2016.
- Modelo Computacional Unidimensional
HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System)
Produzido pelos Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE).
A versão atual do software é a 5.0.3, disponibilizada em setembro de 2016.
- Modelo Computacional Bidimensional
RiverFlow2D®
Produzido pela Hydronia, LLC, localizada na Flórida, Estados Unidos.
A versão atual do software é a 6.01.05, disponibilizada em julho de 2017.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação de Mestrado encontra-se estruturada em 6 (seis) capítulos, constituindo a presente INTRODUÇÃO no Capítulo 1.

No Capítulo 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – apresentam-se as principais referências utilizadas para a elaboração do trabalho. Detalhando-se, de forma teórica,

as equações governantes da hidráulicas em cada um dos modelos computacionais selecionados para este trabalho: sendo o software HEC-RAS para modelagem unidimensional e RiverFlow2D[®] para modelagem bidimensional.

No Capítulo 3 – MATERIAIS E MÉTODOS – apresentam-se as informações do local de estudo e informações coletadas do Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR) sobre o modelo físico reduzido. Neste capítulo estão organizadas todas as informações de dados geométricos, vazões características e, também, os níveis observados necessários para calibração de cada uma das modelagens computacionais.

No Capítulo 4 – RESULTADOS – apresentam-se todas as informações utilizadas para o modelo reduzido e os modelos computacionais unidimensional e bidimensional. Apresentam-se ainda as condições de contorno necessárias para calibração e demais simulações, determinando-se o erro de cada modelo com os dados observados.

No Capítulo 5 – ANÁLISES DOS RESULTADOS – apresenta-se uma completa análise comparativa entre o modelo reduzido e os modelos computacionais unidimensional e bidimensional.

No Capítulo 6 – CONCLUSÕES – apresentam-se as principais conclusões que se pode tomar em função dos resultados obtidos, respondendo muitas das dúvidas que motivaram a realização deste trabalho.

Por fim – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS – apresentam-se todas as publicações que fizeram parte do desenvolvimento desta dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Existem três maneiras de abordar a solução de um problema na engenharia hidráulica: por teoria e raciocínio; por experiência derivada de projetos semelhantes; ou investigando o problema e testando o projeto em um modelo, seja físico ou computacional.

Devido à complexidade de muitos casos de escoamento de água, em determinadas situações, a aplicação de métodos teóricos e equações básicas não são suficientes e muitas das vezes são necessários modelos físicos ou computacionais para alcançar uma solução efetiva. Mas, deve-se enfatizar a necessidade de orientação teórica para a solução de um problema por abordagem experimental, mesmo que esta seja restrita para uma análise dimensional.

O termo “modelo” é utilizado na hidráulica para descrever uma simulação física ou computacional de um “protótipo”, ou seja, situação de tamanho real. Os modelos da engenharia hidráulica são ferramentas para prever o efeito de um projeto proposto, prevenir problemas e produzir soluções técnica e economicamente ideais para os problemas de engenharia. Em outras palavras, um modelo é um sistema que irá converter determinados dados de entrada (geometria, condições de contorno, levantamentos de campo, etc.) em dados de saída (velocidades, níveis, pressões, etc.) para ser usado no projeto em questão.

As abordagens experimentais e computacionais são frequentemente utilizadas na hidráulica para resolver certos tipos de problemas práticos que não são passíveis de uma abordagem única. Quando utilizadas em conjunto, elas oferecem uma maneira instrutiva de lidar com questões relacionadas ao escoamento da água. Embora muitos engenheiros e cientistas utilizem e, talvez, dependam de modelos computacionais para resolver muitos dos seus problemas, há uma necessidade de voltar para análise dos dados experimentais, sobretudo porque a maioria das modelagens computacionais dependem de grande conhecimento teórico para o seu uso de forma correta (KNIGHT, 2013).

Um modelo hidráulico reduzido é uma representação em escala de uma situação de fluxo hidráulico, onde as condições de contorno, as condições de fluxo a montante e o campo de fluxo devem ser dimensionadas de maneira apropriada. São comumente utilizados durante o estágio anterior ou inicial de projeto visando otimizar e garantir uma operação segura do estudo, apresentando um importante papel no

processo de decisões e alterações necessárias para viabilização do projeto de engenharia em questão (CHANSON, 1999).

Pode-se afirmar que o modelo hidráulico reduzido é uma alternativa de precisão utilizada para prever o comportamento de um fenômeno físico, mas para que um modelo seja considerado confiável, este deve ser projetado corretamente. Caso o projeto não esteja correto conforme o real, pode-se empregar os instrumentos e métodos de medição mais sofisticados que servirá apenas para aumentar a precisão de previsões erradas.

Portanto, uma reprodução em pequena escala de um fenômeno físico pode ser um modelo válido se suas características quantitativas forem relacionadas ao fenômeno real (protótipo), considerando-se certas proporções que satisfaçam as devidas condições. Estas proporções são referidas como escalas, ou seja, as condições satisfeitas pelas escalas sendo critérios de semelhança. Anteriormente, os critérios de semelhança derivavam de relações matemáticas, geralmente as equações diferenciais, descrevendo a natureza do fenômeno estudado. Claramente, a confiabilidade dos critérios de similaridade determinados dessa maneira depende inteiramente da confiabilidade das relações matemáticas utilizadas (YALIN, 1989).

Os termos modelo matemático, modelo numérico e modelo computacional, embora muito utilizado como sinônimos, apresentam uma diferença entre eles, conforme apresentado e detalhado por Samuels (1993):

Um modelo matemático é um conjunto de equações diferenciais que representam a interação entre fluxo variando no espaço e tempo. Baseia-se na física do escoamento do protótipo, estabelecendo limites para o domínio de aplicabilidade tanto para um modelo matemático quanto para qualquer modelo numérico e computacional que possa ser derivado dele. Um pré-requisito para o desenvolvimento de um modelo matemático é a compreensão dos principais processos físicos envolvidos, tanto os princípios fundamentais como as leis do movimento de Newton quanto as relações empíricas, tais como, as leis de resistência de Chezy e Manning.

Um modelo numérico é uma aproximação de um modelo matemático de alguma situação de protótipo, fornecendo um conjunto computável de parâmetros que descreve o fluxo em um conjunto de pontos. O desempenho dos modelos numéricos será determinado pelas propriedades dos métodos numéricos empregados, e, utilizando-se os mesmos dados geométricos e condições de contorno podem

apresentar resultados significativamente diferentes. Essas diferenças são muitas vezes mascaradas, em parte, pelo procedimento de calibração.

Um modelo computacional é uma implementação de um modelo numérico em um sistema informático com os dados relevantes de um projeto específico. Os resultados do modelo computacional dependem de uma variedade de fatores, incluindo a qualidade dos dados do protótipo, detalhes do processamento de dados, possivelmente a organização interna dos cálculos e o tipo de computador usado.

As modelagens computacionais representam uma ferramenta moderna para determinar as profundidades e as velocidades de escoamento em rios e estruturas hidráulicas, assim como a duração das inundações em planícies. Basicamente, apresentam-se três diferentes modelos de simulação hidrodinâmica: (1) modelos computacionais unidimensionais, (2) bidimensionais e (3) tridimensionais. A escolha depende do problema particular, condições de contorno, quantidade de informações e levantamentos de campo disponibilizados.

Por isto, antes de criar modelos computacionais, a dimensionalidade do problema deve ser analisada com muita atenção. Um modelo superdimensionado levará a grandes tempos de cálculo e sem aumentar os aspectos da qualidade do modelo. Assim como um modelo subdimensionado pode produzir grandes erros e incertezas, ou seja, devido a componentes de velocidade não respeitados. Portanto, é importante escolher a dimensionalidade do modelo correto para o problema hidráulico específico ao analisar as condições de contorno e as situações de fluxo geral dentro do domínio do modelo.

As modelagens computacionais unidimensionais são utilizadas como ferramentas padrão e, muitas vezes, estão disponíveis gratuitamente com as características e funcionalidades complexas do modelo. Softwares como HEC-RAS, MIKE11, JABRON, WSPWIN, entre outros, podem ser utilizados para o estudo permanente e não-permanente e cálculo dos níveis da superfície da água e das velocidades na direção do canal principal, com base em equações de uma dimensão ou conservação de energia. Para utilizar os modelos unidimensionais adequadamente, não devem existir componentes de velocidade de fluxo importantes na direção y e z , pois nenhuma distribuição de velocidade em largura e profundidade poderá ser relatada, o que limita sua aplicabilidade (OERTEL, 2015).

As modelagens bidimensionais são utilizadas para estudos de escoamentos complexos trechos descontínuos, processos de escoamento não permanentes e

simulação de ruptura de diques e barragens. Alguns dos softwares disponíveis são RiverFlow2D®, BASEMENT, RIVER2D, MIKE21, TELEMAC2D, entre outros. Os modelos de simulação numérica com mais de uma dimensão geralmente negligenciam os componentes da velocidade vertical. Por isso, esses produtos são usados como modelos bidimensionais, com base na profundidade média das equações de águas rasas. O componente de velocidade no eixo z (velocidade w) é integrado sobre a profundidade de fluxo e os componentes de velocidade no eixo y (velocidade v) podem ser descritos em detalhes (OERTEL, 2015).

Existem muitos sistemas e programas de modelagem computacional que estão disponíveis para uma variedade de problemas da engenharia hidráulica. Por conta disso, há necessidade de conhecimento científico para poder escolher qual modelo usar em cada situação e, principalmente, capacidade de interpretar os resultados do modelo de forma crítica e responsável. É importante destacar que os resultados de um modelo computacional não devem ser aceitos como definitivos apenas porque os números foram produzidos por um computador, ou seja, os resultados devem ter sentido físico e sempre analisados com muita atenção.

As modelagens computacionais se tornaram ferramentas essenciais para a engenharia hidráulica, com a necessidade de bons especialistas com conhecimento teórico e capacitados tecnicamente para desenvolvimento de modelos computacionais. Por isso, uma visão crítica e um conhecimento teórico básico são necessários para entender a natureza das simulações de fluxo numérico e para escolher o método correto para o problema de engenharia hidráulica.

2.1 MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO

2.1.1 Análise Dimensional e Semelhança Dinâmica

Conforme Cirilo et al. (2003), conceitos fundamentais são apresentados em formas de expressões algébricas para base de modelos matemáticos, que por sua vez, estes têm o objetivo de representar o comportamento de um sistema físico e geralmente podem ser resolvidos facilmente com o auxílio de um computador. Mas, como sabemos, um modelo matemático pode ser muito convincente desde que seja analisado e, principalmente, aplicado adequadamente ao sistema em questão. Em muitas vezes os escoamentos não são possíveis de modelar matematicamente e uma

alternativa frequentemente adotada para esses casos é o uso de experimentos com modelos físicos.

2.1.1.1 Análise Dimensional

Conforme descrito por Vianna (2009), a análise dimensional surge como um instrumento de cálculo para solucionar casos em que a matemática clássica e o conhecimento físico são impotentes para resolvê-los. Trata-se de uma teoria relativamente simples, baseando-se em alguns axiomas e no princípio da homogeneidade dimensional e no Teorema de Vaschy-Buckingham ou Teorema dos π .

Dentre os axiomas que a análise dimensional se baseia, pode-se afirmar que só existe igualdade numérica absoluta quando as grandezas são semelhantes qualitativamente, ou seja, deve-se comparar apenas forças com forças, velocidades com velocidades, etc. Assim como podemos afirmar que quando é realizada a razão entre medidas de duas grandezas similares, não importa o sistema de unidades utilizado para cada conjunto de medidas, pois os resultados devem ser igualmente alcançados (CIRILO et al., 2003).

A análise dimensional pode ser utilizada em diversas aplicações na Engenharia, nas quais podem ser destacadas as seguintes:

- Classificação de equações e verificação dos casos em que podem ser aplicadas;
- Conversão de equações ou dados de um sistema de unidades para outro;
- Dedução de equações;
- Sistematização de coleta de dados em um programa experimental;
- Realização de análises em modelos hidráulicos reduzidos.

2.1.1.2 Semelhança Dinâmica

Não somente em grandes projetos de obras hidrelétricas e projetos aerodinâmicos que os estudos em modelos reduzidos podem ser úteis, mas também em outras diversas áreas da Engenharia, assim como, análise do efeito da ação do vento sobre uma estrutura, o efeito dinâmico das ondas sobre um quebra-mar, a

percolação da água através do solo, entre muitas outras simulações da prática (BAPTISTA e COELHO, 2010).

Um modelo reduzido deve obedecer a determinadas condições que assegurem uma semelhança com o protótipo, validando-se a reprodução das forças, momentos e cargas dinâmicas do protótipo, sendo necessárias três semelhanças obrigatórias:

- Semelhança geométrica: mesma forma do protótipo e apresente uma relação de escala entre as dimensões lineares dos dois;
- Semelhança cinemática: necessário que as velocidades em pontos correspondentes nos dois escoamentos tenham a mesma direção e sentido e que suas magnitudes mantenham uma relação de escala;
- Semelhança dinâmica: requer que existam semelhanças tanto geométricas quanto cinemáticas e que as forças atuantes sobre o modelo tenham a mesma direção e sentido que as correspondentes do protótipo, mantendo-se uma relação constante entre as magnitudes de ambas.

2.1.2 Critério de Semelhança de Modelos

O critério de semelhanças de modelos constitui uma ferramenta de verificação e simulação dos aspectos hidráulicos relacionados ao objeto de estudo. Necessita-se, para isso, reproduzir adequadamente as forças preponderantes envolvidas nos aspectos hidráulicos do protótipo.

Cada critério de semelhança tem sua utilização mais difundida em áreas específicas, conforme listado a seguir:

- Semelhança de Reynolds: sendo essa semelhança mais utilizada nos modelos hidrodinâmicos de escoamento em condutos forçados, como turbinas e bombas. Diferencia os regimes de escoamento, em laminar e turbulento;
- Semelhança de Froude: mais utilizado em condutos livres como canais, vertedores, portos, quebra-mares. Útil nos cálculos de ressalto hidráulico e projeto de estruturas hidráulicas;

- Semelhança de Euler: indica a relação entre as forças de pressão e as forças de inércia no escoamento de um fluido. Importante nos escoamentos em torno de perfis, em tubos e também em máquinas hidráulicas;
- Semelhança de Mach: amplamente utilizado em modelos aerodinâmicos de aviões e automóveis. Permite classificar os escoamentos em subsônicos ou supersônico.

No caso de escoamentos a superfície livre, a força preponderante sobre as demais forças possíveis de atuar é a força da gravidade. Resulta-se, dessa consideração, para os estudos a serem conduzidos no modelo reduzido, o critério de semelhança de Froude, expresso pela seguinte equação:

$$Fr_m = Fr_p \quad (1)$$

$$\frac{V_m}{\sqrt{g \cdot I_m}} = \frac{V_p}{\sqrt{g \cdot I_p}}$$

Onde:

m = índice que se refere a valores de modelo;

p = índice que se refere a valores de protótipo;

V = velocidade do escoamento (m/s);

I = profundidade (m);

g = aceleração da gravidade (m/s²).

Considerando-se a escala geométrica do modelo (λ) expressa pela relação $\lambda = I_m/I_p$ e que a aceleração da gravidade seja a mesma no modelo e no protótipo ($\lambda_g = g_m/g_p = 1$), resulta da equação anterior, a escala de velocidades:

$$\lambda_v = V_m/V_p = \left(I_m/I_p\right)^{1/2} = \lambda^{1/2} \quad (2)$$

Considerando-se, adicionalmente, que o fluido no modelo e no protótipo é o mesmo (água), pode-se determinar, por equações fundamentais, as escalas dos demais parâmetros envolvidos no estudo. A título de ilustração, apresentam-se, na TABELA 1, algumas dessas escalas.

TABELA 1 – EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS DE ESCALAS

Parâmetro	Escala	Valor Numérico
Comprimento	$\lambda_L = l_m/l_p = \lambda$	1:100
Área	$\lambda_A = [l_m/l_p]^2 = \lambda^2$	1:10.000
Volume	$\lambda_V = [l_m/l_p]^3 = \lambda^3$	1:1.000.000
Velocidade	$\lambda_V = [l_m/l_p]^{1/2} = \lambda^{1/2}$	1:10
Tempo (para $\lambda_g=1$)	$\lambda_T = \lambda^{1/2}/\lambda_g = \lambda^{1/2}$	1:10
Vazão	$\lambda_Q = \lambda^3/\lambda_T = \lambda^{5/2}$	1:100.000
Pressão (para $\lambda_\gamma = 1$)	$\lambda_P = \lambda \cdot \lambda_\gamma = \lambda$	1:100

FONTE: O Autor (2017).

2.2 MODELO COMPUTACIONAL UNIDIMENSIONAL (HEC-RAS)

O HEC-RAS, desenvolvido pela U.S. Army Corps of Engineers (USACE), é um modelo computacional unidimensional aplicado à simulação de perfis de linha de água em rios e reservatórios. O sistema é composto por uma interface gráfica de usuário (GUI), contendo quatro componentes de análise hidráulica unidimensional: (1) modelagem de perfil de superfície de água para regime de escoamento permanente; (2) modelagem de escoamento não permanente; (3) modelagem de transporte de sedimentos e fundo móvel; e (4) modelagem de qualidade da água. Os dados necessários para realizar esses cálculos são divididos nas seguintes categorias:

- Dados geométricos (Geometrica Data);
- Dados de escoamento permanente (Steady Flow Data);
- Dados de escoamento não permanente (Unsteady Flow Data);
- Dados de sedimentos (Sediment Data); e
- Dados de qualidade da água (Water Quality Data).

Os dados geométricos são necessários para qualquer uma das análises realizadas dentro HEC-RAS, as outras categorias são necessárias para cada análise específica.

A extensão Hec-GeoRAS para uso com o ArcGIS é um programa de software de Sistema de Informação Geográfica de propósito geral desenvolvido com direitos

autorais pelo Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI). Trata-se de um conjunto de ferramentas do ArcGIS especificamente projetadas para processar dados geoespaciais para uso no HEC-RAS. Esta extensão permite que os usuários com experiência limitada em GIS criem um arquivo de importação para o HEC-RAS contendo dados geométricos de um modelo digital de terreno (MDT) existente e conjuntos de dados complementares.

Na sequência será abordada a teoria e equações hidráulicas que o HEC-RAS utiliza na resolução das suas simulações para modelagem unidimensional.

2.2.1 Equações Governantes

O HEC-RAS contém quatro componentes unidimensionais: cálculos de perfil de superfície de água de fluxo permanente, simulação de fluxo não-permanente, cálculos de transporte de sedimentos móveis e análise da qualidade da água (USACE, 2016).

2.2.1.1 Equações de Energia

O componente de fluxo permanente destina-se a calcular os perfis da superfície da água para um fluxo constante e gradualmente variado. O procedimento básico de computação é baseado na solução da equação de energia unidimensional.

A equação de energia aplicada entre duas seções de um escoamento permanente denomina-se equação de Bernoulli para os fluidos reais. Perfis de superfície de água são calculados a partir de uma seção transversal para a outra, resolvendo-se a equação de energia com um procedimento iterativo chamado “Standard Step Method”.

A equação da energia é escrita da seguinte forma:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 U_2^2}{2g} + \Delta h \quad (3)$$

Onde:

Z_1, Z_2 = energia ou carga de posição;

$\frac{P_1}{\gamma}, \frac{P_2}{\gamma}$ = energia ou carga de pressão;

$$\frac{\alpha_1 U_1^2}{2g}, \frac{\alpha_2 U_2^2}{2g} = \text{energia ou carga de velocidade cinética};$$

g = aceleração da gravidade;

Δ_h = perda de carga.

Na equação de Bernoulli, a soma $\left(Z + \frac{P}{\gamma}\right)$, é denominada energia potencial e a parcela $\left(\frac{\alpha U^2}{2g}\right)$ de energia cinética. Portanto, caso seja adotado para P o valor correspondente à pressão efetiva, tem-se:

- $\left(Z + \frac{P}{\gamma}\right)$ corresponde à linha piezométrica efetiva (L.P.E);
- $\left(Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha U^2}{2g}\right)$ corresponde à linha de carga efetiva (L.C.E);
- $\left(Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha U^2}{2g} + \Delta_h\right)$ corresponde ao plano de carga efetivo (P.C.E).

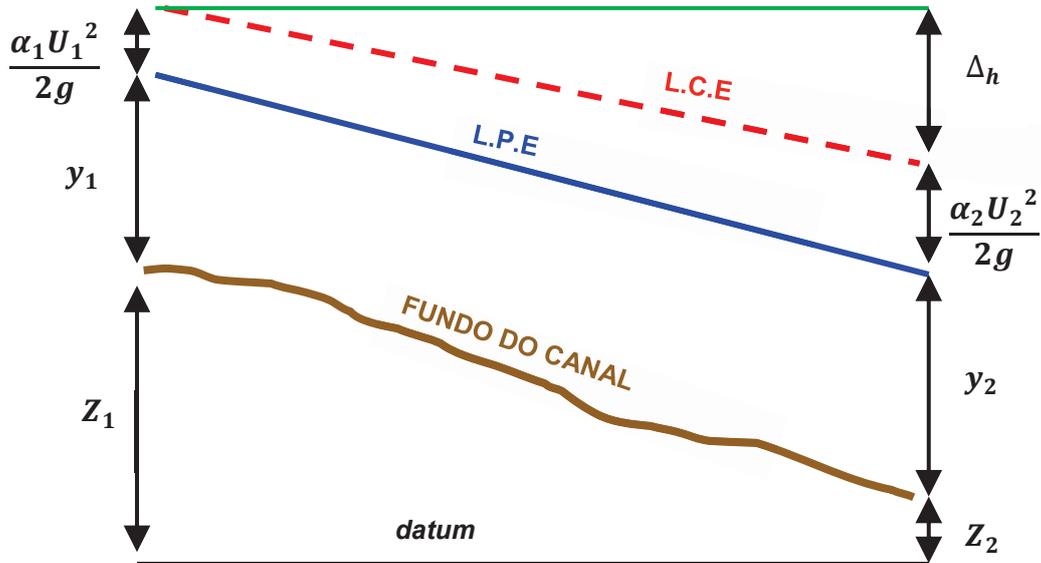
Se a carga de pressão $\left(\frac{P}{\gamma}\right)$ no fundo do canal for correspondente à profundidade y , a equação de Bernoulli pode ser apresentada da seguinte forma:

$$Z_1 + y_1 + \frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} = Z_2 + y_2 + \frac{\alpha_2 U_2^2}{2g} + \Delta_h \quad (4)$$

Onde:

y_1, y_2 = profundidade da água na seção transversal.

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO DOS TERMOS NA EQUAÇÃO DE ENERGIA – BERNOULLI



FONTE: Fundamentos de Engenharia Hidráulica (BAPTISTA e COELHO, 2010)

A perda de carga de energia (Δ_h) entre duas seções transversais é composta de perdas por atrito e perdas por contração ou expansão. A equação para a perda de carga de energia é como se segue:

$$\Delta_h = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (5)$$

Onde:

L = comprimento pela descarga ponderada;

\bar{S}_f = atrito por inclinação representativo entre duas seções;

C = coeficiente de perda por expansão ou contração.

O comprimento ponderado do trecho L , pode ser calculado por:

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad (6)$$

Onde:

L_{lob} ; L_{ch} ; L_{rob} = comprimentos entre as seções, respectivamente, para fluxo na margem esquerda, o canal principal e margem direita;

\bar{Q}_{lob} ; \bar{Q}_{ch} ; \bar{Q}_{rob} = média aritmética dos fluxos entre as seções, respectivamente, para fluxo na margem esquerda, o canal principal e margem direita.

2.2.1.2 Capacidade de Escoamento

Para o cálculo de capacidade de escoamento, o item que apresenta grande importância é a rugosidade, proporcionando-se a máxima descarga com sua minimização. Selecionar o valor de coeficiente de rugosidade significa estimar a resistência ao escoamento exercida sobre o fluido.

A fórmula mais comumente empregada é a de Manning, possibilitando-se observar a grande influência da rugosidade:

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} S_f^{1/2} \quad (7)$$

Onde:

Q = descarga (m³/s);

n = coeficiente de rugosidade de Manning (m^{1/3}.s⁻¹);

A = área de fluxo da seção (m²);

R_h = raio hidráulico (área / perímetro molhado) (m);

S_f = declividade longitudinal da linha de energia (m/m).

2.2.1.3 Coeficiente de Manning

Para significativa aproximação das elevações da superfície do escoamento da água, comparando-se os dados simulados com observados, é necessária uma análise criteriosa para seleção de um valor apropriado do coeficiente de Manning.

O valor do coeficiente de Manning é altamente variável e depende de alguns fatores, incluindo: rugosidade superficial, vegetação, irregularidades canal, alinhamento do canal, obstruções nas margens, materiais suspensos, tamanho e forma do canal, entre outros. Para isso, existem várias referências para acessar os valores de Manning, encontrando-se uma extensa compilação de valores no livro "*Open Channel Hydraulics*" (CHOW, 1959).

Na TABELA 2, apresentam-se os valores de Manning para os tipos mais comuns de canais.

TABELA 2 – COMPILAÇÃO DE VALORES DO COEFICIENTE DE MANNING ($M^{1/3}.S^{-1}$).

DESCRIÇÃO DO TIPO DE CANAL	MÍNIMO	NORMAL	MÁXIMO
1. Canal Principal			
a. Limpo, regular, cheio e de fundo regular	0.025	0.030	0.033
b. Idem, mas com pedras e vegetação	0.030	0.035	0.040
c. Limpo, sinuoso, algumas piscinas e bancos de areia	0.033	0.040	0.045
d. Idem, alguma vegetação e pedras	0.035	0.045	0.050
e. Alguma vegetação, plantas livres nas margens	0.040	0.048	0.055
f. Idem ao c, com mais pedras	0.045	0.050	0.060
g. Correntes muito lentas, cheias de plantas e piscinas profundas	0.050	0.070	0.080
h. Correntes muito lentas, cheias de plantas e piscinas profundas	0.075	0.100	0.150
2. Várzeas (adjacente ao curso d'água natural)			
a. Pasto sem arbustos:			
1. Capim baixo	0.025	0.030	0.035
2. Capim alto	0.030	0.035	0.050
b. Áreas cultivadas:			
1. Semeadura	0.020	0.030	0.040
2. Vegetação rasteira alinhada	0.025	0.035	0.045
3. Vegetação rasteira não alinhada	0.030	0.040	0.050
c. Arbustos:			
1. Mato cerrado, arbustos dispersos	0.035	0.050	0.070
2. Arbustos pequenos e árvores, no inverno	0.035	0.050	0.060
3. Arbustos pequenos e árvores, no verão	0.040	0.060	0.080
4. Vegetação de média a densa, no inverno	0.045	0.070	0.110
5. Vegetação de média a densa, no verão	0.070	0.100	0.160
d. Árvores de grande porte:			
1. Salgueiros densos em verão	0.110	0.150	0.200
2. Terra limpa com tocos de árvores	0.030	0.040	0.050
3. Idem, mas com grande crescimento de renovos	0.050	0.060	0.080
4. Arvoredo denso, algumas árvores baixas, pouca vegetação rasteira, estágio caudaloso sob os ramos	0.080	0.100	0.120
5. Idem, mas com o estágio caudaloso atingindo os ramos	0.100	0.120	0.160
3. Correntes montanhosas, sem vegetação no canal, margens íngremes, árvores e plantas ao longo das margens submersas no alto estágio			
a. Fundo de cascalho, seixo rolado e poucos matacões	0.030	0.040	0.050
b. Fundo de seixos com grandes matacões	0.040	0.050	0.070
4. Canais Escavados			
a. Terra em segmento reto e uniforme			
1. Limpa, recentemente completada	0.016	0.018	0.020
2. Limpa, após intempérie	0.018	0.022	0.025
3. Saibro, seção uniforme, limpa	0.022	0.025	0.030
4. Com grama curta, pouca vegetação	0.022	0.027	0.033
b. Terra, em segmento sinuoso			
1. Sem vegetação	0.023	0.025	0.030
2. Grama, alguma vegetação	0.025	0.030	0.033
3. Vegetação densa ou plantas aquáticas em canais profundos	0.030	0.035	0.040
4. Fundo em terra, paredes em pedra	0.028	0.030	0.035

DESCRIÇÃO DO TIPO DE CANAL	MÍNIMO	NORMAL	MÁXIMO
5. Fundo em pedra e margens cobertas de vegetação	0.025	0.035	0.040
6. Fundo em seixos, e paredes limpas	0.030	0.040	0.050
c. Escavado com dragline ou dragado			
1. Sem vegetação	0.025	0.028	0.033
2. Arbustos nas margens	0.035	0.050	0.060
d. Cortes em rocha			
1. Lisa e uniforme	0.025	0.035	0.040
2. Áspera e irregular	0.035	0.040	0.050
e. Canais não conservados, vegetação e arbustos sem cortar			
1. Vegetação densa, altura igual à profundidade do fluxo	0.050	0.080	0.120
2. Fundo limpo, arbustos nas paredes	0.040	0.050	0.080
3. Idem acima, maior altura do fluxo	0.045	0.070	0.110
4. Arbustos em quantidade, altura elevada	0.080	0.100	0.140

FONTE: Open Channel Hydraulics (CHOW, 1959).

2.2.1.4 Subdivisão da Seção Transversal

A determinação do fluxo total e o coeficiente de velocidade para uma seção transversal de fluxo requer ser subdividida no HEC-RAS, para isso tem-se a seguinte consideração apresentada nas equações (8) e (9).

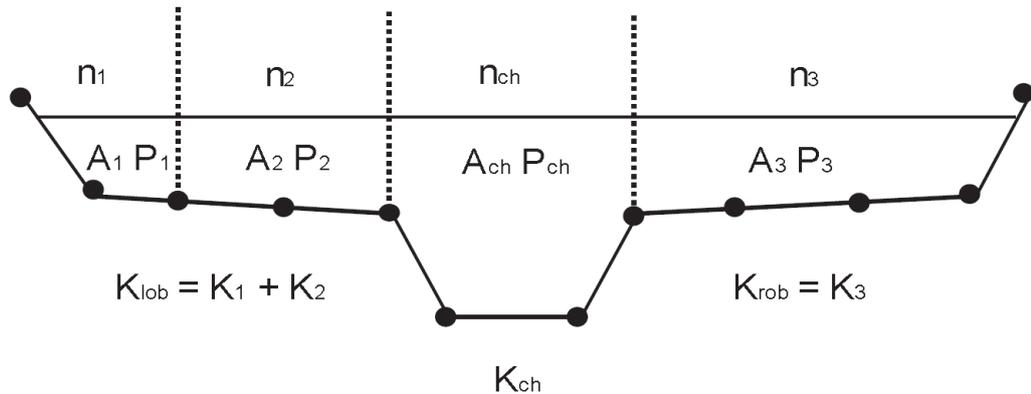
$$Q = K S_f^{1/2} \quad (8)$$

$$K = \frac{1}{\eta} A R_h^{2/3} \quad (9)$$

K = capacidade de condução (conveyance) em função da perda carga contínua.

A abordagem utilizada no HEC-RAS é subdividir o fluxo, utilizando-se como base para a subdivisão os valores dos coeficientes de Manning da seção transversal, conforme apresentado na FIGURA 2.

FIGURA 2 – MÉTODO PADRÃO DE SUBDIVISÃO DO HEC-RAS

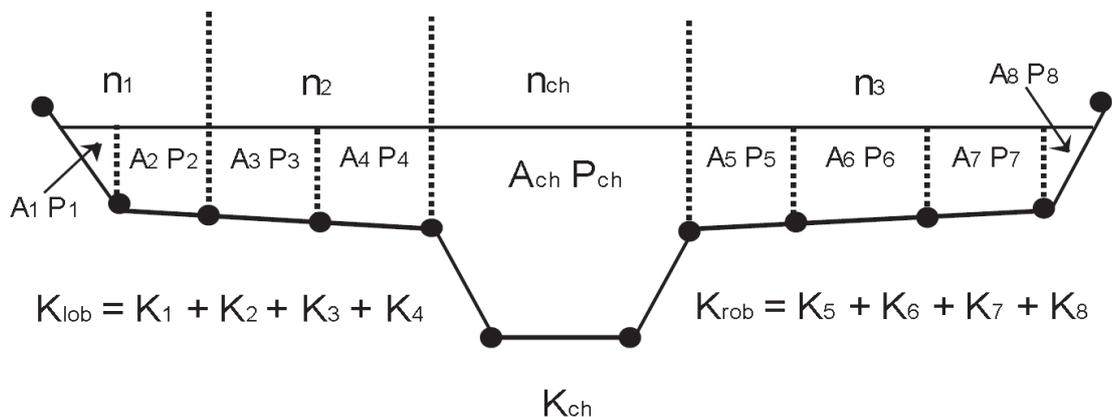


FONTE: Manual de Referência do HEC-RAS (USACE, 2016).

O programa HEC-RAS resume todos os elementos incrementais (K_1, K_2, \dots, K_n) das margens, buscando-se obter um único elemento para margem esquerda (K_{lob}) e margem direita (K_{rob}). O canal é normalmente calculado como um único elemento de transporte (K_{ch}). O transporte total para a seção transversal é obtido pela soma dos três meios de transporte subdivisão (esquerda, canal principal e direita).

Um método alternativo disponível em HEC-RAS é calcular entre cada ponto de coordenadas nas margens de coordenadas. Este método é utilizado no programa do HEC-2 também da U.S Army Corps of Engineers. O método tem sido mantido como uma opção dentro HEC-RAS, a fim de reproduzir os estudos que foram originalmente desenvolvidos com HEC-2.

FIGURA 3 – MÉTODO ALTERNATIVO DE SUBDIVISÃO DO HEC-RAS



FONTE: Manual de Referência do HEC-RAS (USACE, 2016).

2.2.1.5 Avaliação da Perda por Atrito

A perda por atrito é avaliada pelo HEC-RAS como o produto da \bar{S}_f e L , Equação (5), em que \bar{S}_f representa a declividade do atrito para um trecho e L é definido pela Equação (6). A declividade do atrito em cada seção transversal é calculada a partir da equação de Manning, conforme apresentado abaixo:

$$S_f = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \quad (10)$$

Expressões alternativas para representação da declividade do atrito (S_f) pelo HEC-RAS:

Equação Média do Transporte

$$\bar{S}_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2}\right)^2 \quad (11)$$

Equação Média da Declividade do Atrito

$$\bar{S}_f = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} \quad (12)$$

Equação Média Geométrica da Declividade do Atrito

$$\bar{S}_f = \sqrt{S_{f1} \times S_{f2}} \quad (13)$$

Equação Média Harmônica da Declividade do Atrito

$$\bar{S}_f = \frac{2(S_{f1} \times S_{f2})}{S_{f1} + S_{f2}} \quad (14)$$

A Equação (11) é o padrão usado pelo programa HEC-RAS, sendo possível que o usuário selecione uma das outras opções acima. O programa também contém uma opção para selecionar equações, dependendo do regime do fluxo e tipo de perfil.

2.2.1.6 Avaliação de Perdas por Contração e Expansão

De forma geral, devido às transições que são representadas por mudanças nas dimensões, forma ou declividade e às singularidades que são representadas pela presença de obstáculos, possibilita-se a ocorrência de perturbações no escoamento e, assim, perdas de carga localizadas.

Os principais efeitos das obstruções na condição do escoamento são: ocorrência de perdas de carga localizadas devido às contrações e às expansões das seções; alterações na quantidade de movimento em função da presença de obstáculos; e as alterações das profundidades de escoamento face às variações da energia específica, em função do estreitamento e posterior alargamento das seções.

Conforme U.S Army Corps of Engineers (1998), as perdas de carga nas transições podem ser avaliadas pela Equação (15) podendo-se utilizar tanto para contrações quanto expansões:

$$\Delta h_{ce} = C \left| \frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 U_2^2}{2g} \right| \quad (15)$$

Onde:

C = coeficiente de perda de carga, de contração ou expansão;

$\frac{\alpha_1 U_1^2}{2g}, \frac{\alpha_2 U_2^2}{2g}$ = energia ou carga de velocidade.

Assume-se que uma contração ocorre sempre que a velocidade a jusante é superior à velocidade a montante. Do mesmo modo, quando a velocidade a montante é superior à velocidade a jusante, presume-se que ocorra um fluxo de expansão.

Os coeficientes de perda de carga são multiplicados pela diferença absoluta de velocidade entre a seção transversal montante e jusante, resultando-se na perda de energia causada pela transição.

Para regime subcrítico, quando a mudança na seção transversal do rio é pequena, os coeficientes de expansão e contração são tipicamente da ordem de 0,1 e 0,3, respectivamente. Quando a mudança na área da seção transversal efetiva é abrupta, como em pontes, usam-se coeficientes de contração e expansão de 0,3 e 0,5. Em certas ocasiões, os coeficientes de expansão e contração em torno de pontes, por exemplo, podem ser tão elevados como 0,6 e 0,8, respectivamente. Estes valores podem ser alterados a qualquer seção transversal.

Os valores típicos de coeficientes para a contração e expansão, para regime subcrítico, estão apresentados na TABELA 3.

TABELA 3 – VALORES TÍPICOS DE COEFICIENTES PARA CONTRAÇÃO E EXPANSÃO

Geometria da Transição	Coeficiente de Contração	Coeficiente de Expansão
Sem Perdas por Transição	0,0	0,0
Transições Graduais	0,1	0,3
Seções Típicas de Pontes	0,3	0,5
Transições Abruptas	0,6	0,8

FONTE: Manual de Referência do HEC-RAS (USACE, 2016).

Tratando-se de transições em escoamentos supercríticos, deve-se tomar certos cuidados com possíveis ressaltos hidráulicos e, conseqüentemente, resultando em significativas profundidades de escoamento.

2.3 MODELO COMPUTACIONAL BIDIMENSIONAL (RIVERFLOW2D[®])

O RiverFlow2D[®] é um modelo computacional do método dos volumes finitos de combinação hidrológica e hidráulica, com possibilidade de simulação de leito móvel e de transporte de poluentes para rios, estuários e planícies. O uso de malhas de elementos triangulares permite que o campo de fluxo seja resolvido em torno de qualquer ambiente fluvial.

O mecanismo de computação RiverFlow2D[®] usa um método de solução de volumes finitos preciso e estável que elimina as dificuldades de contornos e aquecimento de alguns outros modelos bidimensionais. O modelo pode integrar estruturas hidráulicas como bueiros, barragens, pontes, e condições de contorno internas. As capacidades hidrológicas incluem a distribuição espacial de chuvas, evaporação e infiltração. O modelo conta também com a possibilidade de inclusão da força do vento distribuída na superfície da água.

Diferentemente da modelagem hidráulica com representação unidimensional, a metodologia utilizada neste estudo garante uma adequada representação da rugosidade dos taludes laterais na condutância total da seção e maior precisão no cálculo das perdas de carga nas curvas, seja por contração ou expansão do fluxo.

Tais características são consideradas fundamentais para uma representação fidedigna das perdas ao longo do trecho modelado e consequente confiança nos resultados da modelagem.

A interface de usuário do RiverFlow2D[®] é baseada na solução de modelagem de água superficial (Surface-Water Modeling Solution - SMS) desenvolvida pela Aquaveo. Este sistema de software apresenta integração com GIS que fornece funções interativas para gerar e refinar a malha flexível usada pelo RiverFlow2D[®]. O SMS utiliza objetos GIS conhecidos como pontos, arcos (polilinhas) e polígonos para construir uma representação de alto nível do modelo, facilitando a atribuição de condições de contorno e os valores de rugosidade, permitindo ao usuário gerenciar eficientemente todo o processo de modelagem.

Esta revisão bibliográfica fornece instruções sobre o modelo RiverFlow2D[®] e explica os fundamentos do modelo e seus componentes, bem como os métodos numéricos utilizados para resolver as equações numéricas.

2.3.1 Equações Governantes

Os modelos matemáticos do chamado tipo de águas rasas governam uma grande variedade de fenômenos físicos. Por razões de simplicidade, as equações de águas rasas serão, a partir daqui, abreviadas como SWE/EAR (Shallow Water Equations / Equações de Águas Rasas).

O RiverFlow2D[®] baseia-se na teoria das águas rasas que descreve um fluxo de superfície livre com uma aproximação em profundidade, onde a escala de comprimento vertical é muito menor que a escala de comprimento horizontal. As equações são derivadas de profundidade integrando as equações de Navier-Stokes, onde as velocidades verticais são assumidas uniformes através da profundidade do fluxo. O uso do coeficiente de Manning engloba não apenas a rugosidade local (calha, margens, vegetação, etc.), mas todas as perdas assumidas com mudanças de momento, incluindo expansão e contração. A maioria dos modelos bidimensionais disponíveis usam as equações de águas rasas, principalmente para aplicações de inundação de barragens. As equações não conservativas resultantes são as seguintes:

- Continuidade:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial uH}{\partial x} + \frac{\partial vH}{\partial y} = 0 \quad (16)$$

- Momento na direção x:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_{bx}}{\rho} = 0 \quad (17)$$

- Momento na direção y:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_{by}}{\rho} = 0 \quad (18)$$

Onde:

x, y = coordenadas horizontais;

t = tempo;

η = elevação da superfície de água

h = profundidade da água;

u, v = velocidade da profundidade média na direção x e y;

ρ = densidade da água;

g = aceleração da gravidade;

τ_{bx}, τ_{by} = termos de atrito do leito, definidos conforme abaixo:

$$\tau_{bx} = \frac{gn^2 U \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (19)$$

$$\tau_{by} = \frac{gn^2 V \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (20)$$

n = coeficiente de rugosidade de Manning.

Várias formas de Equações de Águas Rasas podem ser caracterizadas com suas variáveis primitivas. A escolha adequada dessas variáveis e o conjunto correspondente de equações desempenham um papel extremamente importante na modelagem numérica. Sabendo-se que a forma conservativa é preferível, em relação

a não conservativa, se forem esperadas fortes mudanças de descontinuidades na solução.

Bechteler *et al.* (1993) mostraram que a equação que se configura de forma conservativa, com (h, uh, vh) como variáveis independentes e primitivas, produz os melhores resultados. A forma conservativa pode ser derivada multiplicando a continuidade u e v e adicionando equações de momento na direção x e y , respectivamente. Este conjunto de equações pode ser escrito da seguinte forma:

$$U_t + \nabla(F, G) + S = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} + S(U, x, y) = 0 \quad (22)$$

Onde $U, F(U), G(U)$ são os vetores para os fluxos nas direções x e y , respectivamente, dados por:

$$U = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$F = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 \\ uvh \end{pmatrix}; G = \begin{pmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + \frac{1}{2}gh^2 \end{pmatrix} \quad (24)$$

Onde g é a aceleração da gravidade. Os termos $\frac{1}{2}gh^2$ nos fluxos foram obtidos depois de assumir uma distribuição de pressão hidrostática em cada coluna de água, como geralmente aceito em modelos de águas rasas. O vetor do termo S incorpora o efeito da força de pressão sobre o leito e as forças tangenciais geradas pela tensão do leito.

$$S = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{fx} - S_{Bx}) \\ gh(S_{fy} - S_{By}) \end{pmatrix} \quad (25)$$

A tensão de cisalhamento do leito é o parâmetro físico mais importante, além da profundidade da água e do campo de velocidade de um modelo hidrodinâmico. Provoca a turbulência e é responsável pelo transporte de sedimentos e tem um efeito não-linear de retardar o fluxo. Quando o efeito da turbulência cresce, o efeito da viscosidade molecular torna-se menor, e pode até parecer não existir.

Onde a contribuição da tensão do leito é modelada usando a lei de atrito de Manning para que:

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (26)$$

$$S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (27)$$

n = coeficiente de rugosidade de Manning.

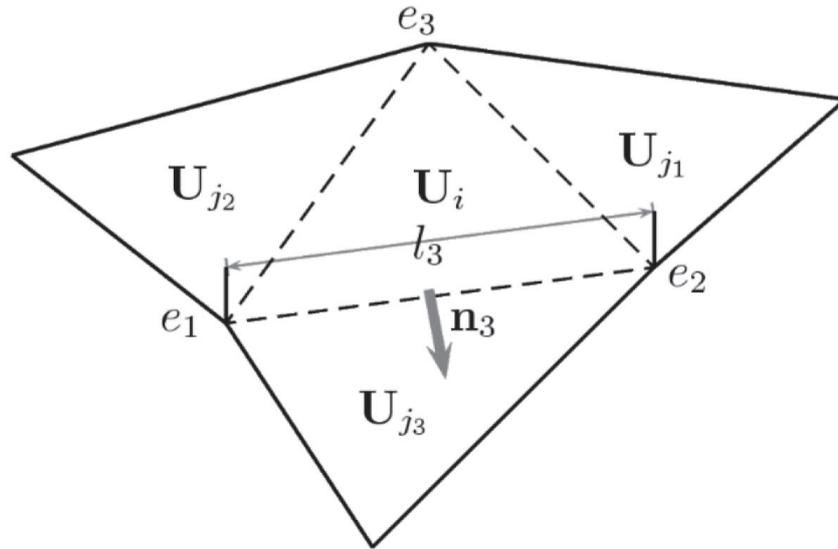
2.3.1.1 Coeficiente de Manning

O coeficiente de Manning geralmente estimado para determinar perdas de carga no fluxo de canal e rio é uma medida global que conta não só os efeitos de rugosidade do leito, mas também de atrito interno, obstruções e variações na forma e tamanho da seção transversal do canal (CHOW, 1959). Portanto, as estimativas do coeficiente de Manning aplicáveis aos modelos unidimensionais devem ser ajustadas, pois as equações do modelo RiverFlow2D[®] consideram a troca bidimensional de momento dentro da seção transversal que é agrupada na simplificação unidimensional. Vários pesquisadores descobriram em aplicações práticas de modelos bidimensionais que os coeficientes de Manning podem ser até 30% mais baixos do que aqueles normalmente usados para modelos unidimensionais no mesmo alcance do rio (BELLEUDY, 2000). No entanto, os modelos bidimensionais não consideram o atrito lateral. Portanto a seleção final dos coeficientes de Manning deve ser o resultado de um processo de calibração onde os resultados do modelo são ajustados aos dados observados em campo.

2.3.1.2 Região de Estabilidade

Uma vez que as correções numéricas são aplicadas, a região de estabilidade para os casos homogêneos pode ser usada para calcular o tamanho do passo do tempo da simulação. Na FIGURA 4, apresenta-se um esboço da discretização da estrutura numérica bidimensional, considerando-se malhas não estruturadas.

FIGURA 4 - ESBOÇO DA DISCRETIZAÇÃO DA ESTRUTURA NUMÉRICA BIDIMENSIONAL.



FONTE: Manual de Referência do RiverFlow2D® (HYDRONIA, 2016).

A distância relevante que será referida como χ_i em cada elemento, deve considerar a área do elemento e o comprimento das bordas (k), conforme apresentado na equação.

$$\chi_i = \frac{A_i}{\max_{(k=1,NE)} l_k} \quad (28)$$

Onde:

NE = número de bordas do elemento i ;

l_k = comprimento de cada borda.

Considerando que cada k é usado para fornecer informações a um par de elementos vizinhos de tamanho diferente, a distância $\min(A_i, A_j) / l_k$ é relevante. Assim, limitando-se o passo de tempo da simulação, conforme a equação.

$$\Delta t = CFL \frac{\min(\chi_i, \chi_j)}{\max_m |\lambda^m|} \quad (29)$$

O método de solução RiverFlow2D® usa passo de tempo variável, sendo controlado pelo número Courant-Friederich-Lewy (CFL) definido pelo usuário. Este número é proporcional ao tamanho do elemento, mas também inversamente

proporcional à velocidade e à profundidade. Elementos menores levam a pequenos passos de tempo. O valor CFL máximo teórico é 1, mas em algumas simulações pode ser necessário reduzir esse número para valores mais baixos.

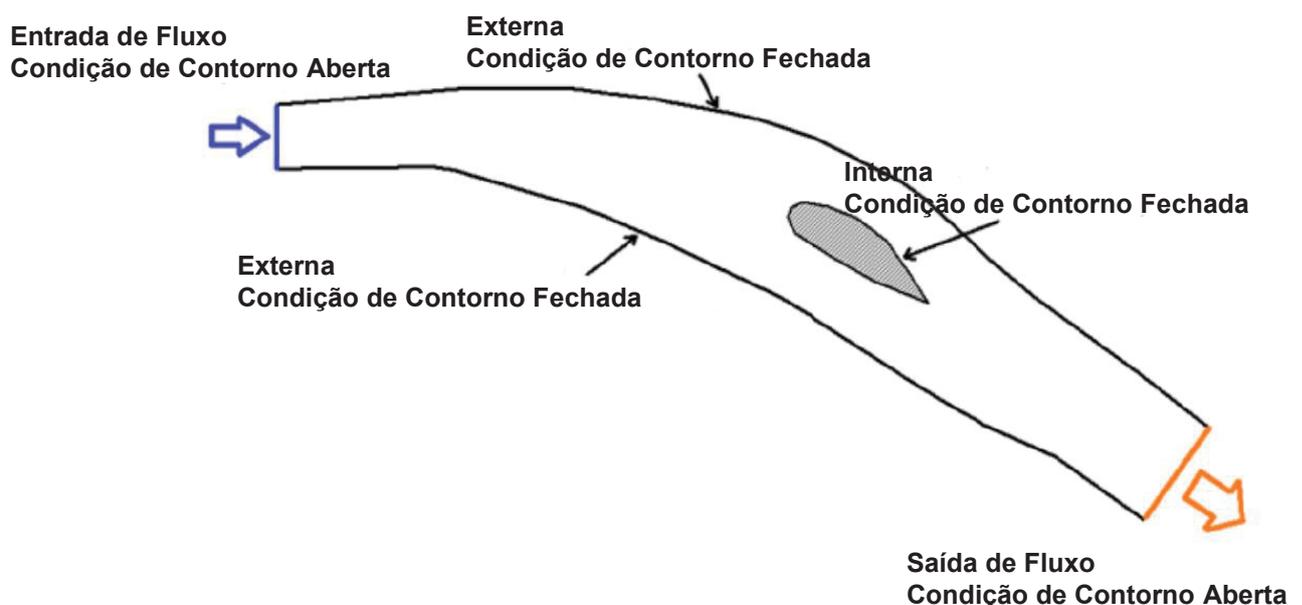
Segundo Toro (2001), ao considerar $CFL = 0,5$ em uma aplicação direta de fluxos unidimensionais têm-se intervalos de estabilidade reduzidos. Embora seja importante notar que o valor de CFL poderia ser maior em certas malhas triangulares, é preferível permanecer sob o valor de 0,5 no modelo bidimensional.

2.3.1.3 Condições de Contorno

Existem dois tipos principais de condições de contorno que podem ser utilizadas no RiverFlow2D[®]: condições abertas onde fluxo pode entrar ou sair da área de modelagem e condições fechadas internas ou externas.

As condições de contorno fechadas são paredes rígidas ou sólidas que bloqueiam completamente o fluxo, como bancos de rio ou ilhas. Eles constituem paredes verticais que o fluxo nunca poderá superar. O software RiverFlow2D[®] detecta automaticamente as condições de contorno fechadas, ajustando o fluxo a zero ao longo da condição e mantendo as velocidades tangenciais.

FIGURA 5 – EXEMPLO DE CONDIÇÕES DE CONTORNO ABERTAS E FECHADAS.



FONTE: Manual de Referência do RiverFlow2D[®] (HYDRONIA, 2016).

O software RiverFlow2D[®] permite ter qualquer número de condições de contorno para entrada e saída do modelo, apresentando várias combinações de condições impostas. Conseqüentemente, o uso adequado dessas condições é um componente crítico para que uma simulação RiverFlow2D[®] seja bem-sucedida.

A teoria das equações de águas rasas indica que, para o fluxo subcrítico bidimensional, é necessário fornecer pelo menos uma condição de entrada e outra para saída. Para o fluxo supercrítico, todas as condições devem ser impostas aos limites de entrada e nenhuma condição limite deve ser imposta nos limites de saída. Na TABELA 4, apresenta-se o resumo das condições de contorno obrigatórias para o modelo conforme o regime do fluxo.

TABELA 4 – CONDIÇÕES DE CONTOURNO OBRIGATÓRIAS.

Regime do Fluxo	Entrada do Fluxo	Saída do Fluxo
Subcrítico	Vazão ou Velocidade	Nível de Água
Supercrítico	Vazão e Nível de Água	-

FONTE: Manual de Referência do RiverFlow2D[®] (HYDRONIA, 2016).

Portanto, recomenda-se ter pelo menos uma condição de contorno com nível de água ou vazão. Por exemplo, ter apenas vazão e nenhum nível de água pode resultar em instabilidade devido a violação dos requisitos de condições de contorno para as equações de águas rasas.

TABELA 5 – TIPOS DE CONDIÇÕES DE CONTOURNO HIDRODINÂMICAS DISPONÍVEL NO RIVERFLOW2D[®].

Condições de Contorno	Descrição
Condição de Contorno Variável simples	Necessário a elevação da superfície da água.
	Necessária a vazão e elevação da superfície da água.
Condição de Contorno Vazão em velocidade	Necessária a vazão Velocidades perpendiculares à linha de contorno são calculadas pelo modelo.
Condição de Contorno Curva de descarga	Necessário uma tabela de nível de água x vazão.
Condição de Contorno Entradas ou saídas livres	Condições de entrada ou saída de fluxos livres. Velocidades e superfície da água são calculadas pelo modelo.
	Condição de saída de fluxo livre. As velocidades e as elevações da superfície da água são calculadas pelo modelo, mas é permitida apenas para a condição externa.
Condição de Contorno Fluxo uniforme	Condição utilizada para saída de fluxo uniforme.

FONTE: Manual de Referência do RiverFlow2D[®] (HYDRONIA, 2016).

2.3.1.4 Modelo Seco ou Molhado

O software RiverFlow2D[®] é capaz de iniciar uma simulação tanto com os elementos secos quanto molhados, ou seja, não é obrigatória uma condição inicial de nível de água. Esta capacidade do modelo é importante em simulações de propagação de ondas de inundação por um canal inicialmente seco, podendo-se secar novamente o leito do canal à medida que a onda de inundação baixar. Uma malha de elementos triangulares pode abranger áreas secas e molhadas e o modelo irá lidar com essas condições usando dois algoritmos distintos e dependendo da classificação de cada elemento.

Um elemento é considerado seco se sua profundidade de água for inferior a uma fração de milímetro, ou seja, não há uma situação de elemento parcialmente seco. Uma borda de elemento é considerada inativa ao separar dois elementos secos e, automaticamente, acaba sendo excluída da computação. Caso contrário, a borda do elemento sempre contribui para a atualização das variáveis em ambos os lados.

O algoritmo utilizado no RiverFlow2D[®] para o processo de “secagem” e “molhamento” dos elementos é uma adaptação do algoritmo proposto por Brufau *et al.* (2004) e posteriormente melhorado por Murillo *et al.* (2007) e Murillo e Garcia-Navarro (2010), e funciona da seguinte forma:

1. No início de cada passo de tempo, todos os elementos são classificados como secos ou molhados, conforme descrito acima.
2. Se um elemento estiver seco e completamente cercado por elementos secos, ele é removido dos cálculos e os componentes de velocidade são ajustados em zero para passo de tempo atual.
3. Todas as bordas dos elementos internos são classificadas como ativas ou inativas.
4. As contribuições da borda dos elementos secos ou molhados são calculadas assumindo, inicialmente, velocidade zero em ambos os lados.
5. O resto das contribuições da borda da célula são calculados de acordo com o esquema numérico, conforme descrito acima.
6. Elementos secos e molhados, cercados por pelo menos um elemento molhado, são mantidos na computação e resolvidos usando as contribuições das bordas.

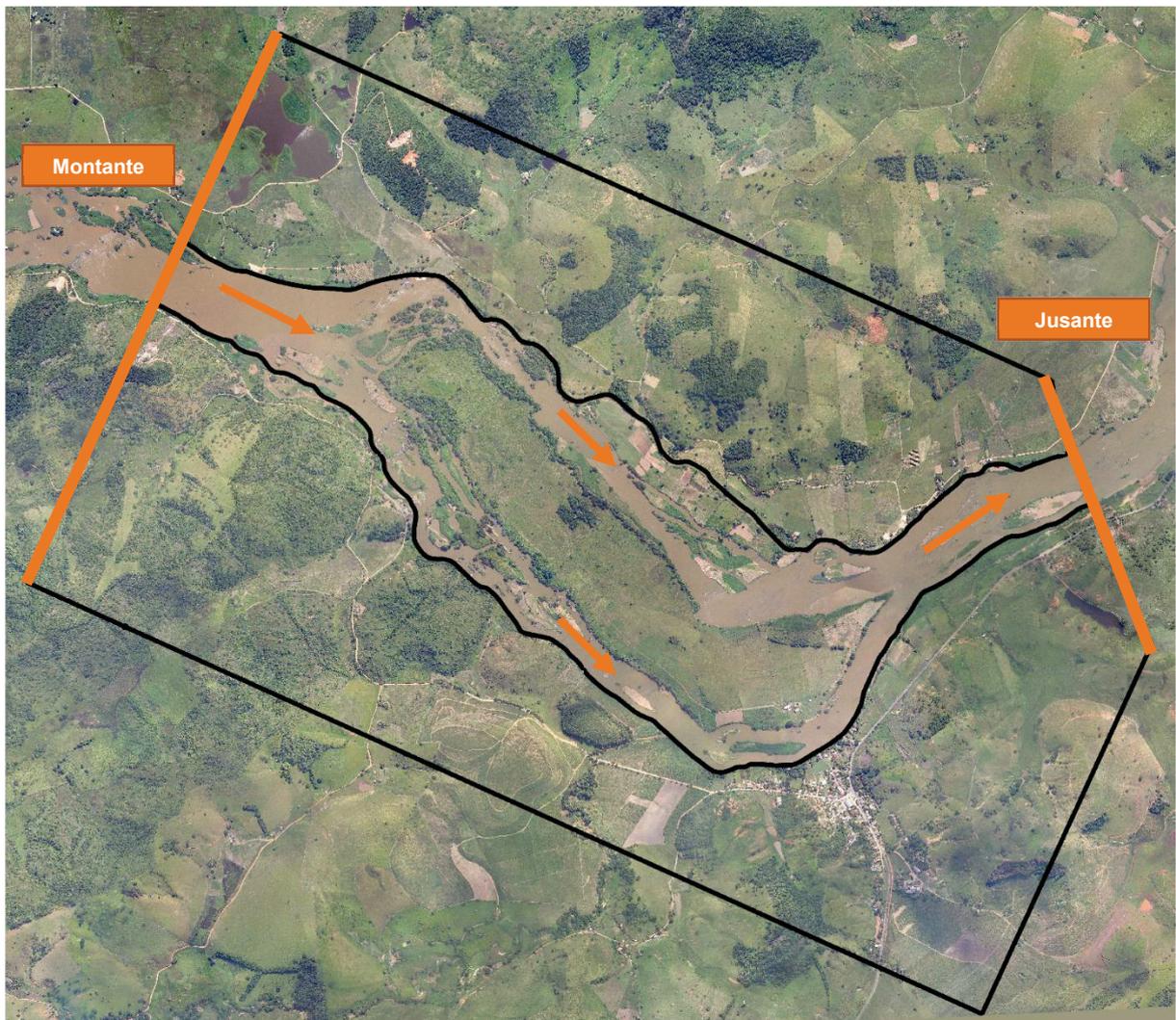
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DOMÍNIO ESTUDADO

O domínio estudado nesta dissertação compreende uma região de aproximadamente 13,0 km², iniciando-se a aproximadamente 1,0 km a montante de uma ilha, divisor físico das águas do rio, e se estende até uma seção localizada a aproximadamente 1,0 km a jusante da ilha supracitada.

A FIGURA 6, apresenta o domínio estudado nesta dissertação.

FIGURA 6 – CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO DE INTERESSE DO RIO.



FONTE: O Autor (2017).

O trecho do rio a ser estudado possui leito rochoso, podendo ser visto diversos afloramentos rochosos na ocasião da visita (FIGURA 7).

FIGURA 7 – AFLORAMENTOS ROCHOSOS CARACTERÍSTICOS



FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

As margens são compostas por vegetação predominantemente rasa. Em alguns lugares percebe-se que o local é utilizado para pastagens e agricultura. Com menor frequência, pode ser observada ao longo do rio a ocorrência de uma vegetação mais densa, composta por árvores de 5 a 10 metros de altura aproximadamente.

Na região da ilha há predominância de vegetação rasa. Em alguns locais, com menor frequência, pode ser verificado o cultivo de hortaliças e a presença de regiões arborizadas com árvores de 5 a 10 metros de altura, conforme apresentado na FIGURA 8.

FIGURA 8 – CARACTERÍSTICAS DA VEGETAÇÃO DA ILHA.



FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

Detectou-se a presença de diversas corredeiras e controles hidráulicos ao longo do domínio estudado, dentre os observados, merecem destaque pela sua intensidade os seguintes locais:

- Corredeiras formadas a montante da entrada do braço esquerdo e da ilha (FIGURA 9 e FIGURA 10);
- Logo após a entrada do braço direito foi verificada a existência de grandes afloramentos rochosos (FIGURA 11);
- Formação de corredeiras de intensidade razoável ao final do braço esquerdo, mais especificamente no local onde o rio faz curva à esquerda (FIGURA 12);
- No braço direito, logo após os afloramentos rochosos, foram identificadas diversas corredeiras formadas entre as pequenas ilhas existentes (FIGURA 13);
- Corredeiras próximas ao limite de jusante a ser reproduzido nos modelos reduzido e matemáticos (FIGURA 14).

FIGURA 9 – CORREDEIRAS A MONTANTE DA ENTRADA DO BRAÇO ESQUERDO.



FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

FIGURA 10 – CORREDEIRAS A MONTANTE DA ILHA.



FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

FIGURA 11 – AFLORAMENTO ROCHOSO NA ENTRADA DO BRAÇO DIREITO.



FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

FIGURA 12 – CORREDEIRA NO BRAÇO ESQUERDO, CURVA PARA A ESQUERDA.



FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

FIGURA 13 – CORREDEIRA NO BRAÇO DIREITO.



FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

FIGURA 14 – CORREDEIRAS A JUSANTE.



FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

3.2 LEVANTAMENTOS DE CAMPO

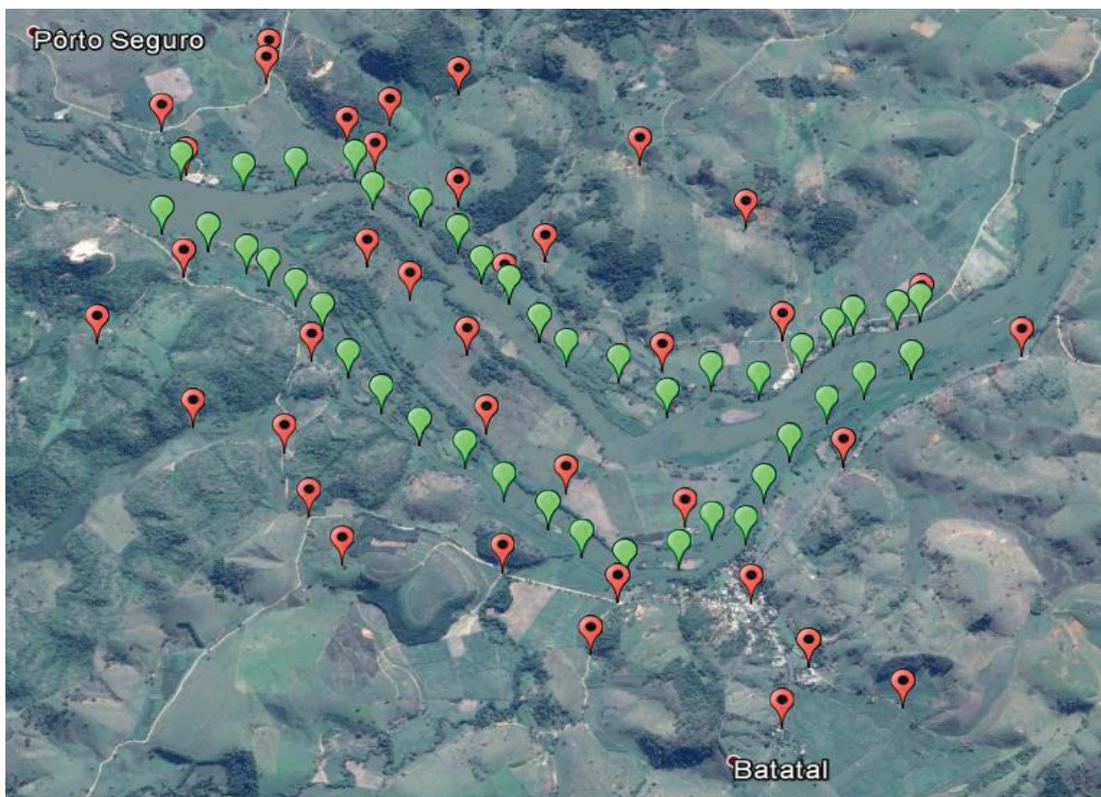
Foram obtidos levantamentos topográfico e batimétrico para consolidação do modelo digital do terreno, informações do perfil da linha de água nos braços esquerdo e direito do rio, leituras das réguas ao longo do local de interesse e dados de medição de vazão realizadas com ADCP (Medição de Vazão pelo Método Acústico Doppler) no braço direito do rio.

3.2.1 Levantamento Topográfico

O modelo digital de terreno utilizado nesse estudo é oriundo do levantamento topográfico a laser, LiDAR (*Light Detection And Ranging*), obtendo-se uma nuvem de pontos extremamente detalhada sobre a elevação do terreno.

A FIGURA 15 ilustra a distribuição espacial dos pontos GNSS levantados em campo, sendo em vermelho os pontos de validação da nuvem de pontos LiDAR e em verde os pontos correspondentes aos vergalhões para a determinação do perfil linha d'água.

FIGURA 15 – PONTOS GNSS LEVANTADOS NA ÁREA DE ESTUDO.



FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

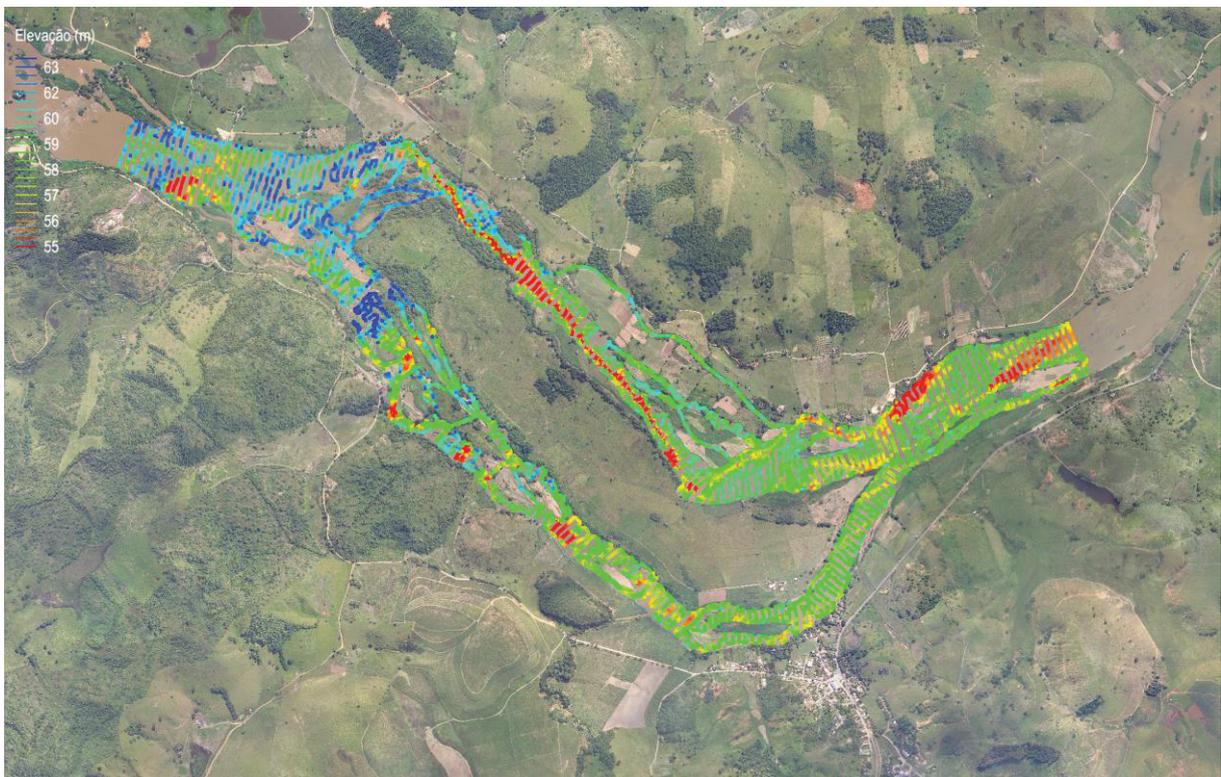
A nuvem de pontos LiDAR classificada como terreno foi interpolada pelo método de Delaunay – também utilizado para geração de curvas de nível a partir deste modelo interpolado. As discrepâncias obtidas entre o modelo e os pontos de validação levantados em campo, apresentaram média de -0,028 m, desvio padrão de 0,270 m e REMQ (Raiz do Erro Médio Quadrático) de 0,272 m.

Face aos resultados apresentados e tendo em vista os critérios do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica), pode-se afirmar que o modelo digital de terreno oriundo da nuvem de pontos LiDAR pode ser classificado com “Classe A” considerando curvas de nível equidistantes de metro em metro (recomendadas para representação cartográfica de mapas na escala 1:2.000).

3.2.2 Levantamento Batimétrico

O sistema de medição batimétrica utilizado neste estudo é composto por três unidades independentes: a embarcação, um sistema GNSS RTK composto por um sensor base e um sensor móvel, e o ecobatímetro.

FIGURA 16 – BATIMETRIA LEVANTADA EM CAMPO



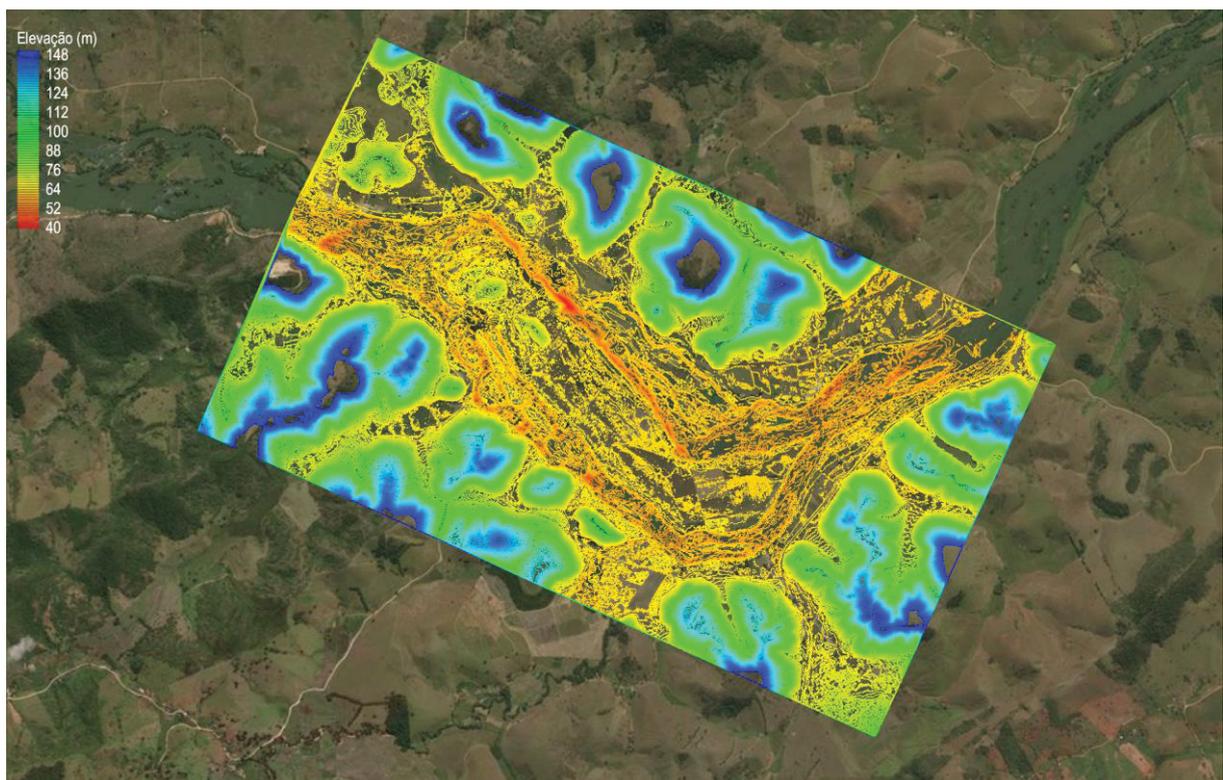
FONTE: O Autor (2017).

O resultado desse trabalho é uma nuvem de pontos contendo as coordenadas UTM no Fuso 23 Sul, referidas ao SGR (Sistema Geodésico de Referência) SIRGAS 2000, e altitudes geométricas. Posteriormente, para compatibilização com a nuvem de pontos LiDAR, esses dados foram transformados para SGR SAD69 com altitudes ortométricas.

3.2.3 Consolidação do Modelo Digital do Terreno

A nuvem de pontos LiDAR foi consolidada com a nuvem de pontos proveniente do levantamento batimétrico, consolidando o modelo digital do terreno (MDT), conforme segue ilustrada na FIGURA 17.

FIGURA 17 – CONSOLIDAÇÃO DO MODELO DIGITAL DO TERRENO



FONTE: O Autor (2017).

3.2.4 Perfil da Linha d'água

As leituras dos níveis d'água foram realizadas no dia 22 de março de 2016. Na FIGURA 18, apresenta-se a localização dos pontos de medição e os resultados obtidos seguem apresentados da TABELA 6 a TABELA 9.

FIGURA 18 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS PARA LEITURA DOS NÍVEIS DE ÁGUA



FONTE: O Autor (2017).

TABELA 6 – PERFIL DA LINHA D'ÁGUA NO BRAÇO DIREITO– 1ª LEITURA – 22/03/2016

Ponto NA	H (orto) topo do vergalhão	Dist. Topo vergalhão até o NA	Horário da leitura	NA	Observações
42	64,066	0,805	12:00	63,261	***
41	64,109	0,755	12:02	63,354	***
40	63,988	Vergalhão removido	12:05	Vergalhão removido	Vergalhão removido
39	63,939	0,850	12:06	63,089	***
38	64,052	0,964	12:09	63,088	***
37	62,402	1,050	12:16	61,352	***
36	62,084	0,802	12:19	61,282	***
35	61,973	0,745	12:23	61,228	***
34	61,879	0,897	12:26	60,982	***
33	61,730	0,910	12:29	60,820	***
32	61,885	1,205	12:32	60,680	***
31	61,624	0,942	12:35	60,682	***
30	61,622	1,015	12:38	60,607	***
29	61,660	1,095	12:41	60,565	***
28	61,564	1,035	12:44	60,529	***
27	61,387	0,890	12:47	60,497	***
26	61,678	1,165	12:50	60,513	***
25	61,565	1,070	12:58	60,495	***
24	61,455	1,022	13:01	60,433	***
23	61,518	1,130	13:07	60,388	***
22	61,219	0,990	13:12	60,229	***
21	61,125	1,010	13:15	60,115	***

FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

TABELA 7 – PERFIL DA LINHA D'ÁGUA NO BRAÇO DIREITO – 2ª LEITURA – 22/03/2016

Ponto NA	H (orto) topo do vergalhão	Dist. Topo vergalhão até o NA	Horário da leitura	NA	Observações
42	64,066	0,775	14:43	63,291	***
41	64,109	0,725	14:46	63,384	***
40	63,988	Vergalhão removido	14:48	Vergalhão removido	Vergalhão removido
39	63,939	0,815	14:50	63,124	***
38	64,052	0,930	14:53	63,122	***
37	62,402	0,995	14:59	61,407	***
36	62,084	0,755	15:03	61,329	***
35	61,973	0,700	15:06	61,273	***
34	61,879	0,790	15:09	61,089	***
33	61,730	0,850	15:11	60,880	***
32	61,885	1,130	15:15	60,755	***
31	61,624	0,865	15:19	60,759	***
30	61,622	0,950	15:23	60,672	***
29	61,660	1,030	15:27	60,630	***
28	61,564	0,970	15:32	60,594	***

Ponto NA	H (orto) topo do vergalhão	Dist. Topo vergalhão até o NA	Horário da leitura	NA	Observações
27	61,387	0,835	15:35	60,552	***
26	61,678	1,115	15:38	60,563	***
25	61,565	1,030	15:41	60,535	***
24	61,455	0,885	15:44	60,570	***
23	61,518	1,095	15:49	60,423	***
22	61,219	0,952	15:52	60,267	***
21	61,125	0,970	15:54	60,155	***

FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

TABELA 8 – PERFIL DA LINHA D'ÁGUA NO BRAÇO ESQUERDO – 1ª LEITURA – 22/03/2016

Ponto NA	H (orto) topo do vergalhão	Dist. Topo vergalhão até o NA	Horário da leitura	NA	Observações
20	63,780	0,544	12:00	63,236	***
19	63,662	0,465	12:03	63,197	***
18	63,650	0,487	12:05	63,163	***
17	63,083	0,512	12:08	62,571	***
16	62,734	0,305	12:13	62,429	***
15	62,727	0,671	12:15	62,056	***
14	62,477	0,795	12:18	61,682	***
13	62,328	0,648	12:21	61,680	***
12	62,320	0,673	12:22	61,647	***
11	61,990	0,582	12:25	61,408	***
10	62,082	0,706	12:27	61,376	***
09	62,023	0,800	12:30	61,223	***
08	61,339	0,656	12:32	60,683	***
07	61,162	0,727	12:34	60,435	***
06	61,141	0,730	12:37	60,411	***
05	61,119	0,747	12:39	60,372	***
04	61,593	0,938	12:42	60,655	***
03	60,596	0,379	12:44	60,217	***
02	61,234	1,150	12:46	60,084	***
01	60,367	0,300	12:47	60,067	***

FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

TABELA 9 – PERFIL DA LINHA D'ÁGUA NO BRAÇO ESQUERDO – 2ª LEITURA – 22/03/2016

Ponto NA	H (orto) topo do vergalhão	Dist. Topo vergalhão até o NA	Horário da leitura	NA	Observações
20	63,780	0,514	14:43	63,266	***
19	63,662	0,450	14:47	63,212	***
18	63,650	0,457	14:50	63,193	***
17	63,083	0,448	14:54	62,635	***

Ponto NA	H (orto) topo do vergalhão	Dist. Topo vergalhão até o NA	Horário da leitura	NA	Observações
16	62,734	0,270	14:58	62,464	***
15	62,727	0,628	15:01	62,099	***
14	62,477	0,753	15:06	61,724	***
13	62,328	0,605	15:09	61,723	***
12	62,320	0,630	15:11	61,690	***
11	61,990	0,550	15:15	61,440	***
10	62,082	0,680	15:18	61,402	***
09	62,023	0,767	15:22	61,256	***
08	61,339	0,613	15:25	60,726	***
07	61,162	0,665	15:29	60,497	***
06	61,141	0,685	15:32	60,456	***
05	61,119	0,695	15:35	60,424	***
04	61,593	0,893	15:38	60,700	***
03	60,596	0,343	15:40	60,253	***
02	61,234	1,110	15:43	60,124	***
01	60,367	0,244	15:45	60,123	***

FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

Considerou-se o valor médio entre as duas medições realizadas no dia 22 de março de 2016 para definição do perfil de linha d'água em cada margem do rio, conforme apresentado na TABELA 10.

TABELA 10 – PERFIL DA LINHA D'ÁGUA – ADOTADO PARA CALIBRAÇÃO DOS MODELOS.

Perfil Linha d'Água – Braço Direito		Perfil Linha d'Água – Braço Esquerdo	
Ponto NA	NA	Ponto NA	NA
42	63,276	20	63,251
41	63,369	19	63,205
39	63,107	18	63,178
38	63,105	17	62,603
37	61,379	16	62,446
36	61,306	15	62,077
35	61,250	14	61,703
34	61,035	13	61,701
33	60,850	12	61,669
32	60,717	11	61,424
31	60,720	10	61,389
30	60,639	09	61,240
29	60,597	08	60,705
28	60,562	07	60,466
27	60,524	06	60,434

Perfil Linha d'Água – Braço Direito		Perfil Linha d'Água – Braço Esquerdo	
Ponto NA	NA	Ponto NA	NA
26	60,538	05	60,398
25	60,515	04	60,677
24	60,501	03	60,235
23	60,405	02	60,104
22	60,248	01	60,095
21	60,135		

FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

3.2.5 Medições de Vazão

As medições realizadas nos dias 20 e 21 de março de 2016 estão apresentadas na TABELA 11 e as medições do dia 22 de março de 2016 estão apresentadas na TABELA 12.

TABELA 11 – RESUMO DAS TRAVESSIAS COM EQUIPAMENTO ACÚSTICO - M9 - 20 E 21/03/2016

Medição	Data	Hora Inicial da Medição	Vazão por Travessia (m³/s)	Vazão Total por Medição (m³/s)	Medição	Data	Hora Inicial da Medição	Vazão por Travessia (m³/s)	Vazão Total por Medição (m³/s)	
1	20/03/2016	15:35:11	47,943	64,462	10	21/03/2016	15:20:02	100,880	93,542	
	20/03/2016	15:37:02	66,588			21/03/2016	15:22:30	91,089		
	20/03/2016	15:38:16	59,395			21/03/2016	15:24:25	93,102		
	20/03/2016	15:39:31	85,935			21/03/2016	15:26:18	84,038		
	20/03/2016	15:40:43	46,775			21/03/2016	15:28:17	99,930		
	20/03/2016	15:41:51	80,137			21/03/2016	15:30:15	83,842		
2	21/03/2016	12:01:49	55,641	39,761		21/03/2016	15:32:19	102,634		423,763
	21/03/2016	12:03:44	35,176			21/03/2016	15:34:11	91,812		
	21/03/2016	12:04:54	24,802			21/03/2016	15:36:11	100,640		
	21/03/2016	12:06:10	43,426			21/03/2016	15:38:12	86,771		
3	21/03/2016	12:16:48	293,540	321,569		21/03/2016	15:40:00	102,250		
	21/03/2016	12:19:00	380,844		21/03/2016	15:42:00	85,513			
	21/03/2016	12:20:44	315,096		11	21/03/2016	15:58:43	426,773		
	21/03/2016	12:22:02	296,797			21/03/2016	16:02:23	431,660		
4	21/03/2016	12:32:16	135,142	104,973		21/03/2016	16:04:58	420,520		
	21/03/2016	12:35:07	89,208			21/03/2016	16:07:03	426,157		
	21/03/2016	12:37:33	110,225			21/03/2016	16:09:00	402,153		
	21/03/2016	12:38:49	85,316			21/03/2016	16:11:36	424,171		
5	21/03/2016	13:03:23	108,667	92,215		21/03/2016	16:14:04	422,320		
	21/03/2016	13:05:21	74,692			21/03/2016	16:16:29	429,895		
	21/03/2016	13:06:45	106,489			21/03/2016	16:19:11	416,281		

Medição	Data	Hora Inicial da Medição	Vazão por Travessia (m³/s)	Vazão Total por Medição (m³/s)
	21/03/2016	13:10:31	79,011	
6	21/03/2016	13:31:10	82,133	90,690
	21/03/2016	13:33:23	85,781	
	21/03/2016	13:34:56	81,244	
	21/03/2016	13:36:22	113,602	
7	21/03/2016	13:53:24	423,860	382,733
	21/03/2016	13:56:11	334,881	
	21/03/2016	13:57:59	386,743	
	21/03/2016	13:59:44	377,572	
	21/03/2016	14:01:31	419,140	
8	21/03/2016	14:07:08	354,204	327,899
	21/03/2016	14:17:06	275,572	
	21/03/2016	14:19:44	413,570	
	21/03/2016	14:21:14	235,578	
9	21/03/2016	14:22:58	386,875	105,036
	21/03/2016	14:38:09	106,764	
	21/03/2016	14:40:25	95,478	
	21/03/2016	14:41:54	125,222	
	21/03/2016	14:45:56	92,680	

Medição	Data	Hora Inicial da Medição	Vazão por Travessia (m³/s)	Vazão Total por Medição (m³/s)
	21/03/2016	16:21:32	438,360	
	21/03/2016	16:24:13	419,730	
	21/03/2016	16:26:35	427,138	
12	21/03/2016	16:38:07	409,303	399,518
	21/03/2016	16:43:06	384,134	
	21/03/2016	16:46:09	410,868	
	21/03/2016	16:49:19	386,311	
	21/03/2016	16:52:05	409,148	
	21/03/2016	16:54:58	400,097	
	21/03/2016	16:57:36	406,092	
	21/03/2016	17:00:48	385,384	
	21/03/2016	17:03:45	405,800	
	21/03/2016	17:06:57	392,158	
	21/03/2016	17:09:57	414,568	
	21/03/2016	17:12:58	390,356	

FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

TABELA 12 – RESUMO DAS TRAVESSIAS COM EQUIPAMENTO ACÚSTICO - M9 - 22/03/2016

Medição	Data	Hora Inicial da Medição	Vazão por Travessia (m³/s)	Vazão Total por Medição (m³/s)
1	22/03/2016	12:02:38	67,528	64,891
	22/03/2016	12:09:22	58,379	
	22/03/2016	12:11:52	57,730	
	22/03/2016	12:18:41	72,687	
	22/03/2016	12:21:32	64,000	
	22/03/2016	12:26:44	69,023	
2	22/03/2016	12:51:48	79,750	77,591
	22/03/2016	12:55:06	73,971	
	22/03/2016	12:57:29	81,234	
	22/03/2016	13:00:04	73,524	
	22/03/2016	13:07:43	83,927	
	22/03/2016	13:10:16	73,141	
3	22/03/2016	13:39:58	85,837	82,046
	22/03/2016	13:43:27	77,195	
	22/03/2016	13:46:06	88,027	
	22/03/2016	13:48:52	75,976	
	22/03/2016	13:51:31	87,999	

Medição	Data	Hora Inicial da Medição	Vazão por Travessia (m³/s)	Vazão Total por Medição (m³/s)
5	22/03/2016	14:51:28	89,229	84,637
	22/03/2016	14:54:39	81,011	
	22/03/2016	14:57:23	93,029	
	22/03/2016	15:00:13	81,917	
	22/03/2016	15:02:38	86,239	
	22/03/2016	15:05:24	76,394	
6	22/03/2016	15:39:48	75,428	80,102
	22/03/2016	15:43:05	76,760	
	22/03/2016	15:45:29	86,993	
	22/03/2016	15:48:10	76,606	
	22/03/2016	15:55:57	86,646	
	22/03/2016	15:58:36	78,178	
7	22/03/2016	16:08:43	88,170	80,715
	22/03/2016	16:12:17	77,390	
	22/03/2016	16:20:03	87,068	
	22/03/2016	16:22:30	75,024	
	22/03/2016	16:25:01	86,470	

Medição	Data	Hora Inicial da Medição	Vazão por Travessia (m³/s)	Vazão Total por Medição (m³/s)
	22/03/2016	13:54:19	77,241	
4	22/03/2016	14:16:38	88,915	84,510
	22/03/2016	14:20:01	76,759	
	22/03/2016	14:22:35	92,353	
	22/03/2016	14:25:25	80,567	
	22/03/2016	14:28:12	93,402	
	22/03/2016	14:30:58	76,811	
	22/03/2016	14:33:36	89,320	
	22/03/2016	14:36:25	77,956	

Medição	Data	Hora Inicial da Medição	Vazão por Travessia (m³/s)	Vazão Total por Medição (m³/s)
	22/03/2016	16:27:46	70,168	

FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

Após a análise das vazões medidas com o ADCP verificou-se uma considerável oscilação das medições de vazão para o dia 21/03/2016 (TABELA 11). Portanto, optou-se por adotar as leituras do dia 22/03/2016 (TABELA 12) para aferição do modelo, pois estas apresentaram menor variação de vazão.

As leituras do ADCP do dia 22/03/2016 foram realizadas somente no braço direito do rio e seus valores variaram aproximadamente entre 65 m³/s a 85 m³/s conforme apresentado na TABELA 12. Sendo adotado para a calibração do braço direito a vazão de 82 m³/s, correspondente à média das medições realizadas no braço direito.

Salienta-se que no cálculo do valor médio foi descartada a medição 1 (64,891 m³/s), pois esta apresentou uma diferença superior a 20% em relação às demais medições do dia 22/03/2016.

3.2.6 Vazão Total para Calibração

A vazão total utilizada para calibração dos modelos reduzido e computacionais, foi estimada pela leitura da de cotas a jusante da ilha no dia 22/03/16 entre o período das 14:20 às 16:20 que corresponde à 454 m³/s, conforme apresentado na TABELA 13.

TABELA 13 – LEITURA DE COTAS NA RÉGUA JI (JUSANTE ILHA) – 22/03/2016

Leitura (m)	Cota (m)	Hora	Vazão (m ³ /s)
2,58	60,01	14:20	454
2,58	60,01	14:30	454
2,58	60,01	14:40	454
2,58	60,01	14:50	454
2,58	60,01	15:00	454
2,58	60,01	15:10	454
2,58	60,01	15:20	454
2,58	60,01	15:30	454
2,58	60,01	15:40	454
2,58	60,01	15:50	454
2,58	60,01	16:00	454
2,58	60,01	16:10	454
2,58	60,01	16:20	454

Nota: Cota do zero da régua, equivalente a 57,429 m, obtida a partir da cota de RN do posto, determinada pelo levantamento de campo e nivelamento geométrico.

FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

Portanto, a divisão da vazão entre o braço esquerdo e braço direito, para aferição do leito do modelo, foi realizada pela simples subtração da vazão total (454 m³/s) obtida pela curva-chave e a vazão medida pelo ADCP no braço direito, resultando em 82 m³/s no braço direito e 372 m³/s no braço esquerdo.

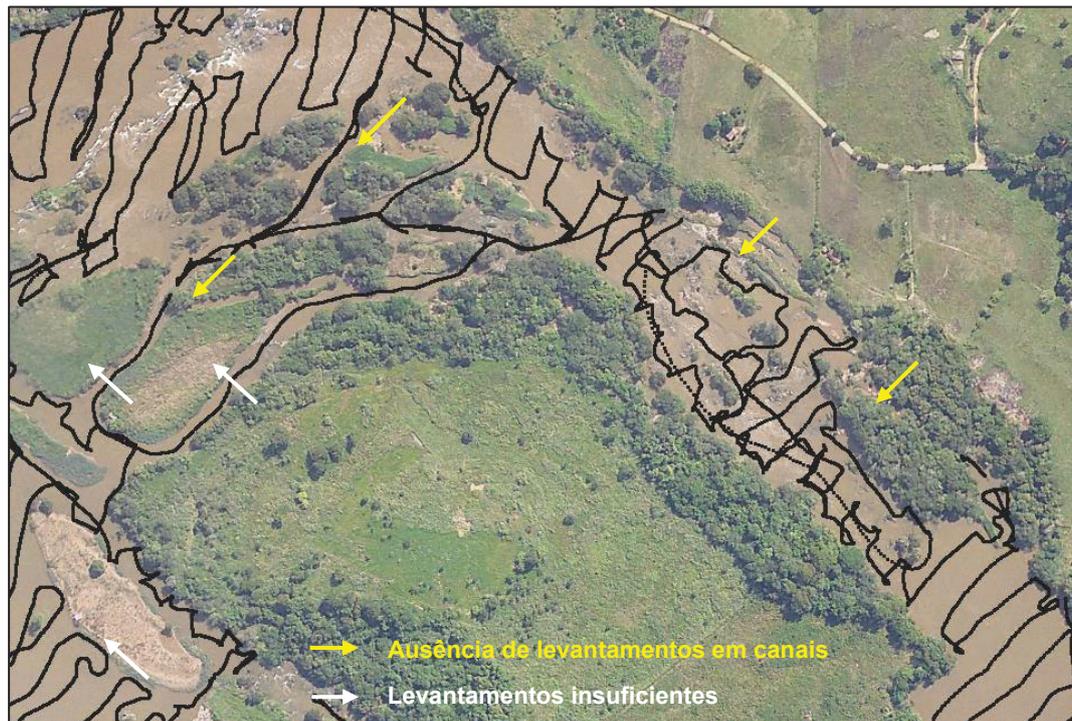
3.3 QUALIDADE DOS LEVANTAMENTOS TOPOBATIMÉTRICOS

A representação computacional da geometria da calha principal e das planícies do curso de água em análise se deu através da utilização de dados provenientes de levantamentos topográficos e batimétricos. Cabe lembrar que a qualidade dos levantamentos topobatimétricos, no que diz respeito à representação do leito do curso de água, sobretudo em uma região composta de diversos pontos de controle do escoamento e ilhas, facilmente detectáveis por meio de uma análise visual de imagens de satélite, está diretamente relacionada à precisão dos resultados da modelagem hidráulica.

A FIGURA 19 ilustra um trecho do levantamento batimétrico sobreposto a uma imagem do rio, na qual é possível observar algumas regiões cujo levantamento pode ser caracterizado como insuficiente. É possível perceber que alguns trechos de canais

e bancos de areia não foram bem representados, deste modo fica a cargo do modelador a interpretação e tomada de decisão em ajustes nos levantamentos de campo, principalmente nos trechos de clara evidência, de modo a garantir um bom resultado nas simulações.

FIGURA 19 – BATIMETRIA SOBREPOSTA A UMA IMAGEM DO TRECHO DO RIO.



FONTE: O Autor (2017)

3.4 CLASSIFICAÇÃO E COMPOSIÇÃO DO MODELO DE TERRENO

Complementarmente à imposição das condições de contorno adequadas, as características do terreno do trecho de interesse tornam-se fundamentais para uma reprodução satisfatória do escoamento. Nos cálculos de escoamentos, uma grande dificuldade que se apresenta diz respeito à avaliação dos fatores de resistência, responsáveis por traduzirem a perda de carga existente. A contabilização do fator de resistência, comumente denominado de coeficiente de rugosidade é representado no HEC-RAS e no RiverFlow2D[®] através do coeficiente de Manning.

Através de registros fotográficos e imagens de satélites, foram identificados ao longo do domínio modelado diversos tipos uso do solo que, associados às tabelas presentes na literatura especializada, torna-se um método considerado satisfatório e

comumente utilizado na prática da engenharia hidráulica para auxílio na estimativa dos coeficientes de rugosidade de trechos fluviais.

Foram identificadas regiões que variam de bancos de areia até afloramentos rochosos existentes ao longo do curso de água, com o auxílio do MultiSpec, um sistema de processamento para análise interativa de dados de imagem multiespectrais de observação da Terra.

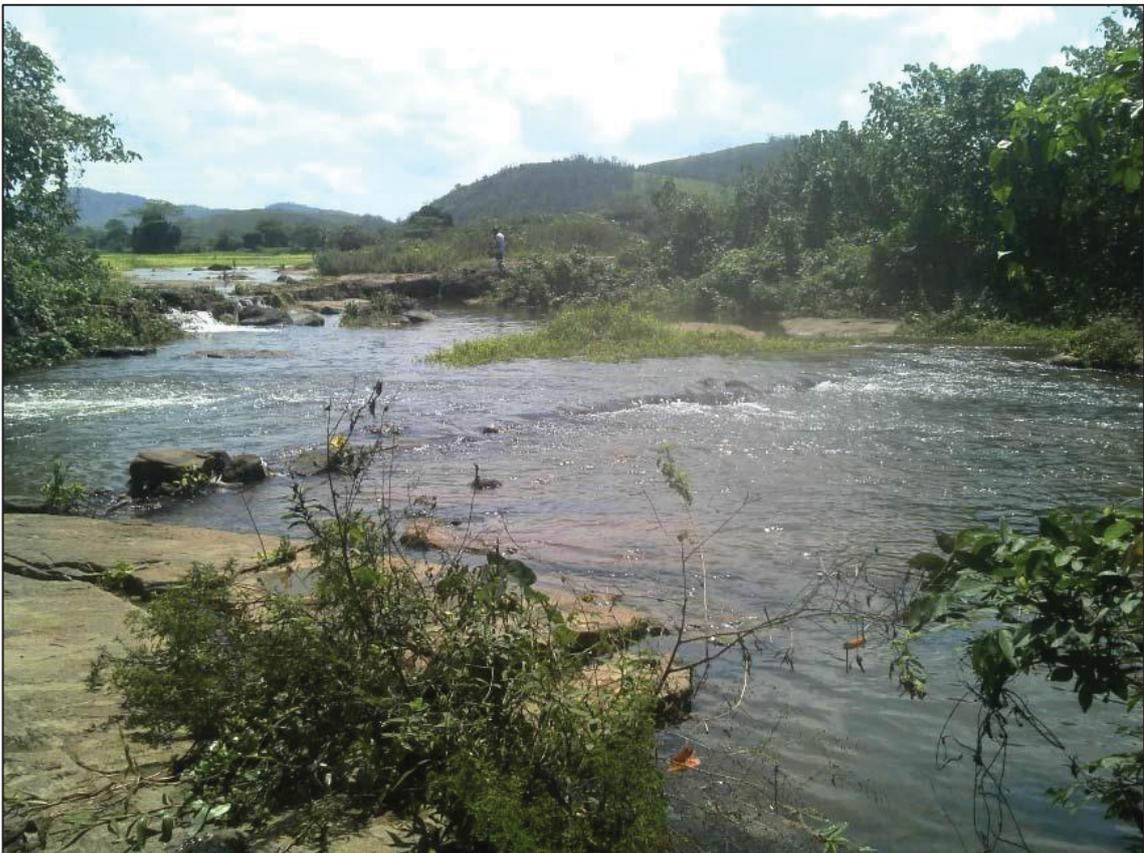
A análise dos dados de imagem multiespectrais pode ser realizada por diversas abordagens, no entanto, pode-se aplicar uma lista genérica com as seguintes etapas de processamento:

- **Análise dos Dados:** Primeiramente é necessário algum tipo de exibição de imagem. A análise de um conjunto de dados, desde a qualidade até as características gerais da imagem, geralmente é realizada através da visualização dos dados em formato multibanda preto/branca e imagem em cores.
- **Definição de Classes:** Deve ser realizada uma definição da classe de material a ser identificada ou o conjunto de classes a serem discriminadas na imagem. Muitas vezes isso é realizado rotulando-se uma pequena amostra dos pixels dos dados em si, como representante das classes de interesse. O processo de análise torna-se então uma extrapolação dessas amostras, chamadas de amostras de classes ou amostras de projeto, que servirão de base para todo o conjunto de dados existente na imagem.
- **Determinação de Características:** Os recursos específicos a serem utilizados na análise devem ser identificados ou calculados. Isso pode ser simplesmente um processo de seleção de um subconjunto das faixas espectrais disponíveis, ou pode haver algum processo de cálculo para combinar as bandas de alguma forma útil.
- **Análise do Conjunto de Dados:** O algoritmo de análise específica é aplicado ao conjunto de dados para realizar a identificação ou discriminação desejada em relação às características determinadas que foram identificadas ou calculadas.
- **Avaliação de Resultados:** Meios quantitativos e qualitativos são utilizados para determinar a qualidade e as características dos resultados obtidos com os conjuntos de dados.

Cada pixel deverá ser atribuído a uma classe com base em um critério de julgamento relativo às classes definidas para a imagem. Portanto, as classes devem ser bem definidas para que o software realize corretamente uma divisão lógica das classes, atribuindo-se todos os pixels da imagem, com exceção a um pequeno número de pixels que será condicionado por um limite entre as classes definidas.

A FIGURA 20 e FIGURA 21 apresentam de maneira ilustrativa os registros fotográficos de algumas tipologias de uso do solo identificadas na região do trecho de interesse.

FIGURA 20 – REGISTROS DE AFLORAMENTOS ROCHOSOS NA REGIÃO DO BRAÇO DIREITO DA ILHA.



FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

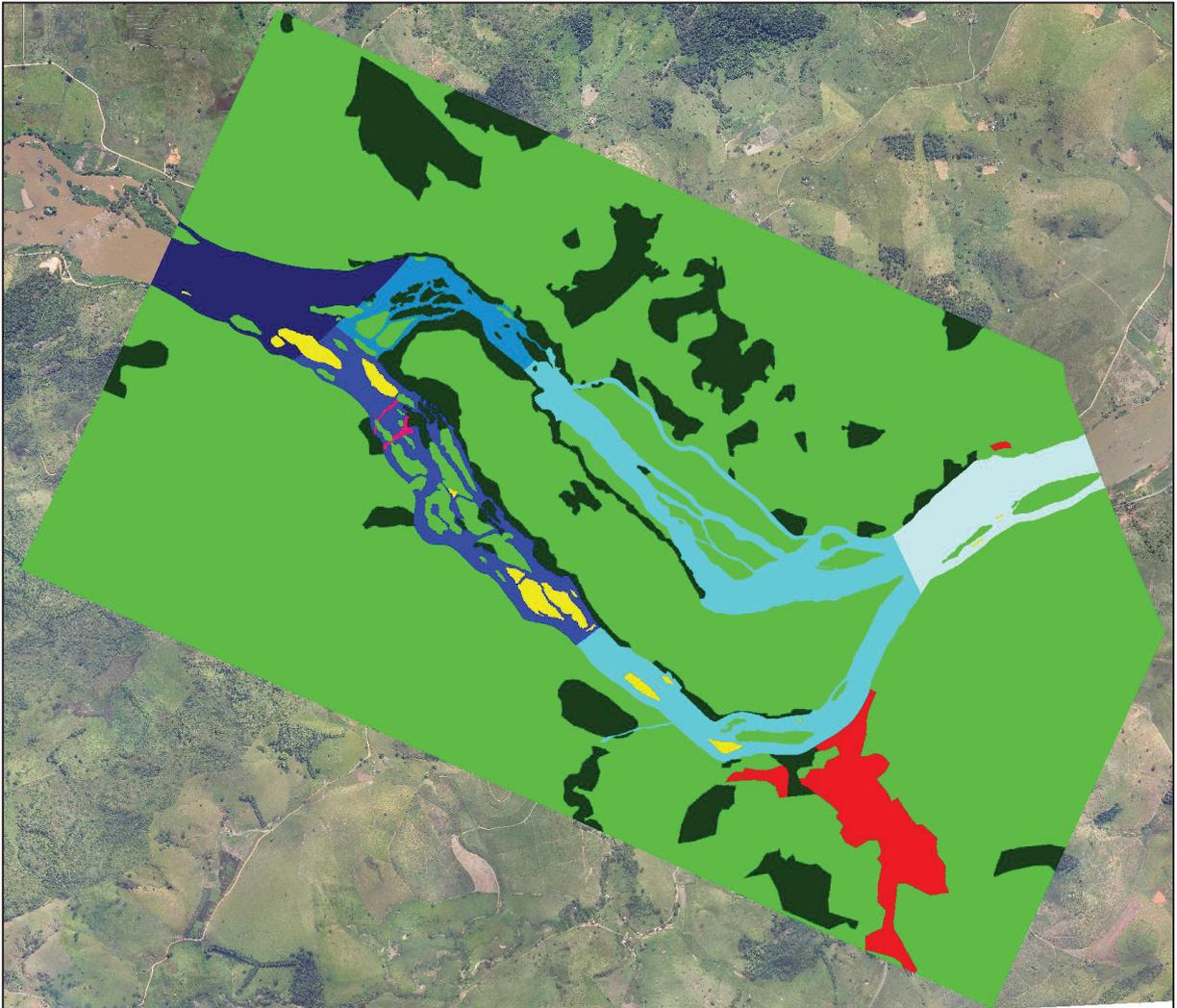
FIGURA 21 – REGISTROS DE VEGETAÇÃO DENSA AO LONGO DA ÁREA DE ESTUDO.



FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

A FIGURA 22 apresenta a classificação e composição do modelo de terreno a ser utilizado nessa dissertação.

FIGURA 22 – COMPOSIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO MODELO DE TERRENO PARA O TRECHO ESTUDADO.



Legenda da Classificação e Composição do Modelo de Terreno			
	Afloramentos Rochosos		Curso d'água Médio
	Banco de Areia		Curso d'água Montante
	Curso d'água Direita		Urbanização
	Curso d'água Esquerda		Vegetação Densa
	Curso d'água Jusante		Vegetação Rasteira

FONTE: O Autor (2017).

Em função da FIGURA 22 e com base na TABELA 2 (CHOW, 1959) que apresenta a compilação de coeficientes de Manning para os tipos mais comuns de canais, apresenta-se a seguir a justificativa da composição do modelo de terreno para

início do processo de calibração dos modelos computacionais unidimensional (HEC-RAS) e bidimensional (RiverFlow2D[®]).

Para afloramentos rochosos, na região do braço direito da ilha, foi considerado um coeficiente de Manning igual a 0,500, sendo este relativamente alto em relação aos coeficientes encontrados na literatura. Esta é uma forma de representar a grande perda de carga para uma região morfologicamente alterada e sem disponibilidade de levantamento batimétrico detalhado. Para chegar nesse coeficiente, baseando-se na sensibilidade dos modelos computacionais desta dissertação, foram realizados testes preliminares para aproximação da vazão e níveis observados em campo na região do braço direito da ilha.

Para banco de areia foi considerado um coeficiente de Manning igual a 0,040, ou seja, enquadrando-se em canal principal (1) do tipo c (limpo, sinuoso, algumas piscinas e bancos de areia).

Para cursos d'água (montante, esquerda, direita, médio e jusante) foram considerados coeficientes de Manning igual a 0,035, ou seja, enquadrando-se em canal principal (1) entre tipo a (limpo, regular, cheio e de fundo regular) e b (pedras e vegetação).

Para urbanização foi considerado um coeficiente de Manning igual a 0,065, ou seja, enquadrando-se em uma rugosidade relativa às margens e adjacente ao canal principal (2) do tipo c (arbustos) com características entre 3 e 4 (arbustos pequenos a médio porte).

Para vegetação densa foi considerado um coeficiente de Manning igual a 0,100, ou seja, enquadrando-se em margens e adjacente ao canal principal (2) do tipo d (árvores de grande porte) com característica 4 (arvoredo denso, algumas árvores baixas, pouca vegetação rasteira, estagio caudaloso sob os ramos).

Para vegetação rasteira foi considerado um coeficiente de Manning igual a 0,045, ou seja, enquadrando-se em margens e adjacente ao canal principal (2) do tipo b (áreas cultivadas) com característica 3 (vegetação rasteira não alinhada).

4 RESULTADOS

4.1 MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO

4.1.1 Características do Modelo Hidráulico Reduzido

As características do trecho de rio permitiram a construção do modelo na escala geométrica 1:100, compatíveis com as necessidades do estudo. A área ocupada pelo modelo é de 681,44 m², incluindo as áreas destinadas à alimentação e à restituição do fluxo.

O modelo foi construído sobre uma laje de concreto armado, dentro das instalações do laboratório de hidráulica. Nessa laje foram demarcados, com uso de estação total, o sistema de coordenadas, limites do modelo e referências de nível. Como referência de nível foi atribuída à laje a El. 0,00 m no protótipo.

Na FIGURA 23 apresenta-se o arranjo geral do modelo hidráulico reduzido.

FIGURA 23 – ARRANJO GERAL DO MODELO REDUZIDO – VISTA DE JUSANTE.



FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

FIGURA 24 – ARRANJO GERAL DO MODELO REDUZIDO – VISTA DE MONTANTE.



FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

O relevo natural da região foi reproduzido a partir da implantação de seções transversais com espaçamento de 30 metros desenhadas e recortadas em chapas de fibra de madeira niveladas com nível ótico FIGURA 25.

FIGURA 25 – SEÇÕES TRANSVERSAIS COM ESPAÇAMENTO DE 30 METROS.



FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

Os espaços vazios entre as seções transversais foram preenchidos com pedra brita e o acabamento da superfície foi executado com argamassa composta por areia e cimento alisado FIGURA 26. Eventuais fissuras sobre a capa de argamassa foram recobertas com impermeabilizante flexível elástico bi-componente para garantir a estanqueidade.

FIGURA 26 – PREENCHIMENTO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS COM BRITA E ARGAMASSA.



FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

4.1.2 Calibração do Modelo Hidráulico Reduzido

A calibração do modelo tem o objetivo de realizar ajustes no leito do rio para que o escoamento e os níveis de água do modelo fiquem semelhantes aos observados em campo.

Para aferição do modelo, utilizaram-se as seguintes condições de contorno:

- Perfis de linha de água, conforme apresentado no item 3.2.4;
- Vazão total de 454 m³/s, sendo 82 m³/s no braço direito e 372 m³/s no braço esquerdo, conforme apresentado no item 3.2.6;
- Coeficientes de Manning, conforme apresentado no item 3.4.

A calibração do modelo consistiu na imposição de rugosidade artificial (pedregulho) no leito e nas margens do rio, visando a obtenção dos níveis de água ao longo do modelo equivalentes aos observados no protótipo, com o grau de precisão suficiente à obtenção de resultados satisfatórios nos estudos a serem desenvolvidos.

Na FIGURA 27, apresenta-se a imposição de macro rugosidade, para simular a obstrução do fluxo em regiões com vegetação muito densa. Esta imposição foi feita pela sobreposição da orto imagem sobre a base cartográfica do modelo e implantado no modelo com auxílio de estação total.

FIGURA 27 – MACRO RUGOSIDADE PARA SIMULAR VEGETAÇÃO DENSA.



FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

Na FIGURA 28, apresenta-se a divisão dos braços esquerdo e direito do rio, através da implantação de um muro divisor a montante da ilha, possibilitando uma calibração independente dos perfis de linha de água dos braços esquerdo e direito do modelo.

FIGURA 28 – DIVISÃO DA VAZÃO DOS BRAÇOS ESQUERDO E DIREITO DO RIO.



FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

Na FIGURA 29, exemplifica-se a imposição de uma rugosidade uniforme sobre toda a extensão do modelo. O material utilizado no modelo foi pedrisco com diâmetro variando entre 2,8 mm a 4,8 mm com média de 3,8 mm.

FIGURA 29 – RUGOSIDADE CARACTERIZADA POR PEDRISCO COM DIÂMETRO DE 2,8 MM A 4,8 MM.



FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

Na FIGURA 30, exemplifica-se a imposição de uma rugosidade adicional de pedrisco com diâmetro de 4,8 mm a 9,5 mm nas imediações da ilha somente no braço esquerdo.

FIGURA 30 – RUGOSIDADE CARACTERIZADA POR PEDRISCO COM DIÂMETRO DE 4,8 MM A 9,5 MM.



FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

As Intervenções, tais como, raspagem de rugosidade e rebaixamento do leito, localizadas em controles hidráulicos são necessárias para calibração e aproximação dos níveis de água no modelo, conforme apresentado na FIGURA 31.

FIGURA 31 – RASPAGEM DE RUGOSIDADE E REBAIXAMENTO DO LEITO



FONTE: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016).

4.1.2.1 Primeira Tentativa de Calibração

Corresponde à configuração inicial do leito, executado a partir dos dados topobatimétricos disponibilizados. Nessas condições, o leito do rio executado em argamassa de cimento alisada não apresentava nenhuma rugosidade adicional, somente o muro de divisão dos braços direito e esquerdo.

Os níveis de água resultantes nos pontos de números 20, 19 e 18 no braço esquerdo, resultaram mais altos do que os do protótipo. Esses resultados devem-se, provavelmente, ao controle exercido pela corredeira a jusante do ponto 18. Para os demais pontos do braço esquerdo, os níveis do modelo resultaram mais baixos que os observados em campo.

Os níveis de água nos pontos 42 ao 33 do braço direito, resultaram acima dos observados em campo. Esses níveis de água mais altos devem-se, provavelmente, aos controles exercidos pelas corredeiras existentes entre os pontos 32 e 35, bem como entre os pontos 38 e 40.

Os demais níveis observados no braço direito resultaram mais baixos que os de campo evidenciando a necessidade de aplicação de rugosidade no modelo.

4.1.2.2 Segunda Tentativa de Calibração

Tendo em vista que a maioria dos níveis de água medidos no modelo resultaram abaixo do medido em campo (exceto os afetados por controles hidráulicos) foi implantada uma rugosidade uniforme ao longo de todo o modelo. Essa rugosidade foi constituída por pedregulho com diâmetro variando entre 0,28 m a 0,48 m com média de 0,38 m, fixada com nata de cimento ao longo de toda a extensão do leito do modelo.

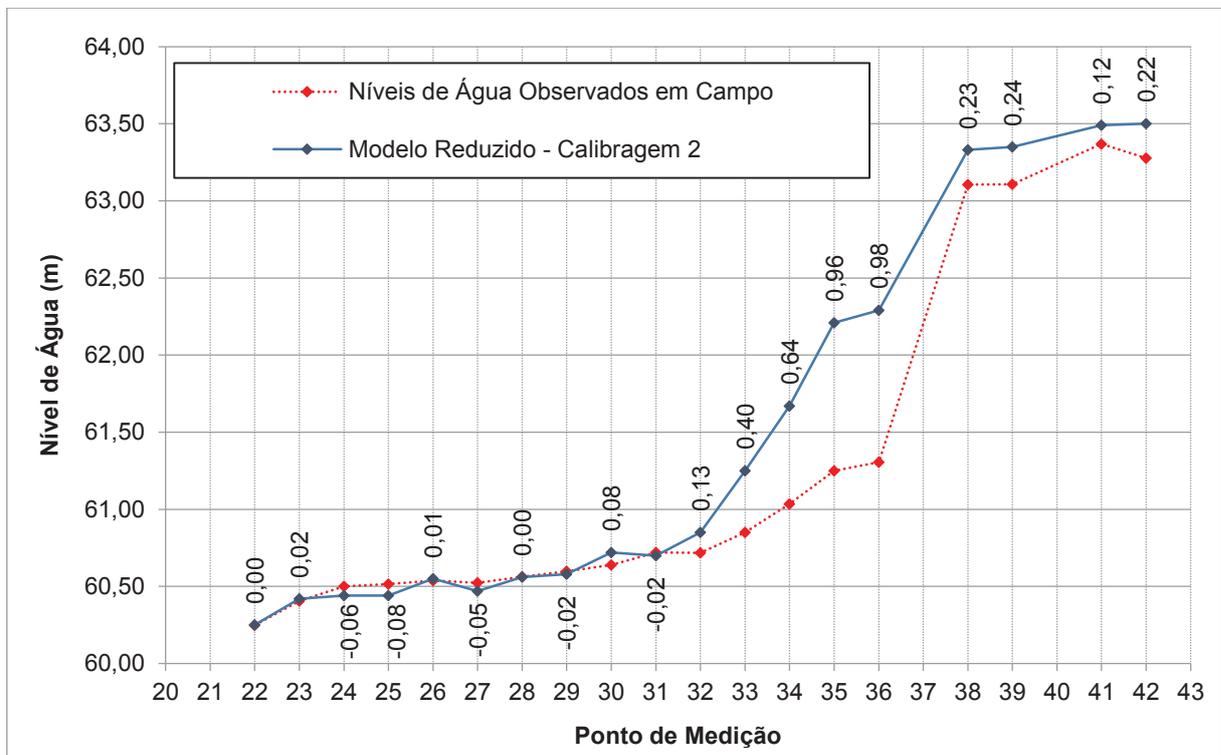
Os resultados da segunda tentativa de calibração estão apresentados na TABELA 14 e os perfis de linha d'água estão graficamente apresentados na FIGURA 32 (braço direito) e na FIGURA 33 (braço esquerdo).

TABELA 14 – RESUMO DOS RESULTADOS – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – MODELO REDUZIDO

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 2 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 2 (m)	Δh Calibração (m)
42	63,28	63,50	0,22	20	63,25	63,70	0,45
41	63,37	63,49	0,12	19	63,21	63,64	0,44
39	63,11	63,35	0,24	18	63,18	63,55	0,37
38	63,11	63,33	0,23	17	62,60	62,10	-0,50
36	61,31	62,29	0,98	16	62,45	61,92	-0,53
35	61,25	62,21	0,96	15	62,08	62,05	-0,03
34	61,04	61,67	0,64	14	61,70	61,73	0,03
33	60,85	61,25	0,40	13	61,70	61,70	0,00
32	60,72	60,85	0,13	12	61,67	61,51	-0,16
31	60,72	60,70	-0,02	11	61,42	61,50	0,08
30	60,64	60,72	0,08	10	61,39	61,45	0,06
29	60,60	60,58	-0,02	9	61,24	61,10	-0,14
28	60,56	60,56	0,00	8	60,71	60,67	-0,03
27	60,52	60,47	-0,05	7	60,47	60,61	0,14
26	60,54	60,55	0,01	6	60,43	60,38	-0,05
25	60,52	60,44	-0,08	5	60,40	60,31	-0,09
24	60,50	60,44	-0,06	3	60,24		
23	60,41	60,42	0,02	2	60,10		
22	60,25	60,25	0,00	1	60,10		
21	60,14	Modelo não contempla					
REMQ		0,3731		REMQ		0,2678	

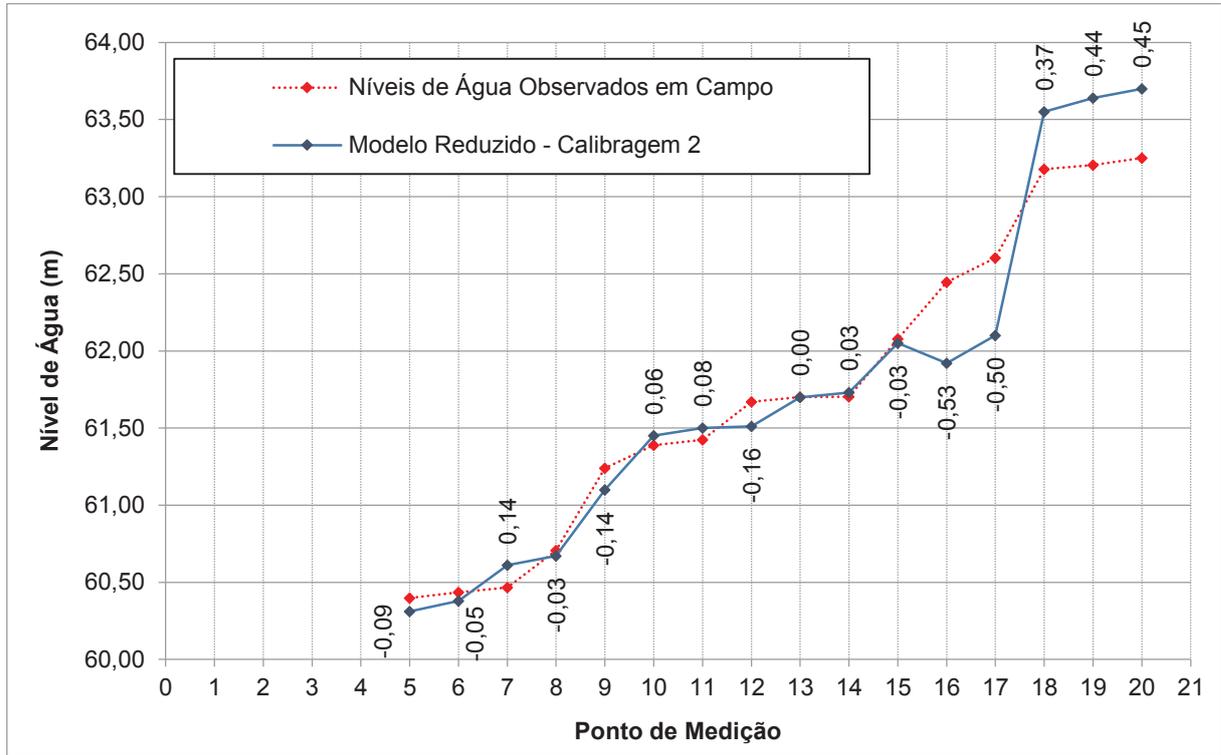
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 32 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – MODELO REDUZIDO



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 33 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – MODELO REDUZIDO



FONTE: O Autor (2017).

Os resultados obtidos nessa etapa conduziram a níveis de água semelhantes aos observados em campo, com exceção dos seguintes pontos:

- 16 e 17, que permaneceram 50 cm abaixo dos níveis de água observados em campo;
- 42 a 33 que eram afetados por controles hidráulicos e resultaram mais altos que os observados em campo de 40 cm a 98 cm);
- 20 a 18 que eram afetados por controles hidráulicos e resultaram aproximadamente 40 cm acima dos níveis observados em campo;

4.1.2.3 Terceira Tentativa de Calibração

Considerando que os pontos que ainda resultavam mais altos que os observados em campo eram mais afetados por controles hidráulicos, decidiu-se realizar intervenções localizadas nas corredeiras imediatamente a jusante dos pontos com nível de água mais alto. Essas intervenções foram realizadas mediante a

raspagem de rugosidade e pequenas intervenções no leito (rebaixamento da ordem de 20 cm – 2mm no modelo).

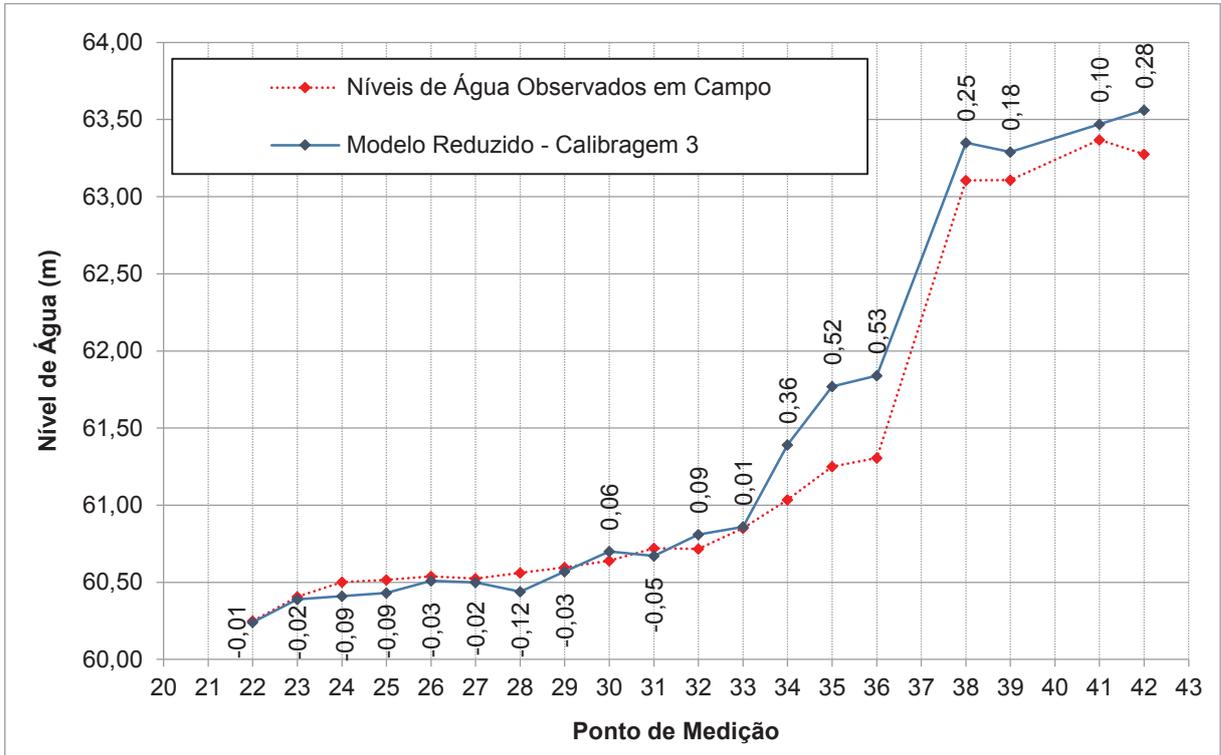
Os resultados da terceira tentativa de calibração estão apresentados na TABELA 15 e os perfis de linha d'água estão graficamente apresentados na FIGURA 34 (braço direito) e FIGURA 35 (braço esquerdo).

TABELA 15 – RESUMO DOS RESULTADOS – TERCEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – MODELO REDUZIDO

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 3 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 3 (m)	Δh Calibração (m)
42	63,28	63,56	0,28	20	63,25	63,60	0,35
41	63,37	63,47	0,10	19	63,21	63,56	0,36
39	63,11	63,29	0,18	18	63,18	63,43	0,25
38	63,11	63,35	0,25	17	62,60	62,34	-0,26
36	61,31	61,84	0,53	16	62,45	62,11	-0,34
35	61,25	61,77	0,52	15	62,08	62,05	-0,03
34	61,04	61,39	0,36	14	61,70	61,59	-0,11
33	60,85	60,86	0,01	13	61,70	61,64	-0,06
32	60,72	60,81	0,09	12	61,67	61,57	-0,10
31	60,72	60,67	-0,05	11	61,42	61,48	0,06
30	60,64	60,70	0,06	10	61,39	61,36	-0,03
29	60,60	60,57	-0,03	9	61,24	61,01	-0,23
28	60,56	60,44	-0,12	8	60,71	60,64	-0,06
27	60,52	60,50	-0,02	7	60,47	60,58	0,11
26	60,54	60,51	-0,03	6	60,43	60,37	-0,06
25	60,52	60,43	-0,09	5	60,40	60,28	-0,12
24	60,50	60,41	-0,09	3	60,24	Modelo não contempla	
23	60,41	60,39	-0,02	2	60,10		
22	60,25	60,24	-0,01	1	60,10		
21	60,14	Modelo não contempla					
REMQ		0,2176		REMQ		0,1957	

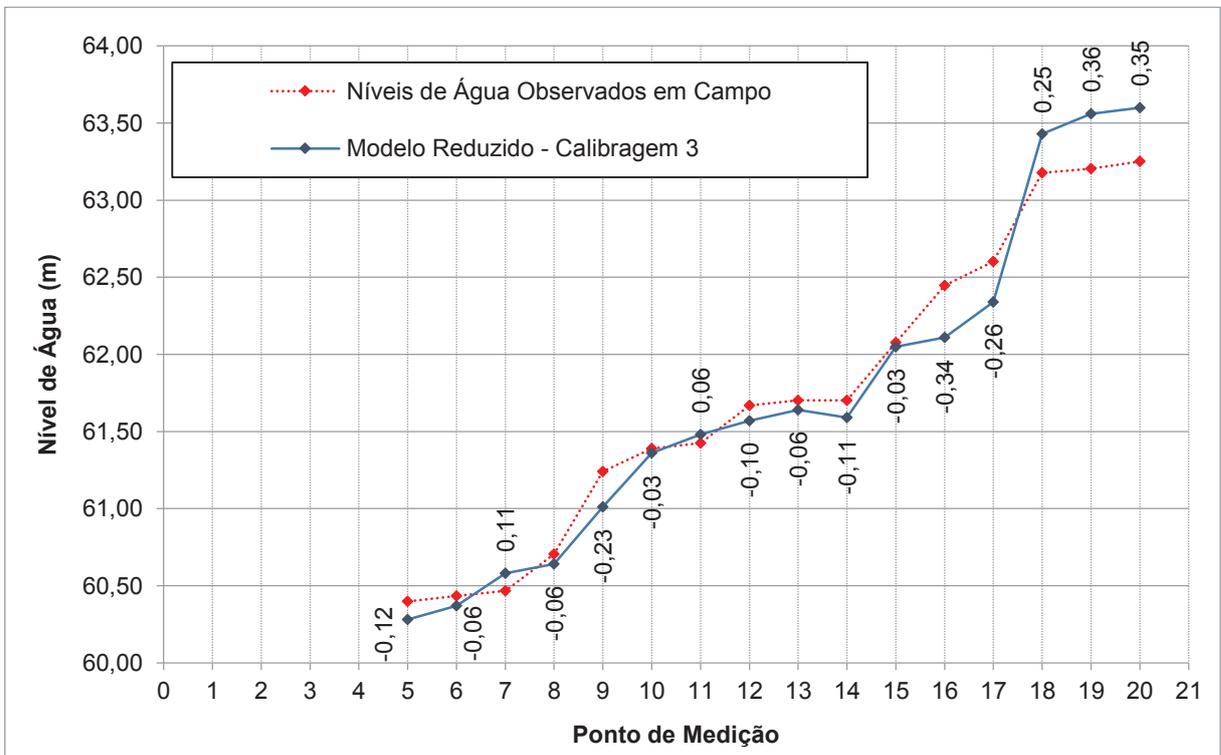
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 34 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – TERCEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – MODELO REDUZIDO



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 35 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – TERCEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – MODELO REDUZIDO



FONTE: O Autor (2017).

De uma maneira geral os resultados da calibração 4 foram satisfatórios sendo as maiores diferenças da ordem de 0,10 m em relação à terceira calibração. Observou-se que os níveis do braço esquerdo apresentaram uma leve queda e os do braço direito um pequeno acréscimo, indicando que após a remoção do muro divisor ocorreu um pequeno desvio maior de vazão para o braço direito.

Verificou-se que os níveis de água na região entre o braço esquerdo e a restituição do modelo foram similares aos observados em campo, com diferença máxima da ordem de 0,13 m na calha principal, exceto pelos pontos 9 e 14 que apresentaram níveis aproximadamente 0,25 m mais baixos.

4.1.3 Resultados da Calibração do Modelo Hidráulico Reduzido

Durante a campanha de campo foi possível observar diversos aspectos hidráulicos e da morfologia local da área reproduzida no modelo, como distribuição de vazão na região de alimentação, leito rochoso, vegetação nas margens, controles hidráulicos e corredeiras. Essas informações foram fundamentais para a calibração do modelo hidráulico reduzido.

O muro divisor do braço direito e esquerdo possibilitou uma calibração independente dos braços do modelo e impediram uma distribuição de vazão inadequada durante o processo de calibração.

O resultado da terceira tentativa de calibração (com o muro divisor implantado) mostrou que a região do braço esquerdo e a restituição do modelo apresentou níveis de água similares aos observados no campo, com diferença máxima da ordem de 0,12 m na calha principal.

Embora tenha se verificado a ocorrência de níveis de água mais altos no braço direito, especialmente na região entre os pontos 34 a 36, optou-se por aceitar os resultados evitando intervenções mais bruscas na batimetria.

Tendo em vista os trabalhos realizados considera-se que o modelo está adequado e apto para realizar a análise comparativa entre os modelos computacionais uni e bidimensionais.

4.2 MODELO COMPUTACIONAL UNIDIMENSIONAL (HEC-RAS)

As simulações hidráulicas computacionais foram desenvolvidas no ambiente do modelo HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*) versão 5.0.3, produzido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE).

4.2.1 Características do Modelo Unidimensional

O domínio modelado compreende uma região de aproximadamente 13,0 km², iniciando-se a aproximadamente 1,0 km a montante da ilha, divisor físico das águas do rio, e se estende até uma seção localizada a aproximadamente 1,0 km a jusante da ilha supracitada.

FIGURA 36 – LIMITE DE MARGENS E SEÇÕES AO LONGO DO MODELO.



FONTE: O Autor (2017).

Conforme apresentado na FIGURA 36, definiu-se o limite das margens ao longo do modelo (destacado em vermelho) e limite das seções a serem processadas

(destacado em preto). Para a modelagem no HEC-RAS, devido à existência de uma ilha no rio estudado, foi necessário dividir em quatro (4) trechos.

- Trecho 1 – Montante da ilha;
- Trecho 2 – Braço direito da ilha;
- Trecho 3 – Braço esquerdo da ilha;
- Trecho 4 – Jusante da ilha.

Com o auxílio da ferramenta HEC-Geo-RAS, foram criadas seções distanciadas em 5 metros ao longo dos quatro (4) trechos de rio. Muitas das seções criadas ficaram sobrepostas em trechos curvos, ou seja, foram necessários ajustes manuais para que as seções não apresentassem interseções entre si.

Na FIGURA 37, apresenta-se a localização das seções ao longo o modelo após a limitação das seções e os ajustes necessários em trechos curvos.

FIGURA 37 – LOCALIZAÇÃO DAS SEÇÕES AO LONGO DO MODELO.



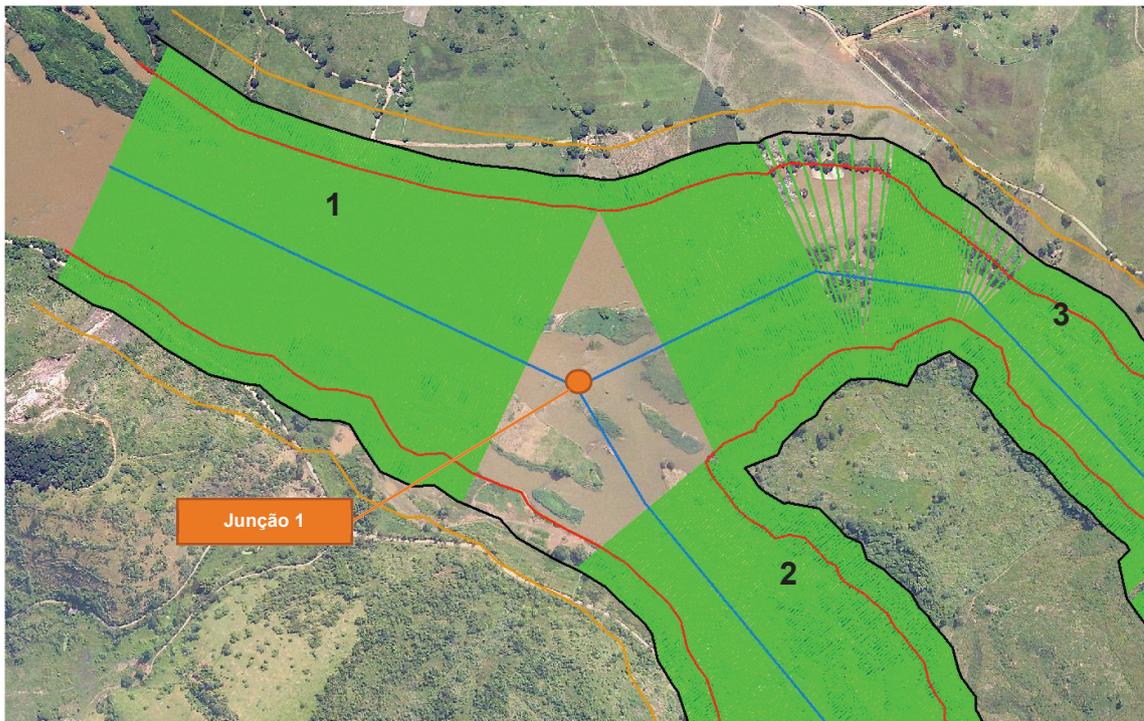
FONTE: O Autor (2017).

Após todos os ajustes, totalizaram-se 1.565 seções ao longo deste completo e refinado modelo unidimensional. As seções apresentam distância máxima de 5 metros em trechos retos e até 20 metros em trechos curvos, onde houve

necessidade de congruência. Nas regiões de junção entre trechos, foi ajustado uma distância limite entre as seções evitando a interseção entre as mesmas, resultando-se para o trecho 1 (montante) 90 metros até a junção 1 e para os trechos 2 e 3 (direito e esquerdo), respectivamente, resultando-se em 75 metros e 160 metros até a junção 2.

Na FIGURA 38 e FIGURA 39 apresentam-se os detalhes das distâncias entre as seções e as junções ao longo dos trechos do rio.

FIGURA 38 – DETALHE PARA DISTÂNCIA ENTRE AS SEÇÕES E AS JUNÇÕES.



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 39 – DETALHE PARA DISTÂNCIA ENTRE AS SEÇÕES E AS JUNÇÕES.



FONTE: O Autor (2017)

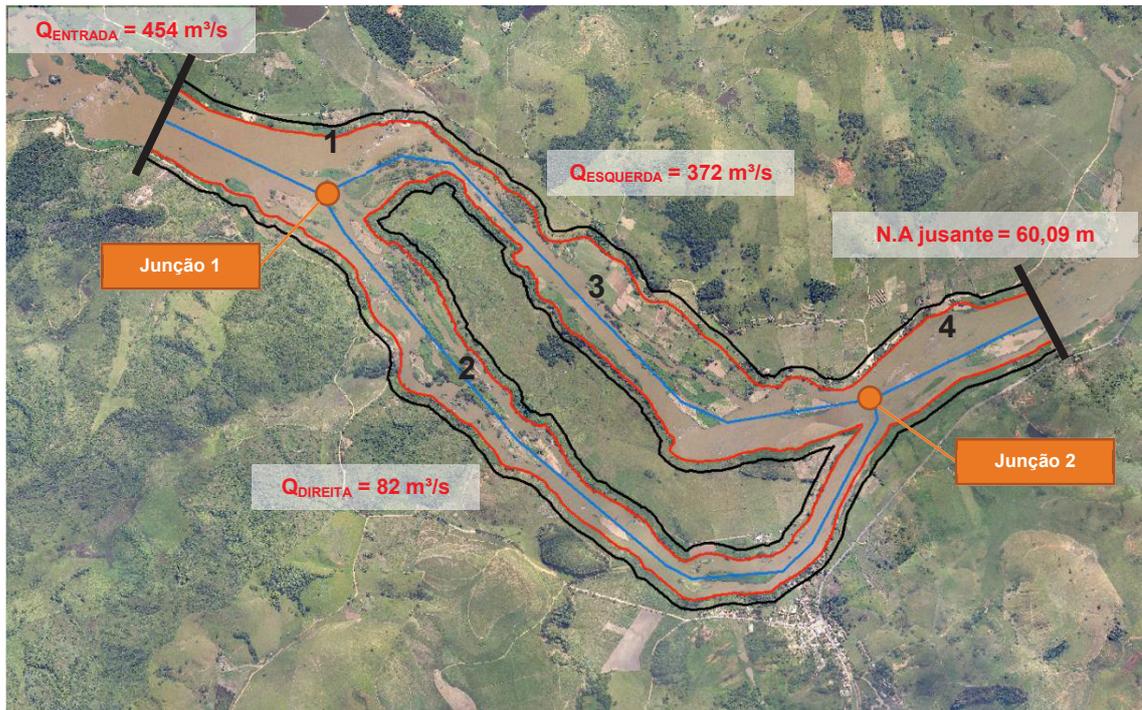
4.2.2 Calibração do Modelo Unidimensional

A etapa de calibração é essencial para a validação dos trabalhos a serem realizados no modelo e seu objetivo fundamental é aproximar, o quanto possível, as condições de escoamento resultantes do modelo matemático aos dados advindos das medições realizadas em campo, de modo a equivaler os níveis de água e velocidades em pontos homólogos de ambos os sistemas analisados.

Para aferição do modelo, utilizaram-se as seguintes condições de contorno:

- Perfis de linha de água, conforme apresentado no item 3.2.4;
- Vazão total de 454 m³/s, sendo 82 m³/s no braço direito e 372 m³/s no braço esquerdo, conforme apresentado no item 3.2.6;
- Coeficientes de Manning, conforme apresentado no item 3.4.

FIGURA 40 – CONDIÇÕES DE CONTORNO UTILIZADAS NA ETAPA DE CALIBRAÇÃO.



FONTE: O Autor (2017).

4.2.2.1 Primeira Tentativa de Calibração

Para a primeira tentativa de calibração no modelo unidimensional, adotaram-se os coeficientes de rugosidade de Manning detalhados anteriormente e apresentados na TABELA 16.

TABELA 16 – COEFICIENTES DE MANNING – PRIMEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS

Manning	
Banco de Areia	0,040
Afloramentos Rochosos	0,500
Curso d'água Jusante	0,035
Curso d'água Margem Direita	0,035
Curso d'água Margem Esquerda	0,035
Curso d'água Médio	0,035
Curso d'água Montante	0,035
Urbanização	0,065
Vegetação Densa	0,100
Vegetação Rasteira	0,045

FONTE: O Autor (2017).

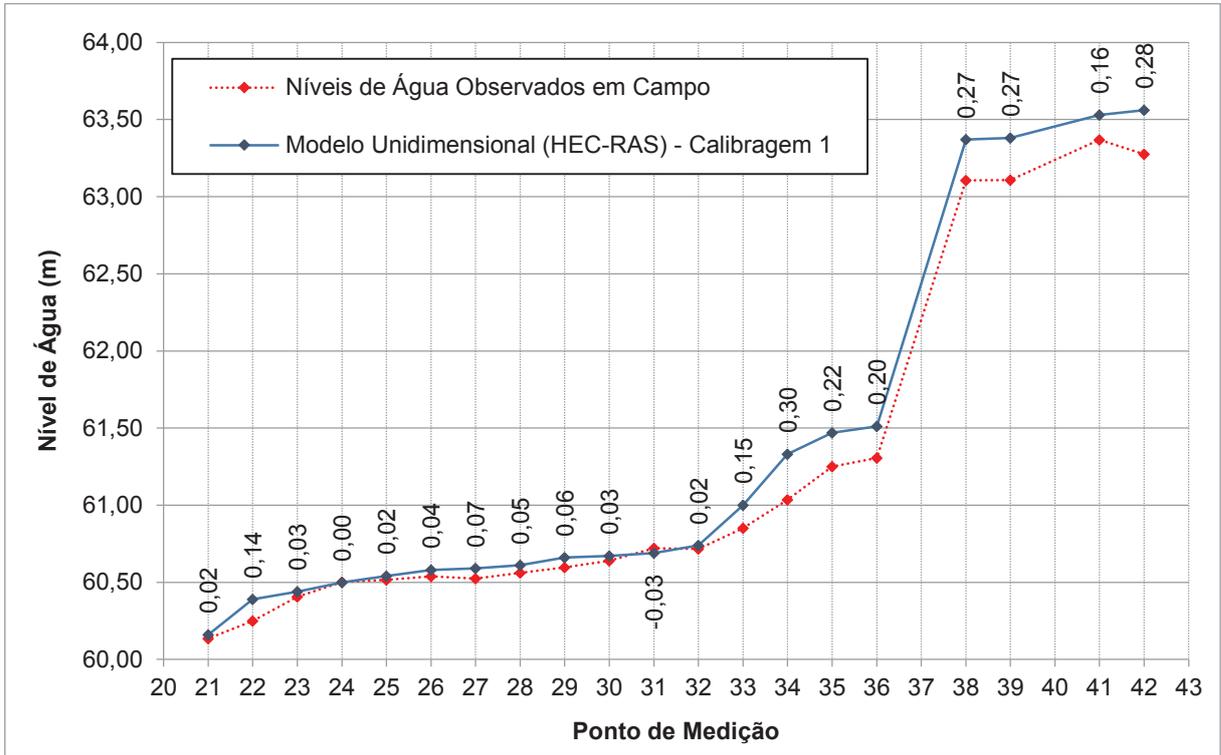
Os resultados da primeira tentativa de calibração estão apresentados na TABELA 17 e os perfis de linha d'água estão graficamente apresentados na FIGURA 41(braço direito) e FIGURA 42 (braço esquerdo).

TABELA 17 – RESUMO DOS RESULTADOS – PRIMEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 1 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 1 (m)	Δh Calibração (m)
42	63,28	63,56	0,28	20	63,25	63,56	0,31
41	63,37	63,53	0,16	19	63,21	63,53	0,33
39	63,11	63,38	0,27	18	63,18	63,27	0,09
38	63,11	63,37	0,27	17	62,60	62,59	-0,01
36	61,31	61,51	0,20	16	62,45	62,50	0,05
35	61,25	61,47	0,22	15	62,08	61,90	-0,18
34	61,04	61,33	0,30	14	61,70	61,43	-0,27
33	60,85	61,00	0,15	13	61,70	61,48	-0,22
32	60,72	60,74	0,02	12	61,67	61,44	-0,23
31	60,72	60,69	-0,03	11	61,42	61,21	-0,21
30	60,64	60,67	0,03	10	61,39	61,14	-0,25
29	60,60	60,66	0,06	9	61,24	60,99	-0,25
28	60,56	60,61	0,05	8	60,71	60,68	-0,02
27	60,52	60,59	0,07	7	60,47	60,56	0,09
26	60,54	60,58	0,04	6	60,43	60,49	0,06
25	60,52	60,54	0,02	5	60,40	60,44	0,04
24	60,50	60,50	0,00	3	60,24	60,25	0,02
23	60,41	60,44	0,03	2	60,10	60,13	0,03
22	60,25	60,39	0,14	1	60,10	60,12	0,02
21	60,14	60,16	0,02				
REMQ		0,1542		REMQ		0,1786	

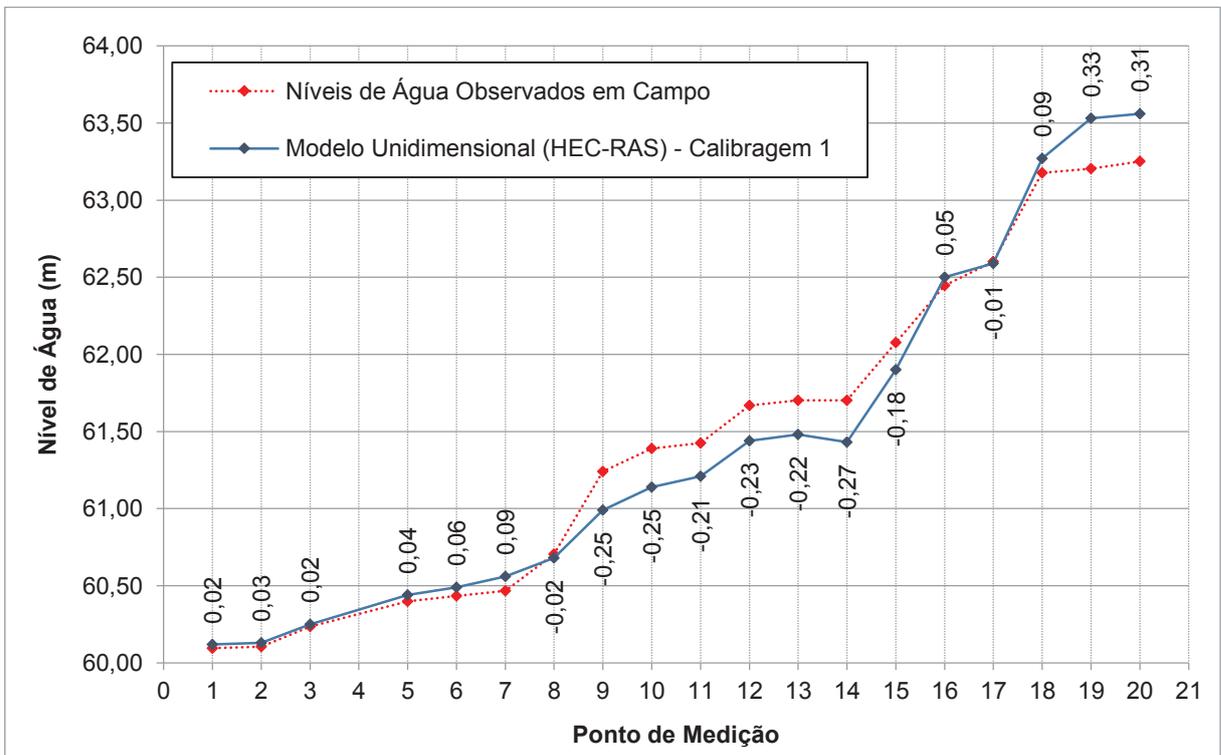
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 41 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – PRIMEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 42 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – PRIMEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS



FONTE: O Autor (2017).

Assim como o modelo hidráulico reduzido, os níveis de água nos pontos 42 ao 33 do braço direito, resultaram acima dos observados em campo. Esses níveis de água mais altos devem-se, provavelmente, aos controles exercidos pelas corredeiras existentes entre os pontos 32 e 35, bem como entre os pontos 38 e 40. Em geral, para os demais pontos do braço direito, os níveis do modelo resultaram mais altos que os observados em campo.

Os níveis de água resultantes nos pontos de números 20, 19 e 18 no braço esquerdo, resultaram mais altos do que as observações de campo. Esses resultados devem-se, provavelmente, ao controle exercido pela corredeira a jusante do ponto 18. Em geral, para os demais pontos do braço esquerdo, os níveis do modelo resultaram mais baixos que os observados em campo, evidenciando a necessidade de aplicação de um coeficiente de Manning maior.

A primeira tentativa de calibração resultou em Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) igual a 0,1675.

4.2.2.2 Segunda Tentativa de Calibração

Para o braço esquerdo, a maioria dos níveis de água medidos na primeira tentativa resultaram abaixo do medido em campo (exceto os afetados por controles hidráulicos), por conta disso, foi considerado um coeficiente de Manning de 0,040 no curso d'água margem esquerda.

Para a segunda tentativa de calibração no modelo unidimensional, adotaram-se os coeficientes de rugosidade de Manning apresentados na TABELA 18.

TABELA 18 – COEFICIENTES DE MANNING – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS

Manning	
Banco de Areia	0,040
Afloramentos Rochosos	0,500
Curso d'água Jusante	0,035
Curso d'água Margem Direita	0,035
Curso d'água Margem Esquerda	0,040
Curso d'água Médio	0,035
Curso d'água Montante	0,035
Urbanização	0,065
Vegetação Densa	0,100
Vegetação Rasteira	0,045

FONTE: O Autor (2017).

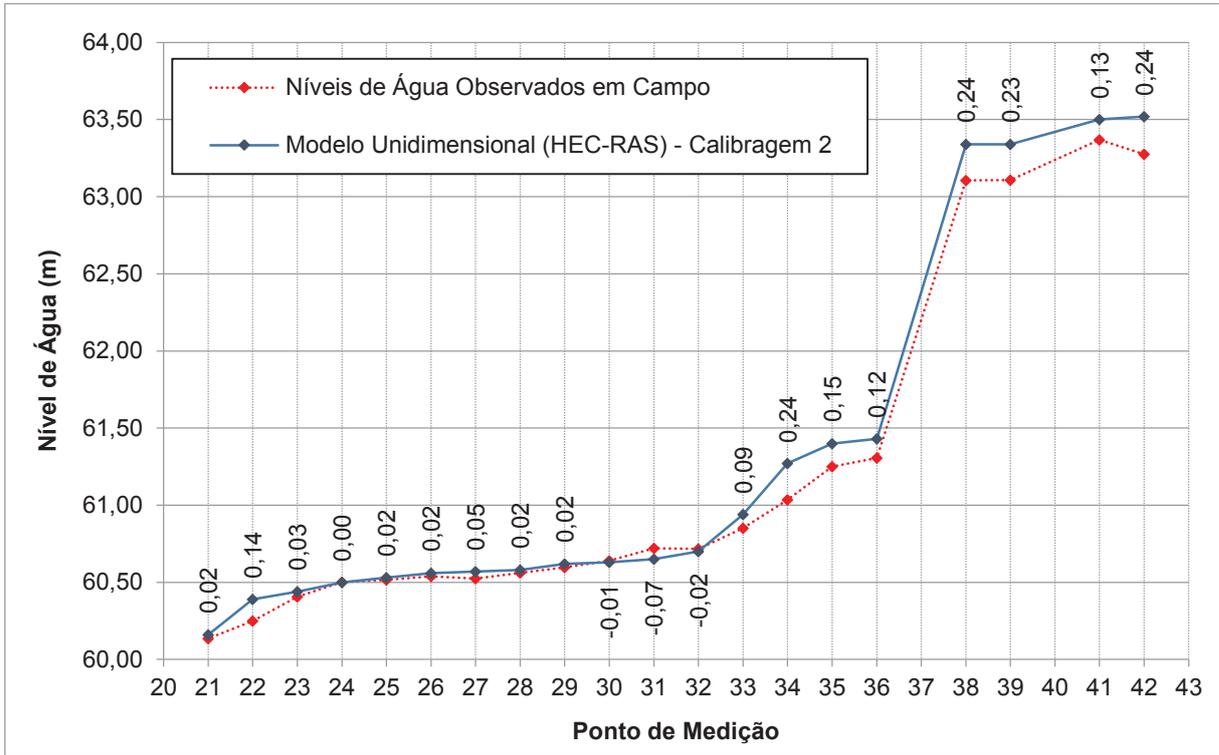
Os resultados da segunda tentativa de calibração estão apresentados na TABELA 19 e os perfis de linha d'água estão graficamente apresentados na FIGURA 43 (braço direito) e FIGURA 44 (braço esquerdo).

TABELA 19 – RESUMO DOS RESULTADOS – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS.

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 2 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 2 (m)	Δh Calibração (m)
42	63,28	63,52	0,24	20	63,25	63,52	0,27
41	63,37	63,50	0,13	19	63,21	63,49	0,29
39	63,11	63,34	0,23	18	63,18	63,23	0,05
38	63,11	63,34	0,24	17	62,60	62,48	-0,12
36	61,31	61,43	0,12	16	62,45	62,40	-0,05
35	61,25	61,40	0,15	15	62,08	61,85	-0,23
34	61,04	61,27	0,24	14	61,70	61,48	-0,22
33	60,85	60,94	0,09	13	61,70	61,52	-0,18
32	60,72	60,70	-0,02	12	61,67	61,48	-0,19
31	60,72	60,65	-0,07	11	61,42	61,25	-0,17
30	60,64	60,63	-0,01	10	61,39	61,17	-0,22
29	60,60	60,62	0,02	9	61,24	61,02	-0,22
28	60,56	60,58	0,02	8	60,71	60,69	-0,02
27	60,52	60,57	0,05	7	60,47	60,57	0,10
26	60,54	60,56	0,02	6	60,43	60,49	0,06
25	60,52	60,53	0,02	5	60,40	60,44	0,04
24	60,50	60,50	0,00	3	60,24	60,25	0,02
23	60,41	60,44	0,03	2	60,10	60,13	0,03
22	60,25	60,39	0,14	1	60,10	60,12	0,02
21	60,14	60,16	0,02				
REMQ		0,1242		REMQ		0,1602	

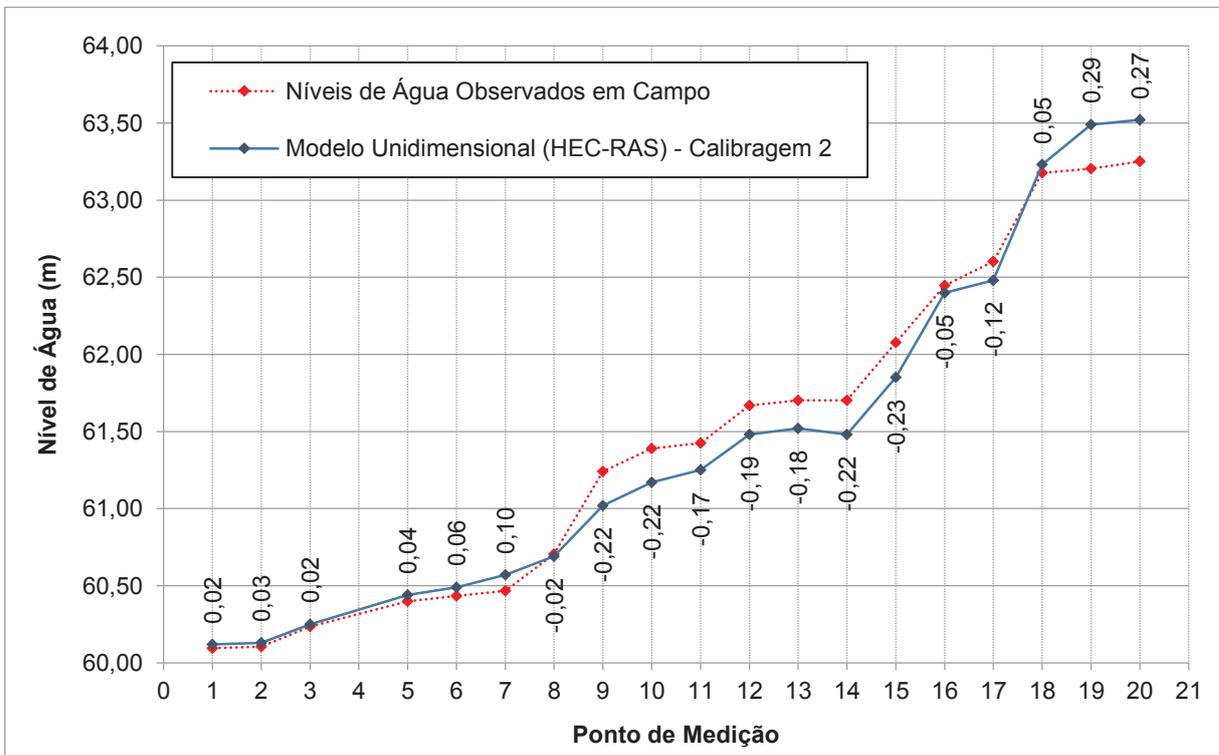
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 43 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS.



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 44 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS.



FONTE: O Autor (2017).

A alteração no coeficiente de Manning no curso d'água esquerdo não foi suficiente para calibração, pois os níveis do modelo apresentaram baixa aproximação aos níveis os observados em campo, evidenciando a necessidade de alteração do coeficiente de Manning em trecho a jusante.

A segunda tentativa de calibração resultou em Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) igual a 0,1437.

4.2.2.3 Terceira Tentativa de Calibração

Como o coeficiente de Manning de 0,040 no curso d'água margem esquerda não foi suficiente para aproximação aos dados observados, realizou-se na terceira tentativa de calibração a alteração no curso d'água médio, trecho a jusante, para um coeficiente de Manning igual a 0,040.

Para a terceira tentativa de calibração no modelo unidimensional, adotaram-se os coeficientes de rugosidade de Manning apresentados na TABELA 20.

TABELA 20 – COEFICIENTES DE MANNING – TERCEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS.

Manning	
Banco de Areia	0,040
Afloramentos Rochosos	0,500
Curso d'água Jusante	0,035
Curso d'água Margem Direita	0,035
Curso d'água Margem Esquerda	0,040
Curso d'água Médio	0,040
Curso d'água Montante	0,035
Urbanização	0,065
Vegetação Densa	0,100
Vegetação Rasteira	0,045

FONTE: O Autor (2017).

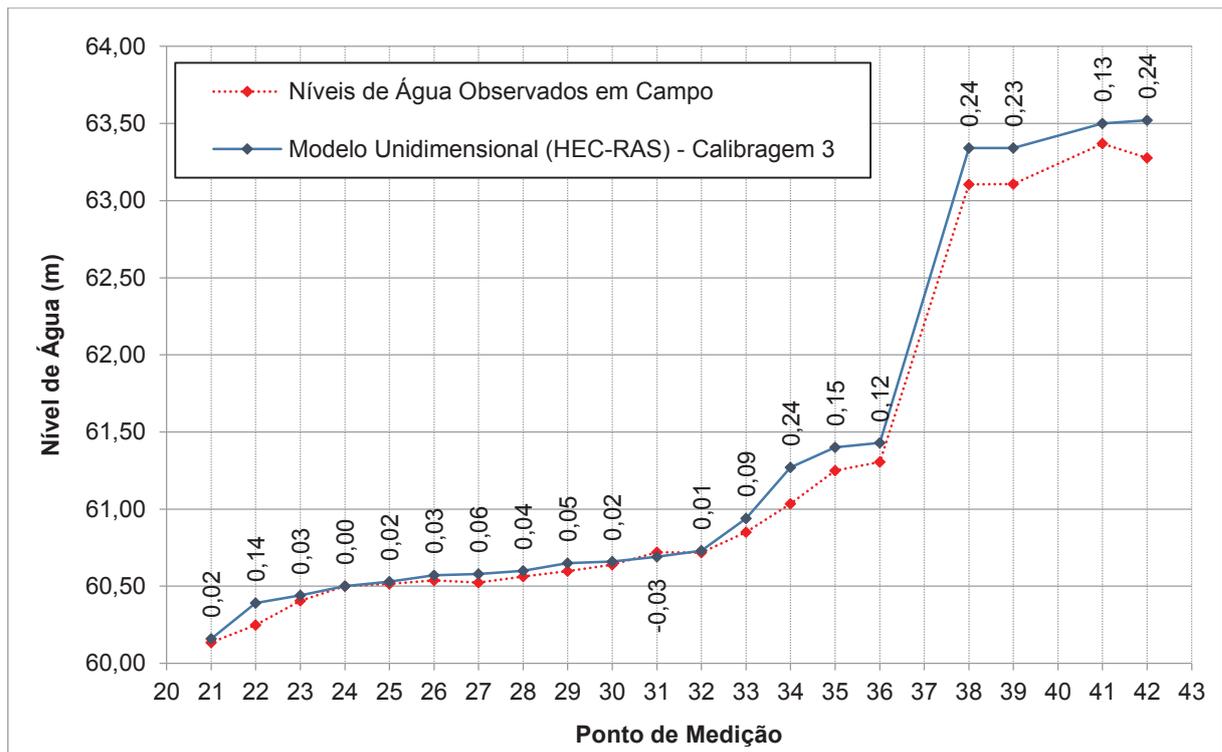
Os resultados da terceira tentativa de calibração estão apresentados na TABELA 21 e os perfis de linha d'água estão graficamente apresentados na FIGURA 45 (braço direito) e FIGURA 46 (braço esquerdo).

TABELA 21 – RESUMO DOS RESULTADOS – TERCEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 3 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 3 (m)	Δh Calibração (m)
42	63,28	63,52	0,24	20	63,25	63,52	0,27
41	63,37	63,50	0,13	19	63,21	63,49	0,29
39	63,11	63,34	0,23	18	63,18	63,23	0,05
38	63,11	63,34	0,24	17	62,60	62,52	-0,08
36	61,31	61,43	0,12	16	62,45	62,45	0,00
35	61,25	61,40	0,15	15	62,08	61,94	-0,14
34	61,04	61,27	0,24	14	61,70	61,61	-0,09
33	60,85	60,94	0,09	13	61,70	61,63	-0,07
32	60,72	60,73	0,01	12	61,67	61,58	-0,09
31	60,72	60,69	-0,03	11	61,42	61,35	-0,07
30	60,64	60,66	0,02	10	61,39	61,26	-0,13
29	60,60	60,65	0,05	9	61,24	61,10	-0,14
28	60,56	60,60	0,04	8	60,71	60,74	0,04
27	60,52	60,58	0,06	7	60,47	60,59	0,12
26	60,54	60,57	0,03	6	60,43	60,50	0,07
25	60,52	60,53	0,02	5	60,40	60,44	0,04
24	60,50	60,50	0,00	3	60,24	60,25	0,02
23	60,41	60,44	0,03	2	60,10	60,13	0,03
22	60,25	60,39	0,14	1	60,10	60,12	0,02
21	60,14	60,16	0,02				
REMQ		0,1243		REMQ		0,1191	

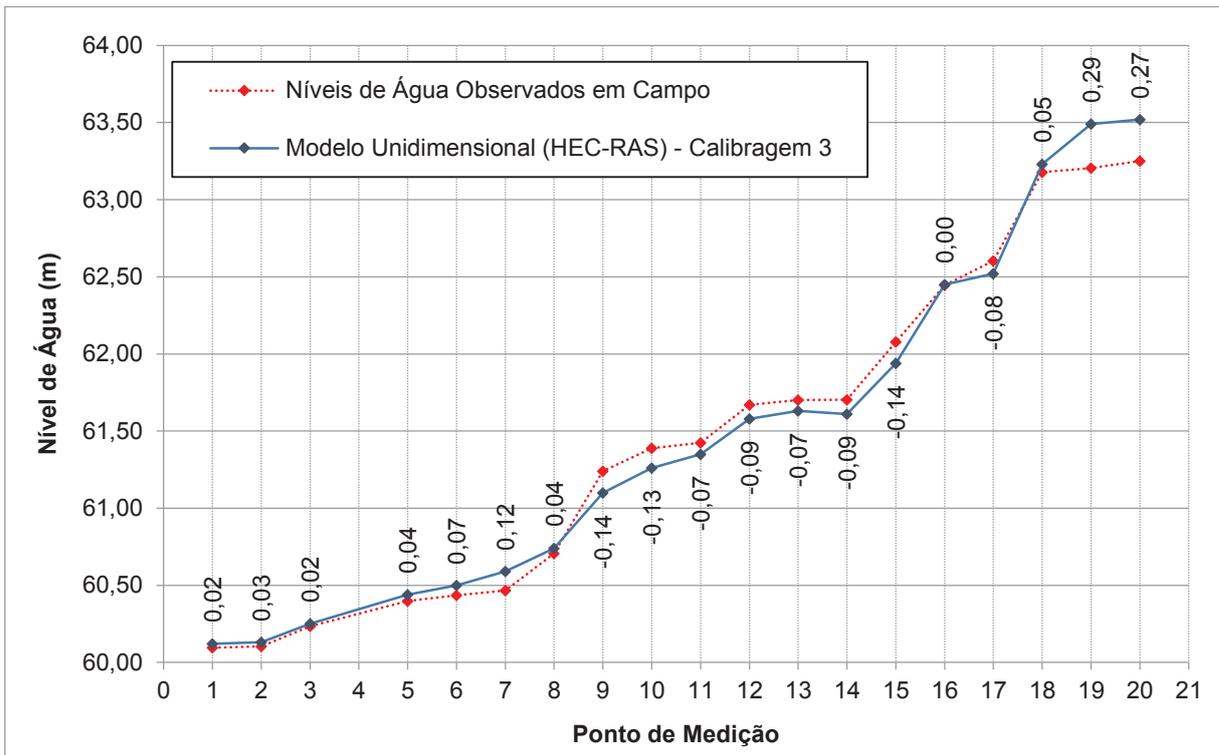
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 45 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS.



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 46 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS.



FONTE: O Autor (2017).

A alteração no coeficiente de Manning no curso d'água médio mostrou uma boa aproximação para os pontos ao longo do braço esquerdo. Com exceção aos pontos afetados por controles hidráulicos a montante, a maioria dos níveis de água medidos na terceira tentativa resultaram em diferença máxima de 0,14 metros.

A terceira tentativa de calibração resultou em Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) igual a 0,1229.

4.2.2.4 Quarta Tentativa de Calibração

Como o coeficiente de Manning de 0,040 no curso d'água médio mostrou boa aproximação aos dados observados, realizou-se na quarta tentativa de calibração a alteração no curso d'água médio para um coeficiente de Manning igual a 0,045.

Para a quarta tentativa de calibração no modelo unidimensional, adotaram-se os coeficientes de rugosidade de Manning apresentados na TABELA 22.

TABELA 22 – COEFICIENTES DE MANNING – QUARTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS.

Manning	
Banco de Areia	0,040
Afloramentos Rochosos	0,500
Curso d'água Jusante	0,035
Curso d'água Margem Direita	0,035
Curso d'água Margem Esquerda	0,040
Curso d'água Médio	0,045
Curso d'água Montante	0,035
Urbanização	0,065
Vegetação Densa	0,100
Vegetação Rasteira	0,045

FONTE: O Autor (2017).

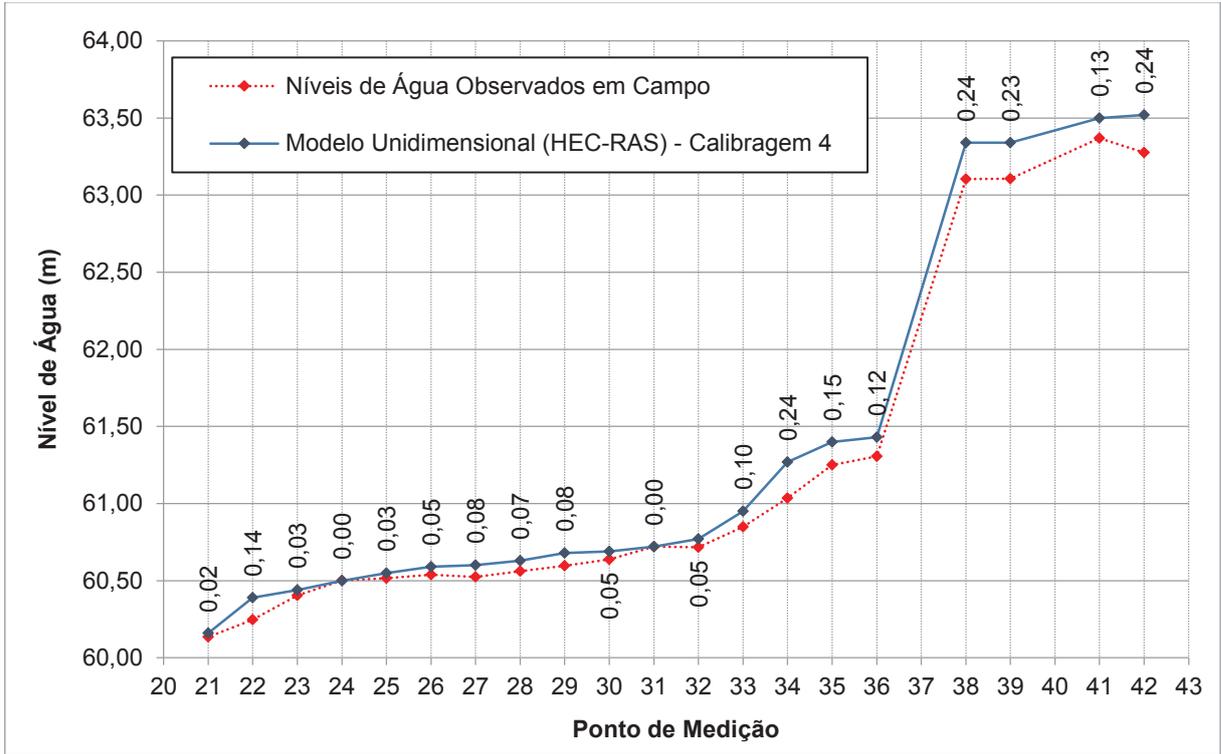
Os resultados da quarta tentativa de calibração estão apresentados na TABELA 23 e os perfis de linha d'água estão graficamente apresentados na FIGURA 47 (braço direito) e FIGURA 48 (braço esquerdo).

TABELA 23 – RESUMO DOS RESULTADOS – QUARTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS.

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 4 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 4 (m)	Δh Calibração (m)
42	63,28	63,52	0,24	20	63,25	63,52	0,27
41	63,37	63,50	0,13	19	63,21	63,49	0,29
39	63,11	63,34	0,23	18	63,18	63,23	0,05
38	63,11	63,34	0,24	17	62,60	62,56	-0,04
36	61,31	61,43	0,12	16	62,45	62,49	0,04
35	61,25	61,40	0,15	15	62,08	62,02	-0,06
34	61,04	61,27	0,24	14	61,70	61,73	0,03
33	60,85	60,95	0,10	13	61,70	61,73	0,03
32	60,72	60,77	0,05	12	61,67	61,69	0,02
31	60,72	60,72	0,00	11	61,42	61,45	0,03
30	60,64	60,69	0,05	10	61,39	61,35	-0,04
29	60,60	60,68	0,08	9	61,24	61,17	-0,07
28	60,56	60,63	0,07	8	60,71	60,79	0,09
27	60,52	60,60	0,08	7	60,47	60,61	0,14
26	60,54	60,59	0,05	6	60,43	60,50	0,07
25	60,52	60,55	0,03	5	60,40	60,44	0,04
24	60,50	60,50	0,00	3	60,24	60,25	0,02
23	60,41	60,44	0,03	2	60,10	60,13	0,03
22	60,25	60,39	0,14	1	60,10	60,12	0,02
21	60,14	60,16	0,02				
REMQ		0,1279		REMQ		0,1046	

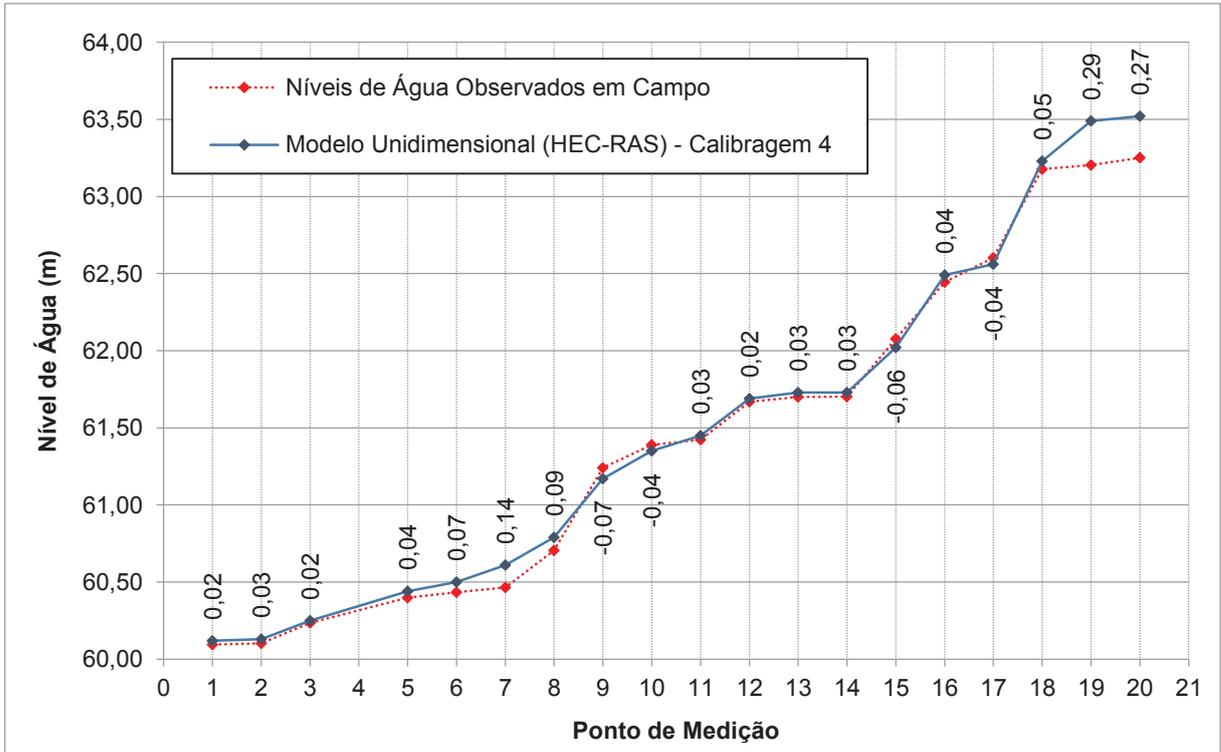
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 47 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – QUARTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS.



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 48 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – QUARTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS.



FONTE: O Autor (2017).

A alteração no coeficiente de Manning no curso d'água médio mostrou uma boa aproximação para os pontos ao longo do braço esquerdo, considerando-se satisfatória para calibração do braço esquerdo. A partir do ponto 18, a maior diferença com os níveis observados em campo é de 0,07 metros, exceto pelo ponto 7 que apresenta diferença de nível de água 0,14 metros acima do observado.

A quarta tentativa de calibração resultou em Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) igual a 0,1183.

4.2.2.5 Quinta Tentativa de Calibração

Para o braço direito, a maioria dos níveis de água medidos resultaram acima do medido em campo (exceto os afetados por controles hidráulicos), por conta disso, foi considerado um coeficiente de Manning de 0,030 para o curso d'água margem direita e curso d'água jusante.

Para a quinta tentativa de calibração no modelo unidimensional, adotaram-se os coeficientes de rugosidade de Manning apresentados na TABELA 24.

TABELA 24 – COEFICIENTES DE MANNING – QUINTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS.

Manning	
Banco de Areia	0,040
Afloramentos Rochosos	0,500
Curso d'água Jusante	0,030
Curso d'água Margem Direita	0,030
Curso d'água Margem Esquerda	0,040
Curso d'água Médio	0,045
Curso d'água Montante	0,035
Urbanização	0,065
Vegetação Densa	0,100
Vegetação Rasteira	0,045

FONTE: O Autor (2017).

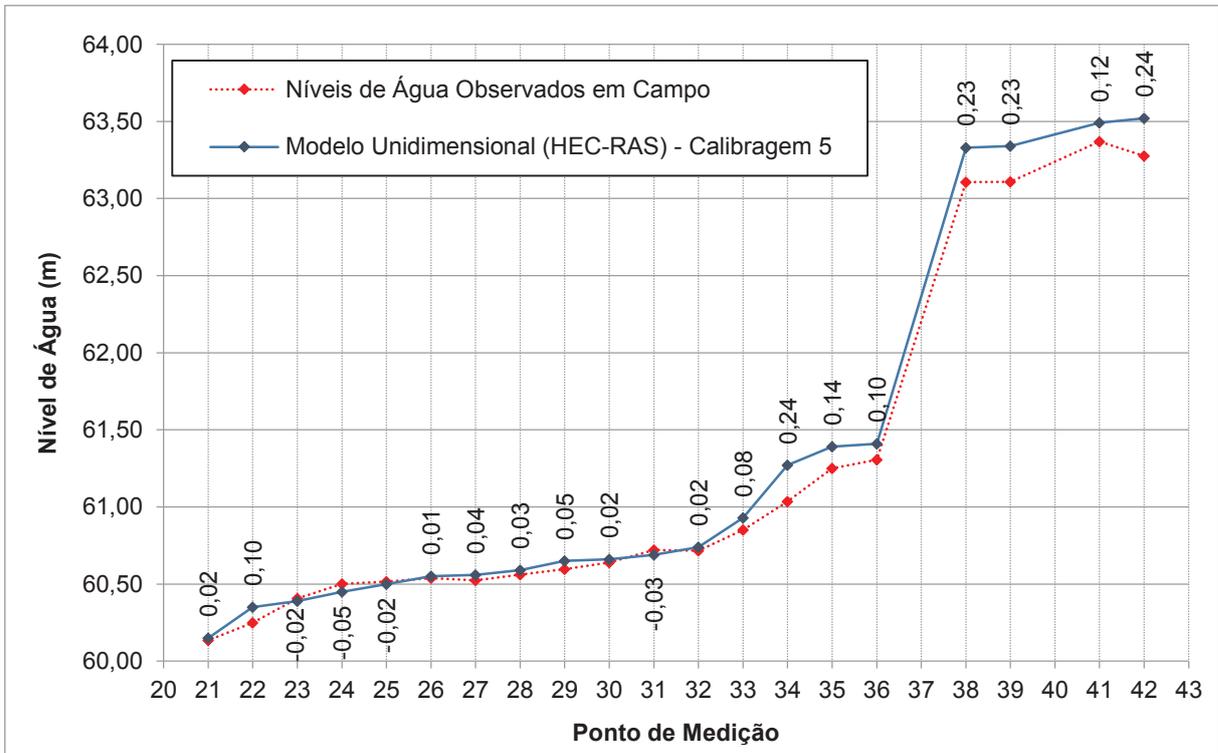
Os resultados da quinta tentativa de calibração estão apresentados na TABELA 25 e os perfis de linha d'água estão graficamente apresentados na FIGURA 49 (braço direito) e FIGURA 50 (braço esquerdo).

TABELA 25 – RESUMO DOS RESULTADOS – QUINTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS.

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 5 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 5 (m)	Δh Calibração (m)
42	63,28	63,52	0,24	20	63,25	63,52	0,27
41	63,37	63,49	0,12	19	63,21	63,48	0,27
39	63,11	63,34	0,23	18	63,18	63,23	0,05
38	63,11	63,33	0,23	17	62,60	62,55	-0,05
36	61,31	61,41	0,10	16	62,45	62,48	0,03
35	61,25	61,39	0,14	15	62,08	62,01	-0,07
34	61,04	61,27	0,24	14	61,70	61,72	0,02
33	60,85	60,93	0,08	13	61,70	61,72	0,02
32	60,72	60,74	0,02	12	61,67	61,67	0,00
31	60,72	60,69	-0,03	11	61,42	61,43	0,01
30	60,64	60,66	0,02	10	61,39	61,34	-0,05
29	60,60	60,65	0,05	9	61,24	61,15	-0,09
28	60,56	60,59	0,03	8	60,71	60,75	0,05
27	60,52	60,56	0,04	7	60,47	60,56	0,09
26	60,54	60,55	0,01	6	60,43	60,45	0,02
25	60,52	60,50	-0,02	5	60,40	60,38	-0,02
24	60,50	60,45	-0,05	3	60,24	60,21	-0,02
23	60,41	60,39	-0,02	2	60,10	60,12	0,02
22	60,25	60,35	0,10	1	60,10	60,11	0,02
21	60,14	60,15	0,02				
REMQ		0,1188		REMQ		0,0981	

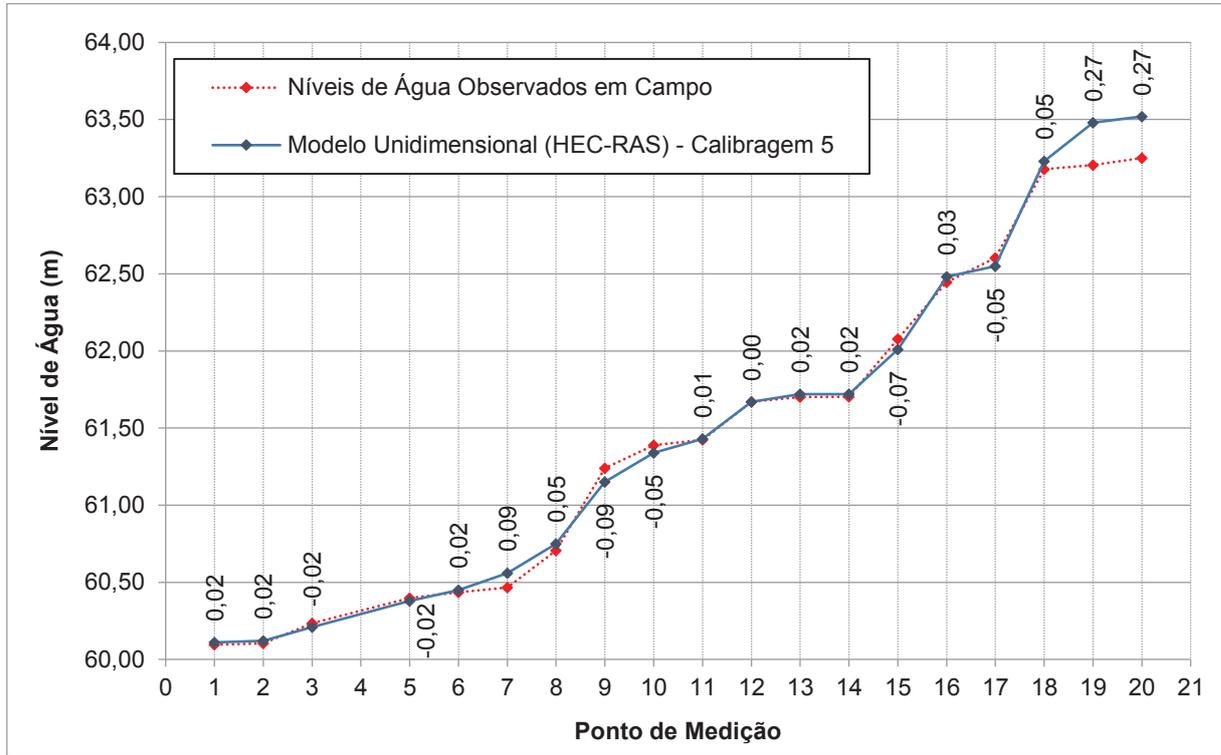
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 49 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – QUINTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS.



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 50 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – QUINTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – HEC-RAS.



FONTE: O Autor (2017).

Após todas as intervenções realizadas verificou-se que o modelo unidimensional apresentou níveis de água similares aos observados em campo, com diferença máxima da ordem de 0,10 m, exceto pelos pontos 34, 38, 39, 41 e 42 (braço esquerdo) e pontos 20 e 21 (braço direito). Podendo-se considerar um resultado muito satisfatório, com Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) igual a 0,1188 e 0,0981, respetivamente, para braço direito e esquerdo.

A quinta tentativa de calibração resultou em Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) igual a 0,1103.

4.2.3 Resultados da Calibração do Modelo Unidimensional

Em relação aos níveis de água obtidos no modelo matemático na região de montante (Pontos 19, 20 e 41, 42) é possível observar que há um distanciamento máximo da ordem de 0,30 metros para os valores obtidos em campo.

Observa-se que os resultados de nível de água entre os Pontos 34 e 39 são mais elevados do que os obtidos nas medições de campo. Esse comportamento pode

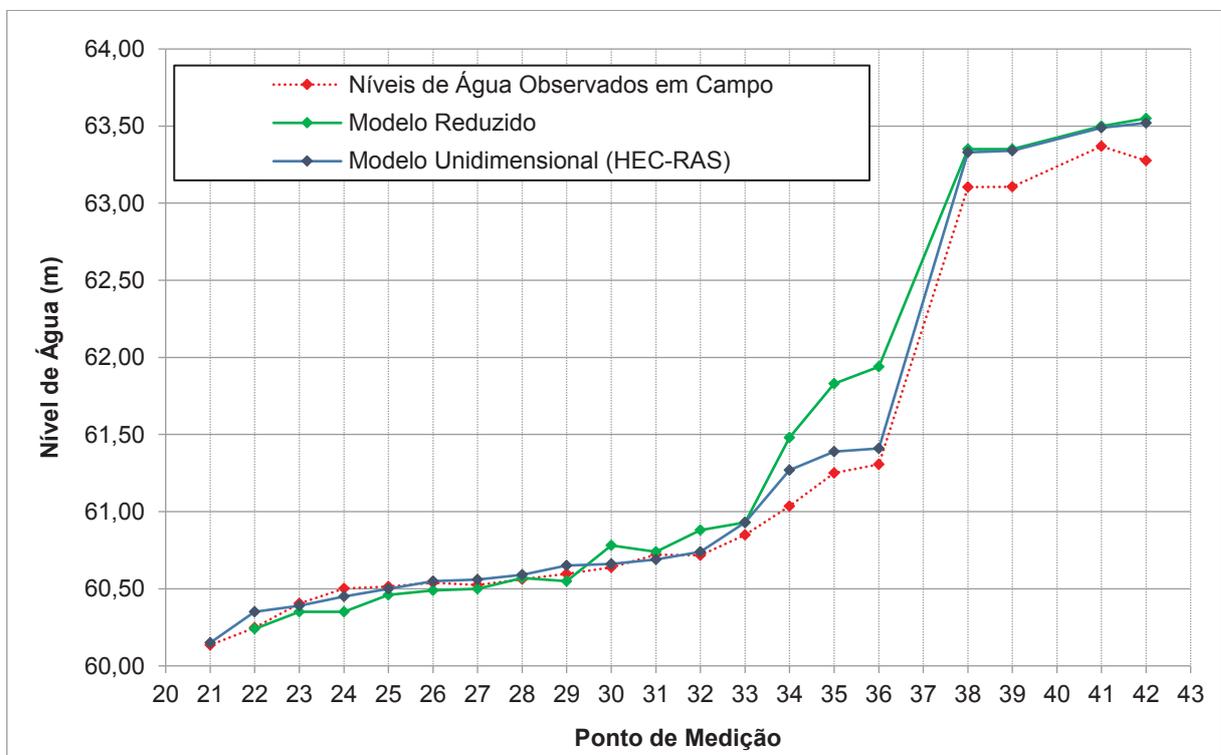
ser devido às características do leito do curso de água nesta região onde são evidenciadas diversas ilhas e afloramentos rochosos que podem não ter sido capturados de maneira satisfatória pelos levantamentos batimétricos e que prejudicam na representação matemática dos fenômenos do escoamento presentes nesta região.

A partir do Ponto 33 e seguindo a análise pela região da braço direito e jusante da ilha, nota-se que os resultados de níveis de água aderem de forma muito satisfatória aos resultados das medições de campo, com distanciamento máximo na ordem de 0,10 metros.

A partir do Ponto 18 e seguindo a análise pela região da margem esquerda do rio, nota-se que os resultados de níveis de água aderem de forma muito satisfatória aos resultados das medições de campo, com distanciamento máximo na ordem de 0,10 metros.

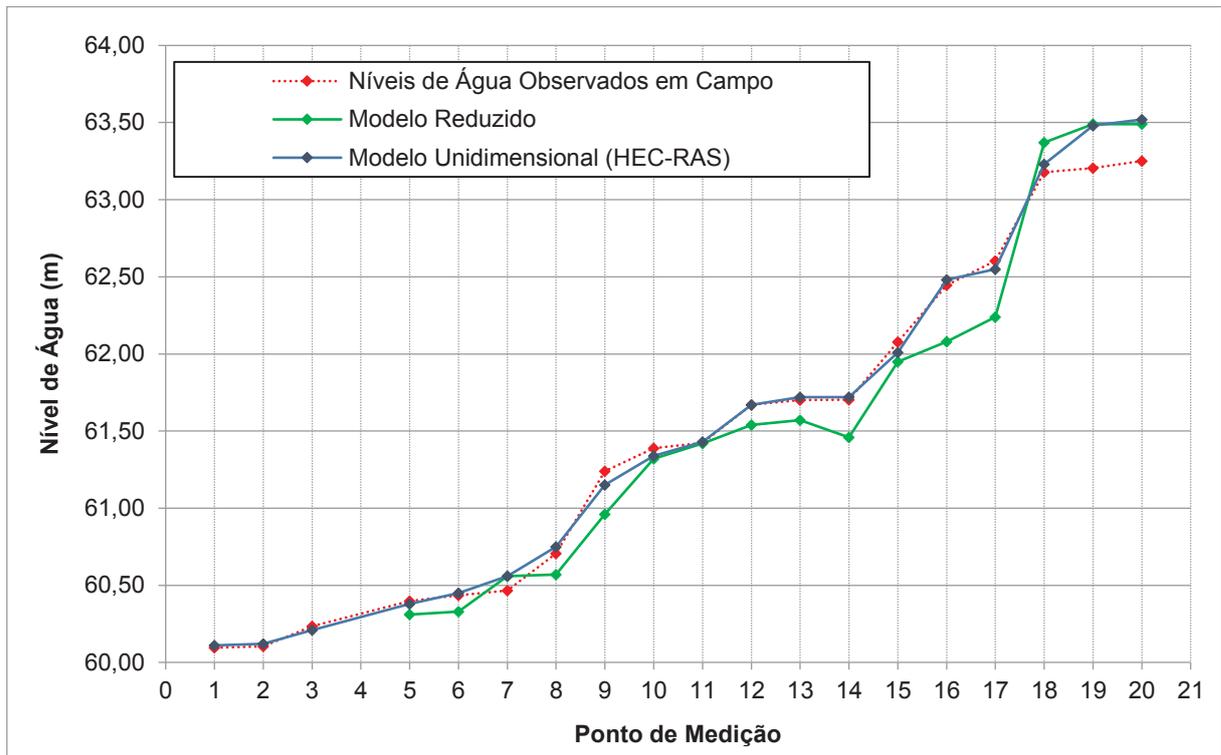
Na FIGURA 51 e FIGURA 52, apresenta-se a título de comparação, uma análise da calibração entre modelo reduzido e modelo unidimensional.

FIGURA 51 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – ANÁLISE ENTRE MODELO REDUZIDO E MODELO UNIDIMENSIONAL



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 52 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – ANÁLISE ENTRE MODELO REDUZIDO E MODELO UNIDIMENSIONAL



FONTE: O Autor (2017).

4.2.4 Simulações do Modelo Unidimensional

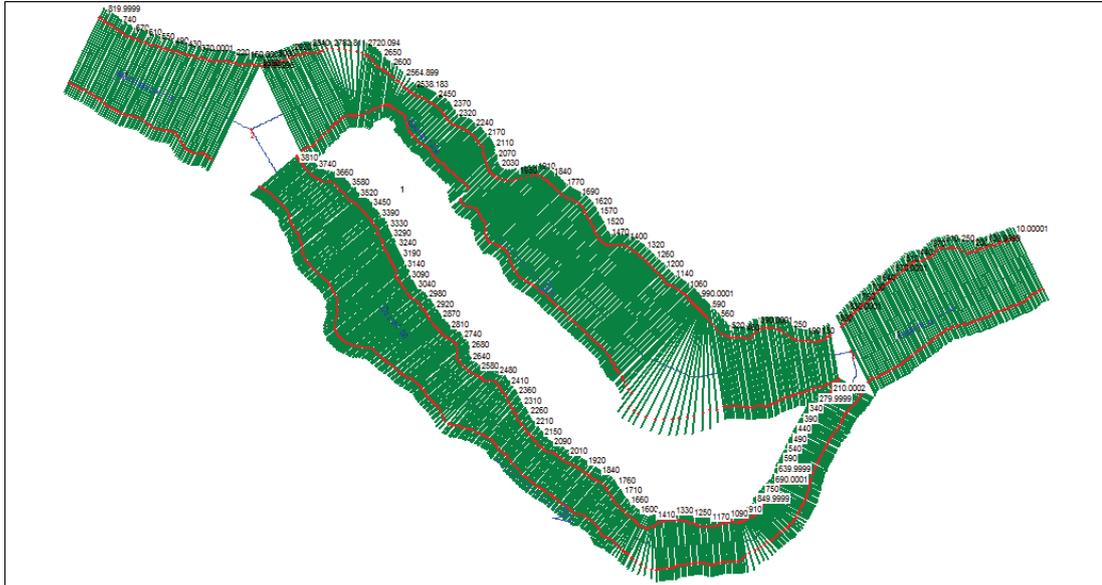
Uma das maiores dúvidas em modelagem computacional é sobre distância entre seções, tamanho de malha a ser utilizada. Para esta análise de sensibilidade nos modelos computacionais, realizou-se além da calibração outras três (3) simulações alterando as características do modelo:

- Calibração 5: Seções distanciadas em 5 metros;
- Simulação 1: Seções distanciadas em 10 metros;
- Simulação 2: Seções distanciadas em 20 metros;
- Simulação 3: Seções distanciadas em 50 metros.

4.2.4.1 Primeira Simulação do Modelo - Seções distanciadas em 10 metros

Utilizando como base o modelo da quinta tentativa de calibração, realizou-se o ajuste das distâncias entre as seções, ou seja, alterando-se de 5 para 10 metros. Na FIGURA 53, apresenta-se a localização das seções distanciadas em 10 metros.

FIGURA 53 – SEÇÕES DISTANCIADAS EM 10 METROS – PRIMEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS



FONTE: O Autor (2017).

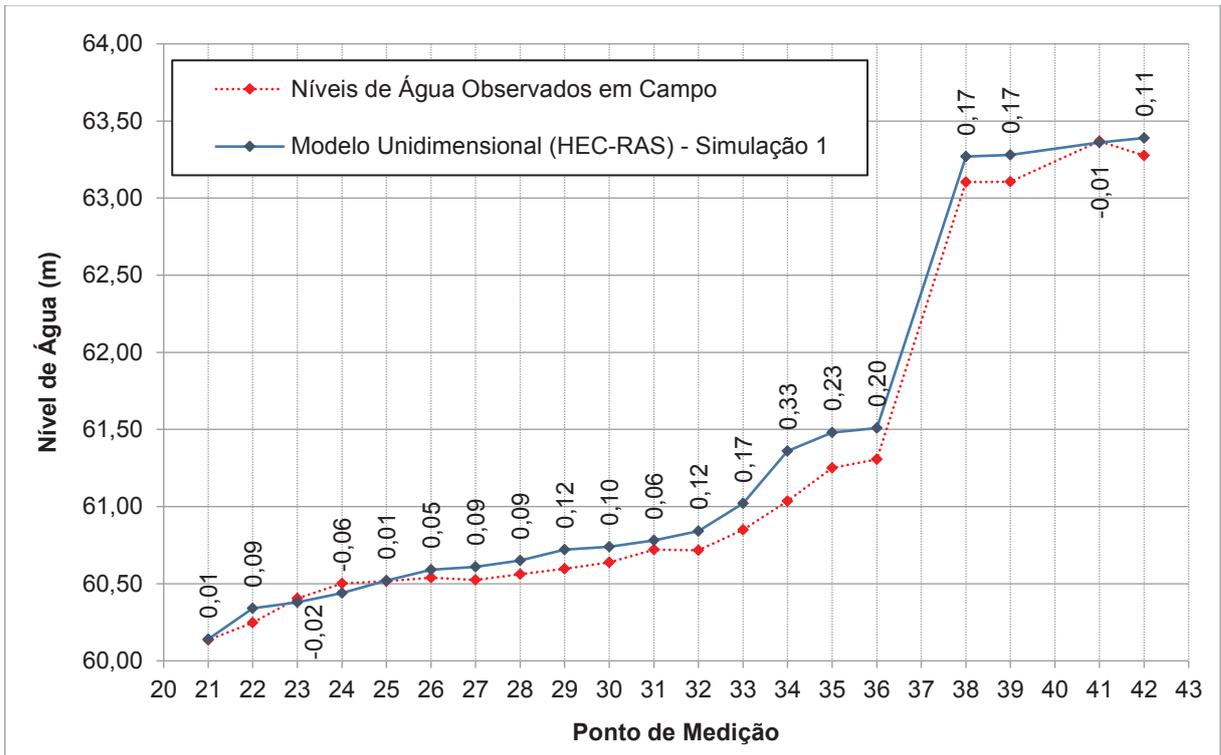
Os resultados da primeira simulação do modelo estão apresentados na TABELA 26 e os perfis de linha d'água estão graficamente apresentados na FIGURA 54 (braço direito) e FIGURA 55 (braço esquerdo).

TABELA 26 – RESUMO DOS RESULTADOS – PRIMEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Simulação 1 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Simulação 1 (m)	Δh Calibração (m)
42	63,28	63,39	0,11	20	63,25	63,39	0,14
41	63,37	63,36	-0,01	19	63,21	63,36	0,16
39	63,11	63,28	0,17	18	63,18	63,18	0,00
38	63,11	63,27	0,17	17	62,60	62,35	-0,25
36	61,31	61,51	0,20	16	62,45	62,29	-0,16
35	61,25	61,48	0,23	15	62,08	61,90	-0,18
34	61,04	61,36	0,33	14	61,70	61,59	-0,11
33	60,85	61,02	0,17	13	61,70	61,61	-0,09
32	60,72	60,84	0,12	12	61,67	61,56	-0,11
31	60,72	60,78	0,06	11	61,42	61,34	-0,08
30	60,64	60,74	0,10	10	61,39	61,25	-0,14
29	60,60	60,72	0,12	9	61,24	61,08	-0,16
28	60,56	60,65	0,09	8	60,71	60,71	0,01
27	60,52	60,61	0,09	7	60,47	60,53	0,06
26	60,54	60,59	0,05	6	60,43	60,44	0,01
25	60,52	60,52	0,01	5	60,40	60,38	-0,02
24	60,50	60,44	-0,06	3	60,24	60,21	-0,02
23	60,41	60,38	-0,02	2	60,10	60,12	0,02
22	60,25	60,34	0,09	1	60,10	60,11	0,02
21	60,14	60,14	0,01				
REMQU		0,1350		REMQU		0,1155	

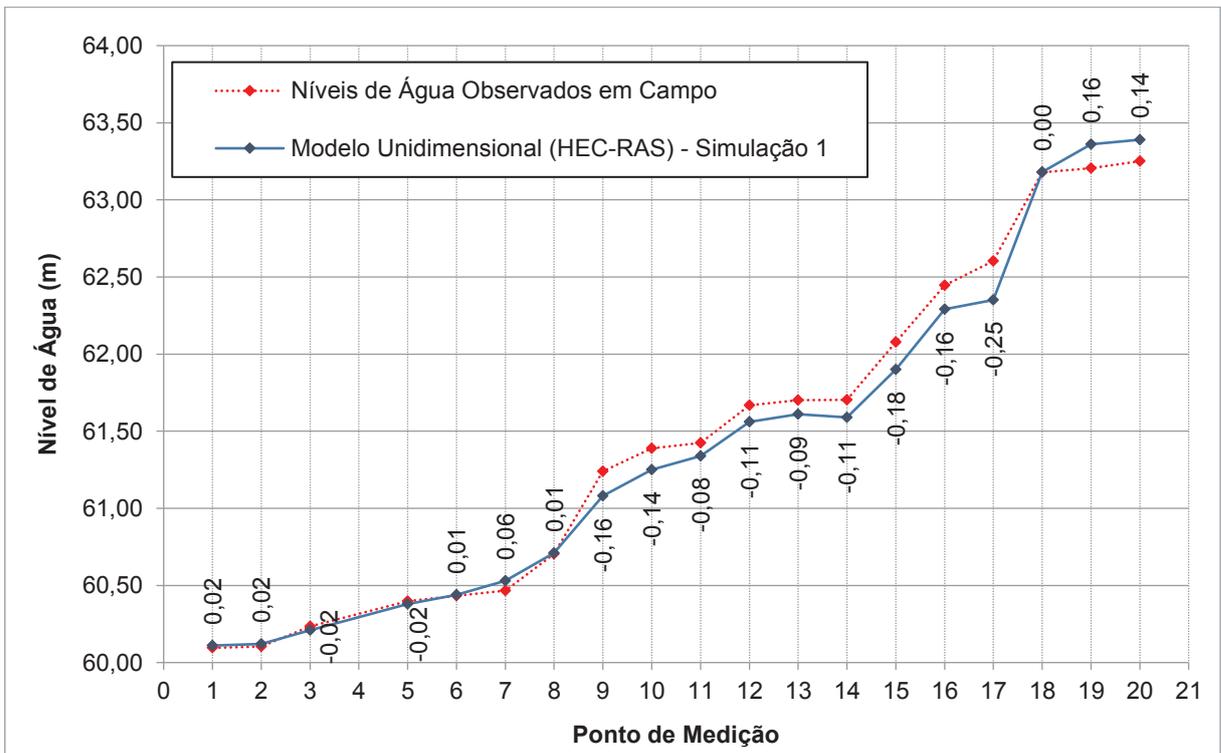
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 54 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – PRIMEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 55 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – PRIMEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS



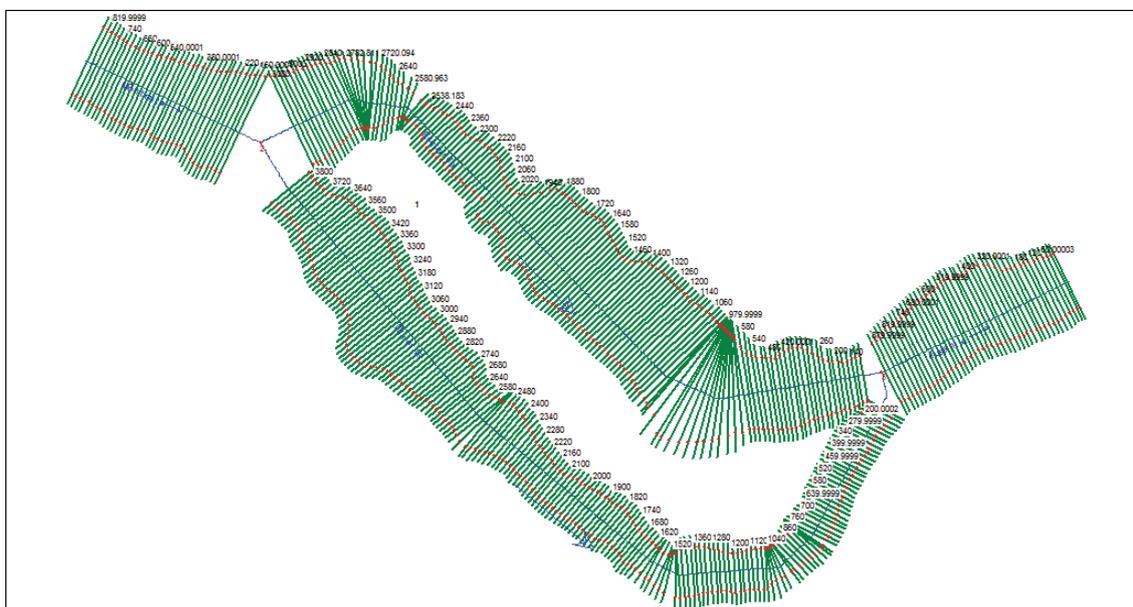
FONTE: O Autor (2017).

A primeira simulação do modelo resultou em Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) igual a 0,1269.

4.2.4.2 Segunda Simulação do Modelo - Seções distanciadas em 20 metros

Utilizando como base o modelo da primeira simulação do modelo, realizou-se o ajuste das distâncias entre as seções, ou seja, alterando-se de 10 para 20 metros. Na FIGURA 56, apresenta-se a localização das seções distanciadas em 20 metros.

FIGURA 56 – SEÇÕES DISTANCIADAS EM 20 METROS – SEGUNDA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS



FONTE: O Autor (2017).

Os resultados da segunda simulação do modelo estão apresentados na TABELA 27 e os perfis de linha d'água estão graficamente apresentados na FIGURA 57 (braço direito) e FIGURA 58 (braço esquerdo).

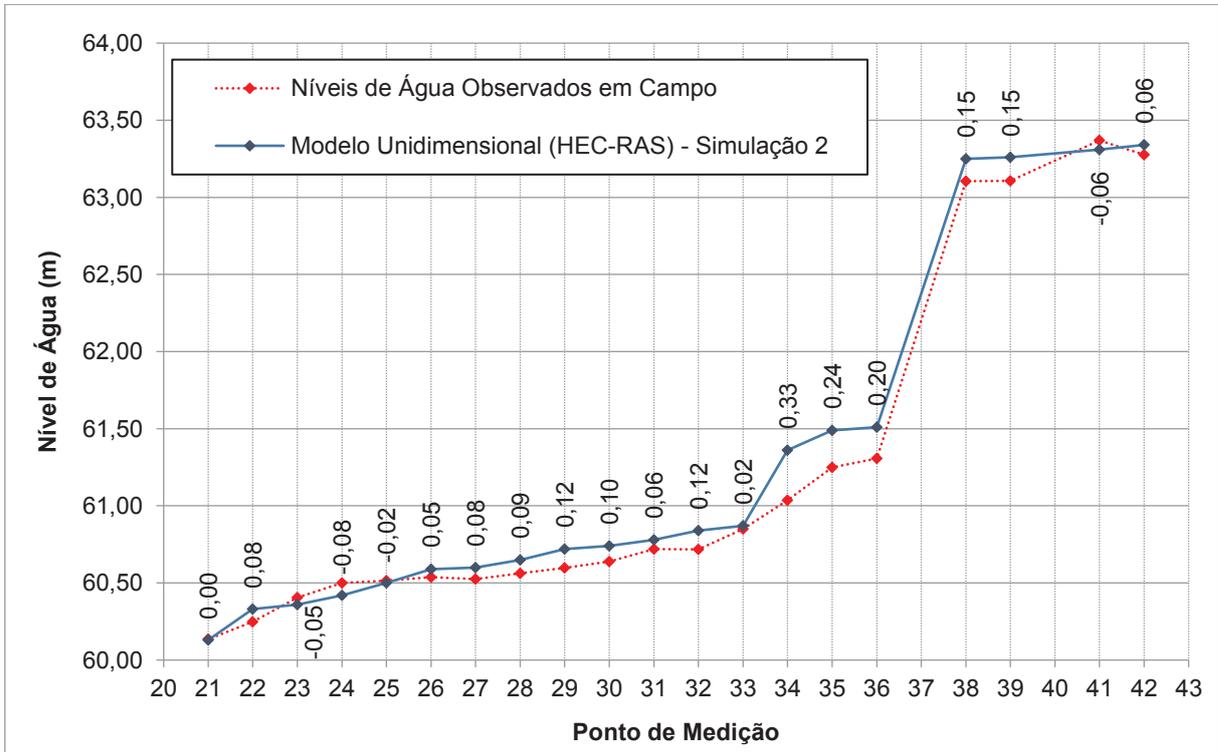
TABELA 27 – RESUMO DOS RESULTADOS – SEGUNDA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Simulação 2 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Simulação 2 (m)	Δh Calibração (m)
42	63,28	63,34	0,06	20	63,25	63,34	0,09
41	63,37	63,31	-0,06	19	63,21	63,31	0,11
39	63,11	63,26	0,15	18	63,18	63,17	-0,01
38	63,11	63,25	0,15	17	62,60	62,19	-0,41

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Simulação 2 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Simulação 2 (m)	Δh Calibração (m)
36	61,31	61,51	0,20	16	62,45	62,13	-0,32
35	61,25	61,49	0,24	15	62,08	61,78	-0,30
34	61,04	61,36	0,33	14	61,70	61,56	-0,14
33	60,85	60,87	0,02	13	61,70	61,51	-0,19
32	60,72	60,84	0,12	12	61,67	61,47	-0,20
31	60,72	60,78	0,06	11	61,42	61,25	-0,17
30	60,64	60,74	0,10	10	61,39	61,15	-0,24
29	60,60	60,72	0,12	9	61,24	61,05	-0,19
28	60,56	60,65	0,09	8	60,71	60,68	-0,02
27	60,52	60,60	0,08	7	60,47	60,51	0,04
26	60,54	60,59	0,05	6	60,43	60,41	-0,02
25	60,52	60,50	-0,02	5	60,40	60,36	-0,04
24	60,50	60,42	-0,08	3	60,24	60,17	-0,06
23	60,41	60,36	-0,05	2	60,10	60,12	0,02
22	60,25	60,33	0,08	1	60,10	60,11	0,02
21	60,14	60,13	0,00				
REMQ		0,1275		REMQ		0,1787	

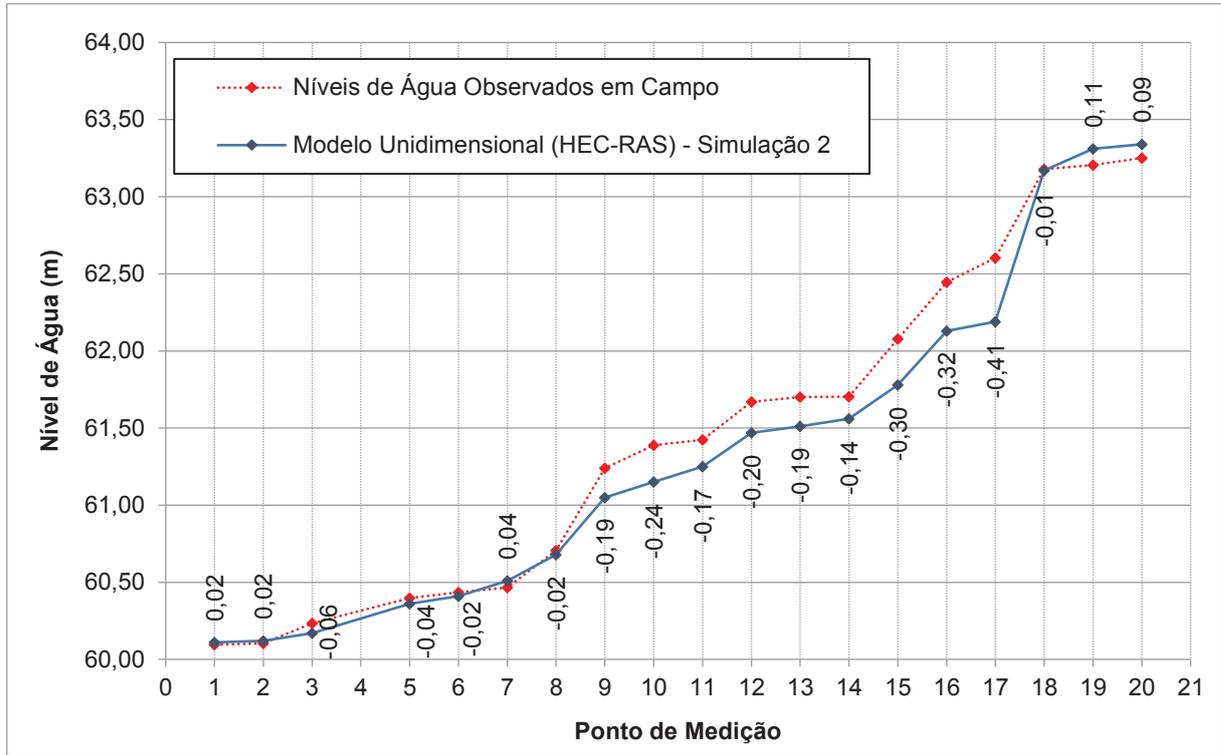
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 57 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – SEGUNDA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 58 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – SEGUNDA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS



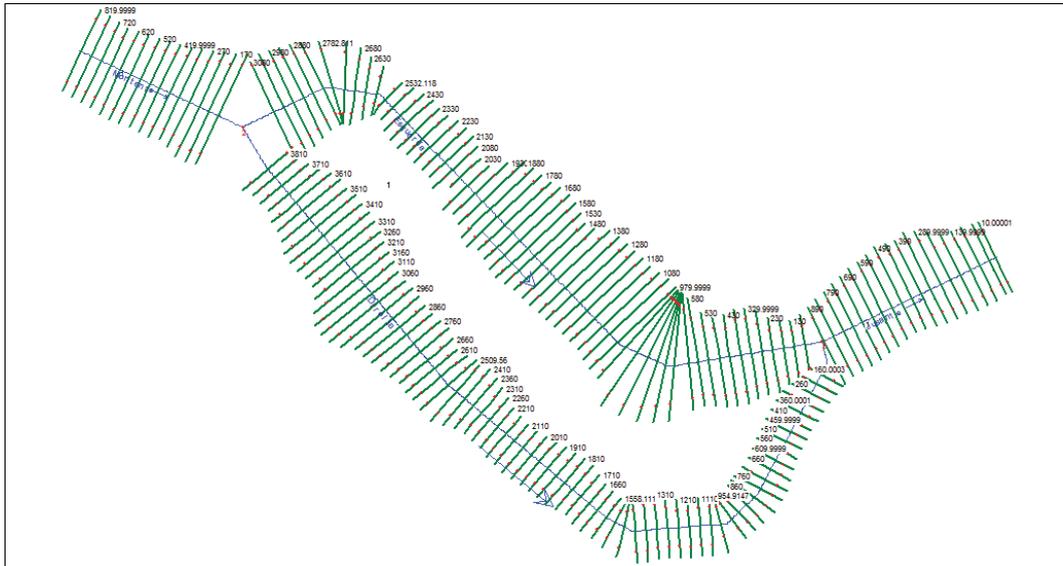
FONTE: O Autor (2017).

A segunda simulação do modelo resultou em Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) igual a 0,1553.

4.2.4.3 Terceira Simulação do Modelo - Seções distanciadas em 50 metros

Utilizando como base o modelo da segunda simulação do modelo, realizou-se o ajuste das distâncias entre as seções, ou seja, alterando-se de 20 para 50 metros. Na FIGURA 59, apresenta-se a localização das seções distanciadas em 50 metros.

FIGURA 59 – SEÇÕES DISTANCIADAS EM 50 METROS – TERCEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS



FONTE: O Autor (2017).

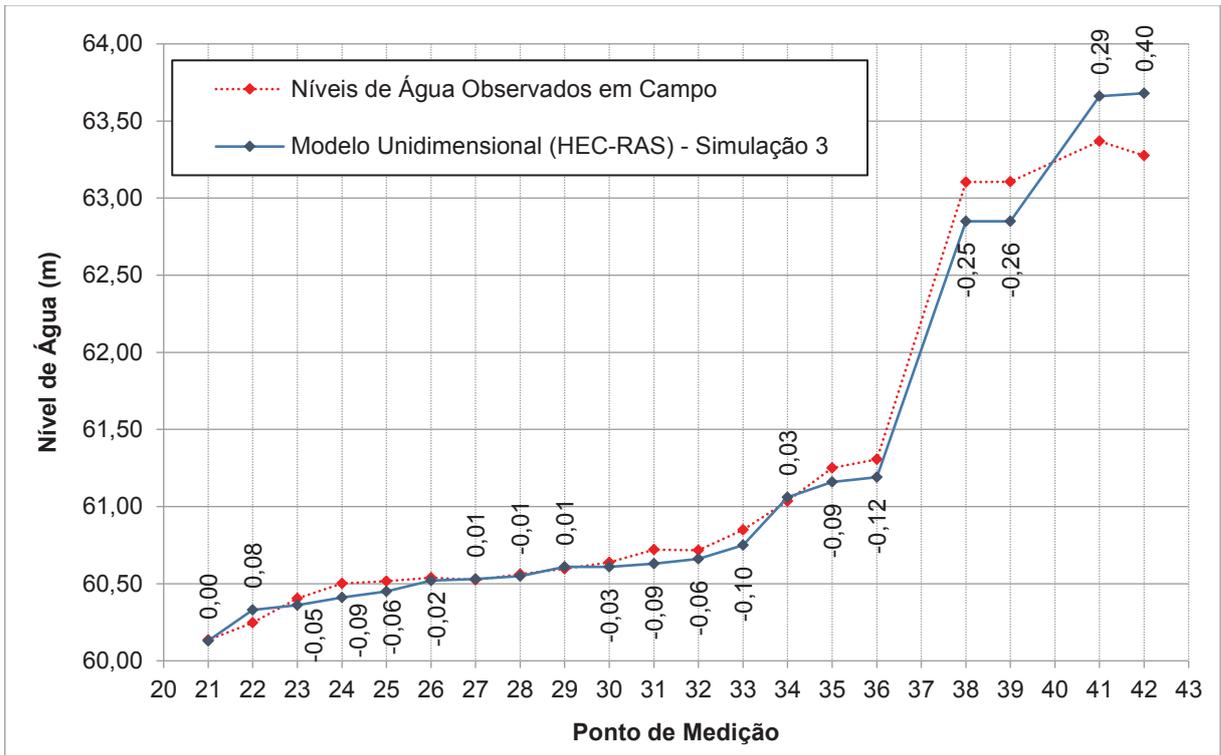
Os resultados da terceira simulação do modelo estão apresentados na TABELA 28 e os perfis de linha d'água estão graficamente apresentados na FIGURA 60 (braço direito) e FIGURA 61 (braço esquerdo).

TABELA 28 – RESUMO DOS RESULTADOS – TERCEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Simulação 3 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Simulação 3 (m)	Δh Calibração (m)
42	63,28	63,68	0,40	20	63,25	63,68	0,43
41	63,37	63,66	0,29	19	63,21	63,66	0,45
39	63,11	62,85	-0,26	18	63,18	62,93	-0,25
38	63,11	62,85	-0,25	17	62,60	62,03	-0,57
36	61,31	61,19	-0,12	16	62,45	61,98	-0,47
35	61,25	61,16	-0,09	15	62,08	61,44	-0,64
34	61,04	61,06	0,03	14	61,70	61,41	-0,29
33	60,85	60,75	-0,10	13	61,70	61,43	-0,27
32	60,72	60,66	-0,06	12	61,67	61,39	-0,28
31	60,72	60,63	-0,09	11	61,42	61,22	-0,20
30	60,64	60,61	-0,03	10	61,39	61,12	-0,27
29	60,60	60,61	0,01	9	61,24	60,99	-0,25
28	60,56	60,55	-0,01	8	60,71	60,70	0,00
27	60,52	60,53	0,01	7	60,47	60,49	0,02
26	60,54	60,52	-0,02	6	60,43	60,40	-0,03
25	60,52	60,45	-0,06	5	60,40	60,36	-0,04
24	60,50	60,41	-0,09	3	60,24	60,17	-0,06
23	60,41	60,36	-0,05	2	60,10	60,12	0,02
22	60,25	60,33	0,08	1	60,10	60,11	0,02
21	60,14	60,13	0,00				
REMQ		0,1496		REMQ		0,3100	

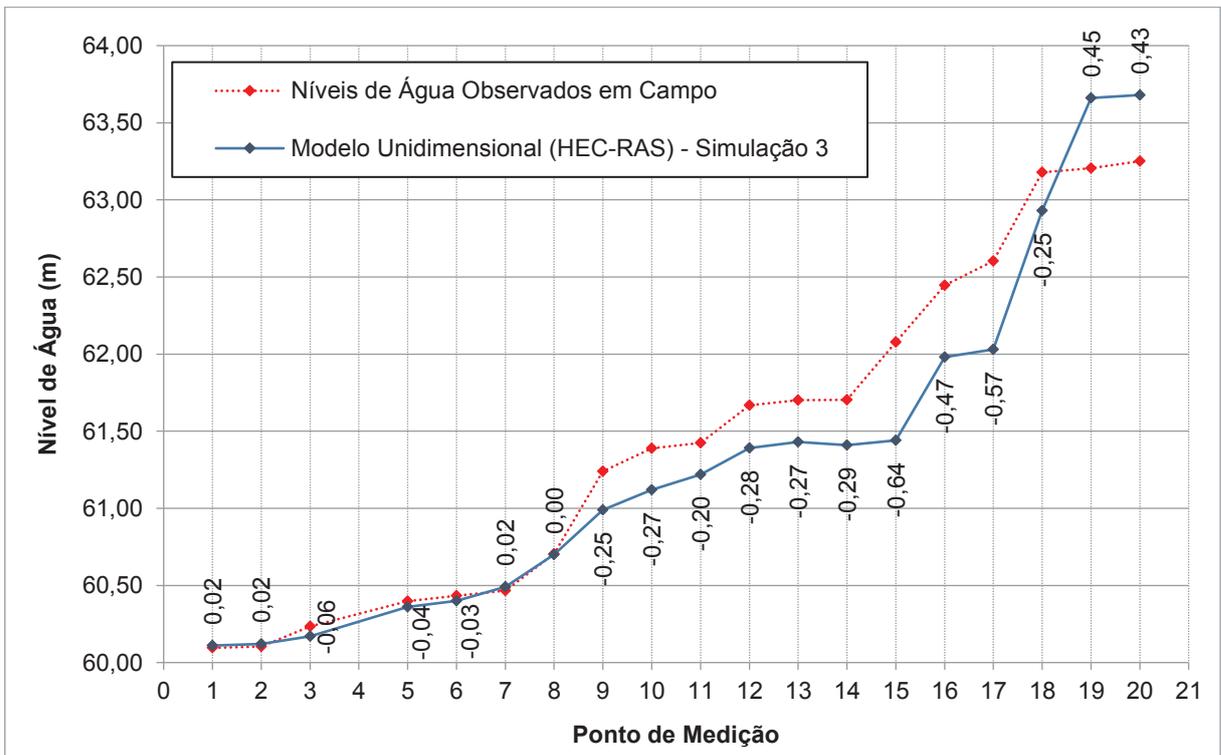
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 60 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – TERCEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 61 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – TERCEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS



FONTE: O Autor (2017).

A terceira simulação do modelo resultou em Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) igual a 0,2413.

4.2.5 Resultados das Simulações do Modelo Unidimensional

Como apresentado na calibração e nas três (3) simulações do modelo, constata-se que mesmo utilizando um modelo menos detalhado com seções distanciadas em 10, 20 e 50 metros. O software HEC-RAS foi capaz de fornecer uma resposta de precisão aceitável até a segunda simulação (seções de 20 em 20 metros) com Raiz do Erro Médio Quadrático igual a 0,15. Enquanto que na terceira simulação (seções de 50 em 50 metros) a precisão tornou-se superior a 0,20.

TABELA 29 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – CALIBRAÇÃO E SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS

Modelo Unidimensional - Software HEC-RAS							
Quinta Calibração (Seções 5 em 5 metros)		Primeira Simulação (Seções 10 em 10 metros)		Segunda Simulação (Seções 20 em 20 metros)		Terceira Simulação (Seções 50 em 50 metros)	
Braço Direito	Braço Esquerdo	Braço Direito	Braço Esquerdo	Braço Direito	Braço Esquerdo	Braço Direito	Braço Esquerdo
0,1188	0,0981	0,1350	0,1155	0,1275	0,1787	0,1496	0,3100
REMQ Total = 0,1103		REMQ Total = 0,1269		REMQ Total = 0,1553		REMQ Total = 0,2413	

FONTE: O Autor (2017).

4.3 MODELO COMPUTACIONAL BIDIMENSIONAL (RIVERFLOW2D[®])

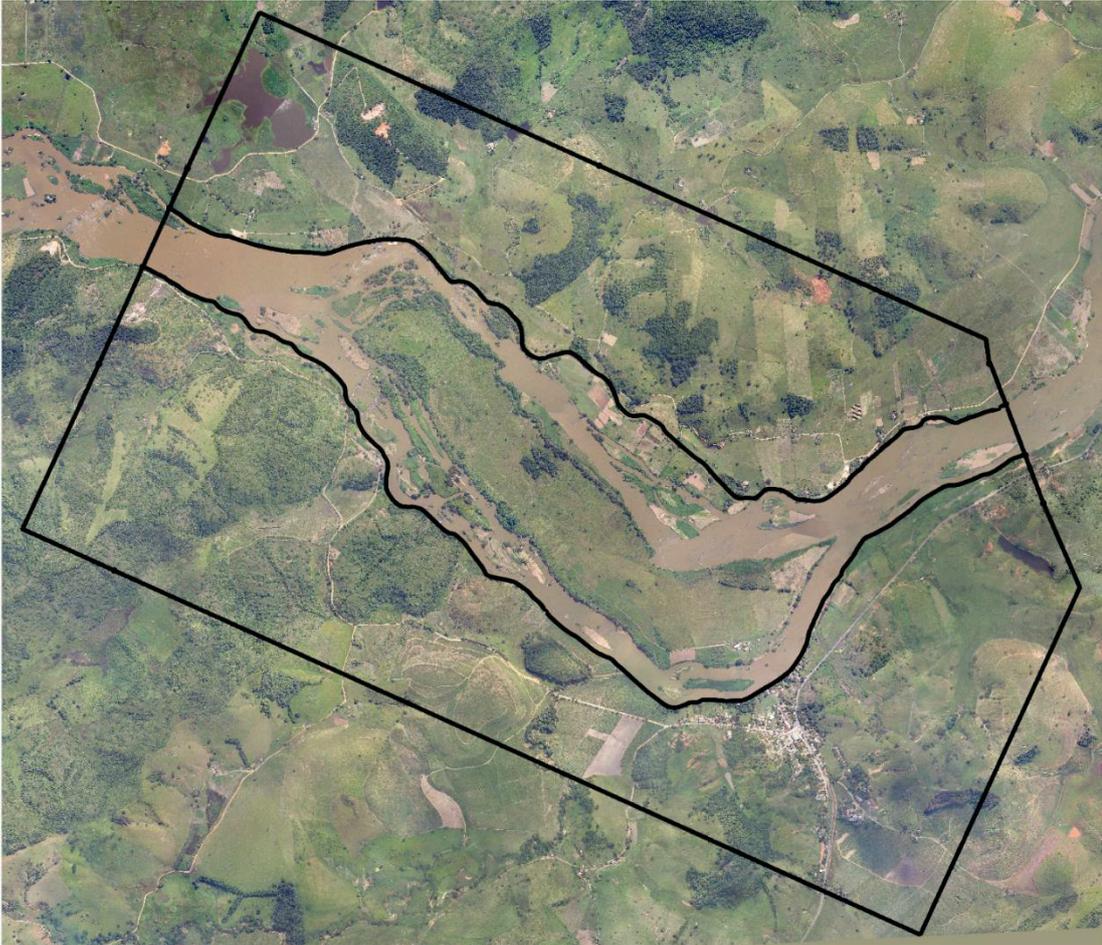
As simulações hidráulicas foram desenvolvidas no ambiente do modelo computacional RiverFlow2D[®] 6.01.05 (HYDRONIA, 2016).

4.3.1 Características do Modelo Bidimensional

O domínio modelado compreende uma região de aproximadamente 13,0 km², iniciando-se a aproximadamente 1,0 km a montante da ilha, divisor físico das águas do rio, e se estende até uma seção localizada a aproximadamente 1,0 km a jusante da ilha supracitada.

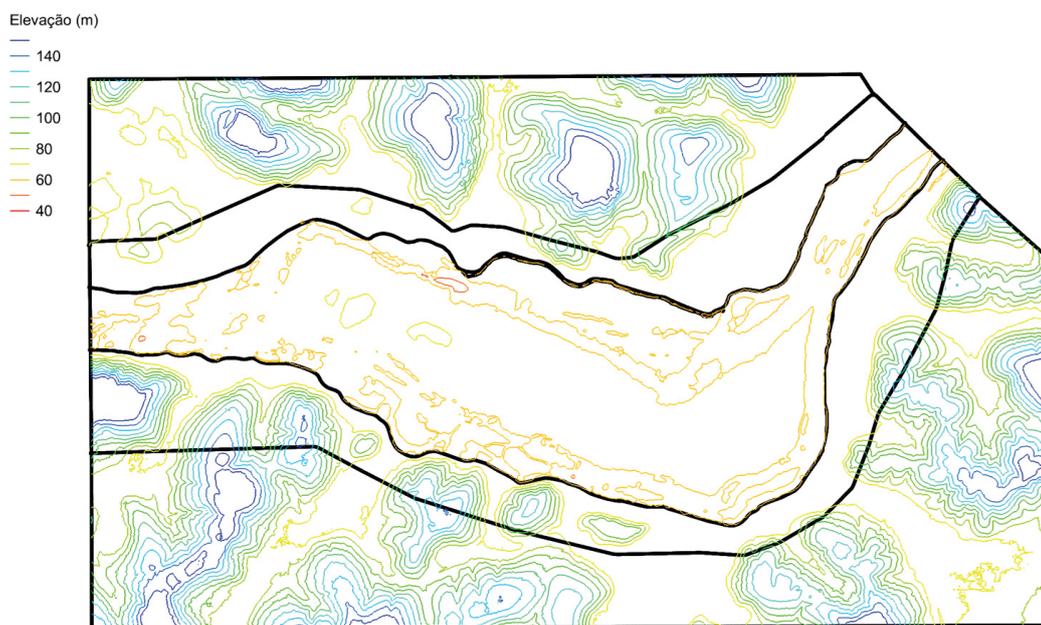
A FIGURA 62 apresenta o limite do domínio modelado no RiverFlow2D[®].

FIGURA 62 – LIMITE DO DOMÍNIO MODELADO NO RIVERFLOW2D®.



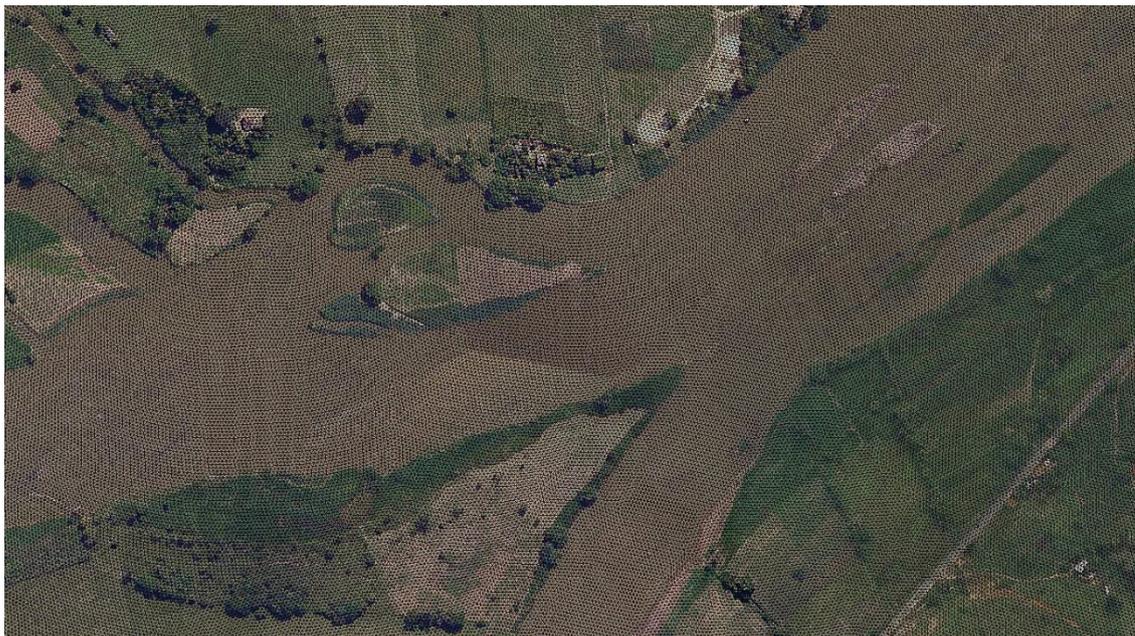
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 63 – DOMÍNIO PARA GERAÇÃO DA MALHA TRIANGULAR ESPAÇADA DE 4 EM 4 METROS.



FONTE: O Autor (2017).

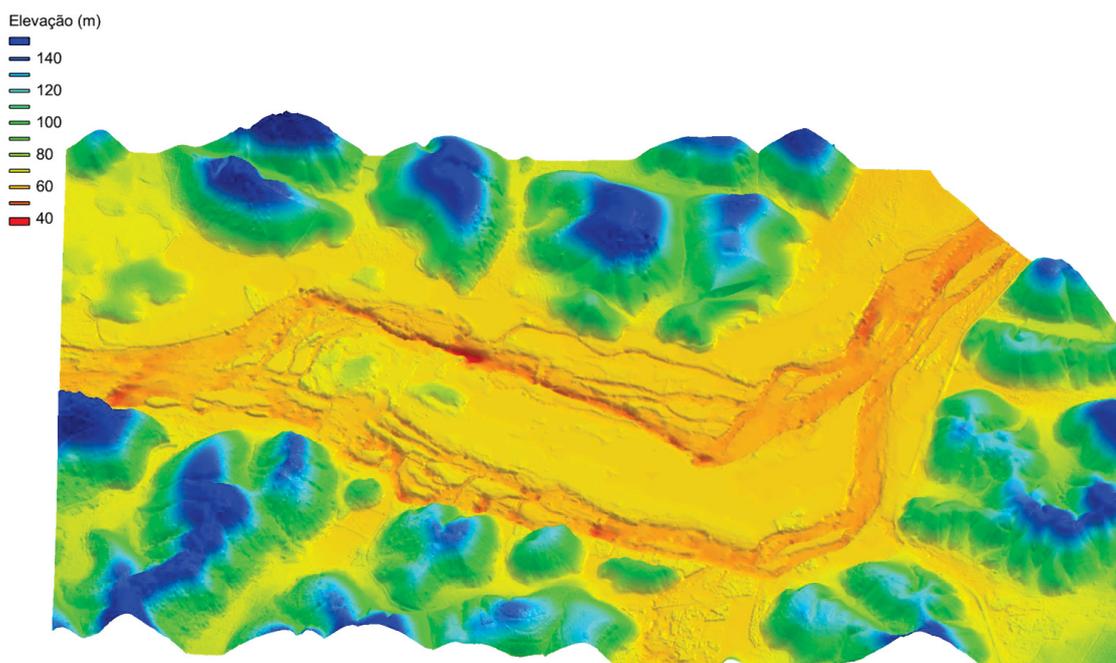
FIGURA 64 – DETALHE PARA MALHA COM ELEMENTOS TRIANGULARES (JUSANTE ILHA).



FONTE: O Autor (2017).

Entre a FIGURA 65 e FIGURA 69, apresenta-se o modelo digital de terreno (MDT) gerado pelo modelo matemático, obtido a partir dos levantamentos topobatimétricos e utilizados nos estudos de modelagem do trecho do rio.

FIGURA 65 – MODELO DIGITAL DO TERRENO DA REGIÃO DE INTERESSE.



FONTE: O Autor (2017).

Foram utilizadas algumas ferramentas do próprio SMS:

FIGURA 66 – MODELO DIGITAL DO TERRENO (VISTA GERAL).



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 67 – MODELO DIGITAL DO TERRENO (VISTA DE JUSANTE DA ILHA).



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 68 – MODELO DIGITAL DO TERRENO (VISTA DE MONTANTE DA ILHA).



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 69 – MODELO DIGITAL DO TERRENO DA REGIÃO DE INTERESSE (VISTA DE JUSANTE).



FONTE: O Autor (2017).

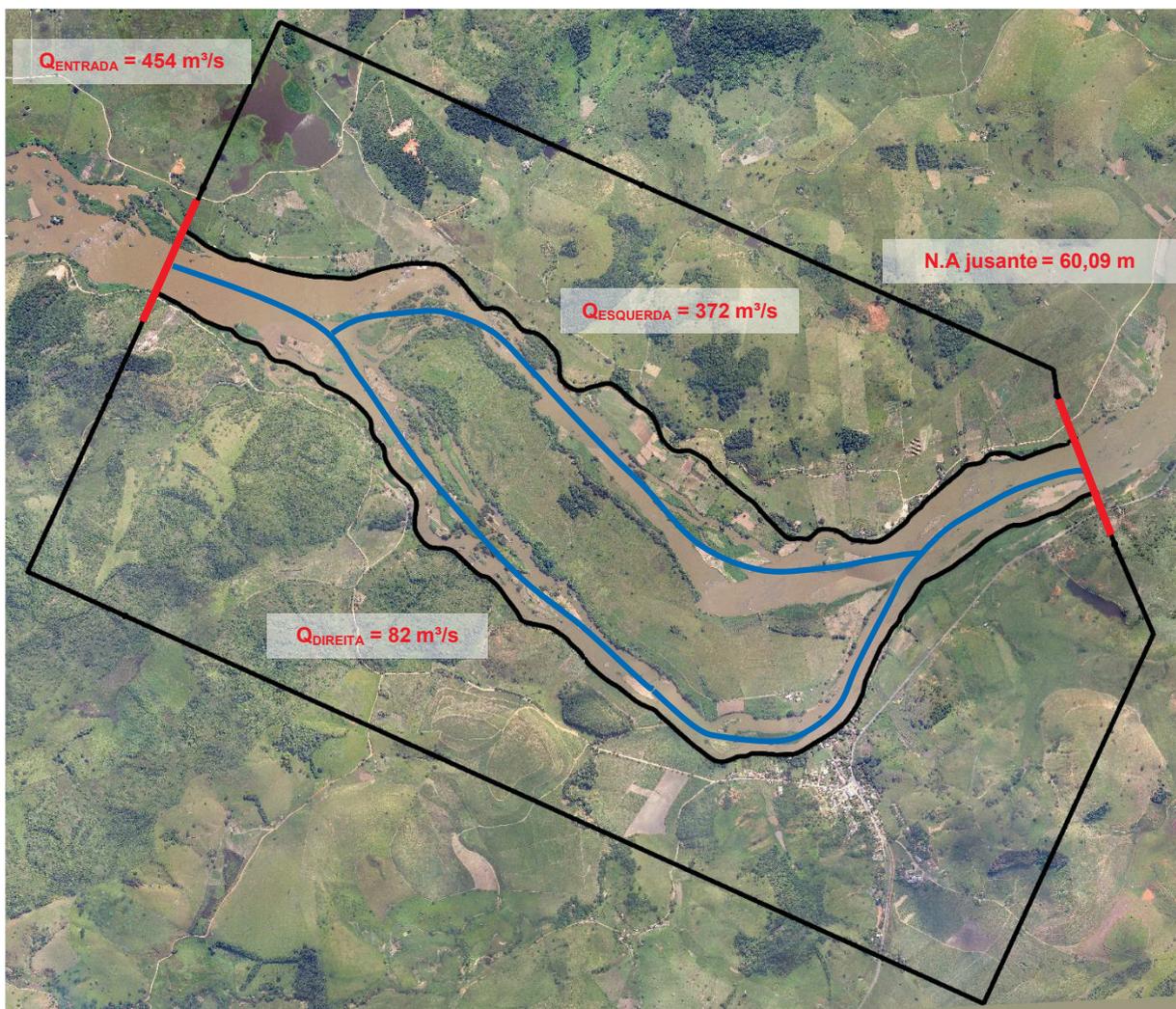
4.3.2 Calibração do Modelo Bidimensional

A etapa de calibração é essencial para a validação dos trabalhos a serem realizados no modelo e seu objetivo fundamental é aproximar, o quanto possível, as condições de escoamento resultantes do modelo matemático aos dados advindos das medições realizadas em campo, de modo a equivaler os níveis de água em pontos homólogos de ambos os sistemas analisados.

Para aferição do modelo, utilizaram-se as seguintes condições de contorno:

- Perfis de linha de água, conforme apresentado no item 3.2.4;
- Vazão total de $454 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Coeficientes de Manning, conforme apresentado no item 3.4.

FIGURA 70 – CONDIÇÕES DE CONTORNO UTILIZADAS NA ETAPA DE CALIBRAÇÃO.



FONTE: O Autor (2017).

4.3.2.1 Primeira Tentativa de Calibração

Para a primeira tentativa de calibração, adotaram-se os coeficientes de rugosidade de Manning apresentados na TABELA 30.

TABELA 30 – COEFICIENTES DE MANNING – PRIMEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.

Manning	
Banco de Areia	0,040
Afloramentos Rochosos	0,500
Curso d'água Jusante	0,035
Curso d'água Margem Direita	0,035
Curso d'água Margem Esquerda	0,035
Curso d'água Médio	0,035
Curso d'água Montante	0,035
Urbanização	0,065
Vegetação Densa	0,100
Vegetação Rasteira	0,045

FONTE: O Autor (2017).

Os resultados da primeira tentativa de calibração estão apresentados na TABELA 31 e os perfis de linha d'água estão graficamente apresentados na FIGURA 71 (braço direito) e FIGURA 72 (braço esquerdo).

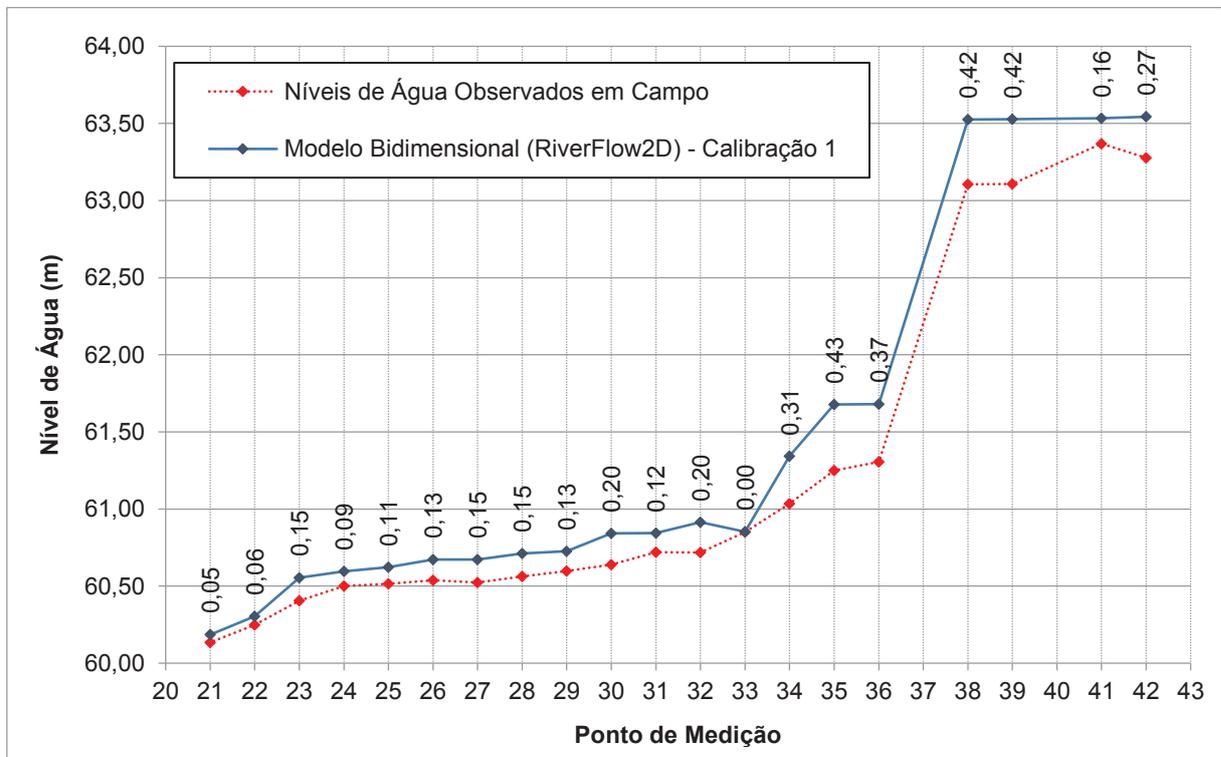
TABELA 31 – RESUMO DOS RESULTADOS – PRIMEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 1 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 1 (m)	Δh Calibração (m)
42	63,28	63,54	0,27	20	63,25	63,55	0,30
41	63,37	63,53	0,16	19	63,21	63,51	0,31
39	63,11	63,53	0,42	18	63,18	63,47	0,29
38	63,11	63,53	0,42	17	62,60	62,56	-0,05
36	61,31	61,68	0,37	16	62,45	62,36	-0,09
35	61,25	61,68	0,43	15	62,08	61,79	-0,28
34	61,04	61,34	0,31	14	61,70	61,71	0,01
33	60,85	60,85	0,00	13	61,70	61,66	-0,04
32	60,72	60,92	0,20	12	61,67	61,65	-0,02
31	60,72	60,84	0,12	11	61,42	61,38	-0,04
30	60,64	60,84	0,20	10	61,39	61,39	0,00
29	60,60	60,73	0,13	9	61,24	61,31	0,07
28	60,56	60,71	0,15	8	60,71	60,77	0,06
27	60,52	60,67	0,15	7	60,47	60,62	0,16

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 1 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 1 (m)	Δh Calibração (m)
26	60,54	60,67	0,13	6	60,43	60,54	0,10
25	60,52	60,62	0,11	5	60,40	60,49	0,09
24	60,50	60,60	0,09	3	60,24	60,25	0,01
23	60,41	60,56	0,15	2	60,10	60,13	0,02
22	60,25	60,30	0,06	1	60,10	60,11	0,01
21	60,14	60,19	0,05				
REMQ		0,2315		REMQ		0,1474	

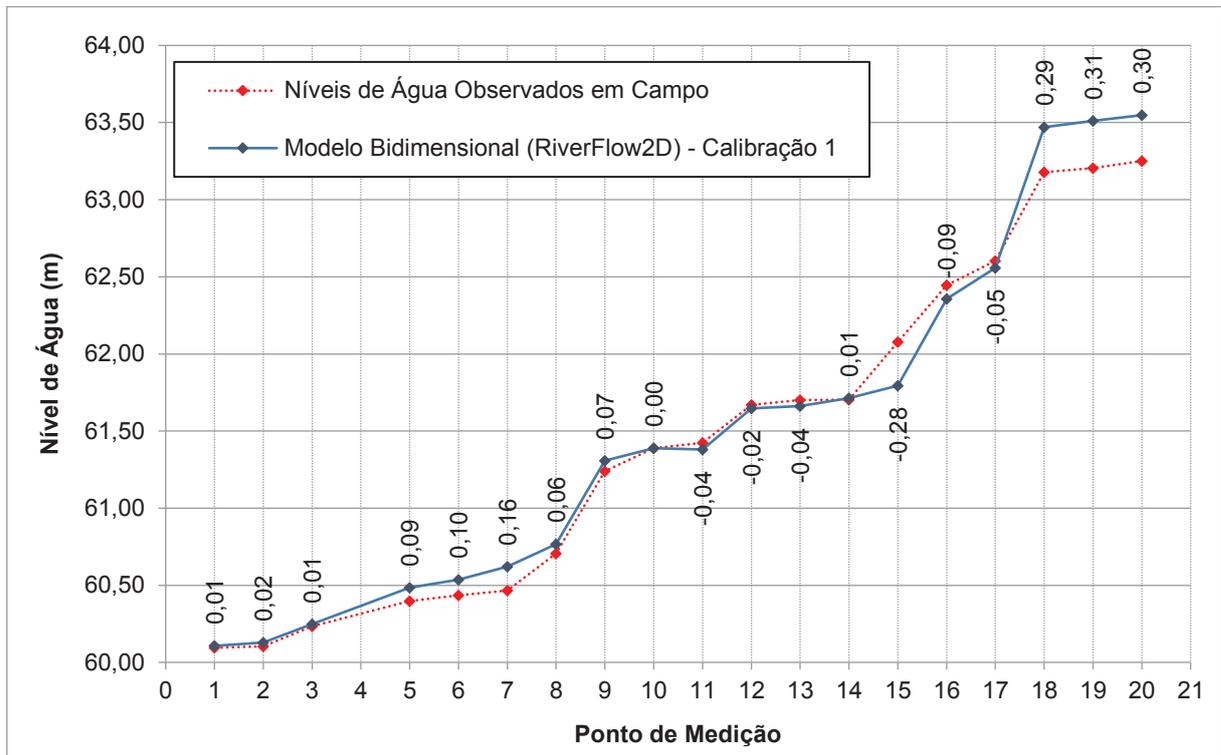
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 71 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – PRIMEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 72 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – PRIMEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.



FONTE: O Autor (2017).

Assim como o modelo hidráulico reduzido e unidimensional, os níveis de água nos pontos 42 ao 34 do braço direito, resultaram acima dos observados em campo. Esses níveis de água mais altos devem-se, provavelmente, aos controles exercidos pelas corredeiras existentes entre os pontos 32 e 35, bem como entre os pontos 38 e 40.

Os níveis de água resultantes nos pontos de números 20, 19 e 18 no braço esquerdo, resultaram mais altos do que as observações de campo. Esses resultados devem-se, provavelmente, ao controle exercido pela corredeira a jusante do ponto 18. Em geral, para os demais pontos do braço esquerdo, os níveis do modelo resultaram com uma diferença máxima de 0,16 metros.

A primeira tentativa de calibração resultou em Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) igual a 0,1964.

4.3.2.2 Segunda Tentativa de Calibração

Para o braço direito, todos os níveis de água medidos na primeira tentativa resultaram acima do medido em campo, por conta disso, foi considerado um coeficiente de Manning de 0,020 no curso d'água margem direita e montante.

Para o braço esquerdo, alguns pontos na primeira tentativa resultaram abaixo do medido em campo (exceto os afetados por controles hidráulicos), por conta disso, foi considerado um coeficiente de Manning de 0,050 no curso d'água margem esquerda.

Para a segunda tentativa de calibração, adotaram-se os coeficientes de rugosidade de Manning apresentados na TABELA 32.

TABELA 32 – COEFICIENTES DE MANNING – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.

Manning	
Banco de Areia	0,040
Afloramentos Rochosos	0,500
Curso d'água Jusante	0,035
Curso d'água Margem Direita	0,020
Curso d'água Margem Esquerda	0,050
Curso d'água Médio	0,035
Curso d'água Montante	0,020
Urbanização	0,065
Vegetação Densa	0,100
Vegetação Rasteira	0,045

FONTE: O Autor (2017).

Os resultados da segunda tentativa de calibração estão apresentados na TABELA 33 e os perfis de linha d'água estão graficamente apresentados na FIGURA 73 (braço direito) e FIGURA 74 (braço esquerdo).

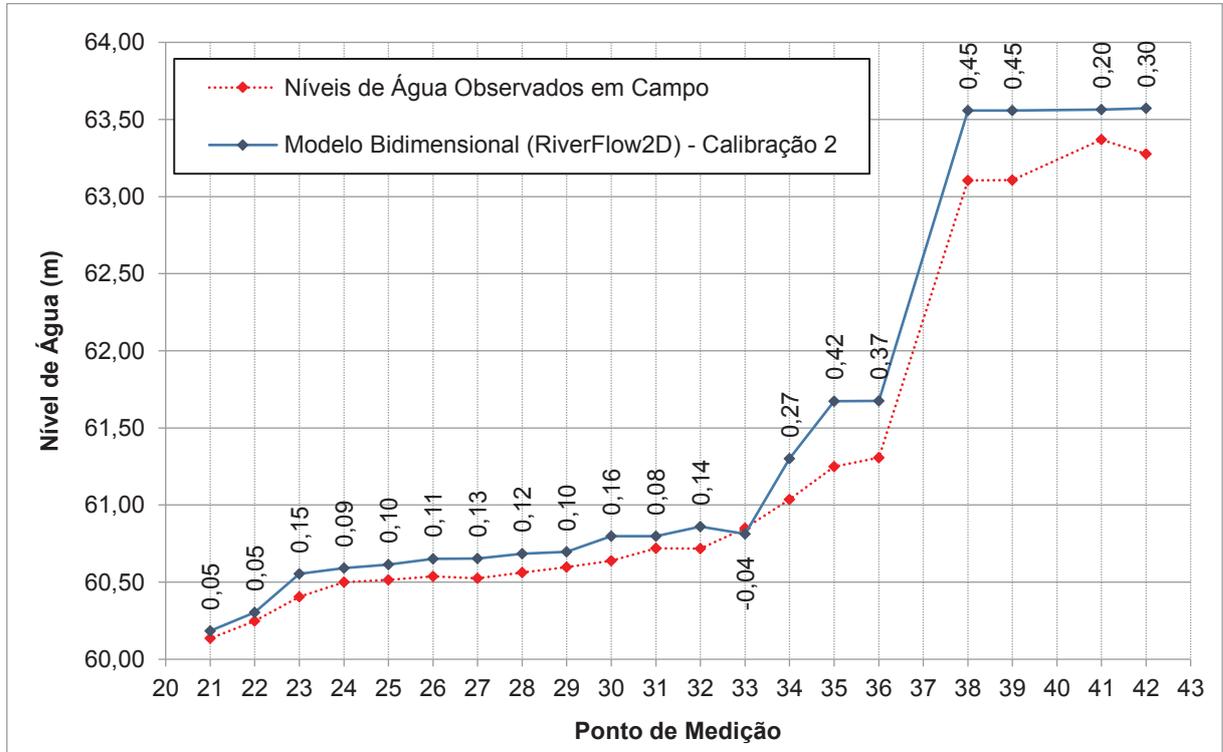
TABELA 33 – RESUMO DOS RESULTADOS – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 2 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 2 (m)	Δh Calibração (m)
42	63,28	63,57	0,30	20	63,25	63,58	0,32
41	63,37	63,56	0,20	19	63,21	63,54	0,33
39	63,11	63,56	0,45	18	63,18	63,49	0,32

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 2 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 2 (m)	Δh Calibração (m)
38	63,11	63,56	0,45	17	62,60	62,62	0,02
36	61,31	61,68	0,37	16	62,45	62,42	-0,03
35	61,25	61,67	0,42	15	62,08	61,88	-0,20
34	61,04	61,30	0,27	14	61,70	61,77	0,07
33	60,85	60,81	-0,04	13	61,70	61,69	-0,01
32	60,72	60,86	0,14	12	61,67	61,68	0,02
31	60,72	60,80	0,08	11	61,42	61,41	-0,02
30	60,64	60,80	0,16	10	61,39	61,42	0,03
29	60,60	60,70	0,10	9	61,24	61,33	0,09
28	60,56	60,68	0,12	8	60,71	60,78	0,07
27	60,52	60,65	0,13	7	60,47	60,62	0,16
26	60,54	60,65	0,11	6	60,43	60,54	0,10
25	60,52	60,61	0,10	5	60,40	60,47	0,07
24	60,50	60,59	0,09	3	60,24	60,25	0,01
23	60,41	60,55	0,15	2	60,10	60,13	0,02
22	60,25	60,30	0,05	1	60,10	60,11	0,01
21	60,14	60,18	0,05				
REMQ		0,2295		REMQ		0,1483	

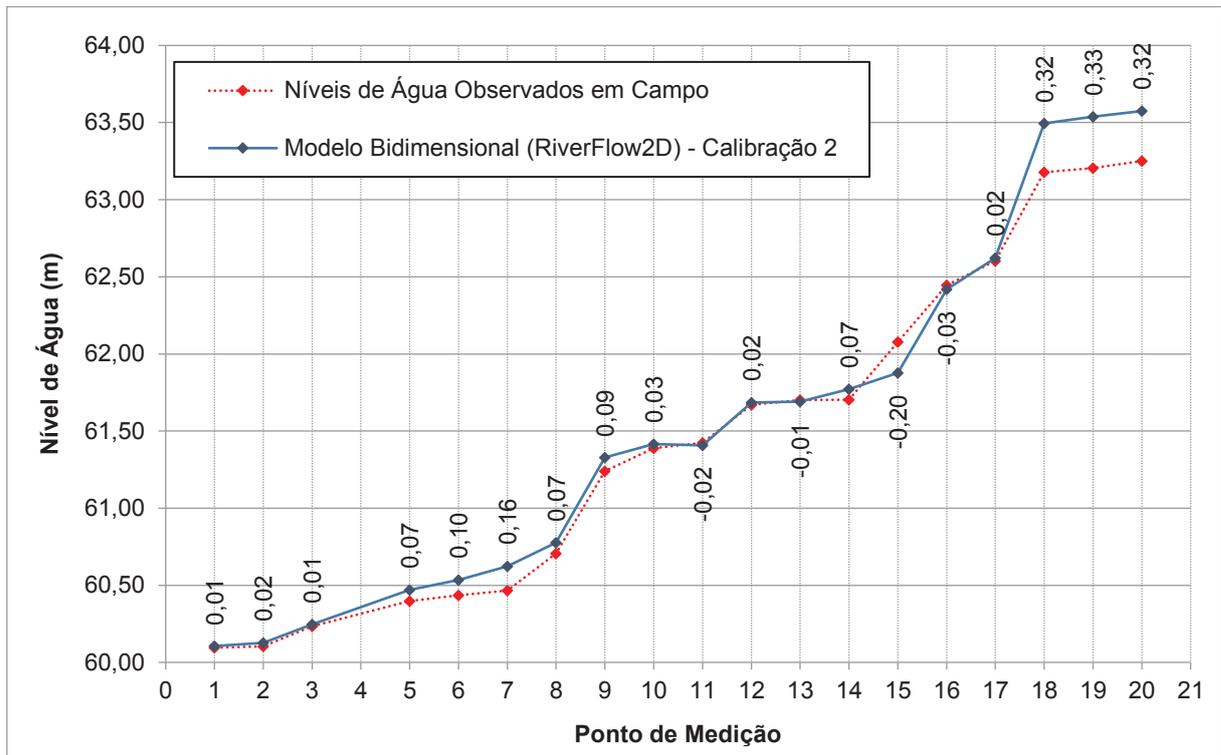
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 73 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 74 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – SEGUNDA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.



FONTE: O Autor (2017).

A alteração no coeficiente de Manning no curso d'água esquerdo foi satisfatória, pois os níveis do modelo apresentaram uma boa aproximação aos níveis os observados em campo.

A segunda tentativa de calibração resultou em Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) igual a 0,1954.

4.3.2.3 Terceira Tentativa de Calibração

Como o nível do braço direito está muito superior ao observado em campo, considerou-se um coeficiente de Manning de 0,750 nos afloramentos rochosos para uma aproximação aos dados observados, assim como um equilíbrio na vazão de 82 m³/s no braço direito e 372 m³/s no braço esquerdo.

Para a terceira tentativa de calibração, adotaram-se os coeficientes de rugosidade de Manning apresentados na TABELA 34.

TABELA 34 – COEFICIENTES DE MANNING – TERCEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.

Manning	
Banco de Areia	0,040
Afloramentos Rochosos	0,750
Curso d'água Jusante	0,035
Curso d'água Margem Direita	0,020
Curso d'água Margem Esquerda	0,050
Curso d'água Médio	0,035
Curso d'água Montante	0,020
Urbanização	0,065
Vegetação Densa	0,100
Vegetação Rasteira	0,045

FONTE: O Autor (2017).

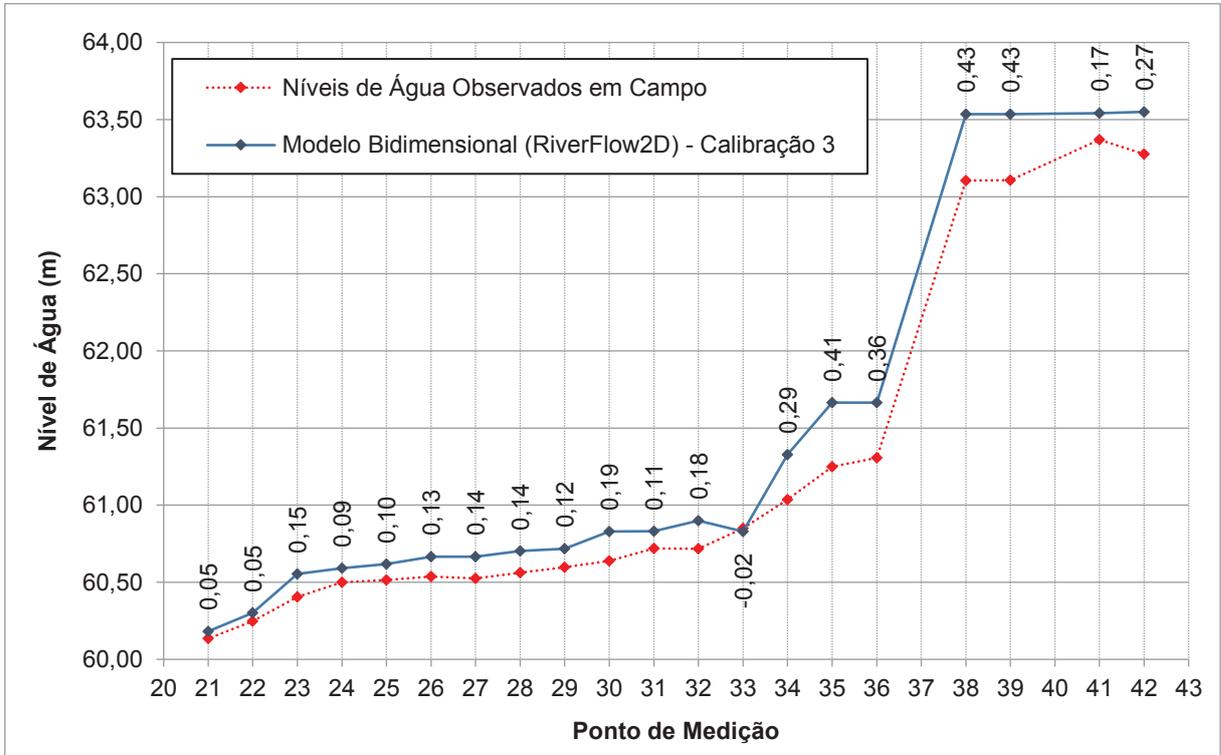
Os resultados da terceira tentativa de calibração estão apresentados na TABELA 35 e os perfis de linha d'água estão graficamente apresentados na FIGURA 75 (braço direito) e FIGURA 76 (braço esquerdo).

TABELA 35 – RESUMO DOS RESULTADOS – TERCEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 3 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 3 (m)	Δh Calibração (m)
42	63,28	63,55	0,27	20	63,25	63,56	0,30
41	63,37	63,54	0,17	19	63,21	63,52	0,31
39	63,11	63,54	0,43	18	63,18	63,48	0,30
38	63,11	63,54	0,43	17	62,60	62,57	-0,03
36	61,31	61,67	0,36	16	62,45	62,37	-0,08
35	61,25	61,67	0,41	15	62,08	61,80	-0,27
34	61,04	61,33	0,29	14	61,70	61,72	0,02
33	60,85	60,83	-0,02	13	61,70	61,67	-0,03
32	60,72	60,90	0,18	12	61,67	61,65	-0,01
31	60,72	60,83	0,11	11	61,42	61,39	-0,04
30	60,64	60,83	0,19	10	61,39	61,39	0,00
29	60,60	60,72	0,12	9	61,24	61,31	0,07
28	60,56	60,70	0,14	8	60,71	60,77	0,06
27	60,52	60,67	0,14	7	60,47	60,62	0,15
26	60,54	60,67	0,13	6	60,43	60,54	0,10
25	60,52	60,62	0,10	5	60,40	60,48	0,08
24	60,50	60,59	0,09	3	60,24	60,25	0,01
23	60,41	60,55	0,15	2	60,10	60,12	0,02
22	60,25	60,30	0,05	1	60,10	60,10	0,01
21	60,14	60,18	0,05				
REMQ		0,2279		REMQ		0,1476	

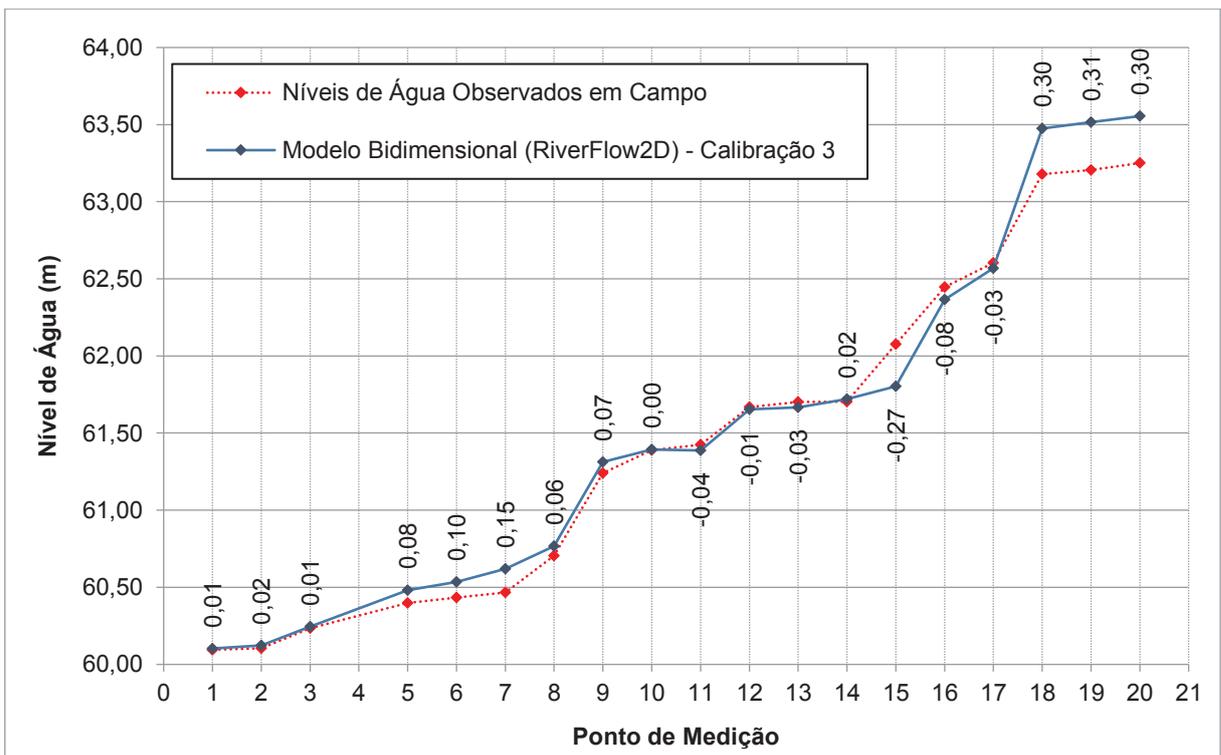
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 75 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – TERCEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 76 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – TERCEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.



FONTE: O Autor (2017).

A alteração no coeficiente de Manning dos afloramentos rochosos ainda não foi satisfatória, pois os níveis do modelo não apresentaram uma aproximação aos níveis os observados em campo, evidenciando a necessidade de aumentar o coeficiente para a próxima tentativa.

A terceira tentativa de calibração resultou em Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) igual a 0,1943.

4.3.2.4 Quarta Tentativa de Calibração

Para uma aproximação aos dados observados, assim como um equilíbrio na vazão de 82 m³/s no braço direito e 372 m³/s no braço esquerdo, considerou-se um conjunto de alterações simultâneas no braço direito, sendo coeficiente de Manning igual a 0,950 nos afloramentos rochoso e no curso d'água margem direita igual a 0,030.

Para a quarta tentativa de calibração, adotaram-se os coeficientes de rugosidade de Manning apresentados na TABELA 36.

TABELA 36 – COEFICIENTES DE MANNING – QUARTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.

Manning	
Banco de Areia	0,040
Afloramentos Rochosos	0,950
Curso d'água Jusante	0,035
Curso d'água Margem Direita	0,030
Curso d'água Margem Esquerda	0,050
Curso d'água Médio	0,035
Curso d'água Montante	0,020
Urbanização	0,065
Vegetação Densa	0,100
Vegetação Rasteira	0,045

FONTE: O Autor (2017).

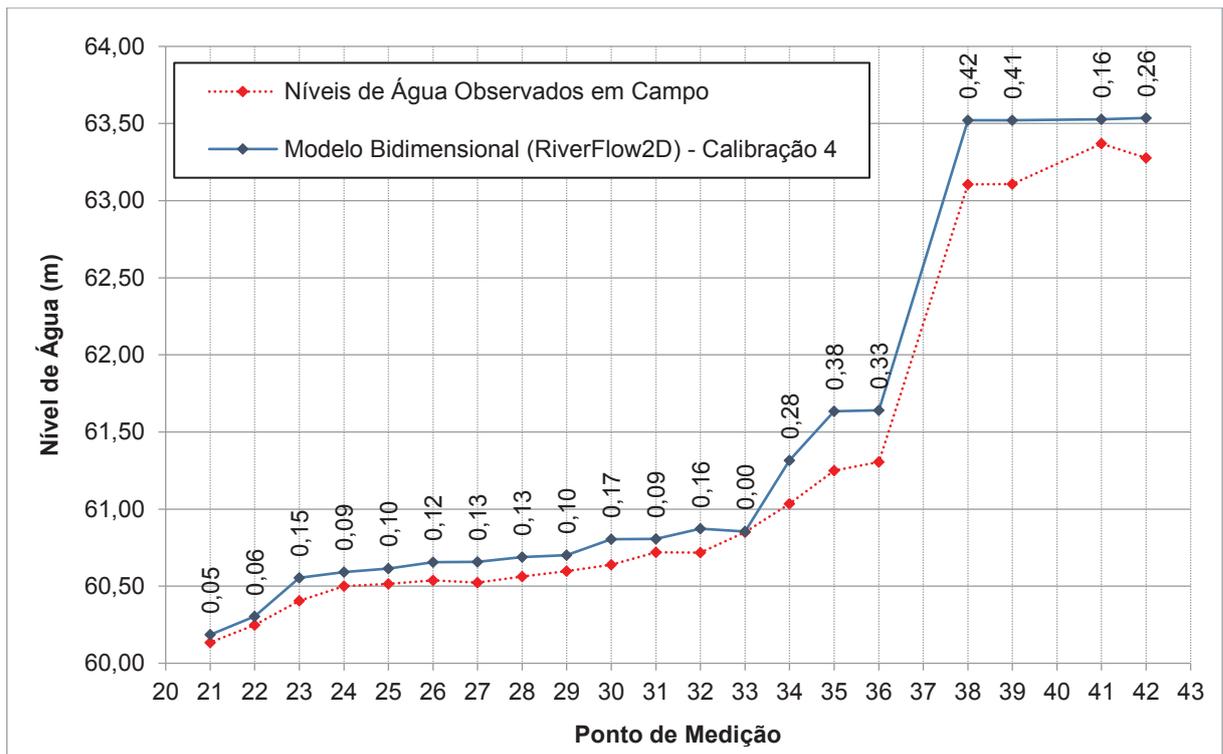
Os resultados da quarta tentativa de calibração estão apresentados na TABELA 37 e os perfis de linha d'água estão graficamente apresentados na FIGURA 77 (braço direito) e FIGURA 78 (braço esquerdo).

TABELA 37 – RESUMO DOS RESULTADOS – QUARTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 4 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 4 (m)	Δh Calibração (m)
42	63,28	63,54	0,26	20	63,25	63,54	0,29
41	63,37	63,53	0,16	19	63,21	63,50	0,30
39	63,11	63,52	0,41	18	63,18	63,46	0,28
38	63,11	63,52	0,42	17	62,60	62,54	-0,06
36	61,31	61,64	0,33	16	62,45	62,35	-0,10
35	61,25	61,63	0,38	15	62,08	61,81	-0,27
34	61,04	61,32	0,28	14	61,70	61,74	0,04
33	60,85	60,85	0,00	13	61,70	61,68	-0,02
32	60,72	60,87	0,16	12	61,67	61,67	0,01
31	60,72	60,81	0,09	11	61,42	61,40	-0,02
30	60,64	60,81	0,17	10	61,39	61,41	0,02
29	60,60	60,70	0,10	9	61,24	61,33	0,09
28	60,56	60,69	0,13	8	60,71	60,77	0,07
27	60,52	60,66	0,13	7	60,47	60,62	0,16
26	60,54	60,66	0,12	6	60,43	60,54	0,10
25	60,52	60,62	0,10	5	60,40	60,48	0,09
24	60,50	60,59	0,09	3	60,24	60,25	0,01
23	60,41	60,55	0,15	2	60,10	60,13	0,02
22	60,25	60,30	0,06	1	60,10	60,11	0,01
21	60,14	60,19	0,05				
REMQ		0,2145		REMQ		0,1434	

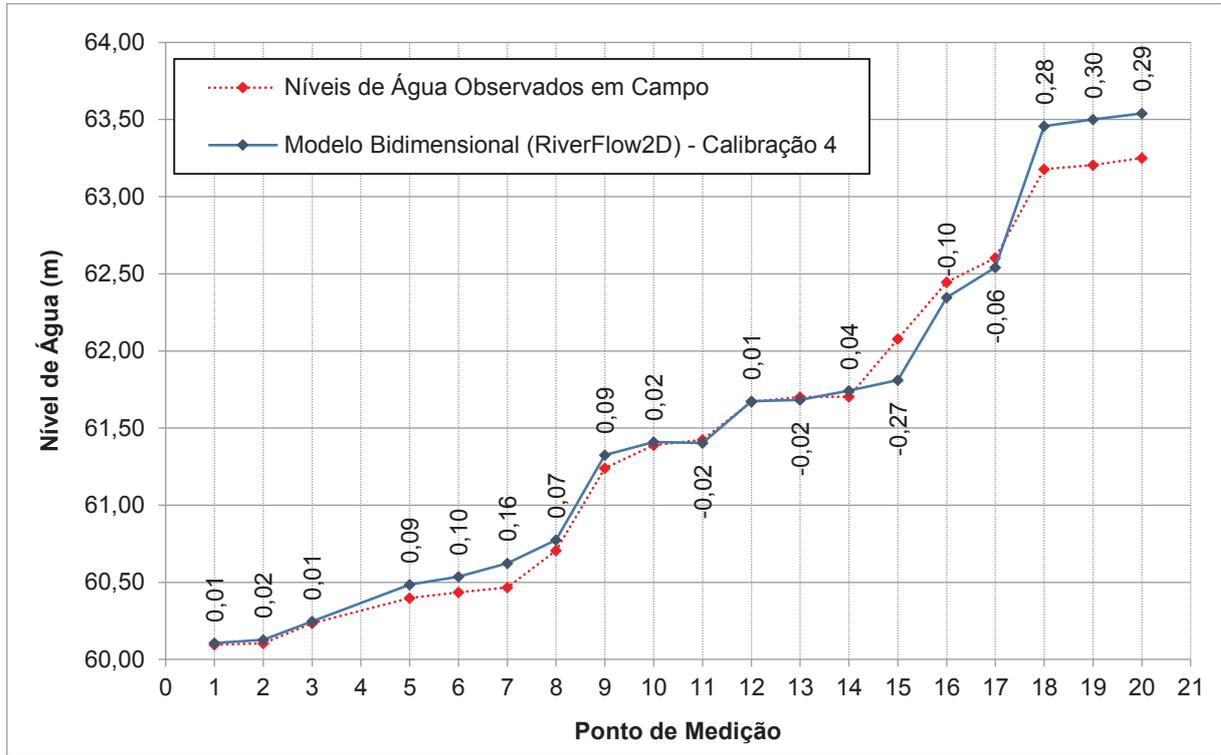
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 77 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – QUARTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 78 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – QUARTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.



FONTE: O Autor (2017).

O conjunto de alterações simultâneas no braço direito apresentou resultados muito satisfatórios, sendo coeficiente de Manning igual a 0,950 nos afloramentos rochoso e no curso d'água margem direita igual a 0,030.

A quarta tentativa de calibração resultou em Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) igual a 0,1846.

4.3.2.5 Quinta Tentativa de Calibração

Para as alterações no braço esquerdo, considerou-se um coeficiente de Manning de 0,020 no curso d'água jusante e 0,040 no curso d'água margem esquerda, buscando uma aproximação dos níveis observados em campo para o braço direito.

Para a quinta tentativa de calibração, adotaram-se os coeficientes de rugosidade de Manning apresentados na

TABELA 38 – COEFICIENTES DE MANNING – QUINTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.

Manning	
Banco de Areia	0,040
Afloramentos Rochosos	0,950
Curso d'água Jusante	0,020
Curso d'água Margem Direita	0,030
Curso d'água Margem Esquerda	0,040
Curso d'água Médio	0,035
Curso d'água Montante	0,020
Urbanização	0,065
Vegetação Densa	0,100
Vegetação Rasteira	0,045

FONTE: O Autor (2017).

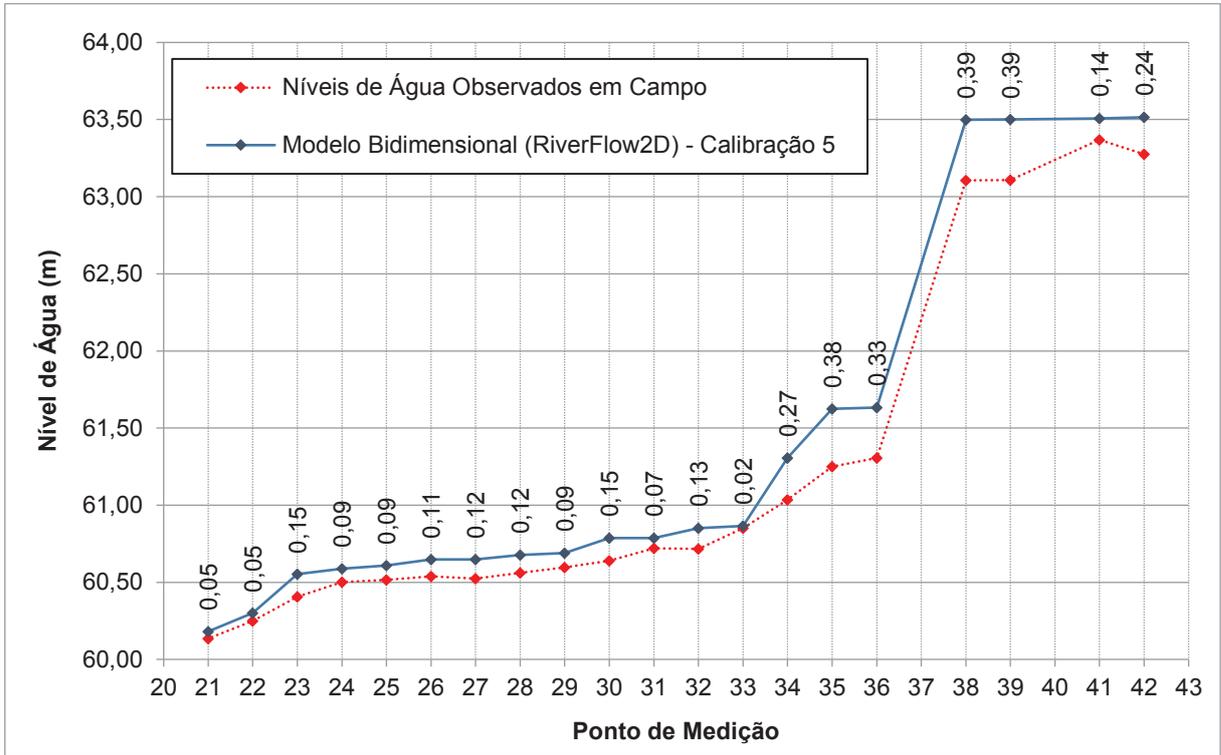
Os resultados da quinta tentativa de calibração estão apresentados na TABELA 39 e os perfis de linha d'água estão graficamente apresentados na FIGURA 79 (braço direito) e FIGURA 80 (braço esquerdo).

TABELA 39 – RESUMO DOS RESULTADOS – QUINTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 5 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 5 (m)	Δh Calibração (m)
42	63,28	63,52	0,24	20	63,25	63,52	0,27
41	63,37	63,51	0,14	19	63,21	63,48	0,27
39	63,11	63,50	0,39	18	63,18	63,43	0,26
38	63,11	63,50	0,39	17	62,60	62,51	-0,10
36	61,31	61,63	0,33	16	62,45	62,32	-0,13
35	61,25	61,63	0,38	15	62,08	61,81	-0,27
34	61,04	61,31	0,27	14	61,70	61,76	0,05
33	60,85	60,87	0,02	13	61,70	61,69	-0,01
32	60,72	60,85	0,13	12	61,67	61,69	0,02
31	60,72	60,79	0,07	11	61,42	61,41	-0,01
30	60,64	60,79	0,15	10	61,39	61,42	0,03
29	60,60	60,69	0,09	9	61,24	61,33	0,09
28	60,56	60,68	0,12	8	60,71	60,78	0,07
27	60,52	60,65	0,12	7	60,47	60,62	0,16
26	60,54	60,65	0,11	6	60,43	60,53	0,10
25	60,52	60,61	0,09	5	60,40	60,48	0,08
24	60,50	60,59	0,09	3	60,24	60,25	0,01
23	60,41	60,55	0,15	2	60,10	60,12	0,02
22	60,25	60,30	0,05	1	60,10	60,10	0,01
21	60,14	60,18	0,05				
REMQ		0,2032		REMQ		0,1393	

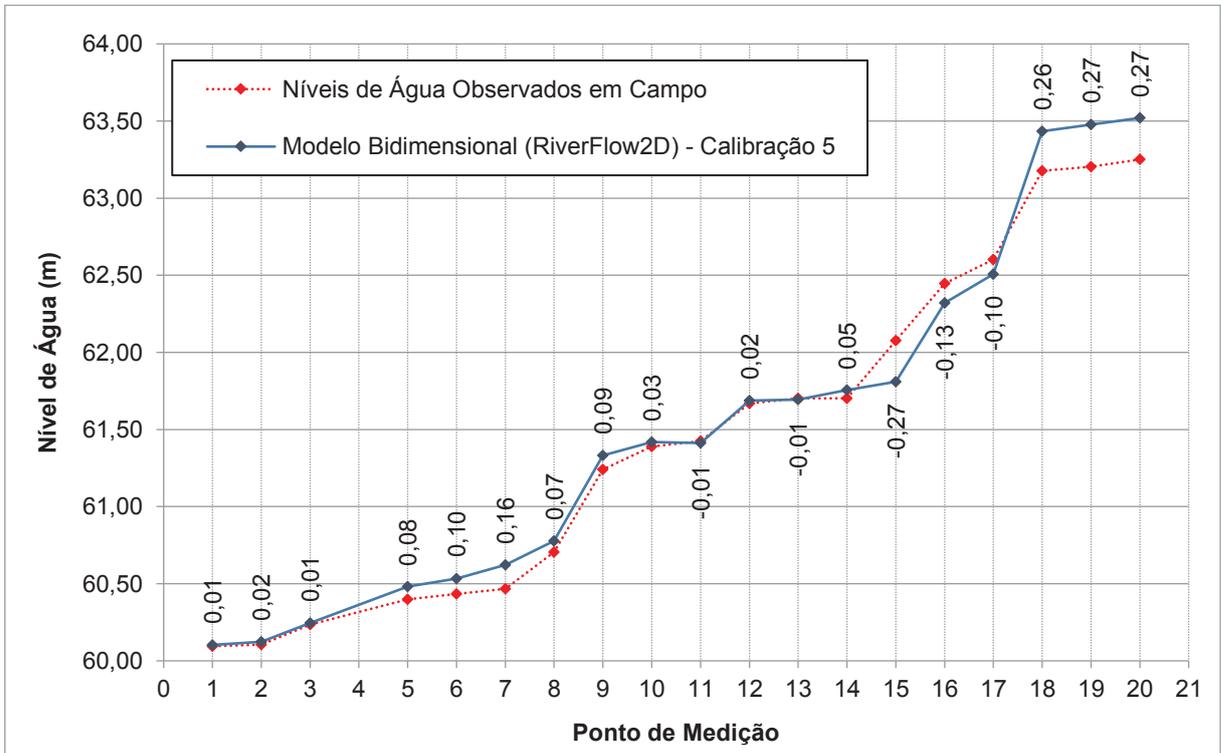
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 79 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – QUINTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 80 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – QUINTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.



FONTE: O Autor (2017).

A alteração no coeficiente de Manning no curso d'água jusante mostrou uma boa aproximação para os pontos ao longo do braço esquerdo e direito, considerando-se satisfatória para calibração do braço esquerdo. A partir do ponto 18, a maior diferença com os níveis observados em campo é de 0,16 metros, exceto pelo ponto 15 que apresenta diferença de nível de água 0,27 metros abaixo do observado.

A quinta tentativa de calibração resultou em Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) igual a 0,1763.

4.3.2.6 Sexta Tentativa de Calibração

Como os níveis de água ainda resultaram acima do medido em campo, considerou-se um coeficiente de Manning de 0,020 no banco de areia e 0,027 no curso d'água margem direita, buscando uma aproximação dos níveis observados em campo para o braço direito.

Para a sexta tentativa de calibração, adotaram-se os coeficientes de rugosidade de Manning apresentados na TABELA 40.

TABELA 40 – COEFICIENTES DE MANNING – SEXTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.

Manning	
Banco de Areia	0,020
Afloramentos Rochosos	0,950
Curso d'água Jusante	0,020
Curso d'água Margem Direita	0,027
Curso d'água Margem Esquerda	0,040
Curso d'água Médio	0,035
Curso d'água Montante	0,020
Urbanização	0,065
Vegetação Densa	0,100
Vegetação Rasteira	0,045

FONTE: O Autor (2017).

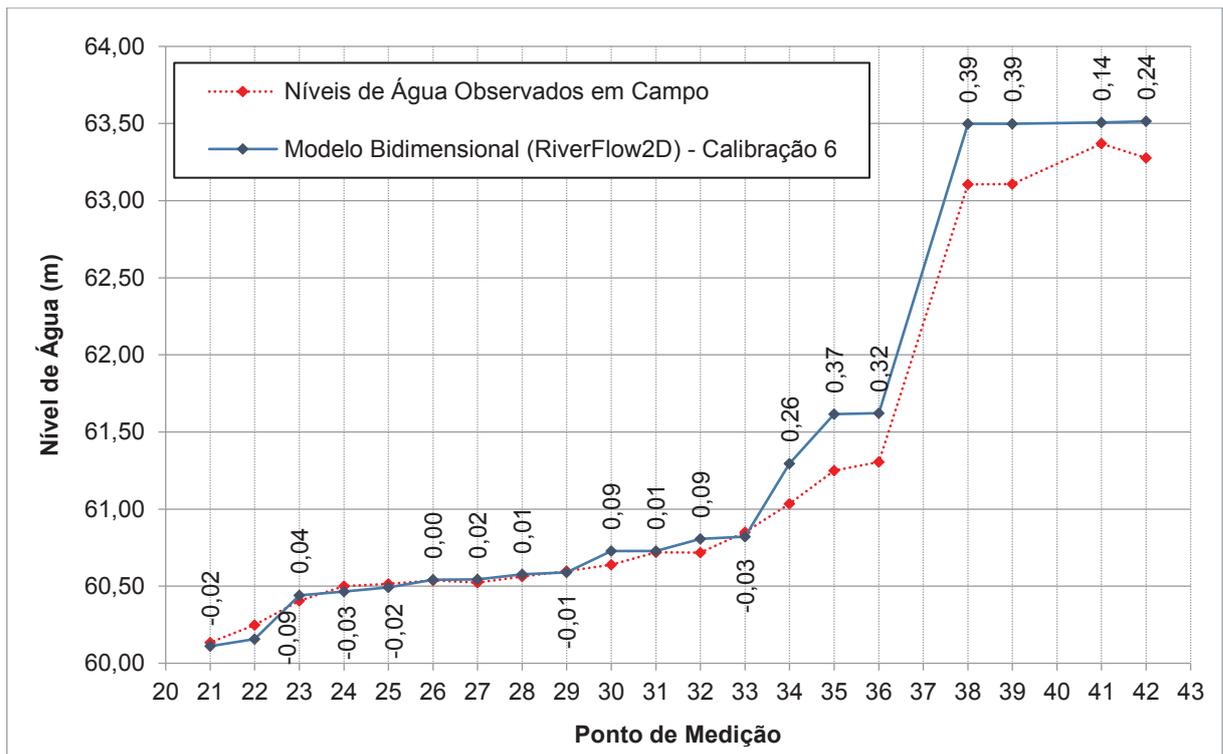
Os resultados da sexta tentativa de calibração estão apresentados na TABELA 41 e os perfis de linha d'água estão graficamente apresentados na FIGURA 81 (braço direito) e FIGURA 82 (braço esquerdo).

TABELA 41 – RESUMO DOS RESULTADOS – SEXTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 6 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Calibração 6 (m)	Δh Calibração (m)
42	63,28	63,51	0,24	20	63,25	63,52	0,27
41	63,37	63,51	0,14	19	63,21	63,48	0,27
39	63,11	63,50	0,39	18	63,18	63,43	0,26
38	63,11	63,50	0,39	17	62,60	62,50	-0,10
36	61,31	61,62	0,32	16	62,45	62,31	-0,13
35	61,25	61,62	0,37	15	62,08	61,80	-0,27
34	61,04	61,30	0,26	14	61,70	61,75	0,04
33	60,85	60,82	-0,03	13	61,70	61,69	-0,01
32	60,72	60,81	0,09	12	61,67	61,68	0,01
31	60,72	60,73	0,01	11	61,42	61,40	-0,02
30	60,64	60,73	0,09	10	61,39	61,41	0,02
29	60,60	60,59	-0,01	9	61,24	61,33	0,09
28	60,56	60,58	0,01	8	60,71	60,70	-0,01
27	60,52	60,54	0,02	7	60,47	60,51	0,04
26	60,54	60,54	0,00	6	60,43	60,40	-0,03
25	60,52	60,49	-0,02	5	60,40	60,36	-0,03
24	60,50	60,47	-0,03	3	60,24	60,13	-0,11
23	60,41	60,44	0,04	2	60,10	60,11	0,00
22	60,25	60,16	-0,09	1	60,10	60,10	0,00
21	60,14	60,11	-0,02				
REMQ		0,1871		REMQ		0,1336	

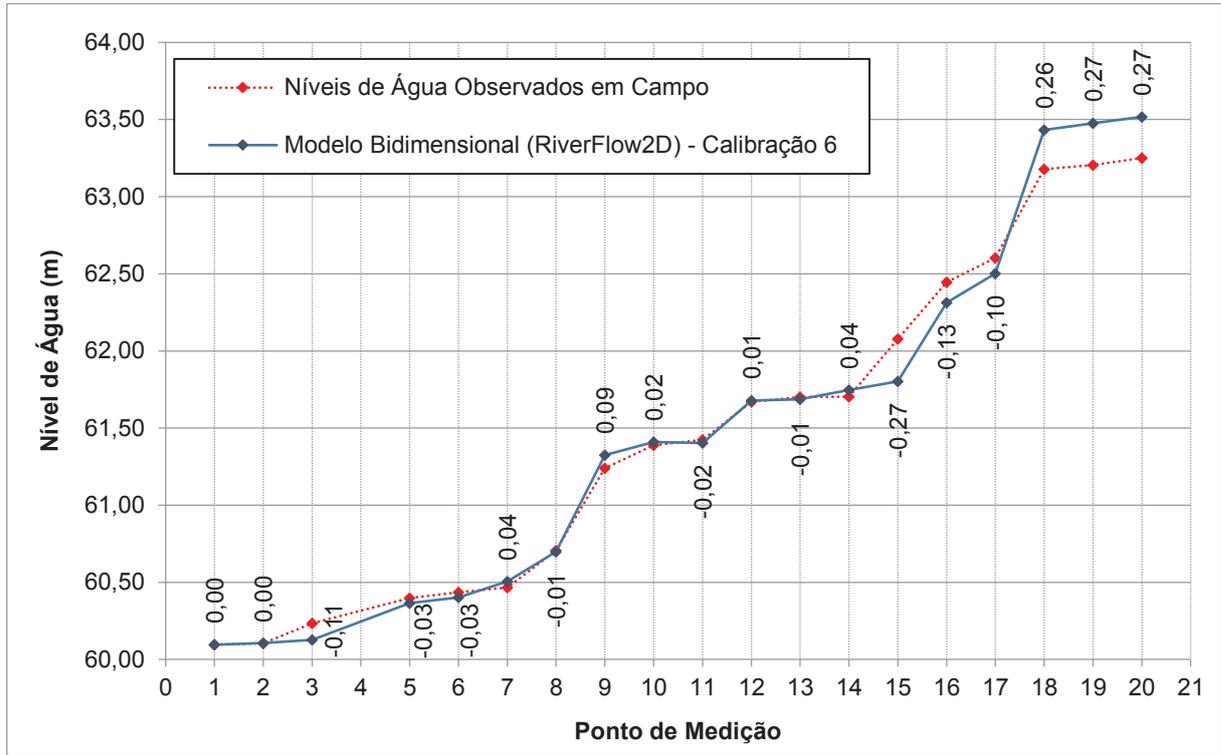
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 81 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – SEXTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 82 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – SEXTA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO – RIVERFLOW2D®.



FONTE: O Autor (2017).

Após todas as intervenções realizadas verificou-se que o modelo bidimensional apresentou níveis de água similares aos observados em campo, com diferença máxima da ordem de 0,10 metros, exceto pelos pontos 34 a 42 (braço esquerdo) e pontos 15, 20 e 21 (braço direito). Podendo-se considerar um resultado muito satisfatório, com Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) igual a 0,1871 e 0,1336, respetivamente, para braço direito e esquerdo.

A sexta tentativa de calibração resultou em Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) igual a 0,1643.

4.3.3 Resultados da Calibração do Modelo Bidimensional

Em relação aos níveis de água obtidos no modelo matemático na região de montante (Pontos 19, 20 e 41, 42) é possível observar que há um distanciamento máximo da ordem de 0,30 metros para os valores obtidos em campo. Este comportamento pode ser justificado pela proximidade desta região com o limite de

montante do trecho modelado, acarretando em uma instabilidade do escoamento e um distanciamento que pode ser considerado natural dos resultados.

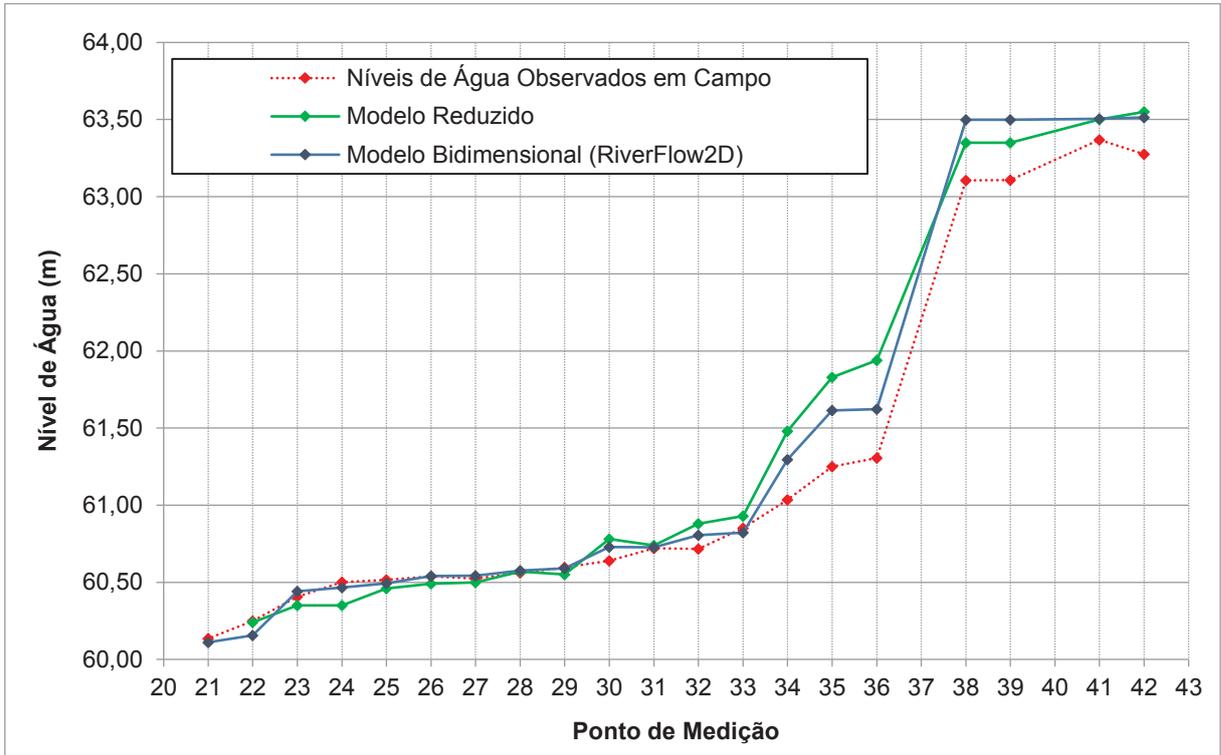
Observa-se que os resultados de nível de água entre os Pontos 34 e 39 são mais elevados do que os obtidos nas medições de campo, distanciamento máximo da ordem de 0,40 metros. Esse comportamento pode ser devido às características do leito do curso de água nesta região onde são evidenciadas diversas ilhas e afloramentos rochosos que podem não ter sido capturados de maneira satisfatória pelos levantamentos batimétricos e que prejudicam na representação matemática dos fenômenos do escoamento presentes nesta região.

A partir do Ponto 33 e seguindo a análise pela região da braço direito e jusante da ilha, nota-se que os resultados de níveis de água aderem de forma muito satisfatória aos resultados das medições de campo, com distanciamento máximo na ordem de 0,10 metros.

A partir do Ponto 14 e seguindo a análise pela região da margem esquerda do rio, nota-se que os resultados de níveis de água aderem de forma muito satisfatória aos resultados das medições de campo, com distanciamento máximo na ordem de 0,10 metros.

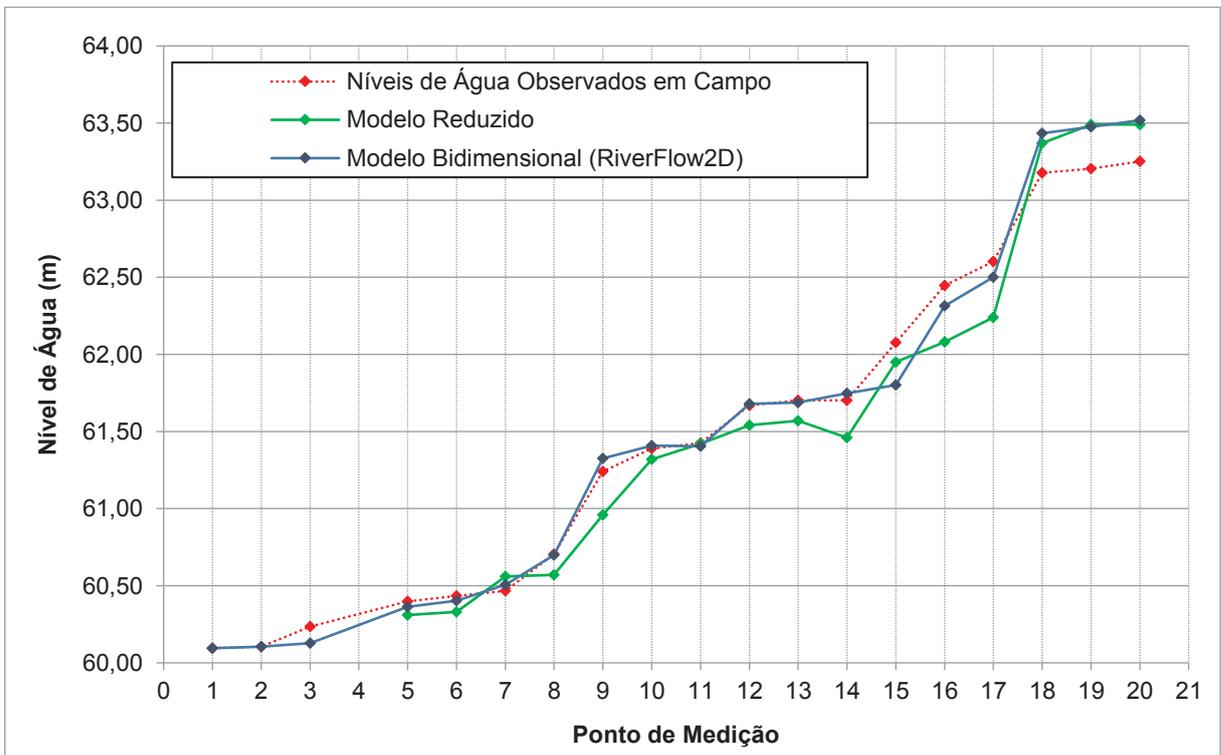
Na FIGURA 83 e FIGURA 84, apresenta-se a título de comparação, uma análise da calibração entre modelo reduzido e modelo bidimensional.

FIGURA 83 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – ANÁLISE ENTRE MODELO REDUZIDO E MODELO BIDIMENSIONAL



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 84 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – ANÁLISE ENTRE MODELO REDUZIDO E MODELO BIDIMENSIONAL



FONTE: O Autor (2017).

4.3.4 Simulações do Modelo Bidimensional

Uma das maiores dúvidas em modelagem computacional é sobre distância entre seções e tamanho de malha a ser utilizada. Para esta análise de sensibilidade nos modelos computacionais, realizou-se além da calibração outras três (3) simulações alterando as características do modelo:

- Calibração 6: Malha com elementos triangulares de 4 metros;
- Simulação 1: Malha com elementos triangulares de 10 metros;
- Simulação 2: Malha com elementos triangulares de 20 metros;
- Simulação 3: Malha com elementos triangulares de 50 metros.

4.3.4.1 Primeira Simulação do Modelo - Malha com elementos de 10 metros

Utilizando como base o modelo da sexta tentativa de calibração, realizou-se o ajuste dos elementos triangulares, ou seja, alterando-se de 4 para 10 metros. Na FIGURA 85, apresenta-se a malha com elementos triangulares de 10 metros.

FIGURA 85 – MALHA TRIANGULAR DE 10 METROS – PRIMEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.



FONTE: O Autor (2017).

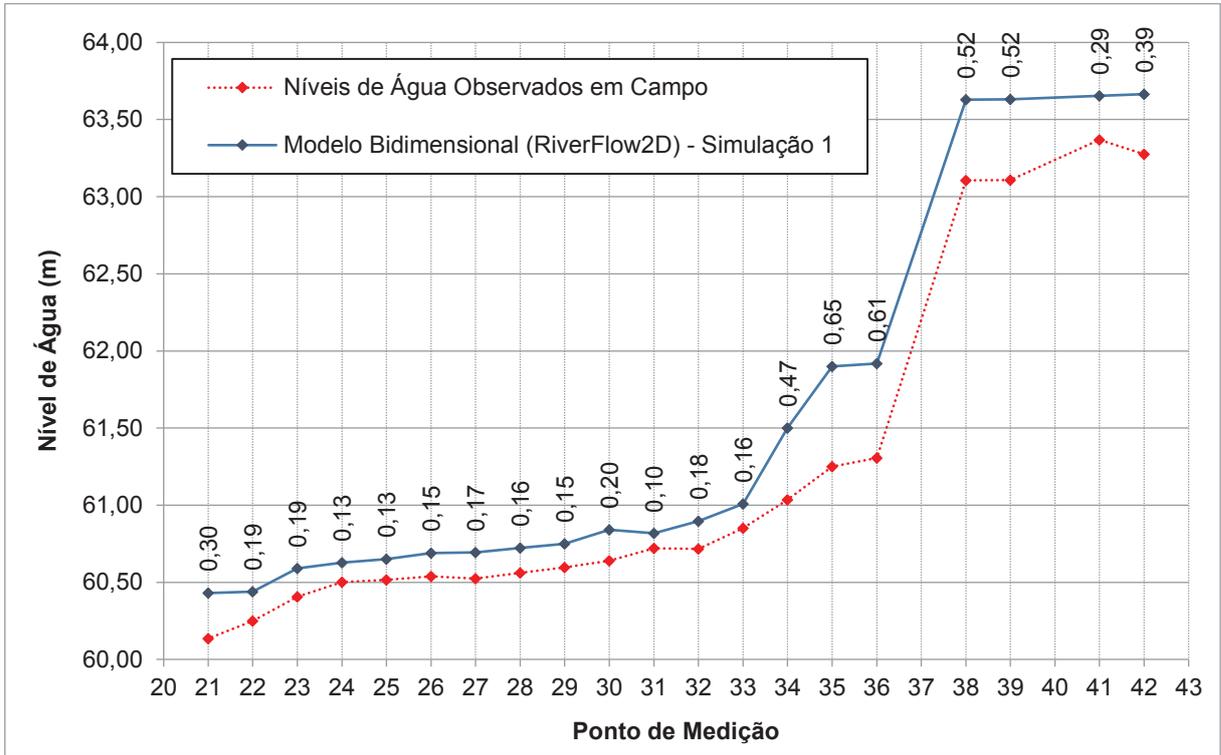
Os resultados da primeira simulação do modelo estão apresentados na TABELA 42 e os perfis de linha d'água estão graficamente apresentados na FIGURA 86 (braço direito) e FIGURA 87 (braço esquerdo).

TABELA 42 – RESUMO DOS RESULTADOS – PRIMEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Simulação 1 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Simulação 1 (m)	Δh Calibração (m)
42	63,28	63,67	0,39	20	63,25	63,66	0,41
41	63,37	63,66	0,29	19	63,21	63,62	0,41
39	63,11	63,63	0,52	18	63,18	63,55	0,37
38	63,11	63,63	0,52	17	62,60	62,79	0,19
36	61,31	61,92	0,61	16	62,45	62,64	0,19
35	61,25	61,90	0,65	15	62,08	62,21	0,13
34	61,04	61,50	0,47	14	61,70	61,99	0,28
33	60,85	61,01	0,16	13	61,70	61,72	0,02
32	60,72	60,90	0,18	12	61,67	61,75	0,08
31	60,72	60,82	0,10	11	61,42	61,31	-0,12
30	60,64	60,84	0,20	10	61,39	61,34	-0,05
29	60,60	60,75	0,15	9	61,24	61,08	-0,16
28	60,56	60,72	0,16	8	60,71	60,86	0,15
27	60,52	60,69	0,17	7	60,47	60,79	0,33
26	60,54	60,69	0,15	6	60,43	60,55	0,12
25	60,52	60,65	0,13	5	60,40	60,55	0,15
24	60,50	60,63	0,13	3	60,24	60,42	0,18
23	60,41	60,59	0,19	2	60,10	60,12	0,01
22	60,25	60,44	0,19	1	60,10	60,13	0,04
21	60,14	60,43	0,30				
REMQ		0,3292		REMQ		0,2170	

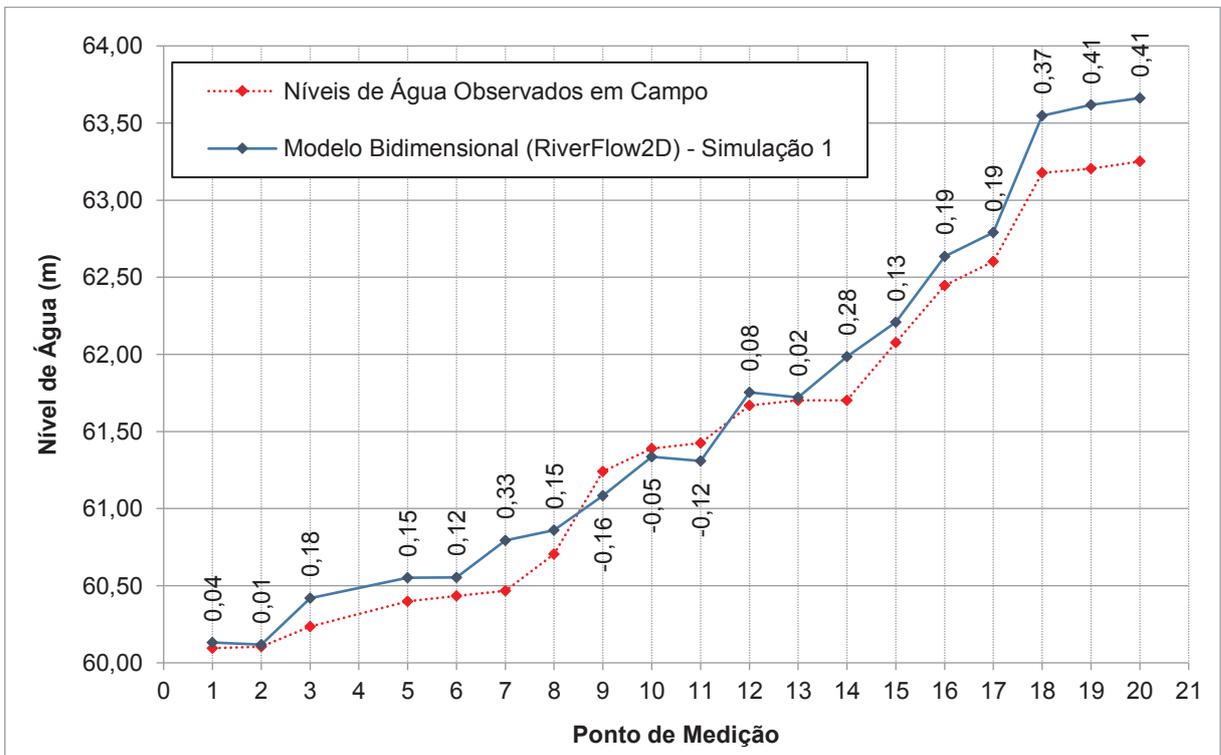
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 86 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – PRIMEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 87 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – PRIMEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.



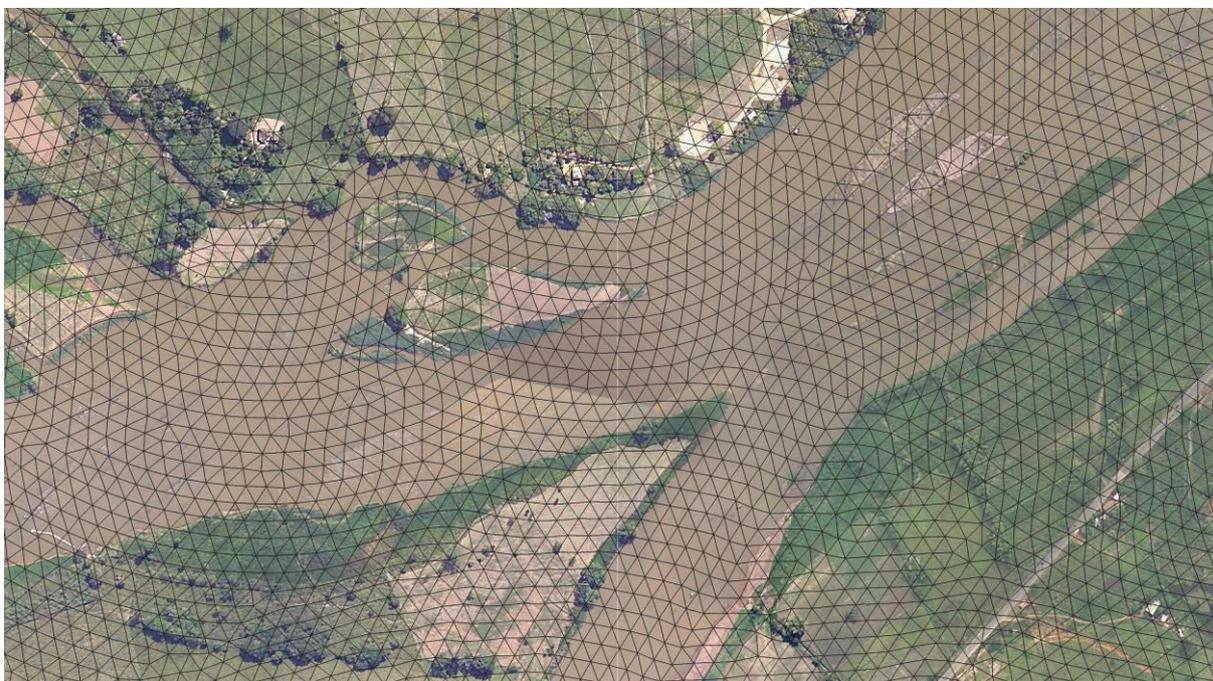
FONTE: O Autor (2017).

A primeira simulação do modelo resultou em Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) igual a 0,2815.

4.3.4.2 Segunda Simulação do Modelo - Malha com elementos de 20 metros

Utilizando como base o modelo da sexta tentativa de calibração, realizou-se o ajuste dos elementos triangulares, ou seja, alterando-se de 10 para 20 metros. Na FIGURA 88, apresenta-se a malha com elementos triangulares de 20 metros.

FIGURA 88 – MALHA TRIANGULAR DE 20 METROS – SEGUNDA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.



FONTE: O Autor (2017).

Os resultados da segunda simulação do modelo estão apresentados na TABELA 43 e os perfis de linha d'água estão graficamente apresentados na FIGURA 89 (braço direito) e FIGURA 90 (braço esquerdo).

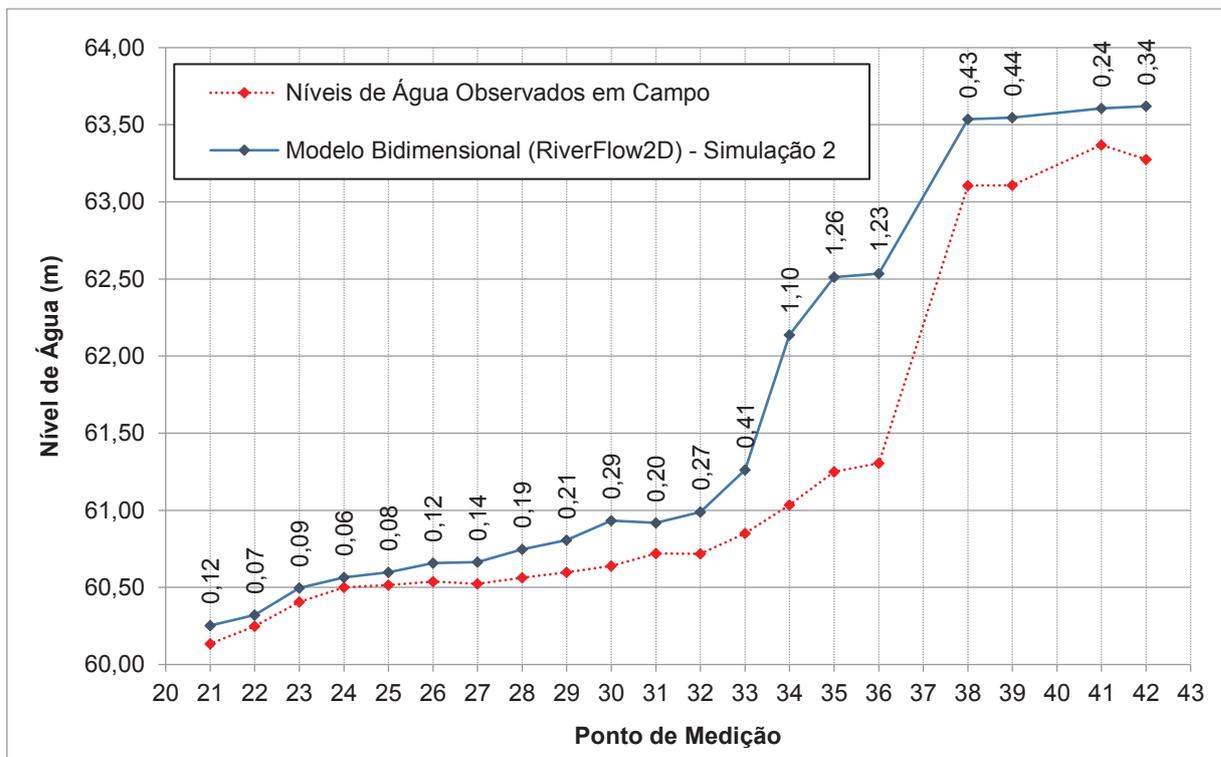
TABELA 43 – RESUMO DOS RESULTADOS – SEGUNDA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Simulação 2 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Simulação 2 (m)	Δh Calibração (m)
42	63,28	63,62	0,34	20	63,25	63,61	0,36

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Simulação 2 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Simulação 2 (m)	Δh Calibração (m)
41	63,37	63,61	0,24	19	63,21	63,56	0,36
39	63,11	63,55	0,44	18	63,18	63,50	0,32
38	63,11	63,54	0,43	17	62,60	62,71	0,10
36	61,31	62,54	1,23	16	62,45	62,52	0,07
35	61,25	62,51	1,26	15	62,08	62,08	0,00
34	61,04	62,14	1,10	14	61,70	61,98	0,28
33	60,85	61,26	0,41	13	61,70	61,79	0,09
32	60,72	60,99	0,27	12	61,67	61,77	0,10
31	60,72	60,92	0,20	11	61,42	61,60	0,17
30	60,64	60,93	0,29	10	61,39	61,56	0,17
29	60,60	60,81	0,21	9	61,24	61,38	0,14
28	60,56	60,75	0,19	8	60,71	60,84	0,13
27	60,52	60,66	0,14	7	60,47	60,73	0,27
26	60,54	60,66	0,12	6	60,43	60,49	0,05
25	60,52	60,60	0,08	5	60,40	60,48	0,09
24	60,50	60,57	0,06	3	60,24	60,28	0,04
23	60,41	60,50	0,09	2	60,10	60,08	-0,02
22	60,25	60,32	0,07	1	60,10	60,13	0,04
21	60,14	60,25	0,12				
REMQ		0,5175		REMQ		0,1855	

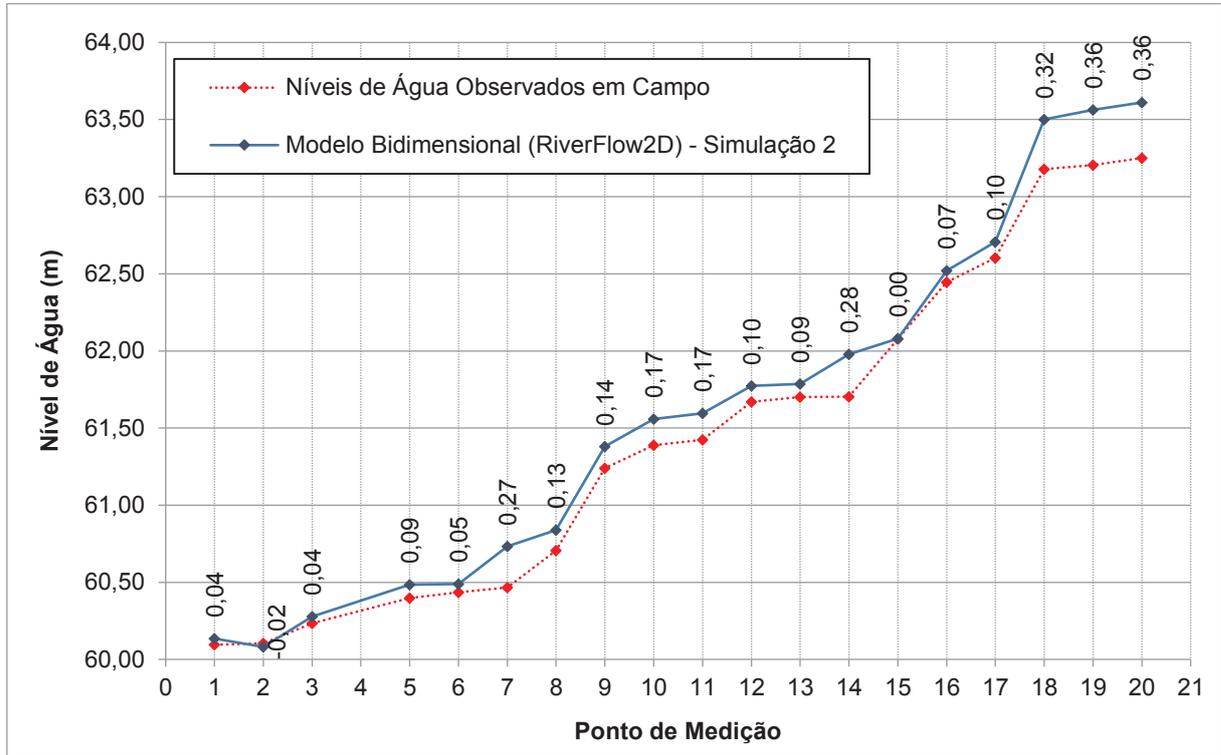
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 89 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – SEGUNDA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 90 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – SEGUNDA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.



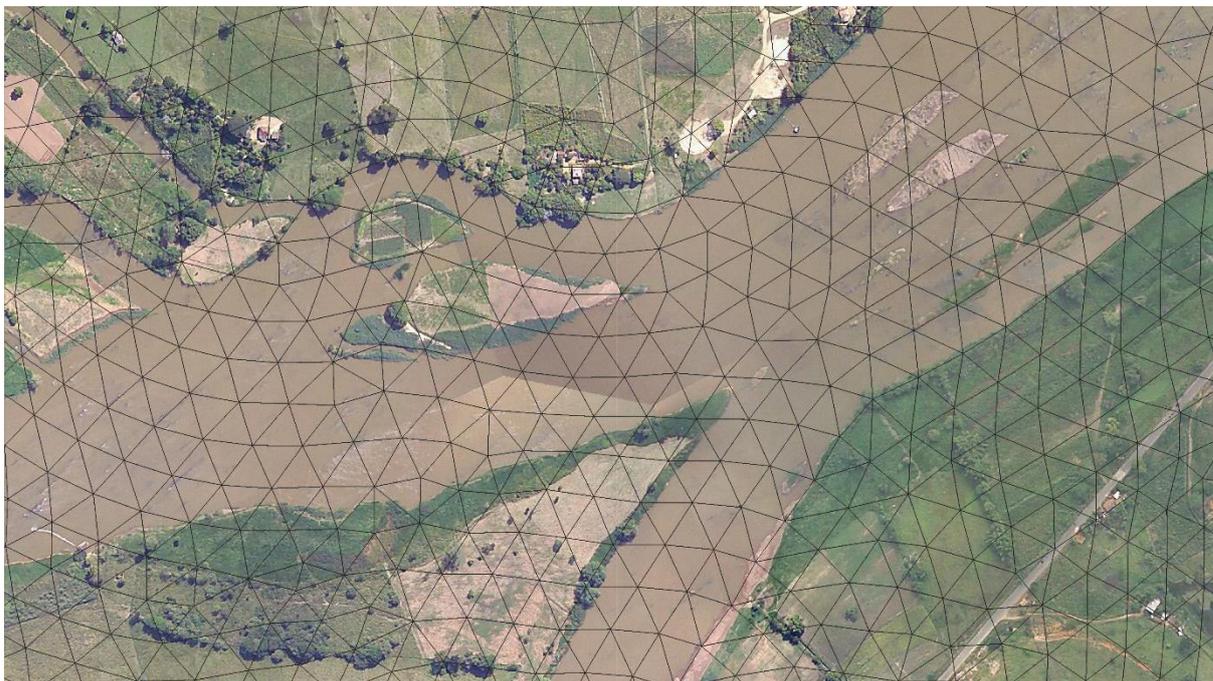
FONTE: O Autor (2017).

A segunda simulação do modelo resultou em Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) igual a 0,3937.

4.3.4.3 Terceira Simulação do Modelo - Malha com elementos de 50 metros

Utilizando como base o modelo da sexta tentativa de calibração, realizou-se o ajuste dos elementos triangulares, ou seja, alterando-se de 20 para 50 metros. Na FIGURA 91, apresenta-se a malha com elementos triangulares de 50 metros.

FIGURA 91 – MALHA TRIANGULAR DE 50 METROS – TERCEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.



FONTE: O Autor (2017).

Os resultados da terceira simulação do modelo estão apresentados na TABELA 44 e os perfis de linha d'água estão graficamente apresentados na FIGURA 92 (braço direito) e FIGURA 93 (braço esquerdo).

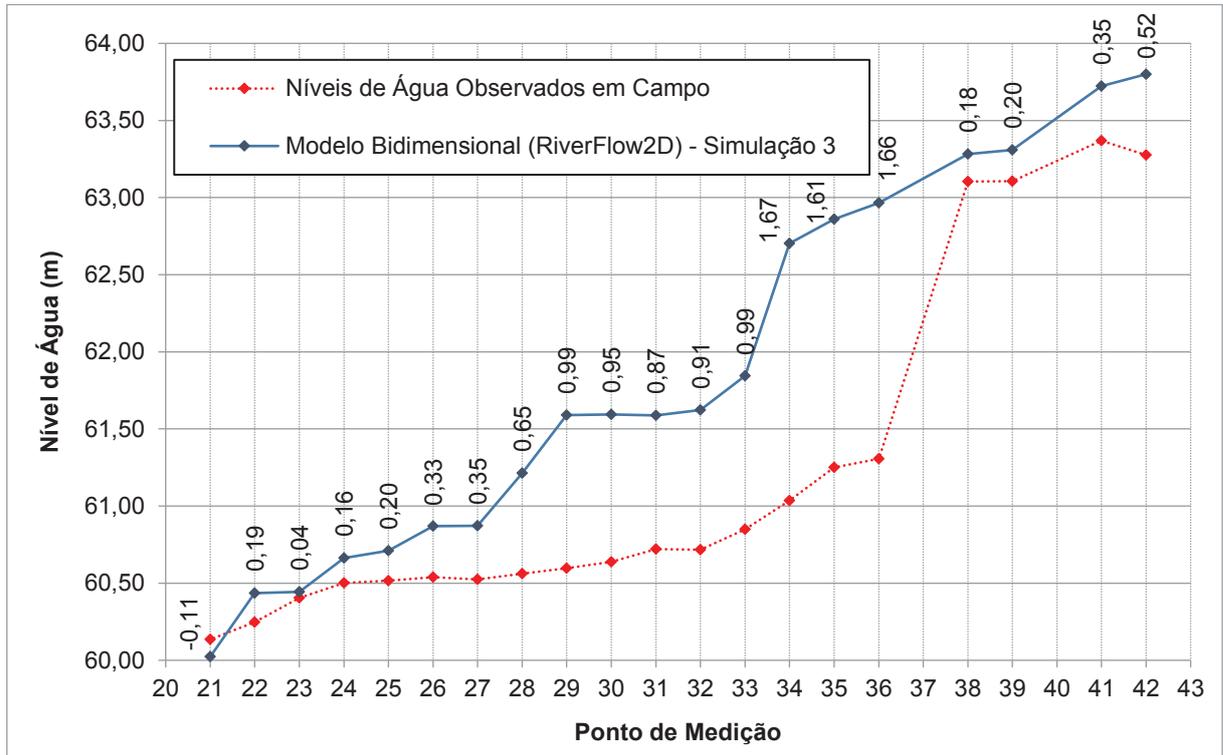
TABELA 44 – RESUMO DOS RESULTADOS – TERCEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.

Ponto de Medição	Braço Direito			Ponto de Medição	Braço Esquerdo		
	N.A Observado (m)	Simulação 3 (m)	Δh Calibração (m)		N.A Observado (m)	Simulação 3 (m)	Δh Calibração (m)
42	63,28	63,80	0,52	20	63,25	63,78	0,53
41	63,37	63,72	0,35	19	63,21	63,75	0,54
39	63,11	63,31	0,20	18	63,18	63,53	0,35
38	63,11	63,28	0,18	17	62,60	63,11	0,51
36	61,31	62,97	1,66	16	62,45	63,05	0,60
35	61,25	62,86	1,61	15	62,08	62,73	0,65
34	61,04	62,70	1,67	14	61,70	62,18	0,48
33	60,85	61,85	0,99	13	61,70	62,19	0,49
32	60,72	61,62	0,91	12	61,67	62,15	0,48
31	60,72	61,59	0,87	11	61,42	62,05	0,63
30	60,64	61,59	0,95	10	61,39	62,02	0,63
29	60,60	61,59	0,99	9	61,24	61,42	0,18
28	60,56	61,21	0,65	8	60,71	61,10	0,40
27	60,52	60,87	0,35	7	60,47	60,97	0,50
26	60,54	60,87	0,33	6	60,43	60,48	0,05
25	60,52	60,71	0,20	5	60,40	60,50	0,10
24	60,50	60,66	0,16	3	60,24	60,42	0,18

Braço Direito				Braço Esquerdo			
Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Simulação 3 (m)	Δh Calibração (m)	Ponto de Medição	N.A Observado (m)	Simulação 3 (m)	Δh Calibração (m)
23	60,41	60,44	0,04	2	60,10	60,18	0,08
22	60,25	60,44	0,19	1	60,10	60,14	0,05
21	60,14	60,02	-0,11				
REMQ		0,8299		REMQ		0,4430	

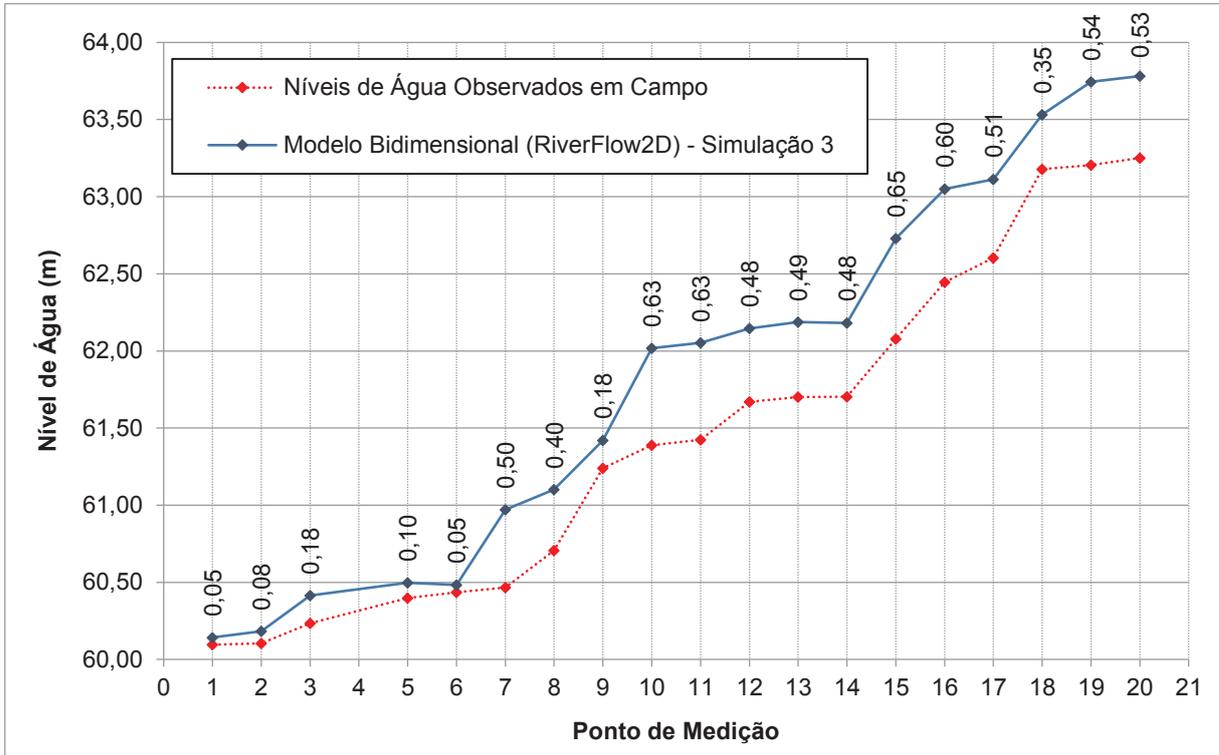
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 92 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – TERCEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 93 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – TERCEIRA SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.



FONTE: O Autor (2017).

A terceira simulação do modelo resultou em Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) igual a 0,6709.

4.3.5 Resultados das Simulações do Modelo Bidimensional

Como apresentado na calibração e nas três (3) simulações do modelo, constata-se que o modelo responde insatisfatoriamente quando aplicamos malhas grosseiras desde 20 metros, onde o software RiverFlow2D® forneceu uma resposta de precisão superior a 0,60 na Raiz do Erro Médio Quadrático.

TABELA 45 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – CALIBRAÇÃO E SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D®.

Modelo Bidimensional - Software RiverFlow2D®							
Sexta Calibração (Malha de 5 metros)		Primeira Simulação (Malha de 10 metros)		Segunda Simulação (Malha de 20 metros)		Terceira Simulação (Malha de 50 metros)	
Braço Direito	Braço Esquerdo	Braço Direito	Braço Esquerdo	Braço Direito	Braço Esquerdo	Braço Direito	Braço Esquerdo
0,1871	0,1336	0,3292	0,2170	0,5175	0,1855	0,8299	0,4430
REMQ Total = 0,1643		REMQ Total = 0,2815		REMQ Total = 0,3937		REMQ Total = 0,6709	

FONTE: O Autor (2017).

5 ANÁLISES DOS RESULTADOS

Os coeficientes de Manning apresentados nesta dissertação resultaram na igualdade ou aproximação dos níveis de água obtidos nos modelos computacionais com os valores de níveis de água observados em campo. Portanto, traduz a configuração de rugosidade do leito do curso de água considerada satisfatória para representação das perdas de carga existentes ao longo do domínio estudado.

Comparando-se os modelos computacionais nas tentativas de calibração, percebe-se uma aproximação em todos os coeficientes de Manning em relação aos encontrados na literatura, com exceção nos afloramentos rochosos do braço direito, no qual foi necessário aumentá-lo para aproximação da medição de vazão. Sabe-se que os coeficientes de Manning para afloramentos rochosos ajustados para esta dissertação estão relativamente altos em relação aos encontrados na literatura, mas esta foi a única forma de representar a grande perda de carga para uma região morfológicamente alterada e sem disponibilidade de levantamento batimétrico detalhado.

A TABELA 46 traz a configuração final, após diversas tentativas, dos coeficientes de Manning utilizados durante a etapa de calibração dos modelos matemático.

TABELA 46 – ANÁLISE DOS COEFICIENTES DE MANNING – MODELOS UNIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL.

Coeficiente de Manning	Modelo Unidimensional	Modelo Bidimensional
	HEC-RAS	RiverFlow2D [®]
Banco de Areia	0,040	0,020
Afloramentos Rochosos	0,500	0,950
Curso d'água Jusante	0,030	0,020
Curso d'água Margem Direita	0,030	0,027
Curso d'água Margem Esquerda	0,040	0,040
Curso d'água Médio	0,045	0,035
Curso d'água Montante	0,035	0,020
Urbanização	0,065	0,065
Vegetação Densa	0,100	0,100
Vegetação Rasteira	0,045	0,045

FONTE: O Autor (2017).

Em todos os modelos, tanto reduzido quanto computacionais, em relação aos níveis de água obtidos no modelo matemático na região de montante (Pontos 19, 20 e 41, 42) é possível observar que são mais elevados do que os obtidos nas medições de campo.

Verificou-se nos modelos, tanto reduzido quanto computacionais, que os resultados de nível de água entre os Pontos 34 e 39 são mais elevados do que os obtidos nas medições de campo. Esse comportamento pode ser devido às características do leito do curso de água nesta região onde são evidenciadas diversas ilhas e afloramentos rochosos que podem não ter sido capturados de maneira satisfatória pelos levantamentos batimétricos e que prejudicam na representação matemática dos fenômenos do escoamento presentes nesta região.

Por fim, analisando-se as regiões da margem direita e esquerda do rio até a jusante da ilha, nota-se que todos os modelos apresentam resultados de níveis de água que aderem de forma muito satisfatória aos resultados das medições de campo, conforme apresentado na TABELA 47.

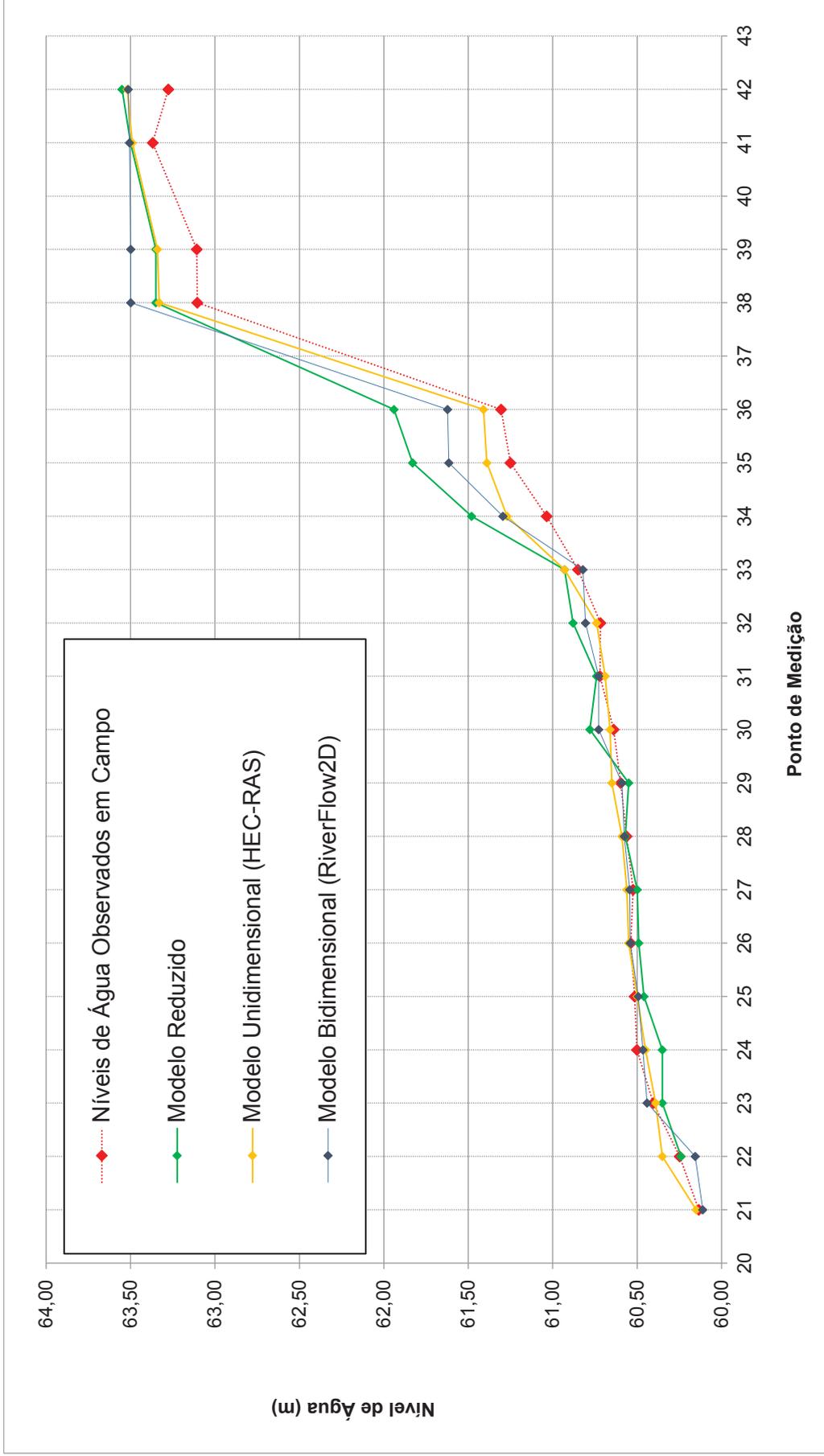
TABELA 47 – ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MODELO REDUZIDO E MODELOS COMPUTACIONAIS.

Modelo Reduzido CEHPAR		Modelo Unidimensional Software HEC-RAS		Modelo Bidimensional Software RiverFlow2D [©]	
TABELA 15		TABELA 25		TABELA 41	
Braço Direito	Braço Esquerdo	Braço Direito	Braço Esquerdo	Braço Direito	Braço Esquerdo
0,2533	0,2060	0,1188	0,0981	0,1871	0,1336
REMQ Total = 0,2338		REMQ Total = 0,1103		REMQ Total = 0,1643	

FONTE: O Autor (2017).

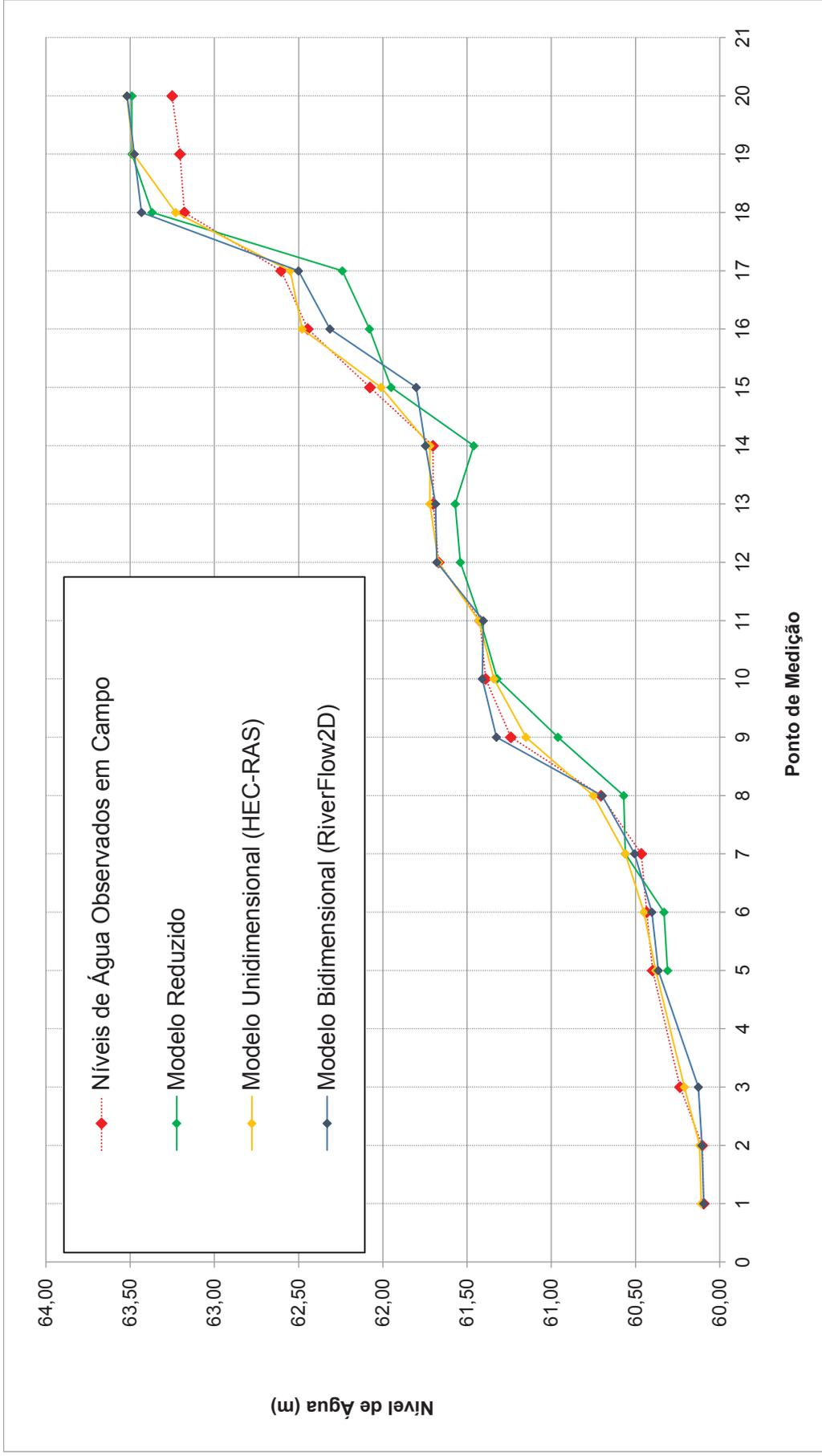
Na FIGURA 94 e FIGURA 95, apresentam-se os perfis da linha de água para o braço direito e esquerdo, respectivamente, analisando-se os dados observados em campo, resultados da calibração do modelo hidráulico reduzido e dos modelos computacionais uni e bidimensionais.

FIGURA 94 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MODELO REDUZIDO E MODELOS COMPUTACIONAIS UNI E BIDIMENSIONAIS



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 95 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MODELO REDUZIDO E MODELOS COMPUTACIONAIS UNI E BIDIMENSIONAIS.



FONTE: O Autor (2017).

Em relação à análise de sensibilidade de cada modelo, realizaram-se algumas alterações do número de seções e tamanho dos elementos das malhas das simulações realizadas, respectivamente, nos modelos computacionais unidimensional (HEC-RAS) e bidimensional (RiverFlow2D[®]).

TABELA 48 – CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS UNIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL.

HEC-RAS	Seções 5 em 5 metros	Seções 10 em 10 metros	Seções 20 em 20 metros	Seções 50 em 50 metros
Nº de Seções	1.565	814	420	169
RiverFlow2D [®]	Elementos de 4 metros	Elementos de 10m	Elementos de 20m	Elementos de 50m
Nº de Elementos	1.940.892	310.759	77.824	12.545

FONTE: O Autor (2017).

Para realização desta dissertação, utilizou-se uma máquina com processador Intel Xeon E5-2430 @ 2.20GHz, 16GB de RAM, placa de vídeo NVIDIA TITAN X. Em relação ao tempo de processamento para a simulação computacional, o modelo unidimensional (HEC-RAS) consome tempo inferior a um minuto em todas as simulações realizadas, enquanto que o modelo bidimensional (RiverFlow2D[®]) consome tempo de aproximadamente 60 minutos para etapa de calibração (malha com 1.940.892 elementos de 4 metros). Para as demais simulações, alterando-se a malha do modelo bidimensional, o tempo caiu significativamente, conseqüentemente à redução do número de elementos triangulares da malha, conforme TABELA 49.

TABELA 49 – ANÁLISE DOS TEMPOS DE SIMULAÇÃO – MODELOS UNIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL.

HEC-RAS	Seções de 5 em 5 metros	Seções de 10 em 10 metros	Seções de 20 em 20 metros	Seções de 50 em 50 metros
Nº de Seções	1.565	814	420	169
Tempo de Simulação	< 1 minuto	< 1 minuto	< 1 minuto	< 1 minuto
RiverFlow2D [®]	Elementos de 4 metros	Elementos de 10 metros	Elementos de 20 metros	Elementos de 50 metros
Nº de Elementos	1.940.892	310.759	77.824	12.545
Tempo de Simulação	60 minutos	5 minutos	3 minutos	< 1 minuto

FONTE: O Autor (2017).

Constatou-se que mesmo utilizando um modelo menos detalhado com seções distanciadas em até 50 metros, o software HEC-RAS é capaz de fornecer uma resposta de precisão inferior a 0,30 na Raiz do Erro Médio Quadrático. Diferente do software RiverFlow2D[®] que para uma malha representada com elementos de 50 metros, fornece uma resposta de precisão superior a 0,60.

FIGURA 96 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – CALIBRAÇÃO E SIMULAÇÃO DO MODELO – HEC-RAS.

Modelo Unidimensional - Software HEC-RAS							
Quinta Calibração (Seções 5 em 5 metros)		Primeira Simulação (Seções 10 em 10 metros)		Segunda Simulação (Seções 20 em 20 metros)		Terceira Simulação (Seções 50 em 50 metros)	
Braço Direito	Braço Esquerdo	Braço Direito	Braço Esquerdo	Braço Direito	Braço Esquerdo	Braço Direito	Braço Esquerdo
0,1188	0,0981	0,1350	0,1155	0,1275	0,1787	0,1496	0,3100
REMQ Total = 0,1103		REMQ Total = 0,1269		REMQ Total = 0,1553		REMQ Total = 0,2413	

FONTE: O Autor (2017).

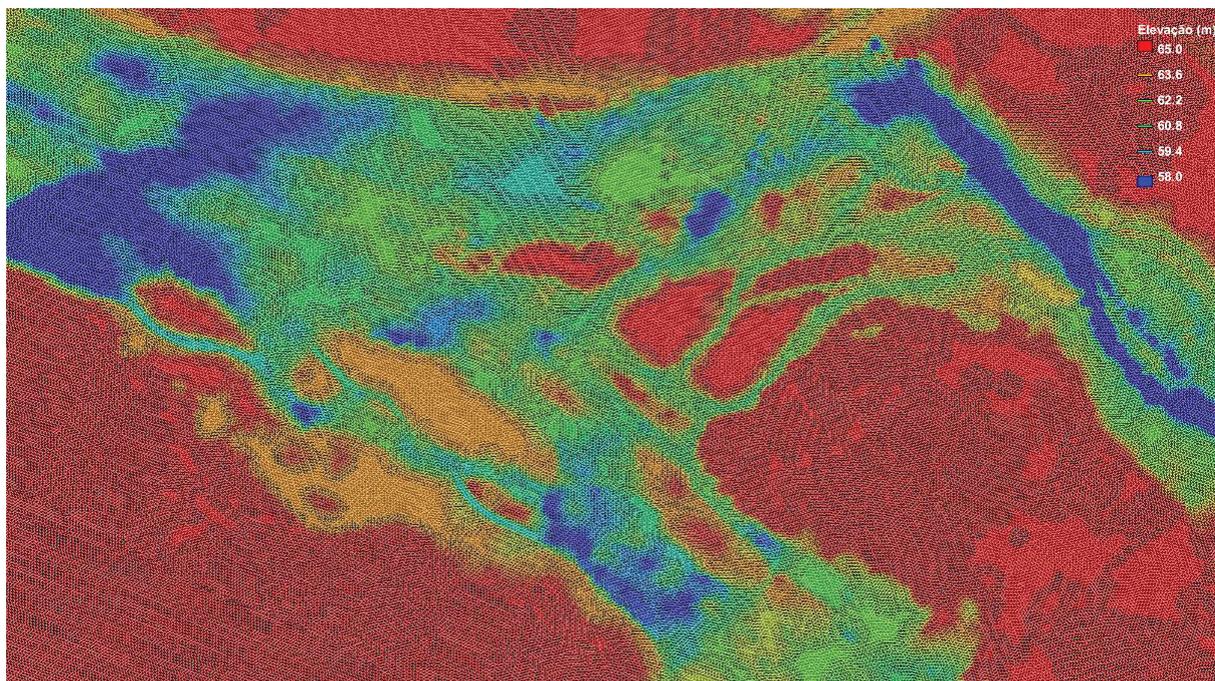
FIGURA 97 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – CALIBRAÇÃO E SIMULAÇÃO DO MODELO – RIVERFLOW2D[®].

Modelo Bidimensional - Software RiverFlow2D [®]							
Sexta Calibração (Malha de 4 metros)		Primeira Simulação (Malha de 10 metros)		Segunda Simulação (Malha de 20 metros)		Terceira Simulação (Malha de 50 metros)	
Braço Direito	Braço Esquerdo	Braço Direito	Braço Esquerdo	Braço Direito	Braço Esquerdo	Braço Direito	Braço Esquerdo
0,1871	0,1336	0,3292	0,2170	0,5175	0,1855	0,8299	0,4430
REMQ Total = 0,1643		REMQ Total = 0,2815		REMQ Total = 0,3937		REMQ Total = 0,6709	

FONTE: O Autor (2017).

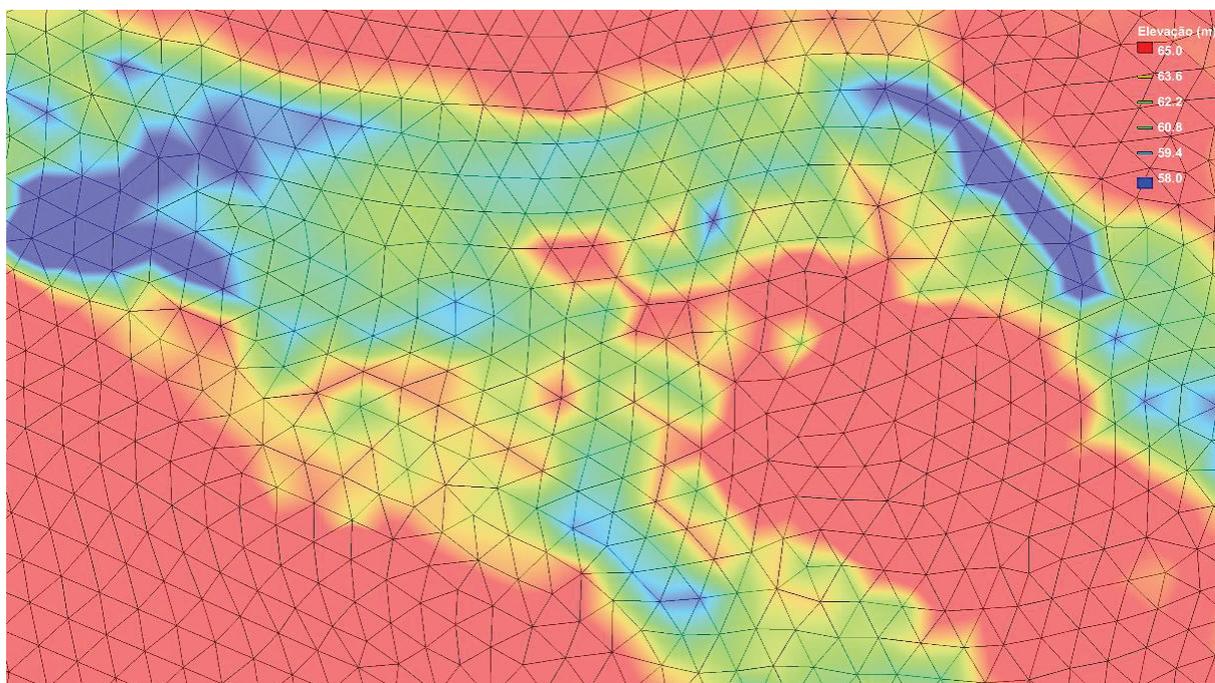
As altas diferenças encontradas no modelo bidimensional são explicadas pela comparação apresentada entre a FIGURA 98 e FIGURA 99, respectivamente, malhas com elementos de 4 metros e 50 metros. Percebe-se claramente a redução dos detalhes entre as malhas e os detalhes dos canais localizados nos braços direito e esquerdo acabaram sendo ignorados pela distância entre cada elemento, criando-se certas interpolações de elevações não existentes. Enquanto que no modelo unidimensional, por mais que a distância entre as seções seja maior, os detalhamentos das seções continuam sendo plenos e completos, com alto detalhamento, assim como feito para as seções da etapa de calibração.

FIGURA 98 – ETAPA DE CALIBRAÇÃO NO MODELO BIDIMENSIONAL - MALHA COM ELEMENTOS DE 4 METROS.



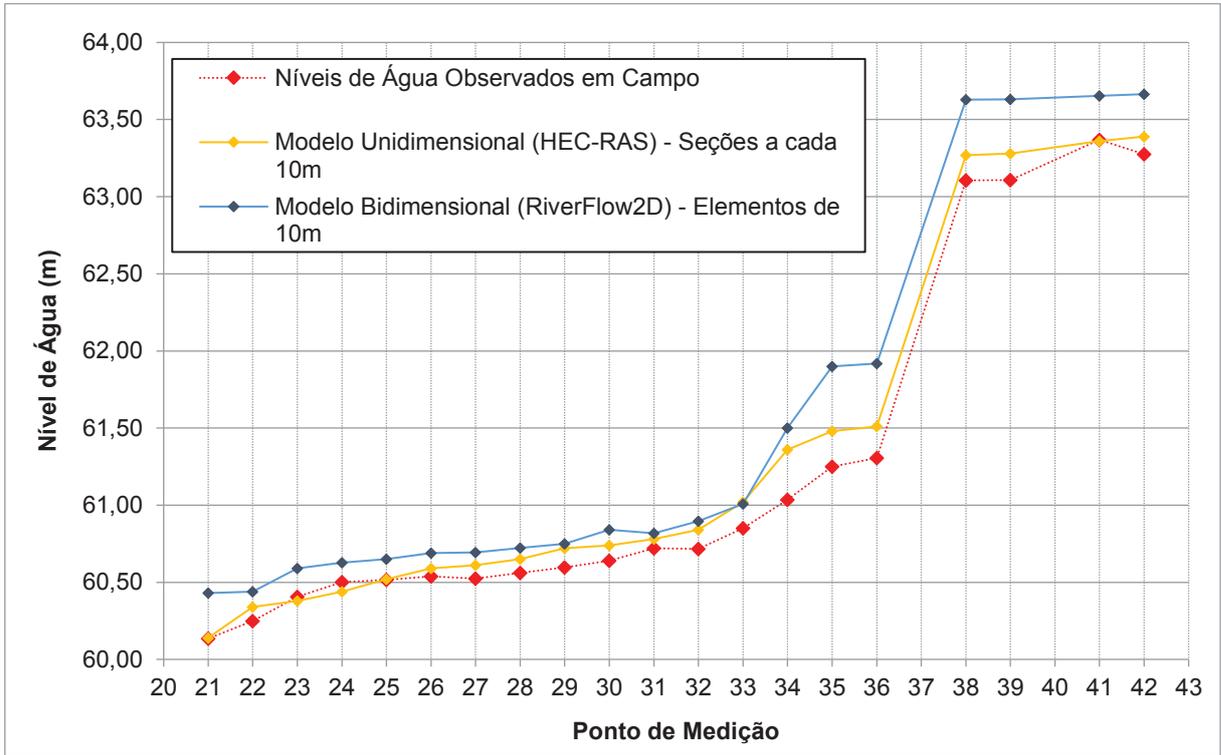
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 99 – ETAPA DE SIMULAÇÃO NO MODELO BIDIMENSIONAL - MALHA COM ELEMENTOS DE 50 METROS



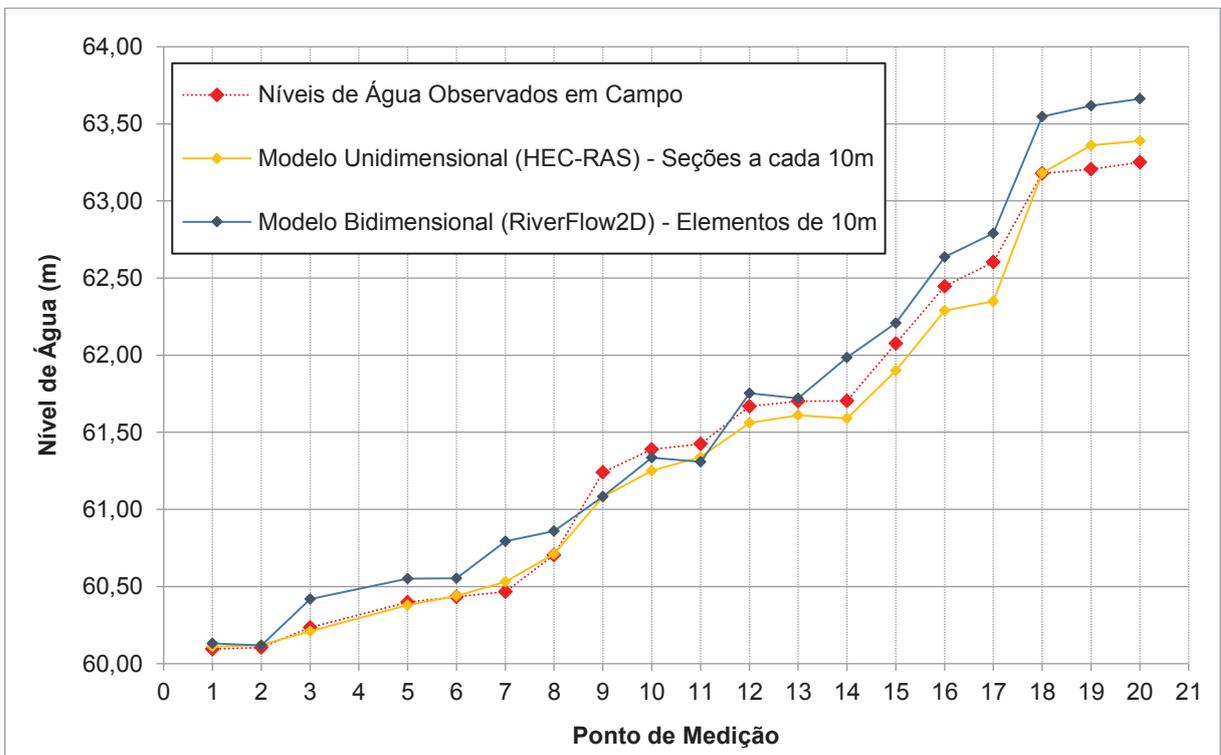
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 100 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – ANÁLISE DA SIMULAÇÃO 1 – MODELOS UNI E BIDIMENSIONAIS.



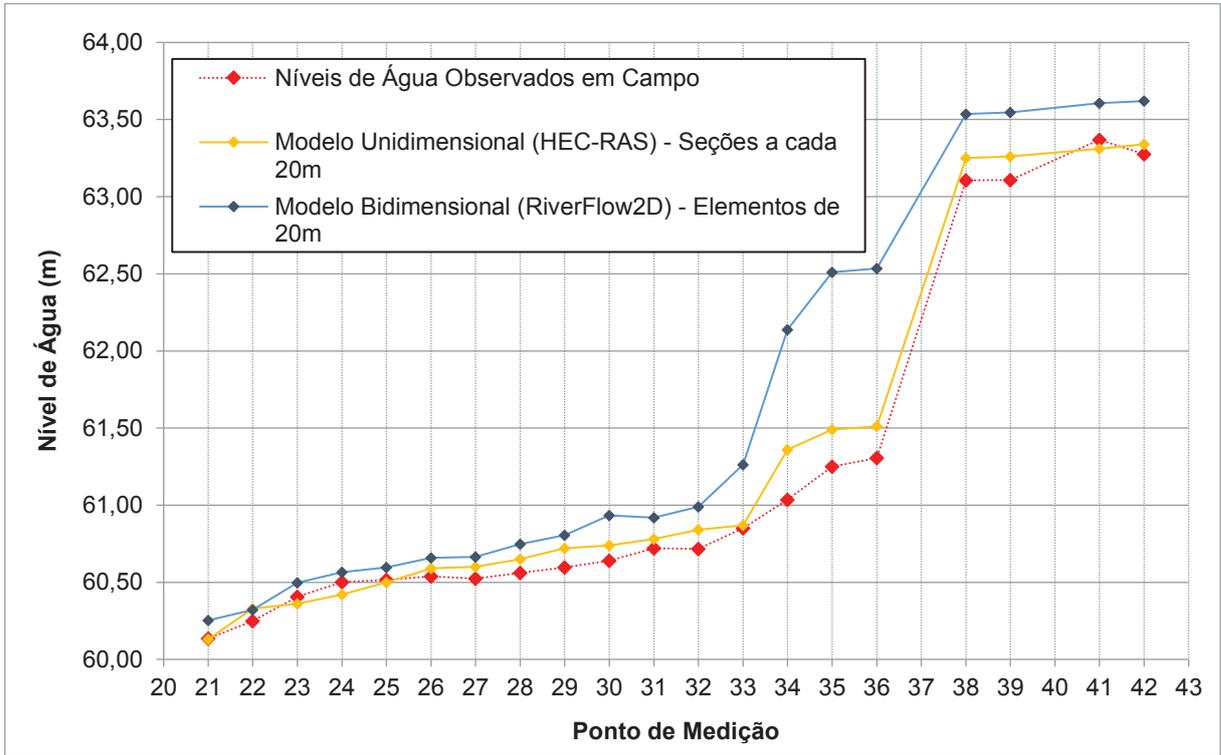
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 101 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – ANÁLISE DA SIMULAÇÃO 1 – MODELOS UNI E BIDIMENSIONAIS.



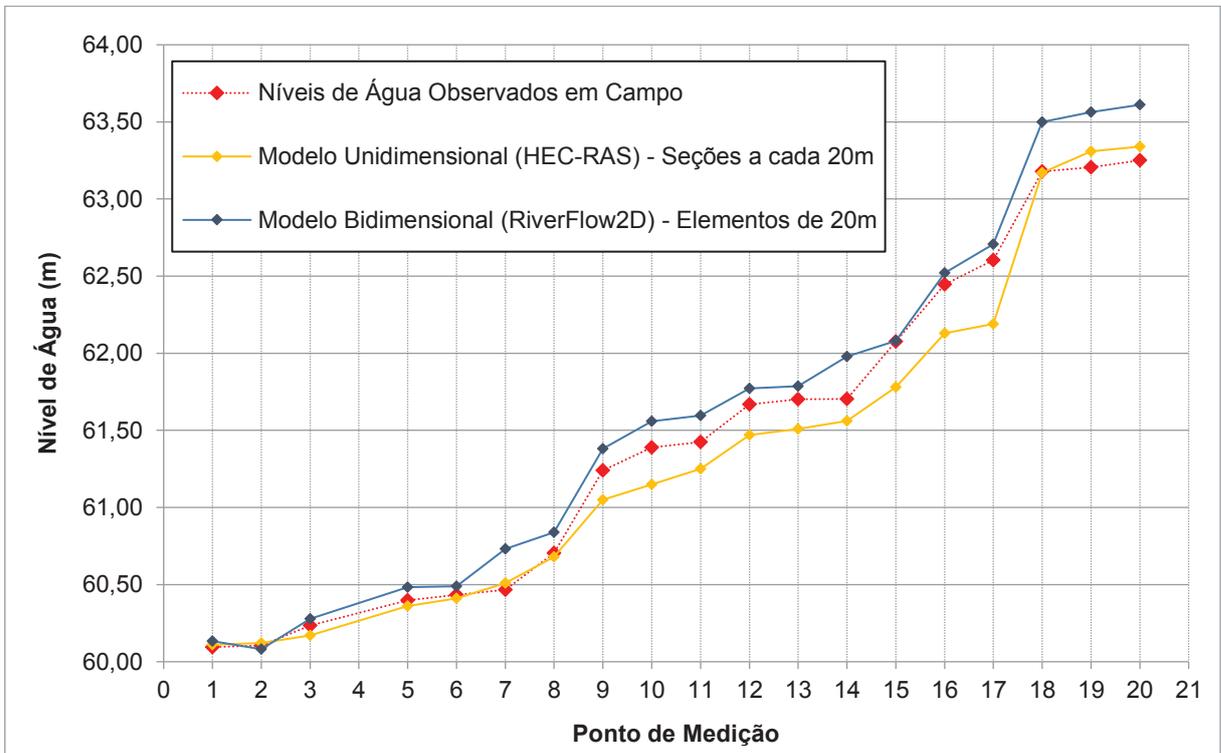
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 102 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – ANÁLISE DA SIMULAÇÃO 2 – MODELOS UNI E BIDIMENSIONAIS.



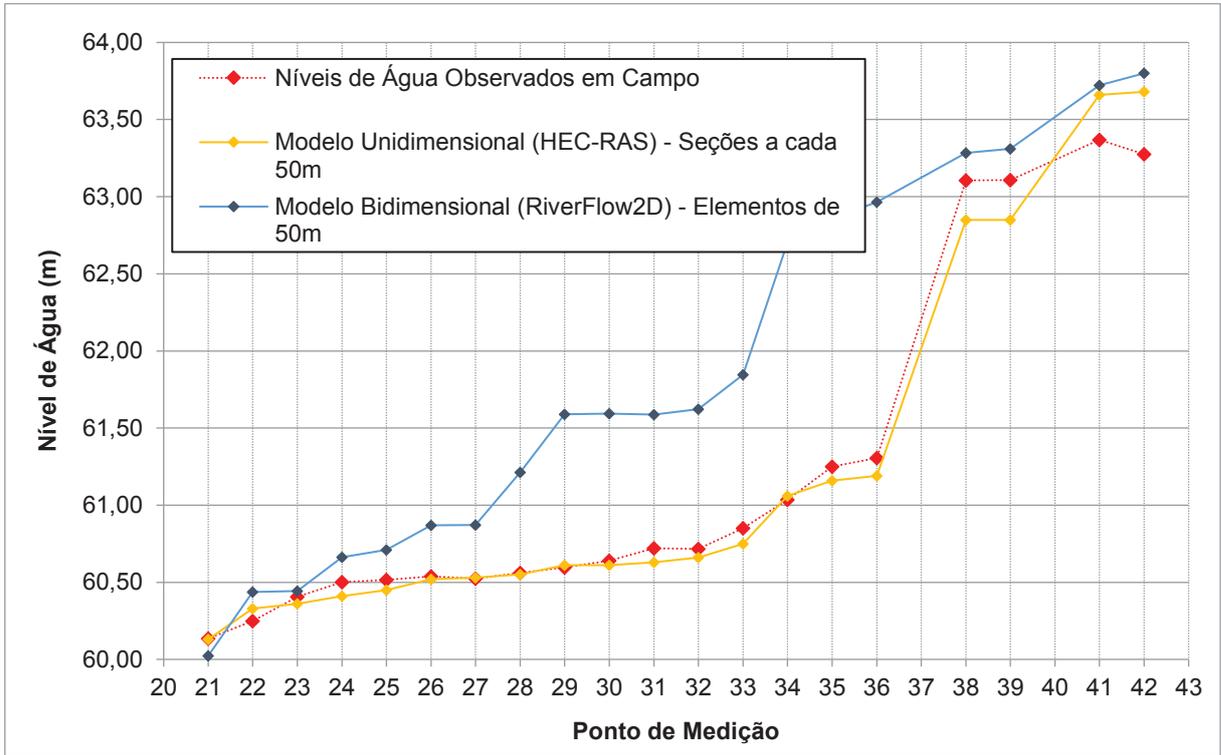
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 103 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – ANÁLISE DA SIMULAÇÃO 2 – MODELOS UNI E BIDIMENSIONAIS.



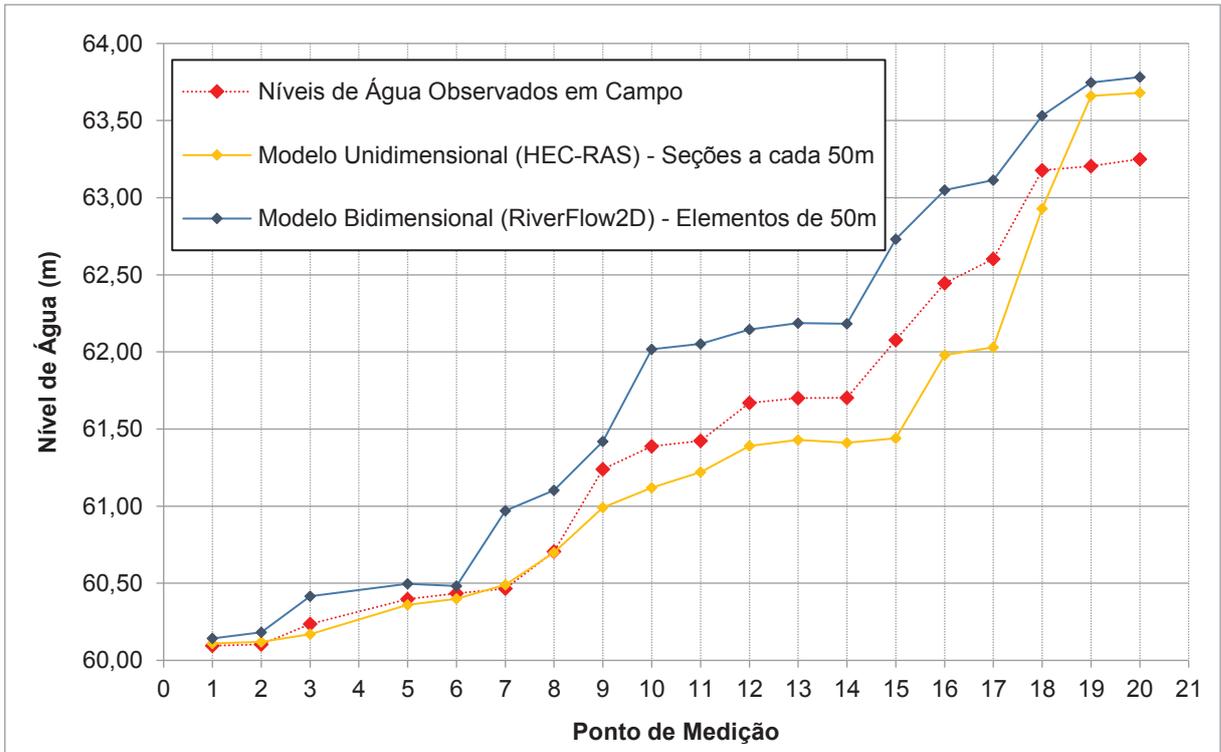
FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 104 – PERFIL DO BRAÇO DIREITO – ANÁLISE DA SIMULAÇÃO 3 – MODELOS UNI E BIDIMENSIONAIS.



FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 105 – PERFIL DO BRAÇO ESQUERDO – ANÁLISE DA SIMULAÇÃO 3 – MODELOS UNI E BIDIMENSIONAIS.



FONTE: O Autor (2017).

6 CONCLUSÕES

Com os resultados apresentados nessa dissertação, confirma-se ainda mais o grande crescimento na complementaridade entre as modelagens físicas e computacionais. Ressalta-se a importância no investimento em técnicas cada vez mais avançadas e sofisticadas para medição e aquisição de dados.

A qualidade dos resultados apresentados nesta dissertação está diretamente relacionada ao modelo digital de terreno utilizado, oriundo de detalhado levantamento topográfico a laser, LiDAR (Light Detection And Ranging) e de pontos provenientes do levantamento batimétrico. Por conta disto, foi possível a utilização de um modelo unidimensional com 1.565 seções espaçadas em apenas 5 metros e para o modelo bidimensional a geração de uma malha densa, com 1.940.892 elementos triangulares de apenas 4 metros.

O espaçamento entre as seções transversais para modelo unidimensional (HEC-RAS) e a resolução da malha para o modelo bidimensional (RiverFlow2D[®]) são os principais fatores que afetam a estabilidade e precisão numérica nas simulações hidráulicas. A combinação desses fatores, associados com um modelo digital de terreno que represente bem as feições morfológicas da área em estudo, são os elementos importantes para uma boa modelagem computacional.

Normalmente a vantagem do modelo unidimensional (HEC-RAS) é a simplicidade de construção do modelo por seções transversais, mas nesta dissertação acabou sendo perdida devido ao elevado número de seções. Por mais que tenha sido utilizada a ferramenta do HEC-Geo-RAS para a importação das seções, foi necessário um longo tratamento manual para ajuste e análise de cada seção dentro do próprio software. Por outro lado, as maiores vantagens encontradas no modelo computacional bidimensional (RiverFlow2D[®]) são as facilidades em criação dos limites do domínio e geração da malha. Para as simulações realizadas no Capítulo 4, analisando a sensibilidade dos modelos alterando o detalhamento da malha e seções, criou-se no RiverFlow2D[®] cada modelo de simulação em menos de 5 minutos, sendo necessário apenas o tempo computacional necessário para interpolação linear dos elementos triangulares.

Confirmou-se que aplicação do modelo computacional unidimensional (HEC-RAS) atende às necessidades de um projeto de trecho fluvial tão bem quanto uma aplicação de modelo computacional bidimensional (RiverFlow2D[®]). Tomando como

referência todas as simulações realizadas nesta dissertação, confirma-se que os resultados das simulações na modelagem unidimensional não deixaram a desejar quando comparados às modelagens bidimensionais. Tendo-se conhecimento que a limitação do modelo unidimensional é a sua incapacidade de modelar os fluxos em duas direções, pois como o fluxo é de apenas uma dimensão, os componentes de velocidade em direções diferentes da direção do fluxo não são contabilizados.

Para o modelo computacional bidimensional (RiverFlow2D[®]), constatou-se que ao aumentar o tamanho dos elementos da malha, ocorre conseqüentemente uma redução dos detalhes. Devido às interpolações equivocadas de elevações ao longo do modelo, dificilmente será possível manter a mesma precisão apresentada com elementos reduzidos. Enquanto que no modelo computacional unidimensional (HEC-RAS), por mais que a distância entre as seções aumente, as informações necessárias e os detalhamentos das seções continuam sendo plenos e completos.

Em geral, todos os resultados encontrados nessa dissertação foram muito satisfatórios em relação às observações de campo, tanto o modelo hidráulico reduzido quanto os modelos computacionais unidimensional e bidimensional mostraram elevada precisão e confiabilidade nos resultados apresentados. Devendo-se valorizar a alta qualidade e precisão dos modelos computacionais que, na etapa de calibração, apresentaram Raiz do Erro Médio Quadrático igual a 0,1103 e 0,1643, respectivamente, para o modelo computacional unidimensional (HEC-RAS) e bidimensional (RiverFlow2D[®]), enquanto que o modelo hidráulico reduzido apresentou valor superior de 0,2338.

Em conclusão, pode ser útil identificar as principais diferenças entre os tipos de modelos discutidos anteriormente, mas independente do modelo selecionado, seja físico ou computacional, se os dados de observação não forem reproduzidos com precisão, é necessário avaliar a incerteza nos resultados de cada modelo.

Os resultados observados em campo devem ser utilizados para entender melhor o que está acontecendo fisicamente com cada problema, auxiliando a busca de respostas para um modelo que não reproduza as observações com precisão e avaliar as imprecisões e/ou os intervalos de incertezas nos resultados. Assim, auxiliando a suprir as necessidades de informações dos modelos, permitindo-se a representação de fenômenos físicos de grande complexidade e condições de contorno das mais diversificadas.

Nota-se que a principal vantagem do modelo computacional está nos prazos e custos que são consideravelmente menores quando comparados aos do modelo hidráulico reduzido, entretanto, recomenda-se sempre que possível a utilização de modelos físicos reduzidos. Pois os modelos físicos fornecem uma representação contínua do protótipo baseados na física do escoamento da água em uma escala geométrica reduzida, enquanto que um modelo computacional está em uma escala de protótipo completa, mas incorpora apenas uma aproximação dimensional finita.

Portanto, as modelagens físicas e computacionais não devem ser vistas como métodos conflitantes de investigação, análise e estudo hidráulico. Pois ambos os modelos possuem pontos fortes e fracos que servem de complementaridade em um problema de engenharia hidráulica, e em muitas vezes, exigirá uma combinação destes métodos, isto é, modelagem híbrida, para alcançar uma solução ótima.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O projeto inicial desta dissertação contava com uma análise comparativa entre modelagens computacionais uni, bi e tridimensionais. No entanto, a modelagem tridimensional foi descartada ao longo do projeto, pois demandaria um tempo elevado para processamento e simulação de uma malha aceitável.

Portanto, para agregar ao estudo realizado, recomenda-se uma análise comparativa utilizando outros softwares de modelagem computacional e se possível, utilizar um modelo computacional tridimensional. Dessa forma, seria interessante avaliar o tempo de processamento necessário em cada software utilizado, mostrando a viabilidade de cada dimensão na modelagem computacional.

Sugere-se utilizar vazões diferentes das apresentadas nesta dissertação, ou seja, vazões que foram simuladas no modelo físico após calibração. Assim, verificando a precisão de calibração dos modelos computacionais e confiabilidade nos resultados apresentados nesta dissertação.

REFERÊNCIAS

- BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 3ª edição revista e ampliada. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.
- BECHTELER, W.; NUJIC, M. e OTTO, A. **Program Package “FLOODSIM” and its Application. Proceedings of the International Conference on Hydrosience & Engineering**. Washington DC, USA, 1993.
- BELLEUDY, P. **Restoring flow capacity in the loire river bed**, Hydrological Processes 14, 2000.
- BRUFAU, P.; GARCIA-NAVARRO, P. e VÁZQUEZ-CENDÓN, M. **Zero mass error using unsteady wetting-drying conditions in shallow flows over dry irregular topography**, Em: Journal for Numerical Methods in Fluids, 2004.
- CEHPAR (Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza). **Projeto HL 187. Estudos hidráulicos em modelo reduzido. Relatório nº 01 – Construção e Calibragem**. Fevereiro, 2016.
- CHANSON, H. **The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction**. Edward Arnold, London, UK, 1999.
- CHOW, V. T. **Open Channel Hydraulics**. Editora McGraw-Hill, New York, 1959.
- CIRILO, J. A.; COELHO, M. M. L. P. e BAPTISTA, M. B. **Hidráulica Aplicada**. 2ª edição revista e ampliada. Porto Alegre: ABRH, 2003.
- HYDRONIA, LLC. **RiverFlow2D, Two-Dimensional River Dynamics Model – Reference Manual**. Janeiro, 2016a.
- HYDRONIA, LLC. **RiverFlow2D, Two-Dimensional River Dynamics Model – Tutorials**. Janeiro, 2016b.
- KNIGHT, D. **Hydraulic Problems in Flooding: From Data to Theory and from Theory to Practice**. Em: P. Rowinski (ed.) **Experimental and Computational Solutions of Hydraulic Problems**. Springer, Berlin, 2013.
- MURILLO, J. e GARCIA-NAVARRO, P. **Weak solutions for partial differential equations with source terms: Application to the shallow water equations**. Journal of Computational Physics, 2010.
- MURILLO, J.; BURGUETE, J.; BRUFAU, P. e GARCIA-NAVARRO, P. **The Influence of Source Terms on Stability, Accuracy and Conservation in Two-dimensional Shallow Flow Simulation Using Triangular Finite Volumes**. International Journal of Numerical Methods in Fluids, 2007.

OERTEL, M. **Numerical Modeling of Free-Surface Flows in Practical Applications. Em: Rivers - Physical, Fluvial and Environmental Processes.** P. Rowiński and A. Radecki-Pawlik (eds.), GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences, 2015.

SAMUELS, P. G. **What's in a Model?** Paper presented to the River Engineering Section, Institution of Water and Environmental Management (IWEM), 1993.

TORO, E. **Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows.** Wiley. New York, 2001.

USACE (U. S. Army Corps of Engineers). **HEC-RAS, River Analysis System – Applications Guide.** Hydrologic Engineering Center. Versão 5.0. Fevereiro, 2016a.

USACE (U. S. Army Corps of Engineers). **HEC-RAS, River Analysis System – Hydraulic Reference Manual.** Hydrologic Engineering Center. Versão 5.0. Fevereiro, 2016b.

USACE (U. S. Army Corps of Engineers). **HEC-RAS, River Analysis System – User's Manual.** Hydrologic Engineering Center. Versão 5.0. Fevereiro, 2016c.

VIANNA, M. R. **Mecânica dos Fluidos para Engenheiros.** 5ª edição revisada. Nova Lima, 2009.

YALIN, M. S. **Fundamentals of hydraulic physical modelling.** Em: **Recent Advances in Hydraulic Physical Modelling,** R. Martins (ed.), Kluwer Acad. Publishers, London, 1989.