

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

WESLEY LEONEL DE SOUZA

MODELOS REOLÓGICOS EM ESCOAMENTOS DE REJEITOS: ESTUDO DE  
CASO DE STAVA – ITÁLIA, COM O USO DOS SOFTWARES HEC-RAS E  
RIVERFLOW2D

CURITIBA

2025

WESLEY LEONEL DE SOUZA

MODELOS REOLÓGICOS EM ESCOAMENTOS DE REJEITOS: ESTUDO DE  
CASO DE STAVA – ITÁLIA, COM O USO DOS SOFTWARES HEC-RAS E  
RIVERFLOW2D

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Engenharia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Tonso Fabiani

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Souza, Wesley Leonel de

Modelos reológicos em escoamentos de rejeitos: estudo de caso de Stava – Itália, com o uso dos softwares HEC-RAS e RIVERFLOW2D. / Wesley Leonel de Souza. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

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

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Tonso Fabiani

1. Escoamento de lama. 2. Escoamento granular. 3. Riverflow2D, Software. 4. HEC-RAS; Software. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. III. Fabiani, André Luiz Tonso. IV. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **WESLEY LEONEL DE SOUZA**, intitulada: **Modelos Reológicos em Escoamentos de Rejeitos: Estudo de caso de Strava - Itália, com o uso dos Softwares HEC-RAS e RIVERFLOW2D**, sob orientação do Prof. Dr. ANDRE LUIZ TONSO FABIANI, que após terem inquirido o aluno e realizada 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, 26 de Março de 2025.

Assinatura Eletrônica

27/03/2025 09:25:21.0

ANDRE LUIZ TONSO FABIANI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

27/03/2025 15:35:38.0

CRISTOVÃO VICENTE SCAPULATEMPO FERNANDES

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

08/04/2025 14:32:28.0

ALEXANDRE KOLODYNKIE GUETTER

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - DEP. DE  
HIDRÁULICA)

Assinatura Eletrônica

27/03/2025 10:34:45.0

MARCOS CRISTIANO PALU

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ )

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por guiar meus caminhos; à minha família pelo apoio incondicional aos meus estudos desde cedo; à minha noiva Ana Rafaela, pelo apoio diário; aos colegas de mestrado e trabalho, pela jornada compartilhada, que fortaleceu a todos nós; aos meus orientadores, André Fabiani (mestrado) e Cristóvão Fernandes (graduação), pela orientação e sabedoria; e à HIDROBR, pela contribuição de licença de *software*, além da flexibilidade e incentivo à realização deste mestrado.

## RESUMO

O estudo avalia parâmetros e modelos reológicos em modelos numéricos, tendo como base o evento de Stava, Itália (1985), que mobilizou cerca de 180.000 m<sup>3</sup> de rejeitos. Inicialmente, apresenta-se uma revisão sobre a modelagem de rupturas de barragens de rejeitos. Considerando as recomendações do estado da arte, foram abordadas as incertezas nos parâmetros reológicos, o uso do módulo de deposição e a aplicação de diferentes modelos reológicos em eventos históricos. Os modelos escolhidos foram: Bingham no HEC-RAS 6.5, Clastic Grain Flow – Coulomb no HEC-RAS 6.6, e os modelos Quadrático e Turbulent Coulomb no RIVERFLOW2D 8.12.05. Utilizou-se um banco de dados com profundidades, tempos de chegada e envoltória de inundação observados. O RIVERFLOW2D apresentou maior sensibilidade aos parâmetros reológicos que o HEC-RAS, indicando a necessidade de análises de incerteza mais robustas nesse software. No entanto, para o ângulo de atrito interno, ambos os modelos apresentaram variações e resultados semelhantes. A tensão limite de escoamento teve maior influência em regiões planas, enquanto viscosidade e rugosidade foram mais relevantes em áreas inclinadas, com maiores velocidades. O uso da equação de Van Rijn com deposição ativa melhorou apenas o ajuste da profundidade final no RIVERFLOW2D. Ângulos de atrito interno entre 2,5° e 5° apresentaram melhor desempenho. Os parâmetros não são diretamente transferíveis entre os modelos. A depender do vale de jusante e das velocidades envolvidas, a priorização de recursos e o foco nas análises de sensibilidade devem ser ajustados. Os modelos baseados em tensões de fundo e na teoria de Mohr-Coulomb mostraram-se uma alternativa viável para casos com concentrações volumétricas próximas a 50% e alta probabilidade de incorporação de árvores e detritos no vale de jusante. Por fim, foram indicadas linhas futuras de pesquisa, como a análise dos 50.000 m<sup>3</sup> de árvores e detritos arrastados, a inserção das pontes na modelagem, o uso de concentração variável no rio Avisio e a sensibilidade a diferentes conformações do hidrograma de ruptura.

Palavras-chave: HEC-RAS; RIVERFLOW2D; ESCOAMENTO DE LAMA; ESCOAMENTO GRANULAR; COULOMB; BINGHAM; QUADRÁTICO

## ABSTRACT

This study evaluates rheological parameters and models in numerical simulations, based on the Stava tailings dam failure in Italy (1985), which mobilized approximately 180,000 m<sup>3</sup> of tailings. A review of tailings dam breach modeling is initially presented. Following state-of-the-art recommendations, the study addresses uncertainties in rheological parameters, the use of the sediment deposition module, and tests different rheological models applied to historical events. The selected models include: Bingham in HEC-RAS 6.5, Clastic Grain Flow – Coulomb in HEC-RAS 6.6, and the Quadratic and Turbulent Coulomb models in RIVERFLOW2D 8.12.05. A dataset containing observed flow depths, arrival times, and inundation outlines was used for model comparison. RIVERFLOW2D showed greater sensitivity to rheological parameters than HEC-RAS, suggesting the need for more robust uncertainty analyses in this software. However, for internal friction angle, both platforms yielded similar results and variations. Yield stress was more influential in flat areas, while viscosity and roughness had greater effects in steeper regions with higher velocities. The use of Van Rijn's equation and active sedimentation improved only the final depth fit in RIVERFLOW2D. Internal friction angles between 2.5° and 5° led to better performance. Rheological parameters were not directly transferable between models. Depending on downstream valley geometry and flow velocities, resource allocation and the focus of sensitivity analyses should be adjusted accordingly. Models incorporating basal shear stress and Mohr-Coulomb theory proved to be a viable alternative for scenarios with volumetric concentrations near 50% and significant likelihood of vegetation and debris incorporation in the downstream valley. Future work is recommended, including the analysis of 50,000 m<sup>3</sup> of entrained trees and debris, modeling the influence of bridges, using variable concentration in the Avisio River, and testing different dam breach hydrograph configurations.

**Keywords:** HEC-RAS; RIVERFLOW2D; MUDFLOW; GRANULAR FLOW; COULOMB; BINGHAM; QUADRATIC

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS NORMATIVAS PARA BARRAGENS DE MINERAÇÃO NO QUE TANGE ESTUDOS DE RUPTURA HIPOTÉTICA.....	18
FIGURA 2-2 – ELEMENTOS DE FLUIDO BIDIMENSIONAL.....	19
FIGURA 2-3 – VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NA DEDUÇÃO PARA DUAS DIMENSÕES.....	20
FIGURA 2-4 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO FLUXO DE CISALHAMENTO UNIDIRECIONAL.....	21
FIGURA 2-5 – TIPOS DE COMPORTAMENTO DE FLUIDOS ‘INDEPENDENTES DO TEMPO’ .....	22
FIGURA 2-6 – TIPOS DE ESCOAMENTO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DO FLUIDO.....	25
FIGURA 2-7 – EXEMPLO DE MUDFLOOD.....	26
FIGURA 2-8 – EXEMPLO DE MUDFLOW.....	26
FIGURA 2-9 – EXEMPLO DE ESCOAMENTO DE DETRITOS.....	27
FIGURA 2-10 – ESCOAMENTO DE DETRITOS E GRANULAR.....	27
FIGURA 2-11 – CLASSIFICAÇÃO, PROCESSOS, MODELO CONCEITUAL E MODELOS REOLÓGICOS .....	29
FIGURA 2-12 – REPRESENTAÇÃO IDEALIZADA DAS ZONAS DE CLASSIFICAÇÃO 1 E 2.....	47
FIGURA 3-1 – PLANTA DO EMPREENDIMENTO BASEADO EM LEVANTAMENTO AÉREO DE 15 DE JULHO DE 1983.....	49
FIGURA 3-2 – SEÇÃO TRANSVERSAL DAS BARRAGENS DE STAVA-ITA.....	50
FIGURA 3-3 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DO EMPREENDIMENTO (A-B)....	52
FIGURA 3-4 – IMAGEM AÉREA DAS DUAS BARRAGENS DE REJEITOS EM STAVA-ITALIA.....	53
FIGURA 3-5 – MAPEAMENTO DO VALE DE JUSANTE AFETADO.....	54
FIGURA 3-6 – MANCHA DE INUNDAÇÃO OBSERVADA A JUSANTE DAS DUAS BARRAGENS.....	55
FIGURA 3-7 – ANTES E DEPOIS DA PASSAGEM DO FLUXO DE LAMA NA VILA DE TESERO NA SEÇÃO 20.....	56

FIGURA 3-8 – EFEITOS DA MANCHA DE INUNDAÇÃO EM TESERO A MONTANTE DAS PONTES .....	56
FIGURA 3-9 – MANCHA DE INUNDAÇÃO NA CONFLUÊNCIA COM O RIO AVISIO .....	57
FIGURA 3-10 – DADOS OBSERVADOS DO EVENTO DE RUPTURA DAS BARRAGENS DE STAVA-ITA .....	59
FIGURA 3-11 – MODELO DIGITAL DE TERRENO .....	60
FIGURA 3-12 – SUPERFÍCIE MOBILIZADA ESTIMADA DE STAVA-ITA.....	61
FIGURA 3-13 – Exemplo aplicação do índice <i>FIT METRIC</i> .....	64
FIGURA 3-14 – RESUMO METODOLÓGICO DA PESQUISA .....	67
FIGURA 4-1 – COMPARAÇÃO DA PROFUNDIDADE FINAL ENTRE HEC-RAS SEM DEPOSIÇÃO E RIVERFLOW2D COM E SEM DEPOSIÇÃO ...	84
FIGURA 4-2 – COMPARAÇÃO DA PROFUNDIDADE FINAL ENTRE HEC-RAS SEM DEPOSIÇÃO E RIVERFLOW2D COM E SEM DEPOSIÇÃO ...	85
FIGURA 5-1 – COMPARAÇÃO – ENVOLTÓRIA – BINGHAM (HEC-RAS), QUADRÁTICO (RIVERFLOW2D) E COULOMB (HEC- RAS/RIVERFLOW2D).....	91
FIGURA 5-2 – COMPARAÇÃO – PROFUNDIDADE FINAL – BINGHAM (HEC- RAS), QUADRÁTICO (RIVERFLOW2D) E COULOMB (HEC- RAS/RIVERFLOW2D).....	95
FIGURA 5-3 – COMPARAÇÃO – PROFUNDIDADE FINAL NA REGIÃO 5 – BINGHAM (HEC-RAS), QUADRÁTICO (RIVERFLOW2D) E COULOMB (HEC-RAS/RIVERFLOW2D).....	96
FIGURA 5-4 – PONTOS PARA ANÁLISE DAS TENSÕES CISALHANTES .....	102
FIGURA 5-5 – VARIAÇÃO DAS TENSÕES CISALHANTES, DA PROFUNDIDADE E DA VELOCIDADE NA SIMULAÇÃO RAS-26 NO PONTO 1 .....	104
FIGURA A3-1–CONSERVAÇÃO DA MASSA EM UMA PARCELA DE FLUIDO ....	126
FIGURA A3-2–CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO EM UMA PARCELA DE FLUIDO .....	128

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 3-1 - SUPERFÍCIE MOBILIZADA ESTIMADA DE STAVA-ITA.....	62
GRÁFICO 4-1 - COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS REOLÓGICOS DE BINGHAM E QUADRÁTICO NO HEC- RAS E RIVERFLOW2D, RESPECTIVAMENTE .....	70
GRÁFICO 4-2 – COMPARAÇÃO – TEMPO DE CHEGADA - BINGHAM – HEC-RAS e QUADRÁTICO – RIVERFLOW2D COM E SEM DEPOSIÇÃO.....	79
GRÁFICO 4-3 – COMPARAÇÃO – ENVOLTÓRIAS MÁXIMAS - BINGHAM – HEC- RAS e QUADRÁTICO – RIVERFLOW2D COM E SEM DEPOSIÇÃO .....	80
GRÁFICO 4-4 – COMPARAÇÃO – PROFUNDIDADE MÉDIA FINAL NAS REGIÕES 3 E 4 - BINGHAM – HEC-RAS e QUADRÁTICO – RIVERFLOW2D COM E SEM DEPOSIÇÃO .....	81
GRÁFICO 4-5 – COMPARAÇÃO – PROFUNDIDADE MÁXIMA FINAL NA REGIÃO 5 - BINGHAM – HEC-RAS e QUADRÁTICO – RIVERFLOW2D COM E SEM DEPOSIÇÃO .....	82
GRÁFICO 4-6 – COMPARAÇÃO – PROFUNDIDADE MÁXIMA NA MARGEM DIREITA - BINGHAM – HEC-RAS e QUADRÁTICO – RIVERFLOW2D COM E SEM DEPOSIÇÃO .....	83
GRÁFICO 5-1 - COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO NO HEC-RAS E RIVERFLOW2D .....	87
GRÁFICO 5-2 – COMPARAÇÃO – TEMPO DE CHEGADA– BINGHAM (HEC-RAS), QUADRÁTICO (RIVERFLOW2D) E COULOMB (HEC- RAS/RIVERFLOW2D).....	89
GRÁFICO 5-3 – COMPARAÇÃO – PROFUNDIDADE MÉDIA FINAL NAS REGIÕES 3 E 4 – BINGHAM (HEC-RAS), QUADRÁTICO (RIVERFLOW2D) E COULOMB (HEC-RAS/RIVERFLOW2D).....	92
GRÁFICO 5-4 – COMPARAÇÃO – PROFUNDIDADE MÁXIMA FINAL NA REGIÃO 5 – BINGHAM (HEC-RAS), QUADRÁTICO (RIVERFLOW2D) E COULOMB (HEC-RAS/RIVERFLOW2D).....	93
GRÁFICO 5-5 – COMPARAÇÃO – PROFUNDIDADE MÁXIMA NAS MARGENS DIREITA E ESQUERDA DA PONTE – BINGHAM (HEC-RAS),	

QUADRÁTICO (RIVERFLOW2D) E COULOMB (HEC-RAS/RIVERFLOW2D).....	94
GRÁFICO 5-6 – COMPARAÇÃO – HIDROGRAMAS MOBILIZADOS – HEC-RAS E RIVERFLOW2D .....	99
GRÁFICO 5-7 – COMPARAÇÃO – ST-01 – HEC-RAS .....	100
GRÁFICO 5-8 – COMPARAÇÃO – ST-01 – RIVERFLO2D .....	100
GRÁFICO 5-9 – COMPARAÇÃO – ST-02 – HEC-RAS .....	100
GRÁFICO 5-10 – COMPARAÇÃO – ST-02 – RIVERFLO2D .....	100

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 2-1 – VALORES TÍPICOS DE VISCOSIDADE EM TEMPERATURA AMBIENTE.....	23
QUADRO 2-2 – VALORES TÍPICOS DE TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO.....	23
QUADRO 2-3 – CLASSIFICAÇÃO DE ESCOAMENTOS NÃO NEWTONIANOS E TIPO DE MODELO REOLÓGICO.....	24
QUADRO 2-4 – CLASSIFICAÇÃO DE ESCOAMENTO HIPERCONCENTRADO COMO FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA.....	24
QUADRO 2-5 – TENSÕES CISALHANTES E MECÂNIISMOS INTERNOS DE PERDA DE ENERGIA DISPONÍVEIS NOS MODELOS REOLÓGICOS APRESENTADOS.....	32
QUADRO 2-6 – DESCRIÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS DE ESCOAMENTO NÃO NEWTONIANO.....	45
QUADRO 3-1 – INFORMAÇÕES HIDRÁULICAS OBSERVADAS NO VALE DE JUSANTE.....	58

## LISTA DE TABELAS

TABELA 4-1 – CENÁRIOS COM O MODELO REOLÓGICO BINGHAM NO MODELO NUMÉRICO HEC-RAS PARA AVALIAR OS PARÂMETROS DE FORMA INDEPENDENTE .....	68
TABELA 4-2 – CENÁRIOS COM O MODELO REOLÓGICO QUADRÁTICO NO MODELO NUMÉRICO RIVERFLOW2D PARA AVALIAR PARÂMETROS DE FORMA INDEPENDENTE .....	69
TABELA 4-3 – PARÂMETRO DE ENTRADA COM MAIOR COEFICIENTE DE VARIAÇÃO POR PARÂMETRO HIDRÁULICO E NUMÉRICO AVALIADO .....	71
TABELA 4-4 – CENÁRIOS COM O MODELO REOLÓGICO BINGHAM NO MODELO NUMÉRICO HEC-RAS PARA AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FORMA CONJUNTA.....	73
TABELA 4-5 – ÍNDICE DE DESEMPENHO GLOBAL DAS SIMULAÇÕES COM O MODELO BINGHAM DO HEC-RAS (RAS-18 A RAS-44).....	75
TABELA 4-6 – CENÁRIOS COM O MODELO REOLÓGICO BINGHAM NO HEC-RAS E QUADRÁTICO NO RIVERFLOW2D .....	76
TABELA 4-7 – CENÁRIOS COM OS MODELOS REOLÓGICOS QUADRÁTICO NO MODELO NUMÉRICO RIVERFLOW COM E SEM DEPOSIÇÃO .....	77
TABELA 5-1 – CENÁRIOS COM O MODELO REOLÓGICO CLASTIC-GRAINFLOW COULOMBO NO HEC-RAS E TURBULENT-COULOMB NO RIVERFLOW2D .....	86
TABELA 5-2 – ÍNDICE DE DESEMPENHO GLOBAL – BINGHAM (HEC-RAS), QUADRÁTICO (RIVERFLOW2D) E COULOMB (HEC-RAS/RIVERFLOW2D).....	98
TABELA 5-3 – TENSÕES CISALHANTES NO MODELO NUMÉRICO HEC-RAS – PONTO 1 .....	103
TABELA 5-4 – TENSÕES CISALHANTES NO MODELO NUMÉRICO HEC-RAS – PONTO 2 .....	103

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>6</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>7</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>14</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	16
1.2 PROBLEMA .....	16
1.3 HIPÓTESE .....	16
1.4 OBJETIVOS .....	17
1.4.1 OBJETIVO GERAL.....	17
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>18</b>
2.1 SÍNTESE DA LEGISLAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO NO BRASIL .....	18
2.2 EQUAÇÕES DE ÁGUAS RASAS .....	19
2.3 REOLOGIA.....	20
2.4 ESCOAMENTO NÃO NEWTONIANO.....	23
2.5 MODELOS REOLÓGICOS .....	29
2.6 MODELO NUMÉRICO HEC-RAS .....	32
2.7 MODELO NUMÉRICO RIVERFLOW2D.....	34
2.7.1 MODELO NUMÉRICO RIVERFLOW2D – LEITO FIXO .....	36
2.7.2 MODELO NUMÉRICO RIVERFLOW2D – LEITO MÓVEL.....	36
2.8 ESTADO DA ARTE – RETROANÁLISES DE CASOS DE RUPTURAS DE BARRAGENS DE REJEITO.....	39
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>49</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO .....	49
3.2 DESCRIÇÃO GERAL DO EVENTO .....	53
3.3 DADOS OBSERVADOS.....	57
3.4 TOPOGRAFIA DO VALE DE JUSANTE .....	60
3.5 ENTRADA DO VOLUME MOBILIZADO.....	61
3.5.1 HEC-RAS .....	61
3.5.2 RIVERFLOW2D .....	61
3.6 MODELOS NUMÉRICOS.....	62
3.7 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO.....	63

3.7.1 PARÂMETROS HIDRÁULICOS.....	63
3.7.2 COEFICIENTE DE VARIAÇÃO.....	64
3.7.3 ÍNDICE DE DESEMPENHO GLOBAL.....	65
3.8 RESUMO METODOLÓGICO DA PESQUISA.....	66
<b>4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS MODELOS REOLÓGICOS BINGHAM NO HEC-RAS E QUADRÁTICO NO RIVERFLOW2D.....</b>	<b>68</b>
4.1 AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO.....	68
4.2 OBTENÇÃO DA SIMULAÇÃO COM MELHOR AJUSTE NO HEC-RAS.....	73
4.3 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS EM RELAÇÃO AOS DADOS OBSERVADOS.....	76
<b>5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS MODELOS REOLÓGICOS CLASTIC- GRAINFLOW-COULOMB NO HEC-RAS E TURBULENT-COULOMB NO RIVERFLOW2D.....</b>	<b>86</b>
5.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO.....	86
5.2 COMPARAÇÃO COM OS MODELOS REOLÓGICOS BINGHAM NO HEC-RAS E QUADRÁTICO NO RIVERFLOW2D.....	88
5.2.1 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS.....	88
5.2.2 AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO GLOBAL.....	97
5.2.3 AVALIAÇÃO DOS HIDROGRAMAS DE RUPTURA.....	99
5.2.4 AVALIAÇÃO DAS TENSÕES CISALHANTES.....	101
<b>6 COMPARAÇÃO COM A LITERATURA.....</b>	<b>105</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>107</b>
7.1 LIMITAÇÕES E CONSIDERAÇÕES DO ESTUDO.....	107
7.2 CONCLUSÕES.....	108
7.3 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	109
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>110</b>
<b>ANEXO 1 – RESULTADOS TABELADOS.....</b>	<b>116</b>
<b>ANEXO 2 – LEGISLAÇÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITOS.....</b>	<b>119</b>
<b>ANEXO 3 – EQUACIONAMENTO DE SAINT-VENANT.....</b>	<b>126</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A avaliação de modelos numéricos para Estudos de Ruptura Hipotética de Barragens de Rejeitos (ERHB), é fundamental para atender às exigências da legislação brasileira, principalmente no que tange à segurança dessas estruturas. As diretrizes legais, como a Política Estadual de Segurança de Barragens de Minas Gerais (Lei nº 23.291/2019), em alinhamento com a Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei Federal nº 12.334/2010), estabelecem critérios para a elaboração de Planos de Ação de Emergência (PAE), que são subsidiados pelo ERHB.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Com o aumento da demanda por modelagem numérica em ERHB de Rejeitos, surgem incertezas inerentes ao desenvolvimento desses estudos. Aspectos como a definição da Zona de Autossalvamento (ZAS), a localização de Pontos de Encontro e os tempos de chegada da onda de ruptura são diretamente influenciados pelos resultados obtidos, destacando a importância de compreender as limitações dos softwares e as incertezas associadas aos dados de entrada, já que esses resultados são frequentemente utilizados à risca. Entre as limitações em escoamento não-newtoniano, pode-se citar a determinação dos parâmetros reológicos e a escolha dos modelos numéricos e reológicos mais adequados para representar o escoamento.

## 1.2 PROBLEMA

Com base no estado da arte deste estudo, alguns autores (Sreekumar et al., 2024; Gharamani et al., 2023; Giantomaso, 2023) discutem limitações relacionadas aos ERHB de rejeitos e apontam sugestões para futuros estudos. Assim, o presente trabalho tem como objetivo abordar alguns dos tópicos levantados por eles, como análises de deposição, testes com diferentes modelos numéricos e reológicos, e a aplicação desses modelos em eventos históricos de ruptura de barragens de rejeito.

## 1.3 HIPÓTESE

A hipótese para esse estudo é que, com base em um banco de dados robusto e organizado apresentado por Adria et al (2023), é possível realizar análises de sensibilidades com os modelos reológicos de Bingham e *Clastic Grain Flow* -

*Coulomb* no HEC-RAS, bem como os modelos Quadrático e *Turbulent Coulomb* no RIVERFLOW2D, sendo esse último nos módulos com e sem deposição, e trazer resultados relevantes no que tange os problemas citados anteriormente coletados no estado da arte do presente estudo.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a sensibilidade de parâmetros e modelos reológicos no estudo de caso de STAVA-ITA, utilizando os modelos numéricos HEC-RAS e RIVERFLOW2D.

### 1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A seguir são apresentados os objetivos específicos do presente trabalho:

- Identificar a sensibilidade dos parâmetros de tensão limite do escoamento, viscosidade, rugosidade do terreno e ângulo de atrito interno;
- Analisar a aplicabilidade dos modelos reológicos de Bingham e Clastic Grain Flow - Coulomb no HEC-RAS, assim como os modelos Quadrático e Turbulent Coulomb no RIVERFLOW2D, no estudo de caso STAVA-ITA;
- Realizar uma análise preliminar do módulo de leito móvel do RIVERFLOW2D com o modelo reológico Quadrático, comparando com as profundidades finais observadas, testando apenas a deposição, com erosão de leito limitada a zero;
- Comparar as diferenças entre os modelos numéricos HEC-RAS e RIVERFLOW2D.

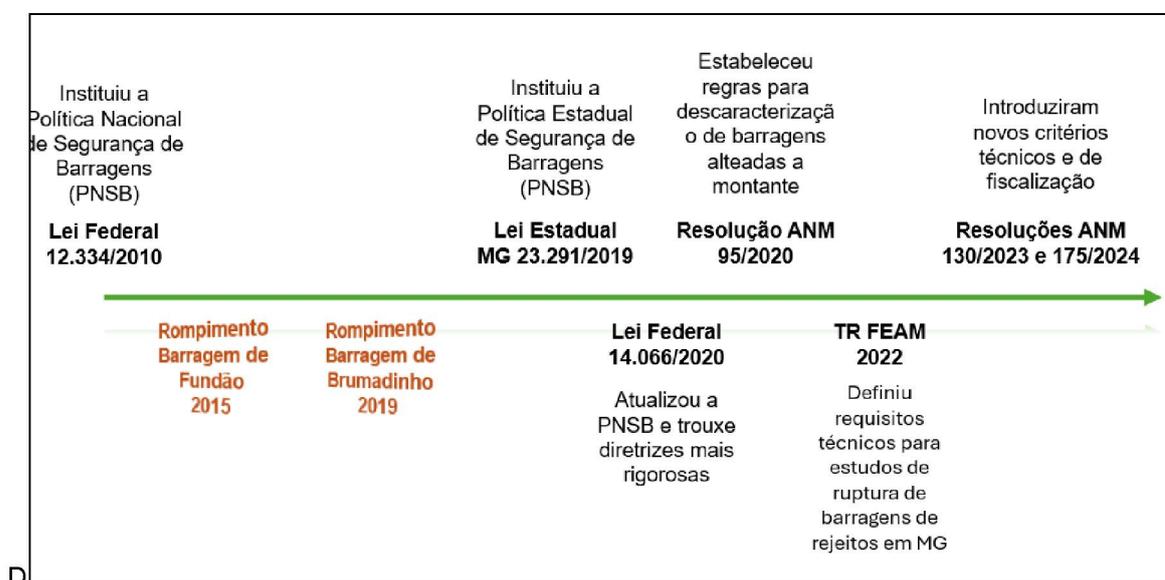
## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 SÍNTESE DA LEGISLAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO NO BRASIL

O ANEXO 2 – LEGISLAÇÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITOS apresenta com mais detalhes as normativas, resoluções e leis no que tange o escopo do presente estudo.

A FIGURA 2-1 apresenta a legislação a ser abordada no ANEXO 2.

FIGURA 2-1 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS NORMATIVAS PARA BARRAGENS DE MINERAÇÃO NO QUE TANGE ESTUDOS DE RUPTURA HIPOTÉTICA



Fonte = O autor, 2025

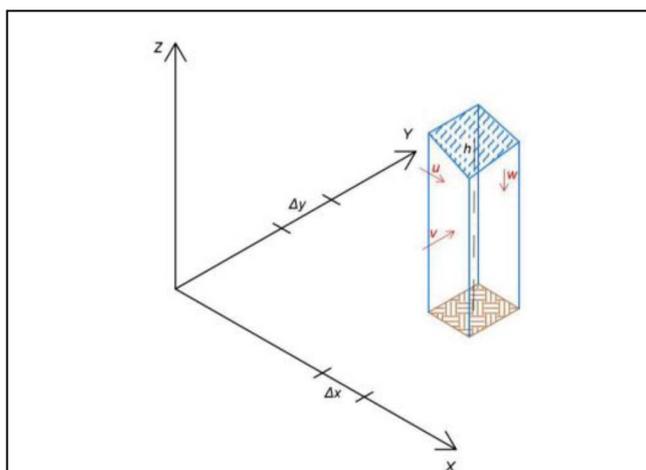
A Zona de Autossalvamento (ZAS), definida como o trecho a jusante da barragem onde não há tempo para intervenção em emergências (Lei Federal nº 12.334/2010), depende diretamente dos resultados de modelagem hidrodinâmica. A Resolução ANM 95/2020 exige a simulação do deslocamento da frente de onda com modelos 2D, além da caracterização geotécnica e reológica dos rejeitos, conforme ABNT/NBR 10.004, e a consideração da topografia atual e primitiva do reservatório. A Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) também publicou um Termo de Referência específico para Estudos de Ruptura Hipotética de Barragens.

A referência internacional que também fornece boas práticas para ERHB é o CDA (2021) *Tailings Dam Breach Analysis*. Esse documento oferece orientações relevantes para a modelagem e avaliação de eventos de ruptura, complementando as normativas nacionais e destacando boas práticas internacionais.

## 2.2 EQUAÇÕES DE ÁGUAS RASAS

A FIGURA 2-2 e a FIGURA 2-3 apresentam esquematicamente os elementos de fluido bidimensional e variáveis envolvidas na dedução para duas dimensões da equação de águas rasas conforme apresentado por Fabiani (2016). No ANEXO 3 – EQUACIONAMENTO DE SAINT-VENANT é apresentada a dedução da equação de Saint-Venant para uma dimensão.

FIGURA 2-2 – ELEMENTOS DE FLUIDO BIDIMENSIONAL



FONTE: Fabiani, 2016

A EQUAÇÃO 2-1 apresenta a equação da continuidade, desprezando contribuições adicionais, com o fluido entrando e saindo pelas quatro faces laterais do elemento de fluido, enquanto a EQUAÇÃO 2-2 e a EQUAÇÃO 2-3 apresentam as equações de conservação da quantidade de movimento nas duas direções em sua forma não-conservativa. A apresentação das equações de Saint-Venant para duas dimensões encontra-se em função da velocidade e profundidade para esse caso.

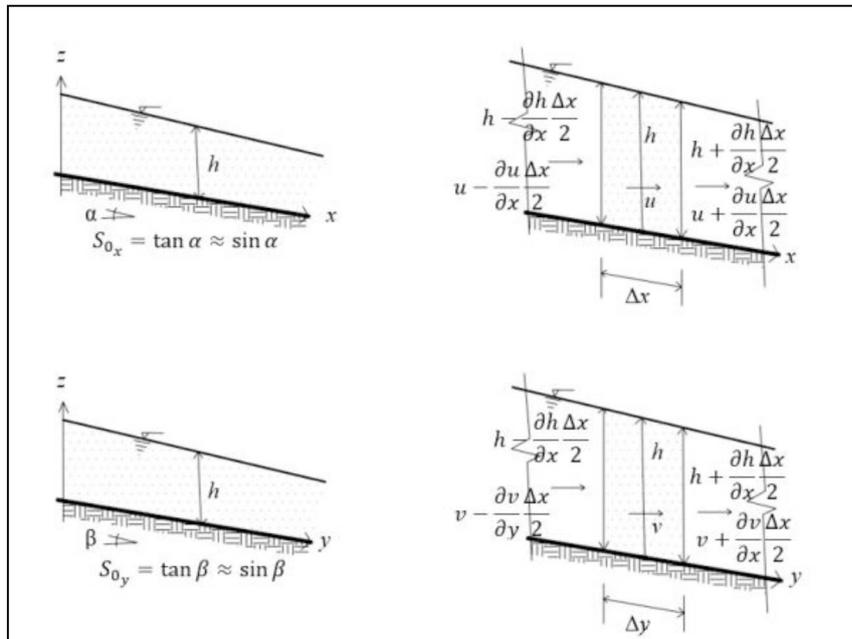
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad \text{EQUAÇÃO 2-1}$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u^2h) + \frac{\partial}{\partial y}(uh)v + \frac{1}{2}g \frac{\partial h^2}{\partial x} = gh(S_{0x} - S_{fx}) \quad \text{EQUAÇÃO 2-2}$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uvh) + \frac{\partial}{\partial y}(v^2h) + \frac{1}{2}g \frac{\partial h^2}{\partial y} = gh(S_{0y} - S_{fy}) \quad \text{EQUAÇÃO 2-3}$$

Em fluidos não newtonianos, é comum que os modelos numéricos incluam a parcela  $S_{md}$  para representar esse escoamento, derivadas das forças de cisalhamento internas  $\tau_{md}$ , que serão descritas nos próximos capítulos.

FIGURA 2-3 – VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NA DEDUÇÃO PARA DUAS DIMENSÕES



FONTE: Fabiani, 2016

### 2.3 REOLOGIA

Mezger (2018) define a reologia como um ramo da Física que descreve a deformação e o comportamento do fluxo de qualquer tipo de material.

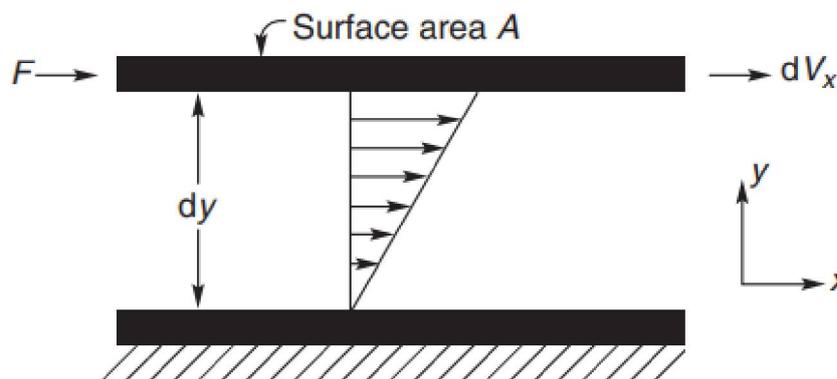
Richardson & Chhabra (2008) classificam os fluidos de duas maneiras diferentes, de acordo com a sua resposta à pressão externamente aplicada ou devido a ação de uma tensão cisalhante. Em relação a primeira opção, os fluidos são classificados como compressíveis e incompressíveis, dependendo se o volume do elemento do fluido depende ou não de sua pressão. Os líquidos normalmente são considerados incompressíveis, sendo sua resposta ao cisalhamento de maior importância.

Mezger (2014) comenta dos dois opostos da reologia, sendo de um lado um fluido viscoso ideal, como a água, e do outro um material sólido ideal, como o aço. Entre os dois tipos de comportamento, existe uma ampla classificação de fluidos ou materiais de acordo com o seu comportamento reológico.

Para iniciar a discussão do comportamento reológico é essencial a definição da Lei de Viscosidade de Newton para definição de um fluido Newtoniano. Inserido um fluido incompressível em escoamento laminar entre dois planos paralelos (FIGURA 2-4), com o plano inferior fixo, e em estado estacionário, se uma força  $F$  é aplicada, ela causará uma força de cisalhamento ( $\tau_{YX}$ ), que será equilibrada por uma força de atrito interno do fluxo. Nesse tipo de fluido, a tensão cisalhante é o produto da taxa de cisalhamento ( $\frac{dV_x}{dy}$  ou  $\dot{\gamma}_{yx}$ ) pela viscosidade do meio ( $\mu$ ), caracterizando um fluido Newtoniano como apresentado na EQUAÇÃO 2-4 (Richardson, J, F & Chhabra, R, P, 2008).

$$\frac{F}{A} = \tau_{YX} = \mu \left( -\frac{dV_x}{dy} \right) = \mu \dot{\gamma}_{yx} \quad \text{EQUAÇÃO 2-4}$$

FIGURA 2-4 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO FLUXO DE CISALHAMENTO UNIDIRECIONAL



FONTE: Richardson e Chhabra , 2008

Já um fluido não newtoniano ocorre quando a relação entre a tensão cisalhante e a taxa de cisalhamento é não linear ou quando para uma taxa de cisalhamento igual a zero, a tensão cisalhante correspondente não é zero, ou seja, a curva taxa x tensão não se inicia na origem (Richardson, J, F & Chhabra, R, P, 2008).

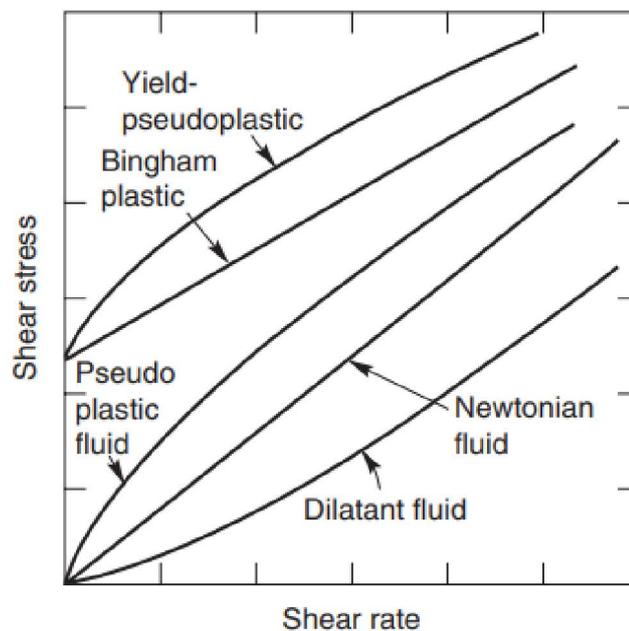
Richardson & Chhabra (2008) comenta que um fluido pode possuir uma combinação de dois ou até mais características não-newtonianas, como as citadas a seguir:

- Fluidos para os quais a taxa de cisalhamento em qualquer ponto é determinada apenas pelo valor da tensão de cisalhamento nesse ponto e naquele instante; esses fluidos são conhecidos como 'independentes

do tempo (FIGURA 2-5)', 'puramente viscosos', 'inelásticos' ou 'fluidos Newtonianos generalizados' (GNF);

- Fluidos mais complexos para os quais a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento depende da duração do cisalhamento e do histórico cinemático; esses são chamados de 'fluidos dependentes do tempo'; e
- Substâncias que exibem características tanto de fluidos ideais quanto de sólidos elásticos e mostram recuperação elástica parcial após a deformação; esses são categorizados como 'fluidos viscoelásticos'.

FIGURA 2-5 – TIPOS DE COMPORTAMENTO DE FLUIDOS 'INDEPENDENTES DO TEMPO'



FONTE: Richardson e Chhabra , 2008

É conveniente definir uma viscosidade aparente do material como a razão da tensão de cisalhamento em relação a taxa de cisalhamento (Richardson e Chhabra, 2008).

O mais comum fluido não newtoniano 'independente do tempo' é o *pseudoplastic fluid* ou também chamado de *Shear-thinning*, caracterizado por uma viscosidade aparente que decresce com o aumento da tensão cisalhante. Para baixas tensões cisalhantes, esse fluido pode se comportar como fluido newtoniano (Richardson, J, F & Chhabra, R, P, 2008), sendo o oposto conhecido como *Shear-thickening*, sendo esse com um comportamento dilatante (*dilatant fluid*).

Um segundo tipo de comportamento não newtoniano ‘independente do tempo’ é o *Viscoplastic*, onde para iniciar o movimento ou deformação, o fluido deve exceder a Tensão Limite de Escoamento  $\tau_y$ . Um fluido com uma curva linear, mas com uma Tensão Limite de Escoamento, é denominado de *Bingham plastic* e possui uma viscosidade aparente constante. No entanto, fluidos com a mesma condição de Tensão Limite de Escoamento, mas com uma curva não linear podem ser denominados de *Yield-pseudoplastic* (Richardson e Chhabra, 2008).

O QUADRO 2-1 e o QUADRO 2-2 apresentam valores de viscosidade e tensão limite de escoamento para substâncias comuns.

QUADRO 2-1 – VALORES TÍPICOS DE VISCOSIDADE EM TEMPERATURA AMBIENTE

Substância	Viscosidade (mPa.s)
Ar	$10^{-2}$
Água	1
Mercúrio	1,55
Óleo de oliva	100
Mel	$10^4$
Betume	$10^{11}$

Fonte: Richardson e Chhabra, 2008.

QUADRO 2-2 – VALORES TÍPICOS DE TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO

Substância	Concentração volumétrica (%)	Tensão limite de escoamento (Pa)
Solo	65-80 %	375-5.000
Caulinita	40-50 %	200-1.600
Argila	35-60 %	950-300.000
Bentonita	5-20 %	200-2E+17

Fonte: O'Brien e Julien, 1995.

## 2.4 ESCOAMENTO NÃO NEWTONIANO

Com base nos comportamentos dos fluidos apresentados no item anterior, a literatura propõe classificações de escoamento para auxiliar na escolha e aplicação de modelos reológicos, considerando fatores como tamanho de partículas, concentração de sólidos e tipo de material.

O modelo numérico HEC-RAS (USACE, 2020) indica três classificações de escoamento à medida que a concentração volumétrica (Cv) aumenta, sendo

escoamentos hiperconcentrados, lama e detritos e, por fim, clásticos. O quadro abaixo apresenta a classificação de escoamento proposta nesse respectivo manual técnico e os respectivos modelos reológicos indicados. A concentração volumétrica é a razão entre o volume de sólidos e o volume total da mistura fluido-sólido.

QUADRO 2-3 – CLASSIFICAÇÃO DE ESCOAMENTOS NÃO NEWTONIANOS E TIPO DE MODELO REOLÓGICO

Classificação	Modelos reológicos	Condição
Hiperconcentrado	<i>Bingham</i>	$C_v > 30\%$
Lama e escoamento de detritos ( <i>mud and debris flow</i> )	<i>Turbulent Quadratic</i> <i>Hershel Bulkley</i>	$C_v > 60\%$
Granulares	<i>Mohr-Coulomb</i>	$N_s > 0,1$

Fonte: Adaptado de USACE, 2020.

Julien e Leon (2000) comentam que escoamentos hiperconcentrados podem ser iniciados por inúmeros casos como chuvas, derretimento de neve, ações vulcânicas ou atividade antrópicas, sendo incrementados por falhas geotécnicas no vale de jusante durante a propagação do escoamento. O escoamento é usualmente dependente da concentração volumétrica, do tamanho de grão e da porção de argila.

O'Brien e Julien (1984) apresenta uma classificação de tipos de escoamento hiperconcentrados baseado na concentração volumétrica do escoamento, onde observa-se diferenças em relação a classificação anterior.

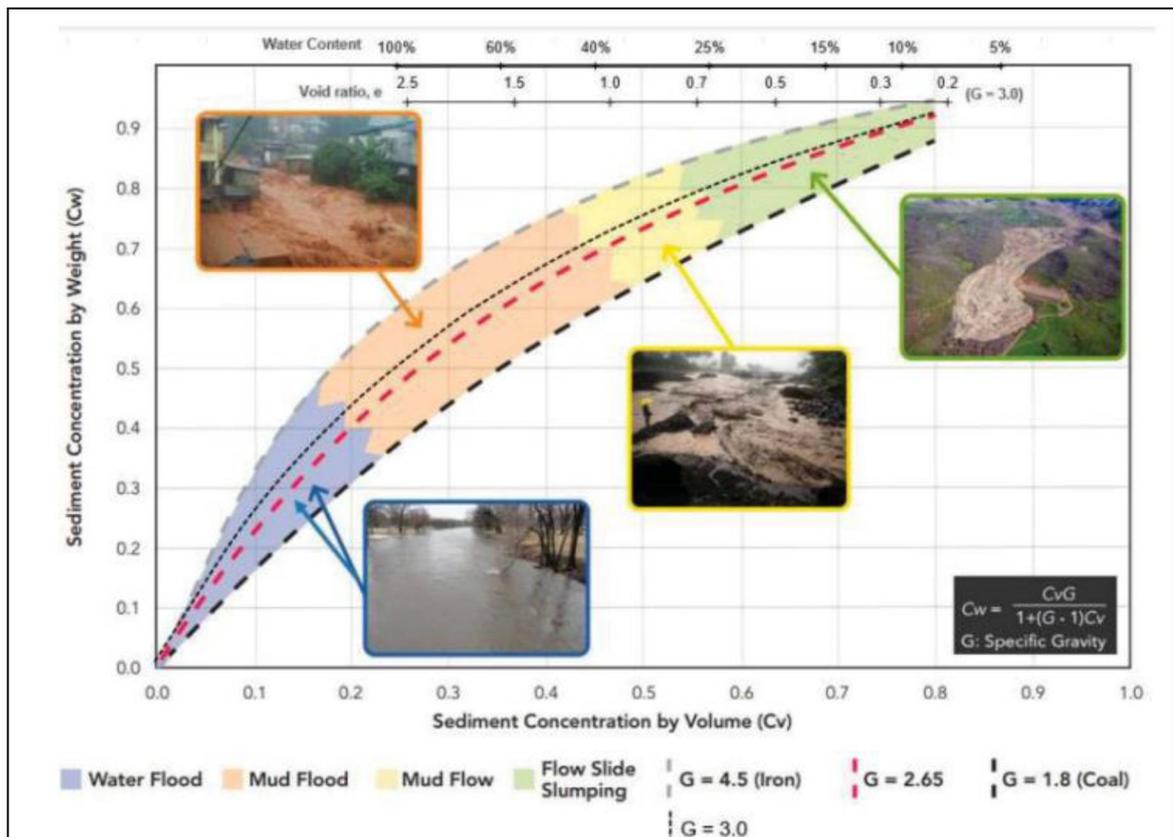
QUADRO 2-4 – CLASSIFICAÇÃO DE ESCOAMENTO HIPERCONCENTRADO COMO FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA

Classificação	Concentração Volumétrica	Características do escoamento
Deslizamentos de terra ( <i>Landslide</i> )	53-90	Não irá escoar, falha por deslizamento de bloco
	50-53	Falha por deslizamento de bloco com deformação interna durante o deslizamento, movimento lento antes da falha
Escoamento de lama ( <i>mudflow</i> )	48-50	Escoamento evidente, movimento lento sustentado por lama, deformação plástica sob seu próprio peso, coesivo, não irá se espalhar no nível da superfície
	45-48	Começa a se espalhar, coesivo
<i>Mud flood</i>	40-45	Facilmente mistura, mostra propriedades de escoamento em deformação; espalha em superfícies horizontais, mas mantém um superfície de fluido inclinada, queda de partículas grandes, ondas aparecem, mas se dissipam rapidamente
	35-40	Quedas aparentes, espalhamento quase completo em superfície horizontais, superfície do líquido de duas fases aparece, ondas percorrem grandes distâncias
	30-35	Separação da água na superfície, com duas fases, onda percorre grandes trajetos facilmente, maioria da areia e cascalho já se depositaram
	20-30	Ondas com características distintas, superfície de fluido, Todas as partículas repousando no fundo em condição de fluido estacionário
Escoamento de água	<20	Escoamento com cargas suspensas e de fundo

Fonte: Adaptado de O'Brien e Julien, 1984.

Essas classificações são um tanto arbitrarias, e a terminologia na literatura sobre fluxos não-newtonianos pode variar (USACE, 2020). A FIGURA 2-6 apresenta a classificação de escoamento com exemplos fotográficos apresentada por CDA (2021, adaptada da classificação apresentada acima de O'Brien e Julien, 1984).

FIGURA 2-6 – TIPOS DE ESCOAMENTO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DO FLUIDO



Fonte = CDA, 2021.

O *Mudflood* (Julien e Leon, 2000) são escoamento hiperconcentrados de partículas não coesivas (exemplo: areia). O escoamento é turbulento e a resistência do escoamento depende da rugosidade assim como escoamento de água, tendo um comportamento fluido para concentrações volumétricas tão alto quanto 40%. Geralmente *Mudfloods* ocorrem em canais montanhosos íngremes com velocidades altas em regime supercrítico, com bastante incremento de sedimentos no caminho da inundação e potencial de erosão e deposição.

FIGURA 2-7 – EXEMPLO DE MUDFLOOD



Fonte: Julien e Leon, 2000

Já o escoamento de lama (*Mudflow*) possui a sua viscosidade muito superior do que a água e possuem velocidades inferiores comparadas ao *Mudflood* (Julien e Leon, 2000). As componentes hidráulicas desse escoamento comumente possuem baixas velocidades e altas profundidades, com valores inferiores de número de Froude. Essas propriedades hidráulicas sustentam o movimento desse escoamento em superfícies mais planas.

FIGURA 2-8 – EXEMPLO DE MUDFLOW



Fonte: Julien e Leon, 2000

Com o aumento da concentração volumétrica de sólidos ( $> 60\%$ ) a relação tensão e taxa cisalhante começa a fugir do comportamento linear de Bingham. Tanto os escoamentos de lama ou de grãos são dilatantes, ou seja, a tensão cisalhante possui incremento mais rápido do que a taxa de cisalhamento (USACE, 2020). Para essa concentração de sólidos, a interação de partículas começa a importar consideravelmente, sendo mais importantes para partículas grossas. No entanto, o fluido ainda é a fase dominante, transportando os sólidos.

Nessa faixa de concentração volumétrica, o escoamento de lama (Mudflow) pode ocorrer com partículas finas, com a não linearidade causada pela turbulência entre partículas, representada por uma tensão cisalhante não linear.

Por fim, o escoamento de detritos ou granulares (Julien e Leon, 2000) envolve o movimento de grandes partículas e detritos. Tensões dispersivas são extremamente relevantes para esse escoamento devido a colisão entre partículas e detritos. Esse escoamento é muito menos fluido que o escoamento de lama e possui menos partículas de sedimentos.

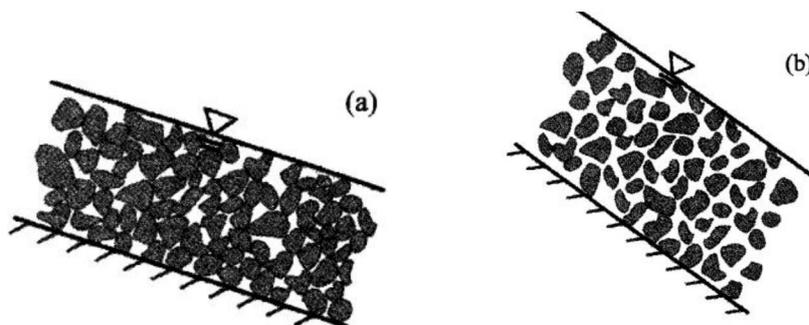
FIGURA 2-9 – EXEMPLO DE ESCOAMENTO DE DETRITOS



Fonte: EIDG. FORSCHUNGSANSTALT WSL, 2023

Iverson e Denlinger (2001) comentam que para escoamentos granulares / detritos existem forças internadas denominadas como tensão de colisão entre grãos e tensão de fricção de Coulomb. A relevância de cada tensão pode ser definida pelo parâmetro adimensional  $N_s$  que estima a relação entre a tensão de colisão entre grãos e a tensão de fricção de Coulomb. Se maior que 0,1, as tensões de colisão são dominantes. Na FIGURA 2-10a é apresentado um escoamento concentrado com fricção dominante devido ao contato contínuo entre as partículas e FIGURA 2-10b um escoamento com partículas espaçadas e grande contato por colisão entre elas. A fricção por ser representada pelo modelo geotécnico de Mohr-Coulomb.

FIGURA 2-10 – ESCOAMENTO DE DETRITOS E GRANULAR



Fonte: Iverson e Denlinger, 2001

Ainda caso de fluxos granulares, conforme a classificação de O'Brien e Julien (1984), em que a matriz fluida é água e o sedimento é composto praticamente por material elástico não coesivo, os fluxos podem ser úmidos ou secos. A água, como meio fluido, proporciona uma velocidade de queda das partículas elevada devido à ausência de finos e à baixa viscosidade da matriz fluida. O comportamento desses fluxos depende da concentração volumétrica. Para que os sedimentos se movam como fluido, a concentração volumétrica deve ser inferior aos valores mínimos observados. Por exemplo, em areia siltosa, a concentração volumétrica mínima é 53%, enquanto em areia fina é 54%, em areia grossa é 57%, e em cascalho é 63%, e acima desses valores, o material passa a se comportar como um sólido, movendo-se em bloco (Bagnold, 1954, apud O'Brien e Julien, 1984).

A reologia de escoamentos sedimentares hiperconcentrados é relativamente complexa, podendo seu comportamento ser inferido pelos processos físicos da fonte de sedimento que gerou o escoamento ou da investigação de eventos que ocorreram em bacias vizinhas (Julien e Leon, 2000).

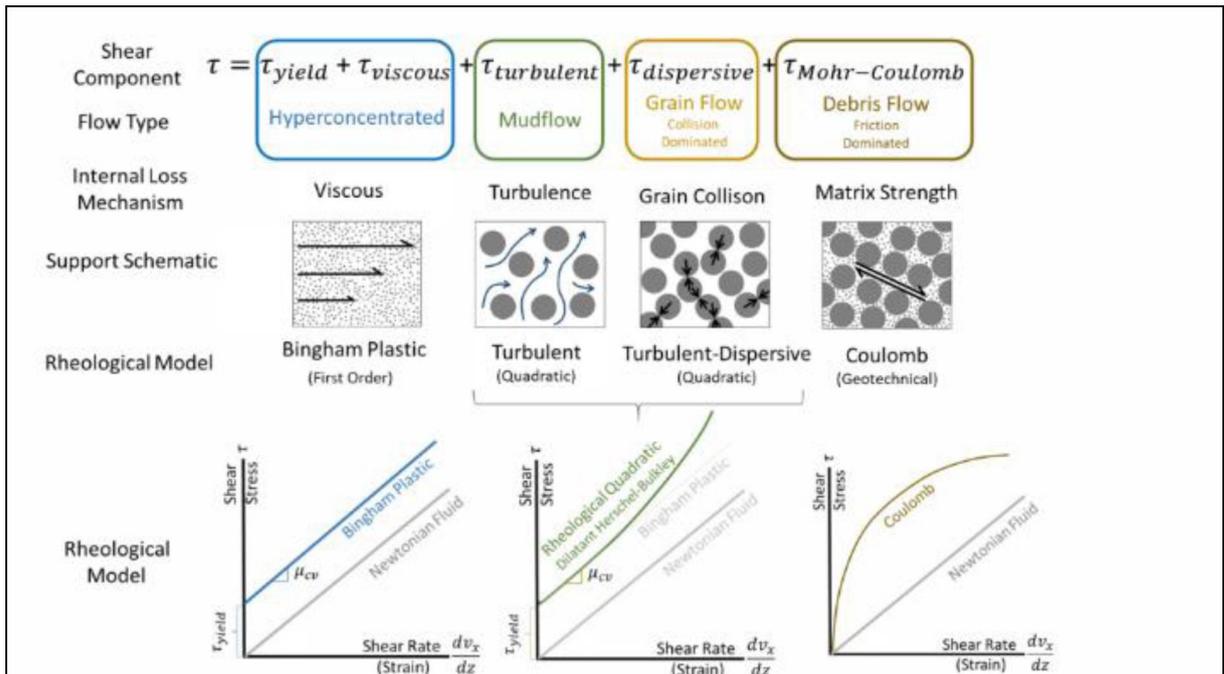
A tensão cisalhante total ( $\tau$ ) desses escoamentos levam em conta cinco tensões: Tensão Limite de Escoamento ( $\tau_c$ ), Tensão Mohr-Coulomb ( $\tau_{mc}$ ), Tensão Turbulenta ( $\tau_t$ ), Tensão Dispersiva ( $\tau_d$ ), que leva em conta a colisão de partículas, e Tensão Viscosa ( $\tau_v$ ).

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad \text{EQUAÇÃO 2-5}$$

Em resumo, *Mudfloods* são escoamentos turbulentos com grande concentração de sedimento não coesivo. Escoamentos de lama (*Mudflow*) carregam grande concentração de partículas finas e sedimento coesivo e são caracterizados por sua alta viscosidade, sendo a tensão limite de escoamento e a tensão viscosa dominantes. Para escoamento de lama (*Mudflow*) com alta concentração de sedimentos, uma relação não linear e dilatante pode ser necessária. Escoamentos com partículas grosseiras possuem a tensão dispersiva predominante, podendo ser preciso também a caracterização de um modelo geotécnico Mohr-Coulomb quanto há grande fricção entre partículas.

A FIGURA 2-11 apresenta em síntese a classificação discutida acima (USACE, 2020).

FIGURA 2-11 – CLASSIFICAÇÃO, PROCESSOS, MODELO CONCEITUAL E MODELOS REOLÓGICOS



Fonte: USACE, 2020.

## 2.5 MODELOS REOLÓGICOS

O modelo reológico de Bingham (EQUAÇÃO 2-6) é apresentada a seguir, onde a tensão cisalhante resultante ( $\tau_{md}$ ) corresponde a soma da Tensão Limite de Escoamento ( $\tau_y$ ) pelo produto da viscosidade ( $\mu$ ) e da taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ).

$$\tau_{md} = \tau_y + \mu \dot{\gamma} \quad \text{EQUAÇÃO 2-6}$$

A taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ) é estimada tanto no HEC-RAS 6.5 quanto no RIVERFLOW2D 8.12.04 pela relação entre a velocidade e a profundidade do escoamento. Sendo  $h$  a profundidade do escoamento e  $V$  a velocidade do escoamento

$$\dot{\gamma} = \frac{3V}{h} \quad \text{EQUAÇÃO 2-7}$$

A tensão cisalhante de fundo pode ser estimada a partir da relação com o quadrado da velocidade e do coeficiente de rugosidade de *Manning* conforme apresentado a seguir. O HEC-RAS possui uma relação inversa ao raio hidráulico da seção ( $R^{\frac{1}{3}}$ ), enquanto o RIVERFLOW2D utiliza a profundidade média do escoamento ( $h^{\frac{4}{3}}$ ).

$$\tau_b = \rho_m C_d |V|^2 \quad \text{EQUAÇÃO 2-8}$$

$$C_{dras} = \frac{gn^2}{R^3} \quad \text{EQUAÇÃO 2-9}$$

$$C_{driver} = \frac{gn^2}{h^3} \quad \text{EQUAÇÃO 2-10}$$

Onde  $\rho_m$  é a densidade da mistura água-sólidos,  $h$  a profundidade do escoamento,  $g$  a aceleração da gravidade,  $V$  a velocidade do escoamento e  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning.

Ao combinar o modelo reológico de Bingham com a parcela de cisalhamento de fundo, obtém-se o modelo reológico denominado Quadrático no RIVERFLOW2D 8.12.04 e de Bingham no HEC-RAS 6.5, visto que nele essa componente está sempre ativada. Esse modelo reológico por possuir as tensões viscosas, limite de escoamento e de fundo, são amplamente utilizadas em escoamentos de lama (*Mudflow*).

Em escoamento onde a tensão dispersiva possui grande influência, necessitando da representação da não linearidade da relação entre tensão cisalhante e taxa de cisalhamento, o modelo reológico de O'Brien and Julien (1984), denominado de Quadrático no HEC-RAS 6.5 (mas não corresponde ao Quadrático do RIVERFLOW2D), é apresentado abaixo:

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma}_{yx} + C \dot{\gamma}_{yx}^2 \quad \text{EQUAÇÃO 2-11}$$

onde:

$$\tau_y = \tau_c + \tau_{mc} \quad \text{EQUAÇÃO 2-12}$$

e:

$$C = \rho_m l^2 + f(\rho_m, C_v) d_s^2 \quad \text{EQUAÇÃO 2-13}$$

$$f(\rho_m, C_v) = 0,01 \rho_m \left[ \left( \frac{C_{max}}{C_v} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \quad \text{EQUAÇÃO 2-14}$$

Sendo que  $\eta$  é a viscosidade,  $\rho_m$  é a densidade de massa da mistura do fluxo,  $l$  é o comprimento de mistura de Prandtl,  $d_s$  é o tamanho das partículas,  $C_v$  é a concentração volumétrica de sólidos,  $ai$  é o coeficiente empírico de Bagnold, e  $C_{max}$  é a concentração volumétrica máxima de sólidos.

Outra forma de representar a não linearidade da relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa cisalhante é o modelo reológico *Hershel-Bulkley* (EQUAÇÃO 2-15), onde os parâmetros K e n representam a parcela não-linear da curva e podem ser obtidas através da busca de melhores ajustes para as amostras disponíveis de um fluido.

$$\tau_{yx} = \tau_y + K \dot{\gamma}_{yx}^n \quad \text{EQUAÇÃO 2-15}$$

Em escoamento com partículas grosseiras onde a fricção exerce grande influência no escoamento, o modelo reológico de *Mohr-Coulomb* pode ser necessário, sendo que ele é representado no RIVERFLOW2D 8.12.04, acrescido da parcela de tensão cisalhante de fundo, com o nome Turbulent-Coulomb com base na EQUAÇÃO 2-16. O ângulo de atrito interno é o ângulo de estabilidade basal e representa o ângulo de atrito efetivo entre as partículas sólidas. Pode ser aproximado pelo ângulo da superfície livre do material depois que ele parou. O ângulo de atrito interno  $\delta_f$  é tipicamente apenas uma fração do ângulo de Coulomb (McDougall e Hungr, 2006, apud Naef, 2006).

$$\tau_b = \tau_f + \rho g_\psi \frac{n^2 |u|^2}{h^{\frac{1}{3}}} \quad \text{Turbulento / fricção}$$

sendo  $\tau_f = (\rho g_\psi h - P_b) \tan \delta_f$  EQUAÇÃO 2-16

Sendo  $\tau_b$  é a tensão cisalhante,  $\tau_f$  é a tensão limite de escoamento / coesão,  $\rho$  é a densidade,  $g_\psi$  é a projeção da gravidade normal ao fundo,  $|u|$  é o módulo da velocidade,  $P_b$  é a pressão nos poros  $h$  é a profundidade do escoamento e  $\delta_f$  é o ângulo de atrito interno

No HEC-RAS 6.5 esse modelo reológico é dado pelas seguintes equações, onde  $c$  é a coesão ou a resistência coesiva,  $\mu$  é o coeficiente de atrito de Coulomb,  $\sigma$  é a tensão normal na base da mistura,  $\theta$  é o ângulo de inclinação do leito,  $h$  é a profundidade vertical do fluxo e  $\phi$  é o ângulo de atrito interno. Salienta-se novamente que a parcela de tensão cisalhante de fundo sempre está ativada no HEC-RAS 6.5.

$$\tau_y = c + \mu \sigma \quad \text{EQUAÇÃO 2-17}$$

$$\sigma = (\rho_m - \rho_w) g h \cos^2 \theta \quad \text{EQUAÇÃO 2-18}$$

$$\mu = \tan. \phi \quad \text{EQUAÇÃO 2-19}$$

O QUADRO 2-5 resume as tensões cisalhantes e mecanismos internos de perda de energia disponíveis nos modelos reológicos apresentados. Para o presente estudo serão testados os modelos de Bingham (HEC-RAS), Clastic Grain Flow – Coulomb (HEC-RAS), Turbulent Coulomb (RIVERFLOW2D) e Quadrático (RIVERFLOW2D).

QUADRO 2-5 – TENSÕES CISALHANTES E MECÂNIISMOS INTERNOS DE PERDA DE ENERGIA DISPONÍVEIS NOS MODELOS REOLÓGICOS APRESENTADOS

Mecanismo interno de perda de energia	Tensões cisalhantes associadas	Bingham (HEC-RAS) Quadrático (RIVER FLO2D)	Clastic Grain Flow Coulomb (HEC-RAS)	Turbulent Coulomb (RIVER FLOW2D)	Quadrático (HEC-RAS)	Hershell-Bulkley (HEC-RAS)
Viscosidade	Viscosa	Sim	Não	Não	Sim	Sim
	Limite de escoamento	Sim	Não	Não	Sim	Sim
Turbulência	Fundo	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Colisão entre grãos	Dispersiva	Não	Não	Não	Sim	Sim
Fricção entre grãos	<i>Coulomb</i>	Não	Sim	Sim	Não	Não

## 2.6 MODELO NUMÉRICO HEC-RAS

O U.S Army Corps of Engineers River Analysis System (HEC-RAS) é um software gratuito desenvolvido pelo Hydrologic Engineer Center. Este item foi escrito com base nos documentos e manuais do HEC-RAS (USACE, 2024). A versão utilizada para o presente estudo é a 6.5, exceto para o modelo *Clastic Grain Flow – Coulomb* que foi utilizado a versão 6.6 devido a um *bug* relatado pela USACE no 6.5.

O software tem diferentes módulos e funcionalidades, incluindo:

- Fluxo permanente unidimensional.
- Fluxo não-permanente unidimensional e bidimensional.
- Fluxo unidimensional e bidimensional para transporte de sedimentos / cálculo de leito móvel.
- Modelagem da temperatura da água e da qualidade da água.
- Módulo de fluxo de lama e detritos.

O software utiliza as Equações de Águas Rasas (Shallow Water Equations - SWE) para descrever a dinâmica dos fluidos, de acordo com as equações de Conservação da Massa e Conservação do Momento. Considera uma distribuição de pressão hidrostática e velocidades verticais pequenas.

O HEC-RAS utiliza o Método dos Volumes Finitos (MVF) para discretizar a equação de conservação de massa e da conservação da quantidade de movimento, em sua forma completa (hidrodinâmica). Outra abordagem inclusa no HEC-RAS, é a equação das Ondas Difusivas, que apenas considera as forças de inércia, gravidade e atrito.

Existem três métodos para resolver as SWE: o Método Euleriano-Lagrangiano, o Método Euleriano e o Método de Conservação de Inércia Local. Com relação aos solvers, há três opções: Pardiso, SOR e FGMRES-SOR. Para mais informações, consultar o manual de referência do HEC-RAS.

O HEC-RAS pode adicionar a turbulência no modelo numérico utilizando a o Modelo de Turbulência Eddy Viscosity calculada em função da velocidade, profundidade da água, coeficiente de Smagorinsky, da resolução da malha, da taxa de deformação e de coeficientes empíricos.

A malha computacional no HEC-RAS estima a elevação da superfície da água no centro de cada célula a cada passo de tempo. As faces das células determinam o fluxo entre elas. O terreno e a malha são pré-processados para gerar relações detalhadas entre elevação e volume, além de propriedades hidráulicas para cada face da célula. Isso garante que os detalhes do terreno sejam considerados no armazenamento e transporte da água, independentemente do tamanho da célula, embora existam limites e recomendações para seu dimensionamento.

Além da configuração de passo de tempo fixo, o software possui funcionalidades referente à utilização de passos de tempo variável para modelagem unidimensional e bidimensional, considerando a condição limite de *Courant* ou séries temporais de divisores.

O modelo HEC-RAS permite a utilização de  $n$  de Manning constante para todo o domínio computacional ou variável espacialmente.

Além disso, o HEC-RAS apresenta várias funcionalidades de representação de estruturas hidráulicas tais como pontes, bueiros, barragens, vertedouros, estruturas laterais e estações de bombeamento.

Outras funcionalidades e possibilidades de simulação incluem:

- Determinação dos limites de planícies de inundação com modelagem de cheias;
- Modelagem de erosão em pontes;
- Projeto de canais;
- Precipitação e infiltração;
- Estudos de ruptura de barragens.

O HEC-RAS oferece flexibilidade para modelagem ao permitir a inclusão de diversas condições de contorno e iniciais. Isso inclui o uso de curvas-chave, níveis de água de reservatórios, hidrogramas laterais e internos, declividades normais etc.

Por último, o módulo RAS-MAPPER merece destaque, pois, além de permitir a visualização e manipulação dos resultados e geometria, também constitui uma plataforma de geoprocessamento com ferramentas de criação e edição de dados espaciais vetoriais e matriciais com ênfase nas demandas para estudos dessa natureza.

## 2.7 MODELO NUMÉRICO RIVERFLOW2D

O RiverFlow2D é um software comercial desenvolvido pela empresa Hydronia LLC. Este subcapítulo foi baseado no manual de referência do RiverFlow2D (Hydronia, 2025). A versão utilizada para o presente estudo é a 8.12.05. O software tem diferentes módulos e abordagens, tais como:

- Módulo de drenagem urbana;
- Módulo de transporte de sedimentos;
- Módulo de escoamento de lama e rejeitos;
- Módulo de transporte de poluentes;
- Módulo de qualidade da água; e
- OilFlow2D: derramamentos de óleo em terra ou água.

O modelo hidrodinâmico do RiverFlow2D utiliza o método de Volumes Finitos para resolver as Equações de Águas Rasas, que descrevem o comportamento hidráulico do fluxo em modelos bidimensionais e derivam da simplificação vertical da equação completa em três dimensões (equação de Navier Stokes).

Uma característica do RiverFlow2D é o tempo variável computacional. A partir da discretização espacial, o modelo converge para um tempo computacional baseado no Número de Courant. O programa utiliza como padrão o valor ideal do Número de

Courant de 1. O RiverFlow2D indica que em alguns casos podem ser utilizados valores inferiores a 1. Deste modo, o usuário não estabelece o passo de tempo computacional a ser utilizado.

Outra característica importante do modelo numérico RiverFlow2D é a rotina de considerar células inativas no cálculo computacional, otimizando o processamento. No início de cada tempo computacional, todas as células são classificadas como secas ou molhadas, de acordo com o tempo computacional anterior. Uma célula é considerada seca quando a profundidade é inferior a uma fração de um milímetro. Se a célula estiver seca e rodeada por células secas, ela é então classificada como inativa e retirada dos cálculos para o tempo computacional seguinte e a componente de velocidade se torna zero.

A interface geométrica do RiverFlow2D corresponde a um complemento no software QGIS, onde o usuário cria os dados geométricos para as simulações. O RiverFlow2D utiliza uma malha não estruturada ou Rede Triangular Irregular (TIN – Irregular Tin Surface), formada por triângulos de tamanhos diferentes. A malha é flexível pois pode ser adaptada a topografia irregular, aos limites, as estruturas, ou a qualquer obstáculo que possa existir na área a ser modelada.

Além disso, o RiverFlow2D pode representar estruturas hidráulicas, tais como pontes, pilares de pontes, barragens, bueiros e açudes.

É possível modelar no software os seguintes itens:

- Chuva e evaporação.
- Infiltração.
- Erosão e deposição.
- Vento.
- Fontes e lagos.
- Abertura de brecha.

O RiverFlow2D pode ser executado utilizando a Unidade de Processamento Gráfico (GPU). O manual indica que as simulações podem funcionar até 700 vezes mais rápido do que em um computador com um único processador.

O modelo oferece flexibilidade para modelagem ao permitir a inclusão de diversas condições de contorno e iniciais. Isso inclui o uso de curvas-chave, níveis de água de reservatórios, hidrogramas laterais e internos, declividades normais etc.

Os resultados do RiverFlow2D estão disponíveis para seções transversais, pontos de observação ou perfis longitudinais. Além disso, utilizando o complemento dentro do QGIS, é possível visualizar e gerar propriedades hidráulicas e reológicas do modelo numérico em diferentes tempos de processamento ou de valores máximos

### 2.7.1 MODELO NUMÉRICO RIVERFLOW2D – LEITO FIXO

O módulo do RIVERFLOW2D para escoamento não newtoniano em leito fixo possui as seguintes premissas:

- O escoamento está confinado a uma camada fina em comparação com a escala horizontal de interesse;
- O escoamento é regido pela equação de águas rasas;
- A mistura de água e sedimentos é descrita utilizando a abordagem do contínuo, sem diferenciar a fase líquida da sólida;
- O leito do rio não sofre erosão, ou seja, não há incorporação ou deposição de material;
- O fluido é considerado uma mistura homogênea de fase única de água e sedimento, com propriedades constantes, como densidade, viscosidade, tensão de escoamento, ângulo de atrito basal etc. A pressão do fluido nos poros também é considerada hidrostática;
- O sistema de coordenadas de referência é horizontal-vertical, e as forças de pressão e tensão atuam na direção horizontal.

### 2.7.2 MODELO NUMÉRICO RIVERFLOW2D – LEITO MÓVEL

O módulo do RIVERFLOW2D para escoamento não newtoniano em leito móvel possui as seguintes premissas:

- Abordagem de escoamento de águas rasas: o fluxo é confinado a uma camada que é fina em comparação com as escalas horizontais de interesse, levando à suposição de pressão hidrostática em massa;
- Fluxo multicomponente: a mistura de água e partículas de sedimento é descrita utilizando a abordagem de contínuo e assumindo a mesma velocidade para as fases líquida e sólida;

- Distribuição uniforme de sedimentos: as diferentes classes de tamanho de sedimentos presentes no fluxo são distribuídas uniformemente ao longo da coluna de fluxo;
- Sistema de coordenadas: o sistema de referência é horizontal-vertical, mas as forças de pressão e tensão atuam na direção tangencial à superfície do leito;
- Pressões dinâmicas do fluido nos poros: podem se desenvolver na fase líquida, afetando a tensão de cisalhamento friccional entre os grãos sólidos;

O modelo bidimensional de fluxo de lama/rejeitos sobre um leito erodível consiste em  $3 + N + 1$  equações diferenciais parciais, incluindo as equações médias em profundidade para a conservação de massa e momento da mistura água-sedimento.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho hu) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho hv) &= - \sum_{p=1}^N \rho_{b,p} \frac{D_p - E_p}{1 - \xi_p} \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho hu) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho hu^2 + \frac{1}{2}g_\psi \rho h^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho huv) &= -g_\psi \rho h \frac{\partial z_b}{\partial x} - \tau_{bx} \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho hv) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho huv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho hv^2 + \frac{1}{2}g_\psi \rho h^2) &= -g_\psi \rho h \frac{\partial z_b}{\partial y} - \tau_{by} \end{aligned} \quad \text{EQUAÇÃO 2-20}$$

A equação de continuidade para cada classe de tamanho de sedimento  $\rho = 1, \dots, N$ , expressa como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(h\phi_p) + \frac{\partial}{\partial x}(hu\phi_p) + \frac{\partial}{\partial y}(hv\phi_p) = -(D_p - E_p) \quad \text{EQUAÇÃO 2-21}$$

Bem como a equação de conservação de massa para a camada de leito, considerando  $N$  classes de tamanho de sedimento.

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \sum_{p=1}^N \frac{D_p - E_p}{1 - \xi_p} \quad \text{EQUAÇÃO 2-22}$$

Onde  $\rho$  é a densidade da mistura,  $h$  é a profundidade do fluxo,  $(u, v)$  são os componentes do vetor de velocidade média na profundidade  $h$  ao longo das coordenadas  $x$  e  $y$ , respectivamente,  $\phi_p$  representa a concentração volumétrica média na profundidade para a classe de sedimento  $p$  – ésima, sendo  $N$  o número de classes de sedimento transportadas, e  $(\tau_{bx}, \tau_{by})$  são os componentes do vetor de resistência basal  $\tau_b$ , apresentado como  $\tau_{md}$  no item 2.2, ao longo das coordenadas  $x$

e  $y$ , respectivamente. Além disso,  $z_b$  é a elevação do leito,  $\xi_p$  é a porosidade de deposição para a classe de sedimento  $p$  – ésima e  $\rho_{b,p}$  é a densidade de massa associada na camada do leito.

$D_p$  e  $E_p$  são as taxas específicas de troca de deposição e erosão, respectivamente, e  $g\psi = g \cos^2 \psi$  é a projeção da gravidade normal ao leito, sendo  $g$  a aceleração gravitacional e  $\cos \psi$  o cosseno direcional da normal ao leito em relação ao eixo vertical.

Assim, a densidade normalizada do misto  $r$  é dada por

$$r = \frac{\rho}{\rho_w} = 1 + \phi^X, \quad \text{com} \quad \phi^X = \sum_{p=1}^N \frac{\rho_{s,p} - \rho_w}{\rho_w} \phi_p \quad \text{EQUAÇÃO 2-23}$$

onde  $\phi^X$  é a concentração de sólidos em suspensão,  $\rho_w$  é a densidade da água nos poros e  $\rho_{s,p}$  é a densidade das partículas de sedimento para cada classe de tamanho de sedimento.

O sistema completo em 2D pode ser expresso em forma vetorial como:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{U})}{\partial y} = \mathbf{S}_b(\mathbf{U}) + \mathbf{S}_\tau(\mathbf{U}) + \mathbf{E}_b(\mathbf{U}) \quad \text{EQUAÇÃO 2-24}$$

O sistema pode ser descrito considerando diferentes termos relacionados à dinâmica do fluxo.  $\mathbf{U}$  representa o vetor das variáveis conservativas, enquanto  $\mathbf{F}(\mathbf{U})$  e  $\mathbf{G}(\mathbf{U})$  correspondem aos fluxos convectivos nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente. O termo  $\mathbf{S}_b(\mathbf{U})$  descreve a força de variação da pressão no fundo,  $\mathbf{S}_\tau(\mathbf{U})$  considera a dissipação do momento devido ao esforço cisalhante na interface entre o fluxo e a camada do leito, e  $\mathbf{E}_b(\mathbf{U})$  representa o fluxo líquido de troca de massa entre o fluxo e o leito.

Os termos  $D_p$  e  $E_p$  correspondem às taxas verticais de deposição e arraste, respectivamente, para a classe  $p$  de sedimentos. O fluxo líquido de troca específico por classe ( $D_p - E_p$ ) é expresso como função da concentração volumétrica média atual  $\phi_p$  e da concentração volumétrica de capacidade  $\phi_p^*$  para cada classe de sedimentos.

$$D_p = \alpha_{D,p} \omega_{s,p} (1 - \phi_0)^{m_0} \phi_p \quad \text{EQUAÇÃO 2-25}$$

$$E_p = \alpha_{E,p} F_{b,p} \omega_{s,p} \phi^* \quad \text{EQUAÇÃO 2-26}$$

A concentração suspensa de equilíbrio ( $\phi_p^*$ ) é estimada por diferentes relações semiempíricas. As formulações de Bagnold (1973), Van Rijn (1984a), Wu (2008) e Zhang & Xie (1993) estão implementadas no RIVERFLOW2D.

A velocidade de queda também é estimada por equações empíricas, tendo o RIVERFLOW2D implementado as equações de Rubey (1933), Zhang (1961), Zanke (1977), Van Rijn (1984b), Raudkivi (1990), Julien (1995), Cheng (1997), Jiménes-Madsen (2003) e Wu-Wang (2006).

## 2.8 ESTADO DA ARTE – RETROANÁLISES DE CASOS DE RUPTURAS DE BARRAGENS DE REJEITO

Giantomaso (2023) analisou a sensibilidade do software RIVERFLOW2D 8.0.4 na modelagem numérica de rupturas hipotéticas de barragens de rejeitos, utilizando dados topográficos precisos e ensaios reológicos. Esse estudo é com um rompimento hipotético de um empreendimento existente e não consiste em retroanálise. O estudo variou o tamanho da malha computacional, coeficientes de rugosidade e modelos reológicos (newtonianos e não newtonianos), concluindo que o refinamento da malha aumenta o custo computacional, mas malhas  $\leq 20\text{m}$  apresentam pouca variação nos parâmetros hidráulicos. Coeficientes de rugosidade maiores aumentaram a profundidade e reduziram a velocidade da onda, enquanto a escolha do modelo reológico influencia significativamente os resultados. Recomendou-se a definição de premissas conforme o objetivo da simulação, com cautela na adoção de equacionamentos reológicos como o de Full Bingham, que despreza a parcela de rugosidade, gerando resultados discrepantes. Como recomendações futuras, elencou o teste de mais modelos reológicos, a utilização de tamanho de malha variável no vale de jusante, o uso de valor único de rugosidade, o teste de equacionamentos para leitos móveis no RIVERFLOW2D e a comparação com outros modelos numéricos.

Lumbroso (2021) avaliou o rompimento da Barragem de Brumadinho, modelo baseado em agentes, conhecido como Life Safety Model (LSM), para estimar o risco para as pessoas a jusante da barragem de rejeitos de Brumadinho e para avaliar se o número de fatalidades poderia ter sido reduzido caso um aviso tivesse sido recebido antes ou no momento da falha da barragem. A modelagem do LSM indicou que, mesmo se um aviso tivesse sido emitido no momento da falha da barragem, o número de fatalidades poderia ter sido reduzido. O estudo aborda a seleção de três parâmetros principais para o modelo numérico MIKE 21. Primeiramente, a densidade do fluido foi definida como  $1800 \text{ kg/m}^3$ , valor que combina os rejeitos, a barragem e os

fluidos presentes na estrutura, baseado em análises de especialistas e pesquisas anteriores. Em relação à tensão limite de escoamento, foi considerada uma faixa entre 400 e 4000 Pa. O modelo mostrou que tensões acima de 1500 Pa impediam o fluxo de alcançar o Rio Paraopeba, enquanto tensões abaixo de 500 Pa faziam o fluxo chegar muito rapidamente. O intervalo ideal para uma correspondência mais precisa foi entre 750 e 1000 Pa. Finalmente, a viscosidade do fluido Bingham foi testada em dois valores: 30 e 100 Pa.s. O valor de 100 Pa.s apresentou uma melhor correspondência entre a extensão observada e simulada. Além desses parâmetros, a rugosidade da planície foi ajustada utilizando o coeficiente de *Manning*.

Pires, Teixeira e Fabiani (2024) realizaram um estudo comparativo da propagação hidrodinâmica de fluidos não newtonianos entre os softwares HEC-RAS e RiverFlow2D 7.0 em leito fixo, utilizando como estudo de caso a ruptura da barragem B1 em Brumadinho, Minas Gerais. Os resultados demonstraram que ambos os softwares foram capazes de prever o comportamento do fluxo de forma coerente com os dados observados, destacando o potencial do HEC-RAS como ferramenta relevante para simulações hidrodinâmicas de fluidos não newtonianos. No entanto, enfatizou-se a necessidade de calibração cuidadosa dos modelos, considerando a sensibilidade dos parâmetros reológicos e a qualidade dos dados de entrada, para garantir a confiabilidade dos resultados.

Melo e Eleutério (2023) investigaram a influência da variabilidade dos parâmetros reológicos nas simulações de inundações causadas por falhas em barragens de rejeitos, utilizando os modelos Bingham e Herschel-Bulkley no HEC-RAS 6.1. A análise probabilística, baseada em amostragem Latin Hypercube, mostrou que o modelo Bingham é mais sensível às variações dos parâmetros, com maiores flutuações nas áreas inundadas, profundidades e tempos de chegada. Por outro lado, o modelo Herschel-Bulkley apresentou menor sensibilidade e maior variabilidade probabilística. O estudo destacou a importância da determinação precisa dos parâmetros reológicos, visto as incertezas associadas ao escoamento não-newtonianos, e sugeriu a aplicação de métodos probabilísticos para melhorar a gestão de riscos em estudos de falhas de barragens.

Mahdi, Shakibaeinia e Dibike (2019) realizaram simulações numéricas para uma barragem de rejeitos de areia betuminosa em Athabasca, Canadá, utilizando o modelo numérico FLO2D em escoamento não-newtoniano. A pesquisa inicia com a validação do modelo numérico com estudo de caso de Mount Polley em 2014. Os

resultados mostraram que a simulação Newtoniana, em comparação com um modelo não Newtoniano, apresentou um tempo de deslocamento da onda 60 % mais rápido. A análise de sensibilidade indicou que os resultados dependem fortemente das propriedades reológicas dos rejeitos, como viscosidade e tensão de escoamento. Apesar de o modelo FLO-2D ser amplamente utilizado, ele possui limitações em prever com precisão fluxos dinâmicos e multifásicos, sugerindo a necessidade de mais pesquisas para desenvolver modelos 3D dinâmicos e mais complexos para essas simulações.

Sreekumar et al (2024) apresenta uma revisão de estado da arte de modelagem para estudos de ruptura hipotética de barragens de rejeito, sendo apresentado abaixo algumas considerações dessa revisão no que tange modelos numéricos e reológicos:

- Modelos numéricos: Mudflow são semelhantes a debris flow, mas com menos blocos e materiais granulares, podendo apresentar uma frente de onda íngreme. Como os rejeitos contêm água, sedimentos e metais pesados, modelos de mudflow são amplamente utilizados na avaliação de risco de barragens de rejeito;
- Fase única (single phase approach): assumem que a densidade da mistura permanece constante no espaço e no tempo, desconsiderando variações na fase sólida. A principal vantagem da abordagem de fase única é a estabilidade numérica, tornando-a adequada para eventos de grande escala e planejamento de evacuação;
- Modelos de duas fases: consideram separadamente as fases sólida e líquida nas equações de conservação de massa e momento. No entanto, a diferença de velocidade entre as fases pode levar a instabilidades numéricas. Métodos para evitar esse problema são computacionalmente intensivos. Além disso, muitos estudos de duas fases não incluem a erosão/deposição do leito ou mudanças na morfologia do canal a jusante.
- No modelo quase-duas-fases, a conservação de massa e momento da mistura e a conservação de massa da fase sólida são tratadas separadamente. Esse método combina as velocidades das fases sólida e fluida em uma única velocidade média, considerando interações entre partículas. O RiverFlow2D emprega essa abordagem para modelar

mudflow, sendo utilizado em estudos de rompimento de barragens, como Brumadinho e Mount Polley. A principal vantagem é permitir uma representação mais realista da interação sólido-fluido sem comprometer excessivamente a estabilidade numérica.

- **Parâmetros reológicos:** Para uma análise de ruptura hipotética de barragem de rejeitos. Durante uma falha estrutural, os rejeitos se comportam como fluidos não-newtonianos, sendo caracterizados principalmente por dois parâmetros: viscosidade e tensão de escoamento. A viscosidade e a tensão de escoamento podem ser medidas em laboratório a partir de amostras coletadas em campo, utilizando um viscosímetro. Recomenda-se que os modeladores plotem os parâmetros reológicos obtidos nos ensaios nesses gráficos, facilitando a interpretação e a comparação com dados de referência. O artigo também reforça a necessidade de protocolos geotécnicos rigorosos para interpretar corretamente os parâmetros reológicos na análise de ruptura de barragens.
- **Modelos numéricos:** Diversos modelos numéricos são amplamente utilizados para simular fluxos hiperconcentrados e corridas de detritos, como Flow-3D, Flo-2D, RiverFlow2D, DAN-3D, MAD Flow, DAMBRK, FLDWAV, HEC-RAS, MIKE 11, MIKE 21, TUFLOW e TELEMAC.
- **FLO2D:** é um modelo amplamente usado para simular fluxos de lama em rompimentos de barragens de rejeitos. Ele adota um método de volumes finitos no referencial Euleriano e permite a inserção de um hidrograma de vazão de ruptura no local do rompimento. Inicialmente baseado em uma abordagem monofásica, recentemente foi introduzida uma modelagem bifásica, que permite simular a interação entre rejeitos e água, erosão, deposição e a ressuspensão do fluxo.
- **HEC-RAS:** Na modelagem não-newtoniana, o HEC-RAS permite usar os modelos Clastic Grain-Flow, Bingham, O'Brien e Herschel-Bulkley, mas não considera variação da concentração de sedimentos, o que pode limitar a precisão. No entanto, sua capacidade de refinar a malha computacional em estruturas hidráulicas é uma vantagem.

- RIVERFLOW2D: modela o escoamento de misturas de rejeito com densidade variável sobre leitos erodíveis, resolvendo as equações hidrodinâmicas, as formulações reológicas e as equações de transporte de sedimentos, considerando deposição, ressuspensão e transporte de sedimentos na coluna de fluido.

Sreekumar et al (2024) apresentam, ainda, as seguintes considerações e limitações em sua revisão de estudos de ruptura hipotética de barragens de rejeito:

- Escolha do modelo reológico: depende das características do material de rejeito e como as propriedades reológicas variam entre estudo, o desenvolvimento de um modelo físico usando lama fluida com propriedades semelhantes às dos rejeitos do local pode ser útil. Simulações numéricas podem ser realizadas com diferentes modelos reológicos, e o que melhor se ajustar aos dados observados pode ser selecionado. O autor cita Ghahramani et al. (2022), onde foram utilizados modelos reológicos distintos para a análise de um evento, sendo necessário atribuir diferentes valores reologia a cada modelo. Isso destaca a necessidade de estudar cada modelo reológico individualmente para calibrar mais eventos históricos e obter uma melhor compreensão da escolha do modelo numérico em cada caso.
- Análise reométrica: A análise reométrica dos rejeitos é essencial, mas muitas vezes utiliza valores publicados, que podem não refletir corretamente a reologia do material consolidado, gerando incertezas.
- Hidrograma de ruptura: A prática atual é utilizar dimensões de brecha de ruptura de barragens da base de dados ou fórmulas empíricas (elaboradas para reservatórios de água). O comportamento do hidrograma de ruptura e da abertura da brecha pode ser diferente para barragens de rejeito, sendo indicada o estudo de modelagens bifásicas.
- Erosão e deposição: O fluxo de rejeitos pode causar uma dinâmica na morfologia do vale de jusante. A maioria dos casos de retroanálises consideram a análise em leito fixo de forma simplificada. Portanto, uma abordagem de modelagem com leito móvel pode ser necessária nas avaliações de risco.

Naef *et al* (2006) em seu estudo para escoamento de detritos em modelo unidimensional estudou relações de resistência ao escoamento usando como um dos estudos de caso um exemplo analítico de rompimento de barragem. Um fluxo de detritos real pode apresentar características de um escoamento viscoso, granular ou mais turbulento (*mud flow*), mesmo dentro de um único canal torrencial (Arattano e Franzi, 2004, apud Naef, 2006). Os fluxos de lama também podem ser descritos como um fluido Newtoniano ou de Bingham; uma forma um pouco mais geral é a relação viscosa de Coulomb (Johnson e Rodine, 1984, apud Naef, 2006), sendo esse função do ângulo de atrito do material sólido (*friction angle of the solid material*).

Andrade et al (2024) avaliaram de forma simplificada os softwares de modelos numéricos 2D e 3D para estudos de ruptura hipotética de barragens com base em uma revisão de literatura. Os autores comentam que não há um software ideal para a modelagem de um dam break, mas sim aquele que melhor se adapta às características e objetivos de cada caso. O QUADRO 2-6 apresenta a descrição dos modelos numéricos de escoamento não newtoniano.

QUADRO 2-6 – DESCRIÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS DE ESCOAMENTO NÃO NEWTONIANO

Software	Dimensão	Recursos	Requisitos	Interface	Custo	Percepção do usuário
RIVERFLOW2D	2D	Modela fluxos laminares e turbulentos, com ou sem sedimentos, em canais naturais ou artificiais. Usa malhas flexíveis e refinadas. Permite a inclusão de estruturas e obstáculos. Aplica as equações de Saint-Venant com o método dos volumes finitos.	Processador de 64 bits, 4 GB de RAM, 20 GB de espaço em disco, Windows 7 ou superior	Gráfica e interativa, com menus, botões, janelas e barras de ferramentas. Possui recursos de visualização, edição e exportação de dados. Permite a simulação em tempo real e a geração de relatórios.	A partir de US\$ 3.000,00 por licença anual, ou US\$ 9.000,00 por licença perpétua. Oferece descontos para estudantes, professores e agências governamentais.	Os usuários relataram que o software é rápido, robusto e fácil de usar, mas que tem dificuldade de representar geometrias complexas e não possui um modelo de turbulência.
FLO2D	2D	Modela fluxos superficiais e subterrâneos, com ou sem sedimentos, em bacias hidrográficas e planícies aluviais. Usa malhas regulares e quadradas. Permite a inclusão de estruturas e vegetação. Aplica as equações de Saint-Venant com o método das diferenças finitas.	Processador de 64 bits, 8 GB de RAM, 100 GB de espaço em disco, Windows XP ou superior	Gráfica e interativa, com menus, botões, janelas e barras de ferramentas. Possui recursos de visualização, edição e exportação de dados. Permite a simulação em tempo real e a geração de relatórios.	A partir de US\$ 6.000,00 por licença anual, ou US\$ 18.000,00 por licença perpétua. Oferece descontos para estudantes, professores e agências governamentais.	Os usuários relataram que o software é simples, estável e de baixo custo computacional, mas que tem baixa resolução, depende da malha e é limitado aos escoamentos rasos.
Mike 21	2D	Modela fluxos costeiros, estuarinos e fluviais, com ou sem sedimentos, salinidade e temperatura. Usa malhas flexíveis e refinadas. Permite a inclusão de estruturas e vegetação. Aplica as equações de Saint-Venant ou Navier-Stokes com o método dos elementos finitos.	Processador de 64 bits, 8 GB de RAM, 40 GB de espaço em disco, Windows 7 ou superior	Gráfica e interativa, com menus, botões, janelas e barras de ferramentas. Possui recursos de visualização, edição e exportação de dados. Permite a simulação em tempo real e a geração de relatórios.	A partir de US\$ 12.000,00 por licença anual, ou US\$ 36.000,00 por licença perpétua. Oferece descontos para estudantes, professores e agências governamentais.	Os usuários relataram que o software é flexível, preciso e capaz de modelar vários tipos de escoamentos, mas que tem alto custo computacional, necessita de calibração e é complexo de usar.
HEC-RAS	1D/2D	Modela fluxos fluviais, com ou sem sedimentos, qualidade da água e transporte de poluentes. Usa malhas regulares. Permite a inclusão de estruturas e obstáculos. Aplica as equações de Saint-Venant com o método dos volumes finitos.	Processador de 64 bits, 4 GB de RAM, 2 GB de espaço em disco, Windows 7 ou superior	Gráfica e interativa, com menus, botões, janelas e barras de ferramentas. Possui recursos de visualização, edição e exportação de dados. Permite a simulação em tempo real e a geração de relatórios.	Gratuito para uso acadêmico, comercial e governamental.	Os usuários relataram que o software é gratuito, integrado com dados hidrológicos e de ampla aplicação, mas que tem dificuldade de calibrar os parâmetros.
FLOW3D	3D	Modela fluxos multifásicos, com ou sem sedimentos, calor e reações químicas. Usa malhas estruturadas e adaptativas. Permite a inclusão de estruturas e obstáculos. Aplica as equações de Navier-Stokes com o método dos volumes finitos.	Processador de 64 bits, 16 GB de RAM, 100 GB de espaço em disco, Windows 7 ou superior	Gráfica e interativa, com menus, botões, janelas e barras de ferramentas. Possui recursos de visualização, edição e exportação de dados. Permite a simulação em tempo real e a geração de relatórios.	A partir de US\$ 25.000,00 por licença anual, ou US\$ 75.000,00 por licença perpétua. Oferece descontos para estudantes, professores e agências governamentais.	Os usuários relataram que o software é de alta resolução, versátil e capaz de modelar geometrias complexas e fluidos multifásicos, mas que tem alto custo computacional, é sensível às condições iniciais e de contorno e requer um usuário experiente.
OpenFoam	3D	Modela fluxos multifásicos, com ou sem sedimentos, calor e reações químicas. Usa malhas não estruturadas e refinadas. Permite a inclusão de estruturas e obstáculos. Aplica as equações de Navier-Stokes com o método dos volumes finitos.	Processador de 64 bits, 8 GB de RAM, 40 GB de espaço em disco, Linux	Baseada em linha de comando, com arquivos de texto para entrada e saída de dados. Requer conhecimento de programação em C++. Possui ferramentas de visualização e pós-processamento.	Gratuito e de código aberto para uso acadêmico, comercial e governamental.	Os usuários relataram que o software é gratuito, customizável, mas que é complexo, instável e que falta suporte técnico e documentação.

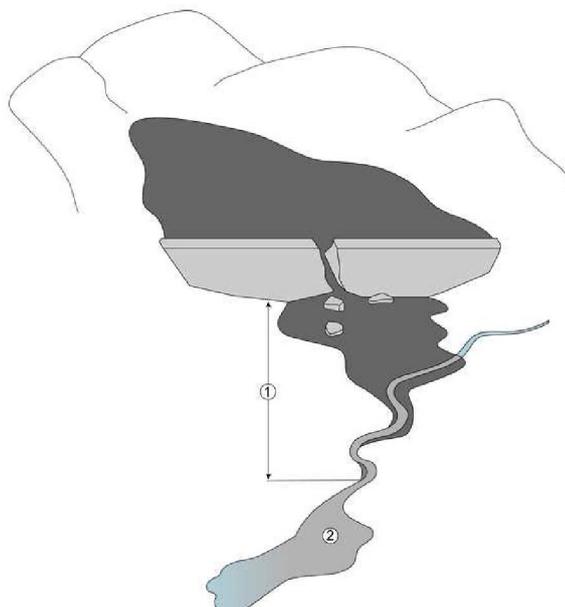
Fonte = Andrade *et al* (2024)

Pirulli et al. (2017) testou um novo modelo computacional RASH3D, permitindo ajustes nas propriedades reológicas durante a propagação e aceitando diferentes modelos reológicos, como Voellmy e Bingham. Aplicado ao desastre de 1985 no Vale do Rio Stava, Itália, o estudo utilizou diferentes combinações reológicas para entender a dinâmica do fluxo. Concluiu-se que a reologia Voellmy, combinada com seus parâmetros, foi a mais adequada para descrever o fluxo, mesmo em áreas críticas, com o menor número de alterações nos valores reológicos ao longo do percurso. O autor ressalta que retro análises de eventos reais e estudos em relação as características do evento e da reologia podem ser importantes para análises preditivas.

Ghahramani et al. (2020) introduziram um novo banco de dados de 33 casos de ruptura de barragens de rejeito, analisando a relação entre o volume mobilizado e a área inundada. A análise sugere que, para um volume dado, os fluxos de rejeitos são, em média, menos móveis do que lavas, mas mais móveis do que fluxos de detritos não vulcânicos, avalanches de rochas e falhas em depósitos de resíduos.

Os mesmos autores classificaram as áreas de inundação em duas zonas (FIGURA 2-12). A Zona 1 é a zona de impacto primário, definida como a extensão do principal depósito sólido de rejeitos, caracterizada por sedimentação visível remotamente ou confirmada no campo, acima das elevações típicas do leito, se estendendo para os canais fluviais a jusante. A Zona 2 é a zona de impacto secundário, definida como a área a jusante da Zona 1 que é ainda afetada pelo fluxo de rejeitos de alguma forma. Os impactos secundários podem incluir impactos de ondas de inundação ou deslocamento (ou seja, impactos de fluido acima dos níveis típicos de água a jusante) e impactos de plumas de sedimentos (ou seja, abaixo dos níveis típicos de água a jusante).

FIGURA 2-12 – REPRESENTAÇÃO IDEALIZADA DAS ZONAS DE CLASSIFICAÇÃO 1 E 2



FONTE: Ghahramani et al, 2020

Ghahramani et al. (2022) avaliaram o desempenho de quatro modelos numéricos para ERHB de rejeitos: DAN3D, MAD Flow, FLO-2D e FLOW-3D, todos com a opção de escoamento não-newtoniano. Para essa avaliação, foram utilizados os estudos de caso das rupturas das barragens de Stava, ocorrida em 1985 na Itália, e Merriespruit, ocorrida em 1994 na África do Sul. Os principais resultados foram: (i) múltiplos conjuntos de parâmetros reológicos podem produzir resultados de saída muito semelhantes, (ii) as combinações de parâmetros de entrada que melhor se ajustam não são transferíveis entre modelos e são inconsistentes com as propriedades reológicas medidas independentemente dos rejeitos armazenados, e (iii) escolher um conjunto apropriado requer um entendimento suficiente das propriedades reológicas do material e julgamento especializado.

Ghahramani et al. (2024) analisaram 11 retro análises de rupturas de barragens no modelo numérico HEC-RAS de tal forma a avaliar a sensibilidade de parâmetros de interesse para ERHB de rejeitos, como volume total mobilizado, coeficiente de rugosidade, tensão limite de escoamento, viscosidade, largura de brecha e tempo de abertura de brecha. Os resultados indicam que é necessário priorizar recursos na estimativa dos principais parâmetros que afetam a sensibilidade dos resultados, a fim de obter resultados mais confiáveis. Foi verificado que o volume total liberado está entre os principais parâmetros que afetam a sensibilidade da área de inundação modelada e da profundidade máxima do fluxo, enquanto o coeficiente de rugosidade é mais importante para a velocidade máxima do fluxo e o tempo de

chegada da onda de ruptura. No entanto, os principais parâmetros para a sensibilidade das saídas dos modelos variaram dependendo do estudo de caso; portanto, o estudo conclui que a seleção de modelos reológicos apropriados e a consideração das condições específicas do local são cruciais para previsões precisas.

Ghahramani et al. (2023) propôs como recomendações futuras: (i) Aumentar tamanho e qualidade das bases de dados de rompimentos de barragens para análises mais precisas e confiáveis. (ii) Consenso na terminologia e classificação da modelagem de escoamento de rejeitos. (iii) Incorporação de informações sobre tipo de rejeito pode reduzir incertezas em previsões. (iv) Entendimento das características reológicas dos rejeitos é crucial para seleção e parametrização de modelos.

Dessa forma, com base no estado da arte apresentado, este estudo analisará as seguintes considerações e recomendações, conforme apresentado a seguir:

- Pires, Teixeira e Fabiani (2024) compararam o modelo reológico RIVERFLOW2D 7.0 sem deposição com o HEC-RAS, sendo o presente estudo uma complementação com a utilização do RIVERFLOW2D 8.12.04 com o uso de deposição ativada;
- Giantomaso (2023) recomenda a realização de retroanálises com o RIVERFLOW2D, com testes de diferentes equacionamentos para leito móvel e simulações com diversos modelos reológicos;
- Sreekumar et al (2024) destacaram como limitação das retro análises atuais o uso de leito fixo. Assim, o objetivo deste estudo é avaliar, ainda que de maneira simplificada e determinística, o módulo de equações de deposição nos efeitos dos resultados obtidos no RIVERFLOW2D;
- Sreekumar et al (2024) comentaram ainda da variabilidade de modelos reológicos existentes e a necessidade de estudar cada modelo para avaliar sua adequação em eventos históricos de ruptura de barragens de rejeitos. Dessa forma, o presente estudo busca avaliar alguns modelos reológicos disponíveis no HEC-RAS e RIVERFLOW2D; e
- Ghahramani et al. (2023) realizaram análises de sensibilidade para diferentes modelos numéricos, porém não incluíram o RIVERFLOW2D, que é amplamente utilizado no Brasil. Assim, o presente estudo tem como objetivo expandir essas análises, incorporando também o RIVERFLOW2D.

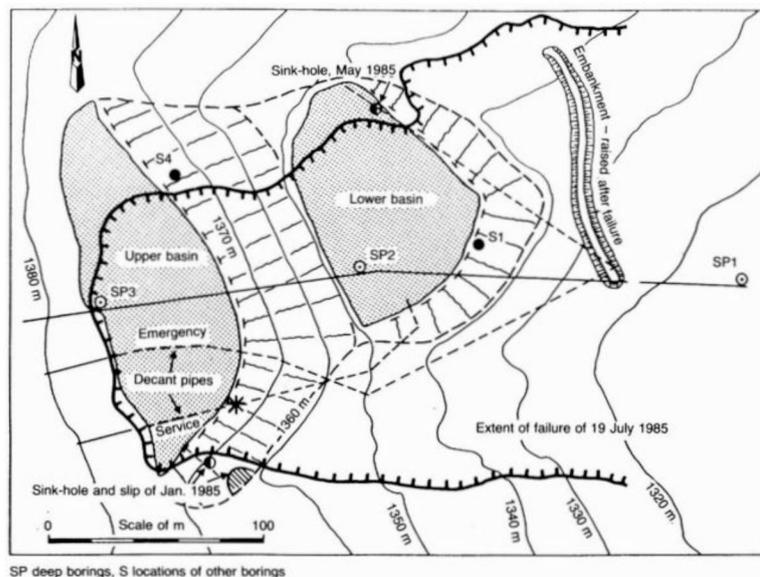
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO

O presente subitem foi elaborado com base na caracterização de Chandler e Tosatti (1995) sobre as barragens de rejeito de fluorita localizadas em Stava, Itália, nas seguintes coordenadas UTM 32N: (691.976,48 m E; 5.132.592,62 m N) para o reservatório inferior e (691.863,26 m E; 5.132.548,88 m N) para o reservatório superior.

As dimensões e a disposição das bacias de rejeitos estão apresentadas em planta e seção na FIGURA 3-1 e na FIGURA 3-2. A construção das bacias começou em 1962 com o reservatório Inferior. Um número significativo de coníferas foi derrubado na área, com presença de nascentes e água superficial. O solo era mole, já que estacas de madeira foram usadas como uma forma rudimentar de cravação em solo para fortalecer as fundações do barramento do reservatório inferior. Fora isso, não houve outras obras para melhorar a fundação da barragem, nem camadas granulares para efeito drenagem interna.

FIGURA 3-1 – PLANTA DO EMPREENDIMENTO BASEADO EM LEVANTAMENTO AÉREO DE 15 DE JULHO DE 1983



FONTE: Chandler e Tosatti, 1995

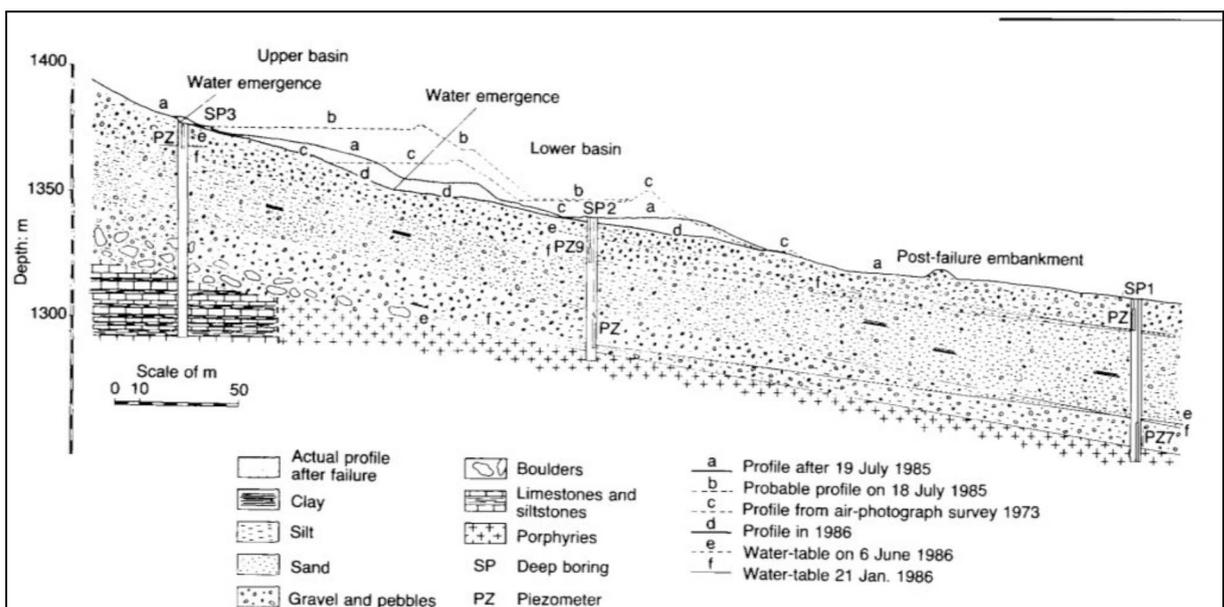
A construção da barragem do reservatório inferior foi realizada pelo método de alteamento a montante. Após a construção do dique inicial, com material local, rejeitos arenosos foram depositados no reservatório, sendo a barragem progressivamente alteada a montante. O ponto de saída de tubos de drenagem

interna estava localizado a jusante do reservatório inferior e foi estendido progressivamente para montante conforme a barragem era alteada. No final da década de 1960, a barragem inferior atingiu uma altura de cerca de 26 m, com um talude de jusante com inclinação aproximada de 32°.

Em 1969, iniciou-se a construção do reservatório superior, inicialmente destinada à reciclagem de rejeitos do reservatório inferior para recuperar fluorita anteriormente descartada. Não foi realizada avaliação da estabilidade da barragem proposta para o reservatório superior, nem consideradas melhorias no solo. Assim como no reservatório inferior, não foram incorporados sistemas de drenagem nas fundações.

Dois tubos de decantação foram instalados, com posições mostradas na FIGURA 3-1. Esses tubos tinham cerca de 200 mm de diâmetro e estavam posicionados logo abaixo do nível do solo existente em uma estrutura de concreto. A construção do reservatório superior foi inicialmente aprovada para uma altura de 19 m, alcançada em 1975. Nesse ponto, o reservatório estava sendo usada para descarte de rejeitos, além da reciclagem. Posteriormente, foi solicitada e aprovada a elevação para 34 m. A construção continuou, com bermas de 4 a 5 m de largura no talude de jusante na altura de 19 m. A partir desse ponto, o método de alteamento a montante foi retomado, com o talude de jusante com inclinação de 34°. Em 1978, o reservatório tinha cerca de 28 m de altura, contendo 260.000 m<sup>3</sup> de rejeitos.

FIGURA 3-2 – SEÇÃO TRANSVERSAL DAS BARRAGENS DE STAVA-ITA



FONTE: Chandler e Tosatti, 1995

Com o fechamento temporário da mina, o descarte de rejeitos foi encerrado, mas a água superficial manteve altos níveis em ambos os reservatórios. Em 1980, a mina foi reaberta, e o descarte de rejeitos no reservatório superior foi retomado. Até 1985, mais 36.000 m<sup>3</sup> foram depositados, e a barragem superior foi elevada para sua altura final de 29,5 m.

Não havia instrumentação para monitorar as barragens. Em 1985, dois eventos destacaram problemas nos tubos de decantação em ambos os reservatórios antes do desastre. Em janeiro, um deslizamento na margem direita do reservatório superior foi seguido por um buraco acima do local (FIGURA 3-1), ambos foram atribuídos a vazamentos no tubo de decantação bloqueado por congelamento, com infiltrações persistindo até março. Em maio de 1985, outro buraco se formou, desta vez na Bacia Inferior, lado esquerdo (FIGURA 3-1), resultado do fluxo de água de decantação e lamas de dentro do tubo de decantação que passava por baixo da Bacia Inferior. Isso drenou o reservatório. Os reparos foram feitos desviando a água e redirecionando o tubo, que foi selado com concreto. Esses eventos evidenciam a má qualidade dos tubos de decantação. Em 15 de julho de 1985, as lagoas foram reativadas, com rejeitos sendo novamente bombeados para o reservatório superior, enquanto a água de decantação era direcionada ao reservatório inferior, que se reenchia. Quatro dias depois, em 19 de julho, ocorreu a falha catastrófica por liquefação.

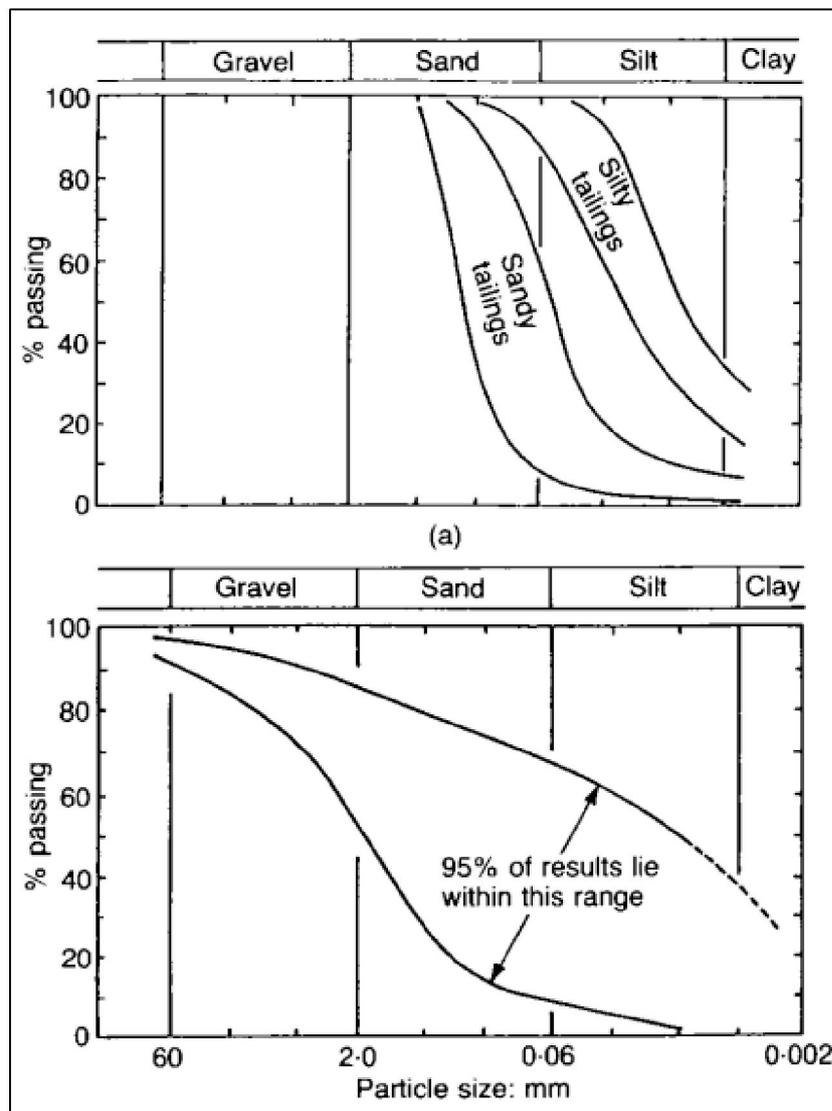
Investigações mostraram que as barragens foram construídas sobre depósitos glaciais heterogêneos, com propriedades do material variando de areia média a silte argiloso. Deve-se enfatizar que, devido ao método de construção, o material é extremamente heterogêneo, variando de uma areia média (ligeiramente siltosa) a um silte fino muito argiloso. O material arenoso predomina próximo à barragem, mas torna-se mais siltoso em direção ao centro dos reservatórios. Os materiais arenosos e siltosos frequentemente se apresentam em camadas alternadas.

Os dois tipos de material são quase completamente diferenciados pelas curvas de granulometria, FIGURA 3-3A definindo-os como areia siltosa e silte argiloso. Poucos resultados individuais caem entre as duas faixas mostradas. As curvas de granulometria obtidas do depósito glacial que está abaixo dos reservatórios de rejeitos são muito diferentes (FIGURA 3-3B).

O teor de água saturada dos rejeitos siltosos da falha era cerca de 35%, enquanto o do material arenoso de 25%. Esses teores de água podem ser vistos como

correspondendo a densidades aparente saturadas de  $1940 \text{ kg/m}^3$  e  $2100 \text{ kg/m}^3$  para os materiais siltosos e arenosos, respectivamente, ambos com peso específico de  $2,89 \text{ g/cm}^3$ . Os rejeitos siltosos estariam saturados no momento da falha, resultando em um peso unitário de  $19,0 \text{ kN/m}^3$ . Já os rejeitos arenosos estavam provavelmente parcialmente saturados, com um grau de saturação de cerca de 30%, com um peso unitário correspondente de aproximadamente  $18,0 \text{ kN/m}^3$ . Portanto, um peso unitário apropriado para utilizar em análises de estabilidade provavelmente será entre esses dois valores, cerca de  $18,5 \text{ kN/m}^3$ .

FIGURA 3-3 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DO EMPREENDIMENTO (A-B)



FONTE: Chandler e Tosatti, 1995

### 3.2 DESCRIÇÃO GERAL DO EVENTO

O desastre ocorreu às 12h22m55s no dia 19 de julho de 1985 onde houve a falha de duas barragens de rejeito de fluorita localizadas logo a montante do vilarejo de Stava no município de Tesero na Itália, resultando em 268 perdas de vidas humanas. Conforme apresentado na FIGURA 3-4, as duas barragens de rejeito estavam em cascata, totalizando aproximadamente 50 m de altura da base da barragem de jusante até a crista da barragem de montante e 180.000 m<sup>3</sup> de volume mobilizado (Luino, F., & Graff, V., 2012).

FIGURA 3-4 – IMAGEM AÉREA DAS DUAS BARRAGENS DE REJEITOS EM STAVA-ITALIA



FONTE: Luino e Graff, 2012

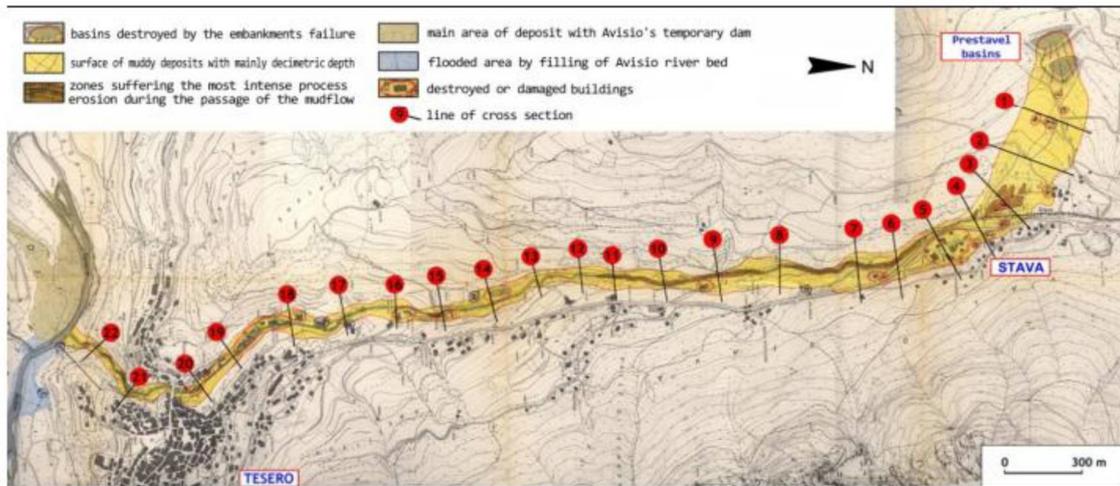
Ambos os reservatórios tinham barragens de terra voltadas para o vale e para as encostas das montanhas. Lateralmente, a barragem do reservatório de montante fazia limite com uma encosta densamente florestada. Seu talude de jusante estava implantado parcialmente sobre o silte do reservatório de jusante. Estruturalmente, as barragens eram compostas principalmente por areia fina média e por camadas finas ou relativamente uniformes de silte argiloso saturado (Luino e Graff, 2012).

A seguir algumas informações do evento obtidas com base em Luino e Graff (2012).

a) Falha das Barragens:

As barragens falharam em 19 de julho de 1985, às 12:22:55, acompanhadas por um "rugido oco" semelhante a uma explosão (Govi e Luino, 2003, *apud* Luino e Graff, 2012). A FIGURA 3-5 apresenta o mapeamento do vale de jusante afetado pelas rupturas dessas barragens.

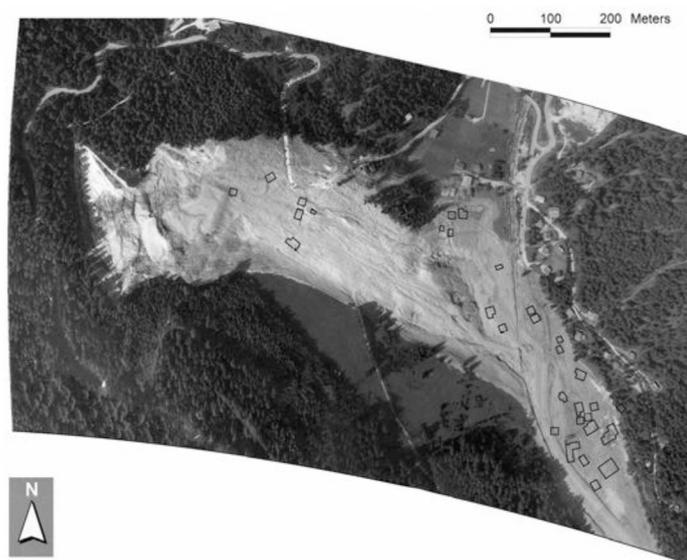
FIGURA 3-5 – MAPEAMENTO DO VALE DE JUSANTE AFETADO



FONTE: Govi e Luino, 2003, *apud* Luino e Graff, 2012

A lama escoou da barragem superior para a inferior e depois fluiu encosta abaixo, com uma largura de aproximadamente 250 m (Seções 1 a 4 identificadas na FIGURA 3-5). O fluxo de lama destruiu casas na encosta e atingiu a vila de Stava, composta por cerca de 20 edifícios próximo a seção 4 (FIGURA 3-6). Nessa região, o escoamento foi forçado a uma curva de aproximadamente 650 de raio que aumentou consideravelmente a espessura depositada de aproximadamente 19 m.

FIGURA 3-6 – MANCHA DE INUNDAÇÃO OBSERVADA A JUSANTE DAS DUAS BARRAGENS



FONTE: (Aeron.Mil., conc.S.M.A.no.623, *apud* Luino e Graff, 2012)

b) Impacto em Tesero:

A largura do fluxo diminuiu após Stava, onde ocorreu deposição significativa de lama (1–3 m de espessura). Próximo a Tesero, a largura do fluxo diminuiu de 90 m para 50 m, e houve destruição significativa de edificações. Próxima à seção 20, o fluxo de massa se moveu consideravelmente rápido devido a uma região canalizada (FIGURA 3-7).

FIGURA 3-7 – ANTES E DEPOIS DA PASSAGEM DO FLUXO DE LAMA NA VILA DE TESERO NA SEÇÃO 20



FONTE: Cartão postal – Foto Trettel P., editado por: Artesan, Tesero *apud* Luino e Graff, 2012

c) Ponte em Tesero:

Antes de atingir Tesero, o fluxo passou por duas pontes em arco. O fluxo de lama desacelerou e aumentou em altura ao passar sob as pontes, especialmente a mais antiga, que tinha um vão mais estreito. Parte da massa lamacenta transbordou a ponte mais antiga, removendo parcialmente a estrada (FIGURA 3-8).

FIGURA 3-8 – EFEITOS DA MANCHA DE INUNDAÇÃO EM TESERO A MONTANTE DAS PONTES



FONTE: CNR-IRPI Torino *apud* Luino e Graff, 2012

d) Chegada à Confluência dos Rios:

O fluxo atingiu a área de confluência dos rios Stava e Avisio, onde se estabilizou, formando uma represa e um lago de 500 m de comprimento. No rio, em seu trecho final confinado, o fluxo de lama provocou uma erosão significativa em ambos os lados do vale e no fundo do vale (FIGURA 3-9). Ao longo do percurso, todas as árvores foram removidas. Nas margens, marcas de lama alcançaram o topo de árvores com até 25 m de altura. A quantidade total de material deslocado foi estimada em 180.000 m<sup>3</sup>, acrescidas de 40–50.000 m<sup>3</sup> resultantes da erosão de árvores e detritos ao longo do vale. Devido a esse incremento deu-se a opção por testar os modelos reológicos friccionais. A velocidade do fluxo foi estimada entre 20 m/s e 27 m/s, com base em medições feitas em pontos selecionados ao longo da trajetória (Takahashi, 1991, *apud* Luino e Graff, 2012).

FIGURA 3-9 – MANCHA DE INUNDAÇÃO NA CONFLUÊNCIA COM O RIO AVISIO



FONTE: CNR-IRPI Torino *apud* Luino e Graff, 2012

### 3.3 DADOS OBSERVADOS

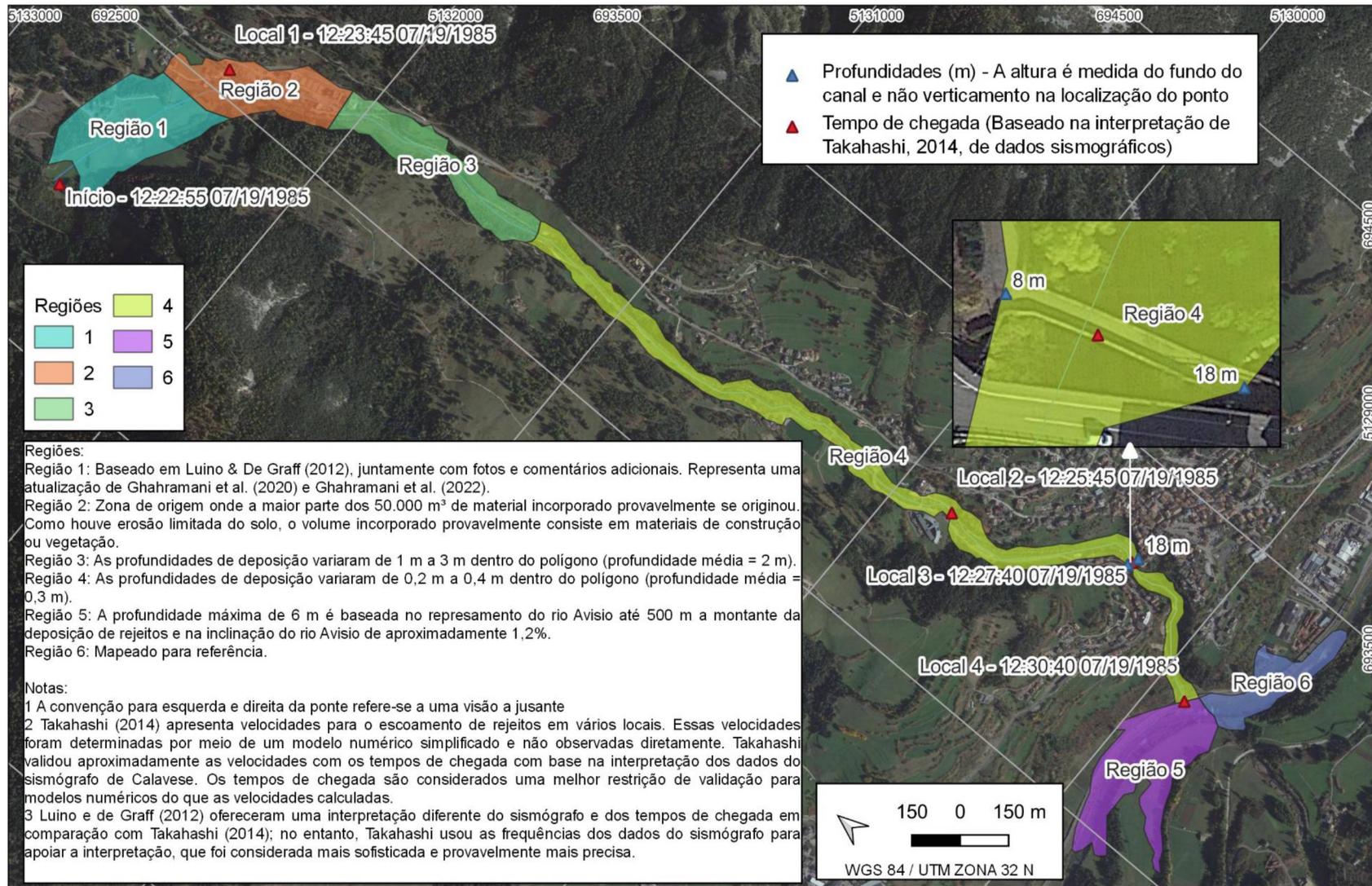
Os dados observado do evento de STAVA-ITA utilizados nessa pesquisa compreendem o compilado de informações realizadas por Adria *et al* (2023) que elaborou um banco de dados de 12 eventos de ruptura de barragem com ênfase em observações necessários para modelagem numérica como volume mobilizado, processo de abertura de brecha, geometria da brecha e observações locais no vale de jusante. O QUADRO 3-1 apresenta as informações disponibilizadas para o evento de STAVA-ITA e a FIGURA 3-10 ilustra as informações no vale de jusante incluindo a envoltória de inundação observada.

QUADRO 3-1 – INFORMAÇÕES HIDRÁULICAS OBSERVADAS NO VALE DE JUSANTE

Pontos de tempo de chegada						
ID	Localização	Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte	Comentário
1	Brecha	Início da formação de brecha	12:22:55 07/19/1985	hh:mm:ss MM/DD/YYYY	Takahashi (2014) Pg. 390-391.	Baseado na interpretação de dados sismográficos de Cavalese por Takahashi.
2	Village of Stava	Frontal Arrival Time	12:23:45 07/19/1985	hh:mm:ss MM/DD/YYYY	Takahashi (2014) Pg. 390-391.	Baseado na interpretação de dados sismográficos de Cavalese por Takahashi.
3	Seção 10'	Frontal Arrival Time	12:25:45 07/19/1985	hh:mm:ss MM/DD/YYYY	Takahashi (2014) Pg. 390-391.	Baseado na interpretação de dados sismográficos de Cavalese por Takahashi.
4	Romano Bridge	Frontal Arrival Time	12:27:40 07/19/1985	hh:mm:ss MM/DD/YYYY	Takahashi (2014) Pg. 390-391.	Baseado na interpretação de dados sismográficos de Cavalese por Takahashi.
5	Rio Avisio	Frontal Arrival Time	12:30:40 07/19/1985	hh:mm:ss MM/DD/YYYY	Takahashi (2014) Pg. 390-391.	Baseado na interpretação de dados sismográficos de Cavalese por Takahashi.
Pontos de profundidade						
ID	Localização	Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte	Comentário
1	Ponte Romana – Direito	Profundidade	8	m	Luino & De Graff (2012) Pg. 1037.	A altura é medida do fundo do canal e não verticalmente abaixo da localização do ponto
2	Ponte Romana – Esquerdo	Profundidade	18	m	Luino & De Graff (2012) Pg. 1037.	A altura é medida do fundo do canal e não verticalmente abaixo da localização do ponto
Regiões						
ID	Localização	Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte	Comentário
1	Área 1 – área inundada	Área 1 – área inundada	527.162	m <sup>2</sup>	Luino & De Graff (2012) Pg. 1037.	Baseado em Luino & De Graff (2012), juntamente com fotos e comentários adicionais. Representa uma atualização de Ghahramani et al. (2020) e Ghahramani et al. (2022).
2	Vilarejo de Stava	Volume de entrada	50.000	m <sup>3</sup>	Luino & De Graff (2012) Pg. 1037. Takahashi (2014) Pg. 384.	Zona de origem onde a maior parte dos 50.000 m <sup>3</sup> de material incorporado provavelmente se originou. Como houve erosão limitada do solo, o volume incorporado provavelmente consiste em materiais de construção ou vegetação.
3	Envoltória em Stava	Profundidade média final	2	m	Luino & De Graff (2012) Pg. 1036.	As profundidades de deposição variaram de 1 m a 3 m dentro do polígono.
4	Vale do rio Stava	Profundidade média final	0,3	m	Luino & De Graff (2012) Pg. 1037.	As profundidades de deposição variaram de 0,2 m a 0,4 m dentro do polígono.
5	Barragem no rio Avisio	Profundidade máxima final	6	m	Luino & De Graff (2012) Pg. 1037.	profundidade máxima é baseada no represamento do rio Avisio até 500 m a montante da deposição de rejeitos e na inclinação do rio Avisio de aproximadamente 1,2%.
6	Reservatório no rio Avisio	Área inundada	45.200	M <sup>2</sup>	Luino & De Graff (2012) Pg. 1037.	Mapeado para referência.
Notas adicionais						
1	A convenção para esquerda e direita da ponte refere-se a uma visão a jusante					
2	Takahashi (2014) apresenta velocidades para o escoamento de rejeitos em vários locais. Essas velocidades foram determinadas por meio de um modelo numérico simplificado e não observadas diretamente. Takahashi validou aproximadamente as velocidades com os tempos de chegada com base na interpretação dos dados do sismógrafo de Calavese. Os tempos de chegada são considerados uma melhor restrição de validação para modelos numéricos do que as velocidades calculadas.					
3	Luino e de Graff (2012) ofereceram uma interpretação diferente do sismógrafo e dos tempos de chegada em comparação com Takahashi (2014); no entanto, Takahashi usou as frequências dos dados do sismógrafo para apoiar a interpretação, que foi considerada mais sofisticada e provavelmente mais precisa.					

FONTE: Adria *et al*, 2023.

FIGURA 3-10 – DADOS OBSERVADOS DO EVENTO DE RUPTURA DAS BARRAGENS DE STAVA-ITA



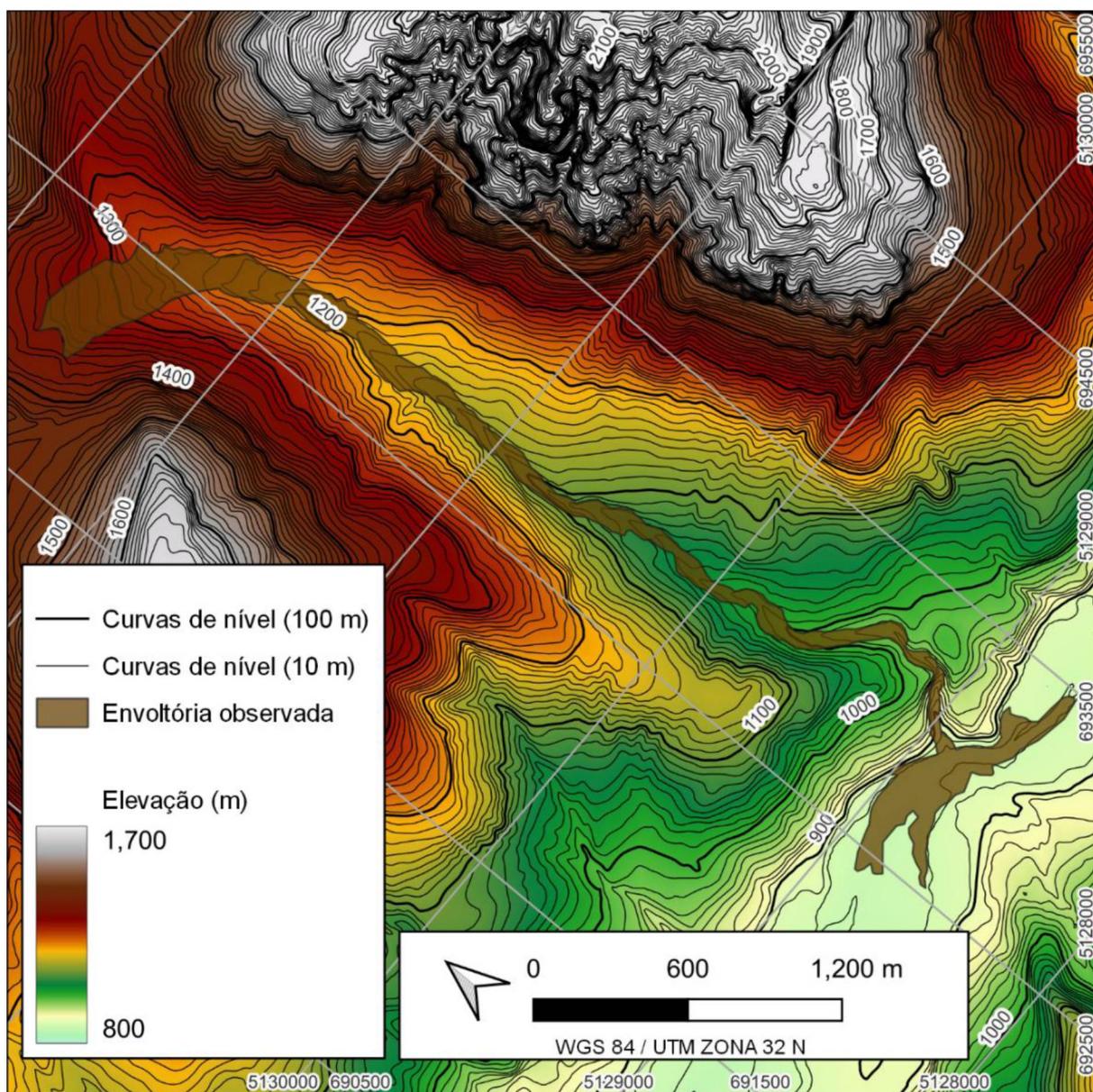
FONTE: O autor, adaptado de Adria *et al*, 2023.

### 3.4 TOPOGRAFIA DO VALE DE JUSANTE

A topografia do vale de jusante para esse estudo (FIGURA 3-11) é o TINITALY com uma resolução de 10 metros do *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia* (Tarquini *et al*, 2007).

Salienta-se que o modelo digital de terreno (MDT) representa a situação do terreno em 2007 e não do evento ocorrido em 1985, sendo uma limitação do presente estudo.

FIGURA 3-11 – MODELO DIGITAL DE TERRENO



FONTE: Adaptado de Tarquini *et al*, 2007.

## 3.5 ENTRADA DO VOLUME MOBILIZADO

### 3.5.1 HEC-RAS

No modelo numérico HEC-RAS optou-se pela utilização de um hidrograma de ruptura conforme Ghahramani *et al* (2022) e Takahashi (2014), que estimam um hidrograma com formato de triângulo retângulo com o pico da vazão de 28.160 m<sup>3</sup>/s (no início da falha) e duração de 13,2 segundos. Como o HEC-RAS permite a mínima discretização de 1 segundo, a base do hidrograma foi alterada para 13,0 segundos e o pico para 28.593,23 m<sup>3</sup>/s.

### 3.5.2 RIVERFLOW2D

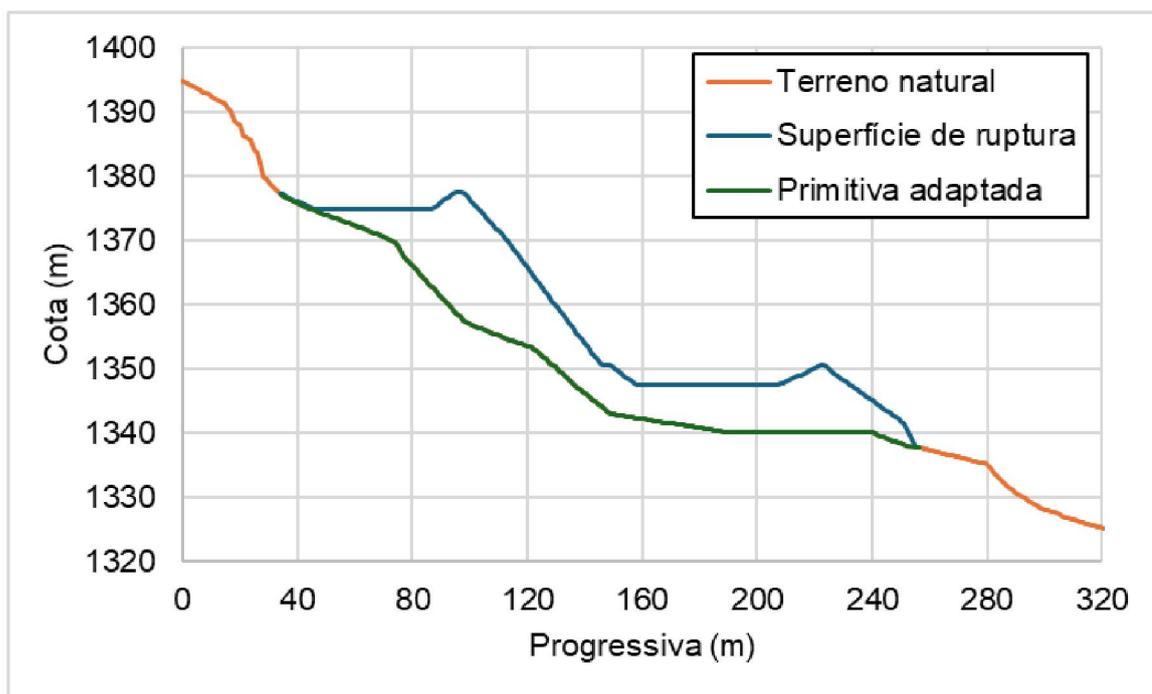
O modelo numérico RIVER-FLOW2D permite a inserção do volume mobilizado como um arquivo matricial. Essa metodologia foi aplicada por Ghahramani *et al* (2022) nas simulações de Stava-ITA para os modelos numéricos DAN-3D e MAD-FLOW. Desse modo, foram elaborados para o estudo de caso de STAVA-ITA um arquivo matricial e uma adaptação do Modelo Digital de Terreno na primitiva conforme apresentado na FIGURA 3-12 e GRÁFICO 3-1 baseado na planta e perfil (FIGURA 3-1 e FIGURA 3-2) antes e depois da ruptura apresentados por Chandler e Tosatti (1995) e adaptado para aproximar ao volume mobilizado de 185.200 m<sup>3</sup> conforme banco de dados compilado por Adria *et al* (2023) e elevações de crista de 1.350,50 m e 1.377,5 m (Ghahramani *et al*, 2022).

FIGURA 3-12 – SUPERFÍCIE MOBILIZADA ESTIMADA DE STAVA-ITA



FONTE: O autor, 2025

GRÁFICO 3-1 - SUPERFÍCIE MOBILIZADA ESTIMADA DE STAVA-ITA



FONTE: O autor, 2025

### 3.6 MODELOS NUMÉRICOS

Os modelos numéricos HEC-RAS e RIVERFLOW2D foram construídos com base em malha bidimensional com células com faces de 5,0 m com utilização de linhas de refino. As simulações no HEC-RAS foram realizadas com a equação de *Saint-Venant* (SWE-ELM) e passo de cálculo adaptativo com base no número de *Courant*, estipulando valores mínimo e máximo de 0,40 e 1,30, seguindo indicação do manual do HEC-RAS, enquanto no RIVERFLOW2D o número de *Courant* foi estabelecido como unitário.

Para o modelo reológico de Coulomb, foi necessário utilizar série de divisores no HEC-RAS com tempos computacionais de 0,03 segundos no primeiro minuto, para manter um erro de conservação de volume baixo, o que não foi necessário para o modelo numérico Quadrático.

## 3.7 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

### 3.7.1 PARÂMETROS HIDRÁULICOS

Os parâmetros hidráulicos a serem avaliados nos cenários hidrodinâmicos simulados correspondem aos apresentados no QUADRO 3-1 e na FIGURA 3-10, sendo os resultados de tempo de chegada da onda de ruptura em 4 localidades, profundidades médias finais depositadas nas regiões 3 e 4, profundidade máxima final depositada na região 5 e profundidades máximas a montante das pontes em Tesero-ITA.

Todos os parâmetros hidráulicos foram extraídos dos respectivos softwares e processados com o auxílio da biblioteca GEOPANDAS do Python. Os dados foram obtidos diretamente dos *rasters* gerados pelas simulações. Os tempos de chegada e as profundidades máximas foram extraídos nos pontos pré-definidos, enquanto as profundidades médias finais foram calculadas a partir da média dos valores do *raster* nas regiões 3 e 4. Para a avaliação da profundidade em relação às pontes, considerou-se como fundo do talvegue a elevação de 971,04 m, além das elevações do nível da água obtidas em ambas as margens, em uma região que se estende da ponte até 70 m a montante, abrangendo a curva do vale de jusante nessa região.

Por fim, será avaliada similaridade entre as envoltórias de inundação observada e simuladas por meio dos índices *FIT METRIC*.

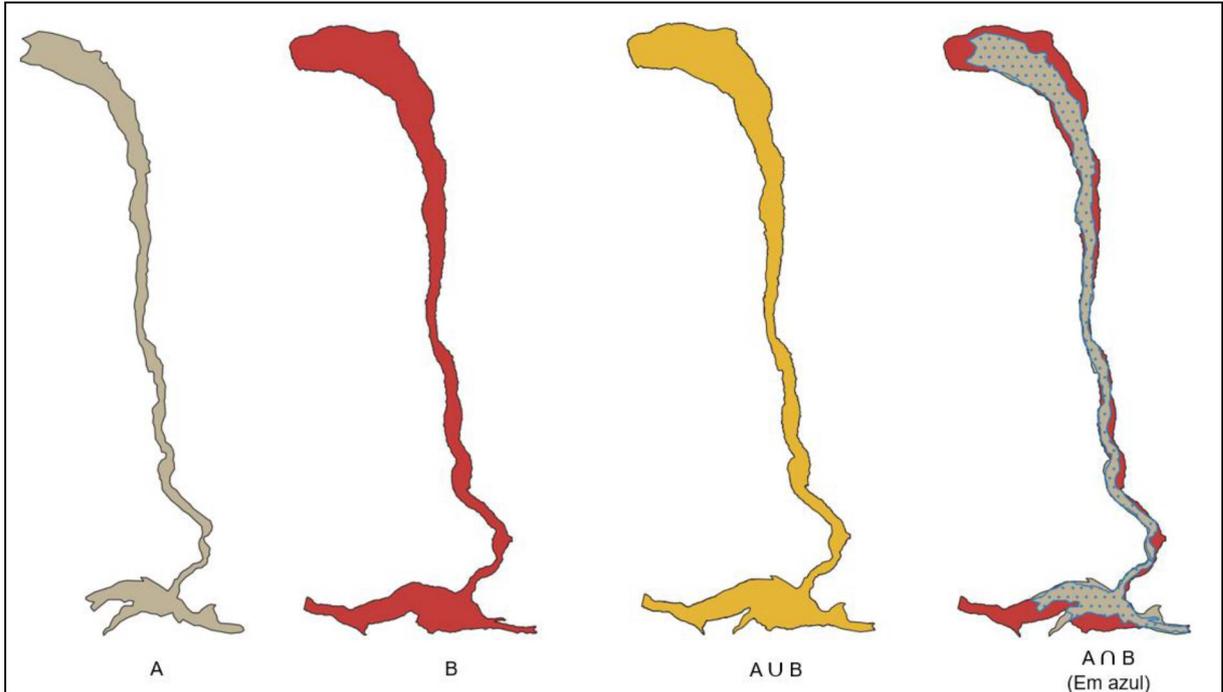
O índice para avaliar a similaridade entre as envoltórias de inundação observada e simulada é o *FIT METRIC* conforme apresentado na EQUAÇÃO 3-1. MELO & ELEUTÉRIO (2023) utilizaram esse parâmetro para a calibração de modelo hidrodinâmico não newtoniano para o evento ocorrido em Brumadinho-MG. Nessa equação, A se refere à envoltória observada, e B, à envoltória simulada.

$$F = \frac{100 \% ( A \cap B )}{( A \cup B )} \quad \text{EQUAÇÃO 3-1}$$

O *Fit Metric* é uma métrica utilizada na avaliação de modelos numéricos que compara os resultados simulados com dados observacionais. Ele quantifica o grau de ajuste entre a simulação e as medições reais, permitindo uma análise mais objetiva da performance do modelo. Um valor de *Fit Metric* próximo a 1 indica um bom ajuste, enquanto valores mais baixos sugerem que o modelo não está reproduzindo

adequadamente as condições reais. A FIGURA 3-13 – Exemplo aplicação do índice *FIT METRIC* apresenta um exemplo aplicação do índice *FIT METRIC*.

FIGURA 3-13 – Exemplo aplicação do índice *FIT METRIC*



FONTE: O autor, 2025

### 3.7.2 COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

A avaliação da sensibilidade dos resultados de tempo de chegada, profundidade e envoltória de inundação foram avaliadas por meio do Coeficiente de Variação ( $Cv$ ) que é uma medida de dispersão de uma distribuição de probabilidade, sendo a razão entre o desvio padrão amostral ( $S$ ) e a média amostral ( $\bar{x}$ ) conforme apresentado na EQUAÇÃO 3-2.

$$Cv = \frac{S}{\bar{x}} \quad \text{EQUAÇÃO 3-2}$$

O coeficiente de variação foi utilizado para analisar a sensibilidade de cada parâmetro hidráulico, variando os parâmetros de entrada, como o coeficiente de rugosidade, a tensão limite de escoamento e a viscosidade, nos modelos HEC-RAS e RiverFlow2D. A análise focou na avaliação dos efeitos dessas variações nos parâmetros de saída comentados anteriormente (tempo de chegada, profundidades e envoltória máxima).

Nos itens 4 e 5 são apresentados gráficos comparando os coeficientes de variação obtidos nas análises de sensibilidade dos parâmetros simulados. Para avaliar a sensibilidade dos parâmetros reológicos (rugosidade, tensão limite de escoamento, viscosidade e ângulo de atrito interno) nos modelos HEC-RAS e RiverFlow2D, foram realizadas simulações variando individualmente cada parâmetro, mantendo os demais constantes. Os resultados extraídos incluíram:

- Tempo de chegada da onda de cheia nos 4 pontos apresentados;
- Profundidades máximas nas margens esquerda e direita da ponte;
- Profundidades médias finais nas regiões 3 e 4;
- Profundidade máxima final na região 5.

A obtenção da coeficiente de variação para cada conjunto de simulações seguiu-se as seguintes etapas:

- Simulação dos cenários de sensibilidade;
- Extração dos valores dos rasters conforme comentado no item 3.7.1;
- Para cada propriedade hidráulica, foi estimada a média e o desvio padrão entre as simulações, com posterior cálculo do coeficiente de variação;
- Por exemplo, para as 5 simulações variando o coeficiente de rugosidade no HEC-RAS com o modelo reológico Bingham, os valores do tempo de chegada no ponto 3 foram de 241, 245, 251, 256 e 270 segundos, resultando em uma média de 253 s, desvio padrão de 11,3 s e coeficiente de variação de 4,47 %.
- Esse resultado foi apresentado graficamente no capítulo de resultados; e
- A mesma metodologia foi aplicada as demais análises de sensibilidade.

### 3.7.3 ÍNDICE DE DESEMPENHO GLOBAL

O Índice de Desempenho Global (*Global Performance Index – GPI*) é uma métrica utilizada para avaliar um determinado sistema, combinando diferentes indicadores de desempenho em um único valor.

Para isso, serão utilizadas 3 métricas: tempo de chegada, profundidade e *Fit Metric*. Os resultados de cada métrica para um conjunto de simulações serão normalizados para um intervalo comum (0 a 1), onde 1 representa o melhor ajuste conforme apresentado na EQUAÇÃO 3-3, onde  $X_{norm}$  é o valor normalizado,  $X$  é o valor que está sendo normalizado,  $X_{mín}$  é o menor valor obtido e  $X_{max}$  o maior valor

obtido. Para propriedades hidráulicas onde o menor valor é o mais representativo, o valor obtido na equação será subtraído de 1 para obtenção do valor normalizado final.

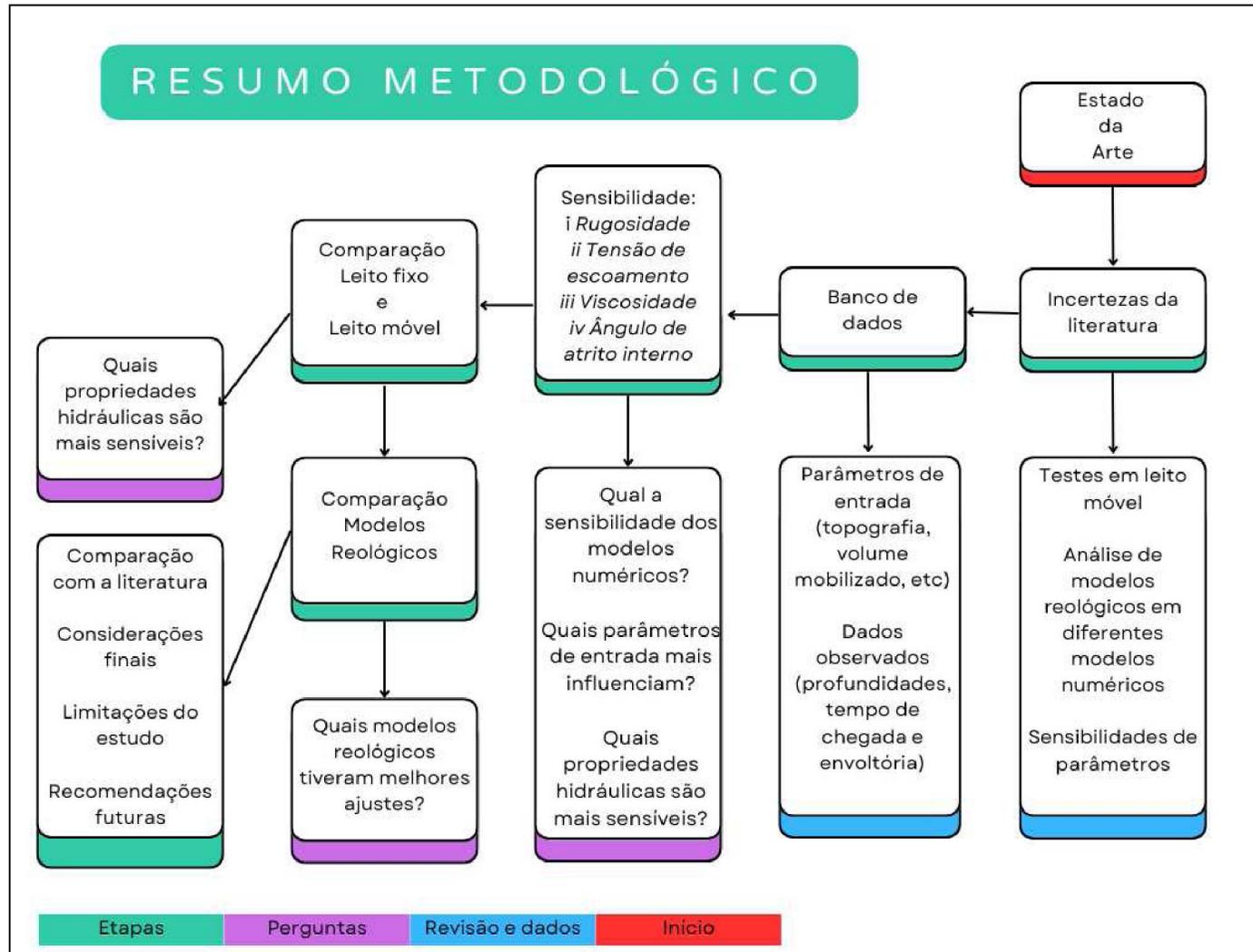
$$X_{norm} = \frac{X - X_{mín}}{X_{max} - X_{min}} \quad \text{EQUAÇÃO 3-3}$$

Desse modo, para cada simulação é obtido o valor normalizado para as 3 propriedades hidráulicas (tempos de chegada, profundidade e *FITMETRIC*) e por meio da ponderação de pesos ( $\frac{1}{3}$  para cada propriedade) será obtido o valor *GPI* final de cada simulação, classificando assim o cenário que performou melhor em relação aos dados observados.

### 3.8 RESUMO METODOLÓGICO DA PESQUISA

A FIGURA 3-14 apresenta o resumo metodológico da pesquisa.

FIGURA 3-14 – RESUMO METODOLÓGICO DA PESQUISA



## 4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS MODELOS REOLÓGICOS BINGHAM NO HEC-RAS E QUADRÁTICO NO RIVERFLOW2D

### 4.1 AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

Os modelos reológicos de Bingham no HEC-RAS 6.5 e Quadrático no RIVERFLOW2D 8.12.04 sem deposição foram avaliados para o estudo de caso das barragens de Stava-ITA, variando de forma independente os parâmetros de tensão limite de escoamento, viscosidade e coeficiente de rugosidade, permitindo a avaliação do coeficiente de variação para estimar a sensibilidade na alteração desses parâmetros nas simulações. Apesar dos nomes diferentes, os modelos são semelhantes em termos de abordagem reológica.

O passo a passo para obtenção dos coeficientes de variação pode ser consultado no item 3.7.2 e a localização dos pontos e das regiões podem ser consultados na FIGURA 3-10.

A TABELA 4-1 apresenta os cenários com o modelo reológico de Bingham no HEC-RAS e no ANEXO 1 apresentam-se os resultados detalhados para consulta.

TABELA 4-1 – CENÁRIOS COM O MODELO REOLÓGICO BINGHAM NO MODELO NUMÉRICO HEC-RAS PARA AVALIAR OS PARÂMETROS DE FORMA INDEPENDENTE

ID	Modelo reológico	Coefficiente de rugosidade ( $m^{-1/3} s$ )	Tensão limite de escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)
RAS-1	Bingham	0,018	1	0
RAS-2	Bingham	0,018	5	0
RAS-3	Bingham	0,018	10	0
RAS-4	Bingham	0,018	50	0
RAS-5	Bingham	0,018	100	0
RAS-6	Bingham	0,018	250	0
RAS-7	Bingham	0,018	500	0
RAS-8	Bingham	0,018	0	1
RAS-9	Bingham	0,018	0	5
RAS-10	Bingham	0,018	0	10
RAS-11	Bingham	0,018	0	50
RAS-12	Bingham	0,018	0	100

ID	Modelo reológico	Coefficiente de rugosidade ( $m^{-1/3} s$ )	Tensão limite de escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)
RAS-13	Newtoniano	0,012	0	0
RAS-14	Newtoniano	0,018	0	0
RAS-15	Newtoniano	0,025	0	0
RAS-16	Newtoniano	0,030	0	0
RAS-17	Newtoniano	0,040	0	0

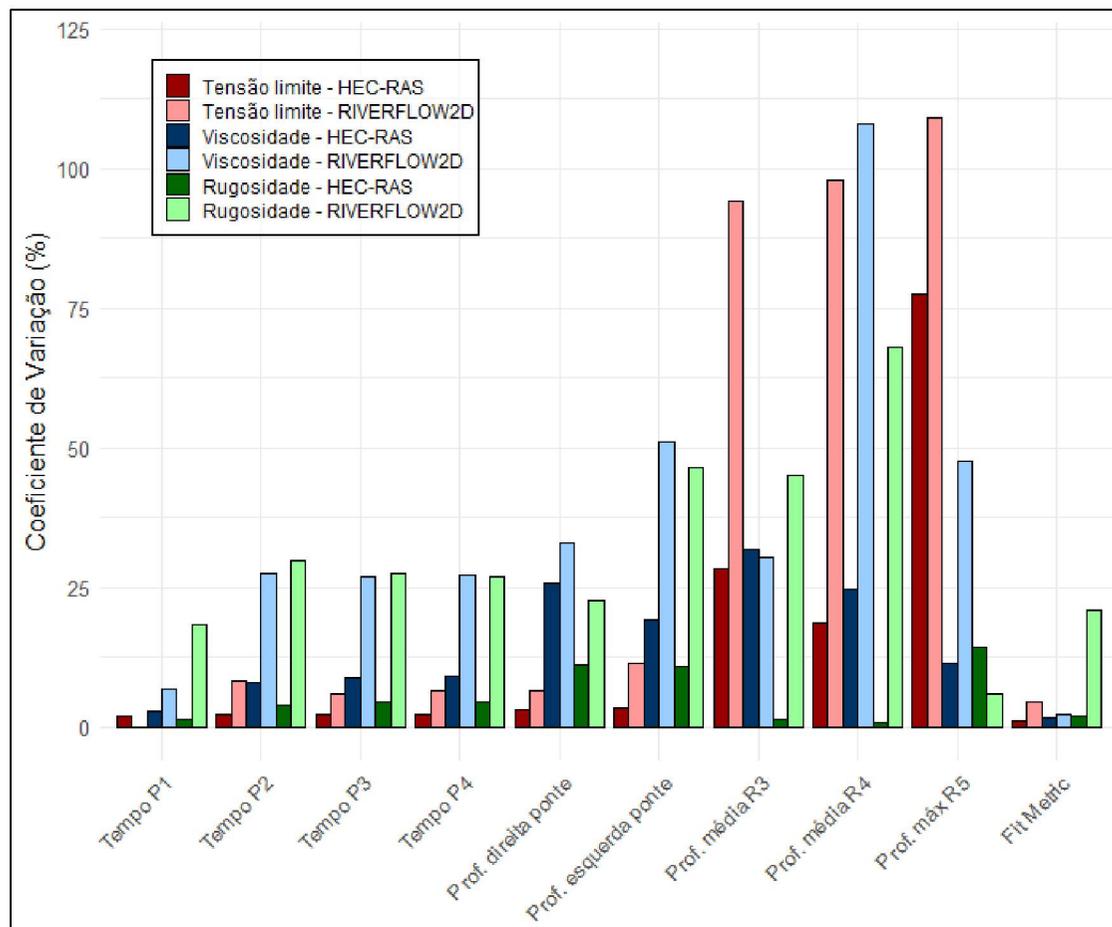
A TABELA 4-2 apresenta os cenários com o modelo reológico Quadrático no RIVERFLOW2D e no ANEXO 1 os resultados detalhados para consulta.

TABELA 4-2 – CENÁRIOS COM O MODELO REOLÓGICO QUADRÁTICO NO MODELO NUMÉRICO RIVERFLOW2D PARA AVALIAR PARÂMETROS DE FORMA INDEPENDENTE

ID	Modelo reológico	Coefficiente de rugosidade ( $m^{-1/3} s$ )	Tensão limite de escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)
RF-1	Newtoniano	0,012	0	0
RF-2	Newtoniano	0,025	0	0
RF-3	Newtoniano	0,040	0	0
RF-4	Quadrático	0,018	1	0
RF-5	Quadrático	0,018	100	0
RF-6	Quadrático	0,018	500	0
RF-7	Quadrático	0,018	0	1
RF-8	Quadrático	0,018	0	10
RF-9	Quadrático	0,018	0	100

O GRÁFICO 4-1 sintetiza os coeficientes de variação obtidos para esse conjunto de simulações nos modelos reológicos Bingham e Quadrático no HEC-RAS e RIVERFLOW2D, respectivamente, e a TABELA 4-2 apresenta os parâmetros de entrada com maiores coeficientes de variação por modelo numérico e parâmetro hidráulico de saída.

GRÁFICO 4-1 - COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS REOLÓGICOS DE BINGHAM E QUADRÁTICO NO HEC-RAS E RIVERFLOW2D, RESPECTIVAMENTE<sup>1</sup>



<sup>1</sup> O passo a passo para obtenção dos coeficientes de variação pode ser consultado no item 3.7.2 e a localização dos pontos e das regiões podem ser consultados na FIGURA 3-10.

TABELA 4-3 – PARÂMETRO DE ENTRADA COM MAIOR COEFICIENTE DE VARIAÇÃO POR PARÂMETRO HIDRÁULICO E NUMÉRICO AVALIADO<sup>2</sup>

SOFTWARE	Tempo de chegada no ponto 1	Tempo de chegada no ponto 2	Tempo de chegada no ponto 3	Tempo de chegada no ponto 4	Profundidade máxima na margem direita da ponte	Profundidade máxima na margem esquerda da ponte	Profundidade média final na região 3	Profundidade média final na região 4	Profundidade máxima final na região 5	Fit Metric
HEC-RAS BINGHAM	VISCOSIDADE (1 a 100 Pa.s)								TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO (1 a 500 Pa)	RUGOSIDADE (0,012 a 0,040)
RIVERFLOW2D QUADRÁTICO	RUGOSIDADE (0,012 a 0,040)			VISCOSIDADE(1 a 100 Pa.s)			TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO (1 a 500 Pa)	VISCOSIDADE (1 a 100 Pa.s)	TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO (1 a 500 Pa)	RUGOSIDADE (0,012 a 0,040)

<sup>2</sup> O passo a passo para obtenção dos coeficientes de variação pode ser consultado no item 3.7.2 e a localização dos pontos e das regiões podem ser consultados na FIGURA 3-10.

Quanto ao tempo de chegada, os coeficientes de variação foram mais elevados no RIVERFLOW2D em comparação ao HEC-RAS. No HEC-RAS, a viscosidade foi o parâmetro mais sensível, seguida pela rugosidade, enquanto no RIVERFLOW2D essa ordem se inverteu, e a tensão limite de escoamento apresentando o menor impacto em ambos os modelos numéricos.

As profundidades máximas nas margens da ponte apresentaram maior sensibilidade no RIVERFLOW2D em comparação ao HEC-RAS. Em ambos os modelos, a viscosidade foi o parâmetro que gerou as maiores variações nesses pontos, seguida pela rugosidade.

Em relação à profundidade média final nas regiões 3 e 4, o RIVERFLOW2D demonstrou maior sensibilidade quando comparado ao HEC-RAS. Na região 4, a viscosidade foi o parâmetro mais influente em ambos os modelos, seguida pela tensão limite de escoamento. Já na região 3, a maior sensibilidade ocorreu com a tensão limite de escoamento no RIVERFLOW2D, enquanto no HEC-RAS a viscosidade continuou sendo o parâmetro predominante. No RIVERFLOW2D, a rugosidade apresentou sensibilidade próxima à dos demais parâmetros, diferentemente do HEC-RAS, em que teve impacto consideravelmente menor.

A profundidade máxima final apresentou maior sensibilidade no RIVERFLOW2D em comparação ao HEC-RAS, sendo a tensão limite de escoamento o parâmetro que mais influenciou esse resultado. No RIVERFLOW2D, a viscosidade apareceu como o segundo parâmetro mais impactante, enquanto a rugosidade teve influência significativamente menor. Já no HEC-RAS, a rugosidade e a viscosidade tiveram coeficientes de variação similares.

## 4.2 OBTENÇÃO DA SIMULAÇÃO COM MELHOR AJUSTE NO HEC-RAS

A próxima análise de resultados consiste nas simulações RAS-18 a RAS-44 com o objetivo de avaliar o Índice de Desempenho Global, verificando quais combinações de parâmetros de rugosidade, tensão limite de escoamento e viscosidade performaram próximas aos dados observados no modelo numérico HEC-RAS 6.5 para subsidiar as próximas análises.

Os cenários simulados estão apresentados na TABELA 4-4 e no ANEXO 1 os resultados detalhados para consulta.

TABELA 4-4 – CENÁRIOS COM O MODELO REOLÓGICO BINGHAM NO MODELO NUMÉRICO HEC-RAS PARA AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FORMA CONJUNTA

ID	Modelo reológico	Coefficiente de rugosidade $\frac{-1}{(m^3 s)}$	Tensão limite de escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)
RAS-18	Bingham	0,018	1	10
RAS-19	Bingham	0,018	50	10
RAS-20	Bingham	0,018	250	10
RAS-21	Bingham	0,030	1	10
RAS-22	Bingham	0,030	50	10
RAS-23	Bingham	0,030	250	10
RAS-24	Bingham	0,040	1	10
RAS-25	Bingham	0,040	50	10
RAS-26	Bingham	0,040	250	10
RAS-27	Bingham	0,018	1	50
RAS-28	Bingham	0,018	50	50
RAS-29	Bingham	0,018	250	50
RAS-30	Bingham	0,030	1	50
RAS-31	Bingham	0,030	50	50
RAS-32	Bingham	0,030	250	50
RAS-33	Bingham	0,040	1	50
RAS-34	Bingham	0,040	50	50
RAS-35	Bingham	0,040	250	50

ID	Modelo reológico	Coefficiente de rugosidade ( $m^{-1/3} s$ )	Tensão limite de escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)
RAS-36	Bingham	0,018	1	100
RAS-37	Bingham	0,018	50	100
RAS-38	Bingham	0,018	250	100
RAS-39	Bingham	0,030	1	100
RAS-40	Bingham	0,030	50	100
RAS-41	Bingham	0,030	250	100
RAS-42	Bingham	0,040	1	100
RAS-43	Bingham	0,040	50	100
RAS-44	Bingham	0,040	250	100

A TABELA 4-5 apresenta o Índice de Desempenho Global para as simulações desse conjunto e os valores normalizados para cada propriedade observada.

Para o tempo de chegada, de acordo com a TABELA 4-5, as simulações com as maiores resistências ao escoamento, performaram melhor nos pontos 1 e 4 (RAS-43 e RAS-44), enquanto o inverso é válido para o ponto 2 (RAS-18). Para o ponto 3, condições intermediárias tiveram melhor encaixe (RAS-26 e RAS-32).

Na margem esquerda da ponte, simulações com resistência intermediária ao escoamento (como RAS-23 e RAS-29) tiveram melhor desempenho, conforme a TABELA 4-5. Na margem direita, simulações com alta resistência ao escoamento (como RAS-44) apresentaram melhor encaixe. Para a profundidade máxima final na região 5, simulações com maior tensão limite de escoamento (250 Pa) tiveram melhor encaixe. Na região 3, as simulações apresentaram profundidades finais médias distantes dos dados observados, enquanto na região 4, os valores simulados foram próximos aos observados.

Em relação a área inundada, as simulações com resistência ao escoamento intermediárias obtiveram melhores resultados (RAS-24). Por fim, a seguir são dispostas as 4 simulações que obtiveram os maiores Índices de Desempenho Global.

1. RAS-26 com  $0,040 m^{-1/3} s$ , 250 Pa e 10 Pa.s
2. RAS-32 com  $0,030 m^{-1/3} s$ , 250 Pa e 50 Pa.s
3. RAS-23 com  $0,030 m^{-1/3} s$ , 250 Pa e 10 Pa.s
4. RAS-24 com  $0,040 m^{-1/3} s$ , 1 Pa e 10 Pa.s

TABELA 4-5 – ÍNDICE DE DESEMPENHO GLOBAL DAS SIMULAÇÕES COM O MODELO BINGHAM DO HEC-RAS (RAS-18 A RAS-44)<sup>3</sup>

ID	Modelo Reológico	Coeficiente de rugosidade $\frac{-1}{(m^{\frac{1}{3}} s)}$	Tensão limite de escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)	TEMPO DE CHEGADA					PROFUNDIDADE					ÁREA INUNDADA	GPI FINAL $\frac{a+b+c}{3}$	
					Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média (a)	ME Ponte Prof. Máxima	MD Ponte Prof. Máxima	Prof. Média Final Região 3	Prof. Média Final Região 4	Prof. Máxima Final Região 5	Média (b)		Fit Metric (c)
RAS-18	Bingham	0,018	1	10	0,00	1,00	0,09	0,00	0,27	0,61	0,00	0,02	0,62	0,09	0,27	0,67	0,40
RAS-19	Bingham	0,018	50	10	0,00	0,96	0,15	0,04	0,29	0,62	0,01	0,15	0,74	0,13	0,33	0,63	0,42
RAS-20	Bingham	0,018	250	10	0,33	0,88	0,32	0,12	0,41	0,70	0,07	0,56	1,00	0,99	0,66	0,65	0,58
RAS-21	Bingham	0,030	1	10	0,00	0,84	0,38	0,15	0,34	0,84	0,21	0,00	0,63	0,00	0,34	0,91	0,53
RAS-22	Bingham	0,030	50	10	0,00	0,82	0,44	0,18	0,36	0,86	0,23	0,13	0,76	0,12	0,42	0,83	0,54
RAS-23	Bingham	0,030	250	10	0,33	0,72	0,65	0,28	0,50	0,96	0,30	0,55	0,92	0,99	0,74	0,79	0,68
RAS-24	Bingham	0,040	1	10	0,33	0,62	0,82	0,37	0,54	0,82	0,46	0,01	0,66	0,00	0,39	1,00	0,64
RAS-25	Bingham	0,040	50	10	0,33	0,58	0,88	0,40	0,55	0,81	0,46	0,13	0,78	0,12	0,46	0,92	0,64
RAS-26	Bingham	0,040	250	10	0,67	0,48	0,97	0,51	0,66	0,68	0,51	0,58	0,76	0,99	0,71	0,83	0,73
RAS-27	Bingham	0,018	1	50	0,33	0,82	0,44	0,18	0,44	0,86	0,22	0,63	0,64	0,07	0,48	0,69	0,54
RAS-28	Bingham	0,018	50	50	0,33	0,78	0,50	0,21	0,45	0,89	0,24	0,71	0,54	0,18	0,51	0,63	0,53
RAS-29	Bingham	0,018	250	50	0,33	0,70	0,71	0,31	0,51	1,00	0,33	0,63	0,81	1,00	0,75	0,64	0,63
RAS-30	Bingham	0,030	1	50	0,33	0,64	0,79	0,36	0,53	0,85	0,44	0,64	0,62	0,07	0,52	0,77	0,61
RAS-31	Bingham	0,030	50	50	0,33	0,62	0,85	0,38	0,55	0,82	0,45	0,71	0,53	0,18	0,54	0,74	0,61
RAS-32	Bingham	0,030	250	50	0,67	0,52	1,00	0,50	0,67	0,66	0,50	0,65	0,73	0,99	0,71	0,68	0,69
RAS-33	Bingham	0,040	1	50	0,67	0,40	0,82	0,59	0,62	0,42	0,63	0,63	0,63	0,06	0,48	0,80	0,63
RAS-34	Bingham	0,040	50	50	0,67	0,38	0,74	0,63	0,60	0,40	0,64	0,70	0,55	0,18	0,49	0,69	0,60
RAS-35	Bingham	0,040	250	50	0,67	0,26	0,50	0,74	0,54	0,31	0,71	0,66	0,51	1,00	0,64	0,46	0,55
RAS-36	Bingham	0,018	1	100	0,33	0,60	0,88	0,41	0,56	0,75	0,46	0,92	0,06	0,14	0,47	0,62	0,55
RAS-37	Bingham	0,018	50	100	0,33	0,56	0,94	0,45	0,57	0,70	0,47	0,98	0,03	0,24	0,48	0,55	0,53
RAS-38	Bingham	0,018	250	100	0,67	0,46	0,88	0,55	0,64	0,51	0,55	0,71	0,37	1,00	0,63	0,40	0,56
RAS-39	Bingham	0,030	1	100	0,33	0,42	0,79	0,60	0,54	0,38	0,64	0,91	0,07	0,14	0,43	0,59	0,52
RAS-40	Bingham	0,030	50	100	0,67	0,38	0,74	0,64	0,61	0,36	0,65	0,97	0,02	0,24	0,45	0,46	0,51
RAS-41	Bingham	0,030	250	100	0,67	0,26	0,50	0,76	0,55	0,26	0,74	0,74	0,27	1,00	0,60	0,24	0,46
RAS-42	Bingham	0,040	1	100	0,67	0,16	0,35	0,82	0,50	0,10	0,91	0,92	0,07	0,14	0,43	0,28	0,40
RAS-43	Bingham	0,040	50	100	1,00	0,14	0,29	0,86	0,57	0,08	0,93	1,00	0,00	0,24	0,45	0,17	0,40
RAS-44	Bingham	0,040	250	100	1,00	0,00	0,00	1,00	0,50	0,00	1,00	0,73	0,18	1,00	0,58	0,00	0,36

Alta classificação
Média classificação
Baixa classificação

<sup>3</sup> A localização dos pontos e das regiões podem ser consultados na FIGURA 3-10.

### 4.3 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS EM RELAÇÃO AOS DADOS OBSERVADOS

A TABELA 4-6 apresenta os cenários simulados no RIVERFLOW2D sem deposição ou erosão para comparação com o HEC-RAS. Além dos parâmetros de melhores ajustes do item anterior, também foram escolhidas as simulações com menor e maior resistência ao escoamento.

TABELA 4-6 – CENÁRIOS COM O MODELO REOLÓGICO BINGHAM NO HEC-RAS E QUADRÁTICO NO RIVERFLOW2D

ID	Modelo reológico	Coefficiente de rugosidade ( $m^{-1/3} s$ )	Tensão limite de escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)
RF-10	Quadrático	0,040	250	10
RF-11	Quadrático	0,040	250	100
RF-12	Quadrático	0,018	1	10
RAS-26	Bingham	0,040	250	10
RAS-44	Bingham	0,040	250	100
RAS-18	Bingham	0,018	1	10

A TABELA 4-7 apresenta os cenários simulados com o modelo reológico Quadrático no RIVERFLOW2D, com leito móvel sem erosão, visando isolar os efeitos das equações de deposição em comparação aos cenários sem deposição da TABELA 4-6. Conforme descrito no item 2.7.2 o modelo RIVERFLOW2D inclui equações para velocidade de queda e concentração de equilíbrio. Utilizou-se a equação de queda de Wu e Wong (2006), dada sua base de dados abrangente, e testaram-se as concentrações propostas por Bagnold (1973), Wu (2008) e Van Rijn (1984a), apesar de não serem voltadas a escoamentos não newtonianos.

O empreendimento possui duas regiões com curvas granulométricas distintas (item 3.1), adotando-se sensibilidade com  $d_{50}$  de 0,11 mm (areia) e 0,007 mm (silte). Utilizaram-se os parâmetros reológicos dos cenários RF-10 e RAS-26.

TABELA 4-7 – CENÁRIOS COM OS MODELOS REOLÓGICOS QUADRÁTICO NO MODELO NUMÉRICO RIVERFLOW COM E SEM DEPOSIÇÃO

ID	Modelo reológico	Coefficiente de rugosidade $(m^{-1/3} s)$	Tensão limite de escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)	Equação de Velocidade de Queda	Equação de Concentração de Equilíbrio	Curva granulométrica	Diâmetro médio (mm)
RF-13	Quadrático	0,040	250	10	Wu Wong	Bagnold	Areia	0,110
RF-14	Quadrático	0,040	250	10	Wu Wong	Wu	Areia	0,110
RF-15	Quadrático	0,040	250	10	Wu Wong	Bagnold	Silte	0,007
RF-16	Quadrático	0,040	250	10	Wu Wong	Wu	Silte	0,007
RF-17	Quadrático	0,040	250	10	Wu Wong	Van Rijn	Silte	0,007
RF-18	Quadrático	0,040	250	10	Wu Wong	Van Rijn	Areia	0,110

Os gráficos deste subcapítulo apresentam a análise dos resultados simulados em comparação com os dados observados, que podem ser representados por um valor médio ou uma faixa de valores, conforme o banco de dados previamente apresentado. Por exemplo, as profundidades médias finais são representadas por meio de uma faixa de valores.

A seguir, serão analisados os resultados do HEC-RAS sem deposição (RAS-18, RAS-26 e RAS-44), RIVERFLOW2D sem deposição (RF-10, RF-11 e RF-12) e RIVERFLOW2D com deposição (RF-13 a RF-18)<sup>4</sup>. A comparação deve ser feita com cautela, pois a simulação escolhida para o RIVERFLOW2D foi baseada em uma análise do HEC-RAS. No entanto, as simulações com limites inferiores e superiores permitem um comparativo imparcial.

A propagação dos hidrogramas de ruptura e avaliação das tensões cisalhantes no vale de jusante serão mais bem discutidas nos itens 5.2.2 e 5.2.4.

Em relação ao tempo de chegada, comparando os resultados do modelo numérico RIVERFLOW2D sem deposição (RF-10) e as respectivas simulações com mesmo parâmetros reológicos com deposição (RF-13 a RF-18) não houve diferenças significativas nos resultados ( $< 0,01\%$ ), desse modo para o GRÁFICO 4-2, os resultados apresentadas do cenário RF-10 podem ser interpretados como os cenários RF-13 a RF-18. Dessa forma, o GRÁFICO 4-2 apresenta o tempo de chegada desse conjunto de simulações em relação a distância da barragem no vale de jusante.

Observa-se que a variação na amplitude do tempo de chegada é superior no RIVERFLOW2D em relação ao HEC-RAS conforme já constatado pelos coeficientes de variação discutidos anteriormente, porém os tempos de chegada entre as simulações RAS-26 e RF-10 são similares.

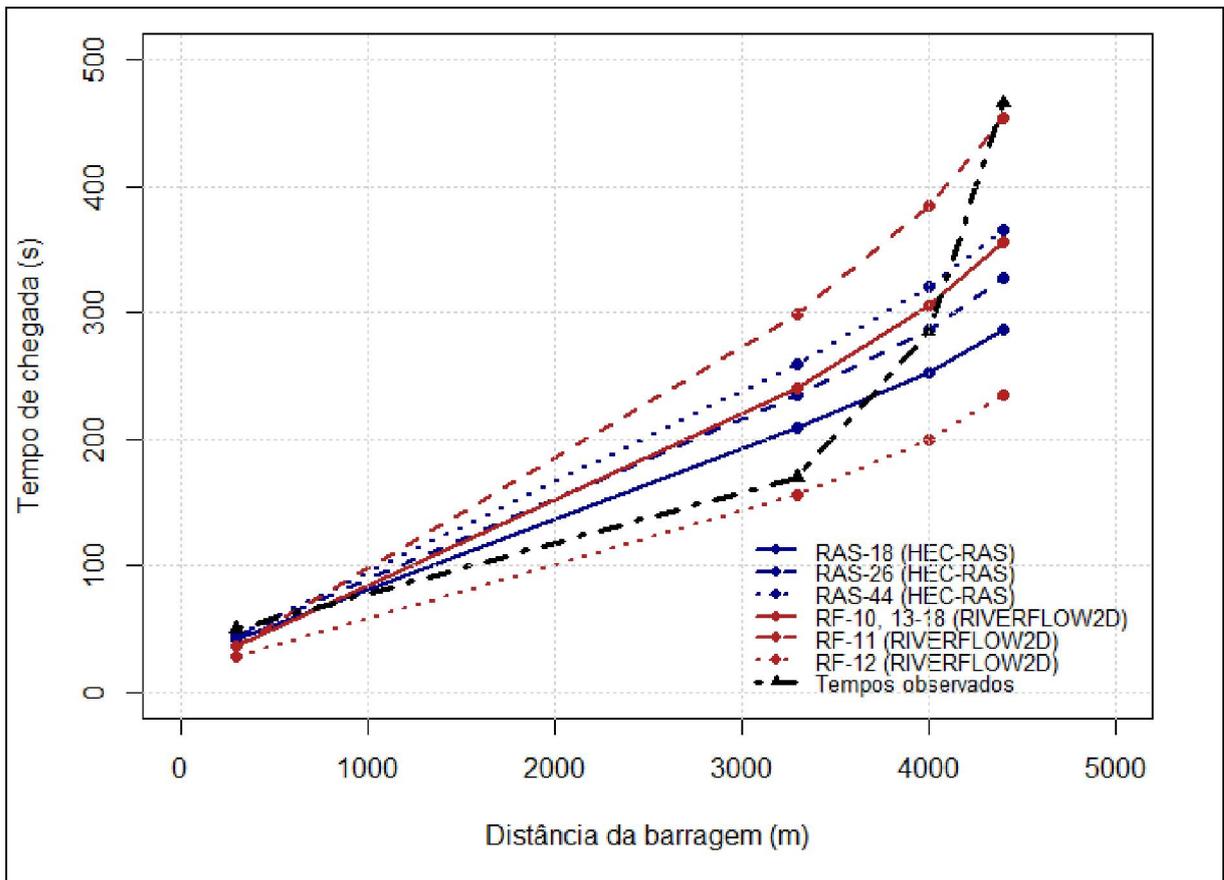
Entre os pontos 1 e 2, o escoamento tende a percorrer o trajeto mais rapidamente, com um aumento progressivo no tempo de chegada a partir do ponto 2 em diante. Como os modelos numéricos foram representados com parâmetros constantes de tensão limite de escoamento, viscosidade e rugosidade ao longo de todo o domínio, a tendência de aumento do tempo de chegada em direção ao vale de jusante é mantida. A variação do coeficiente de rugosidade em diferentes trechos poderia ser uma alternativa para melhor ajustar os tempos de chegada, mas essa

---

<sup>4</sup> A localização dos pontos e das regiões podem ser consultados na FIGURA 3-10.

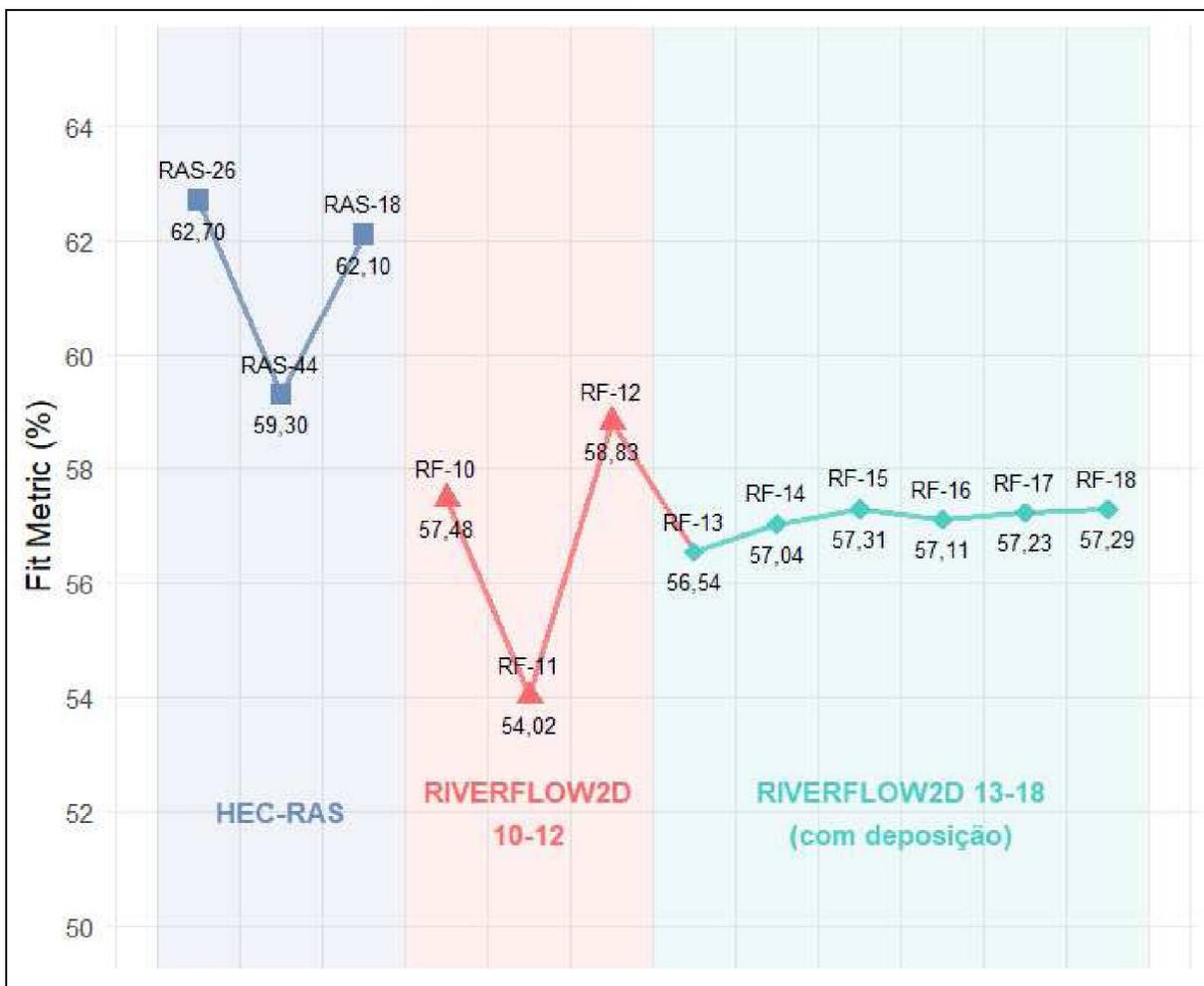
abordagem não faz parte do escopo deste estudo. Além disso, a presença das duas pontes localizadas no ponto 3 pode, teoricamente, retardar o fluxo, contribuindo também para maiores tempos de chegada a jusante desse ponto, sendo que essas estruturas hidráulicas não estão representadas no presente estudo.

GRÁFICO 4-2 – COMPARAÇÃO – TEMPO DE CHEGADA - BINGHAM – HEC-RAS e QUADRÁTICO – RIVERFLOW2D COM E SEM DEPOSIÇÃO



O GRÁFICO 4-3 apresenta a comparação entre os ajustes das envoltórias de inundação, sendo que as simulações no RIVERFLOW2D apresentaram ajustes inferiores ao HEC-RAS. Quanto ao módulo de fundo fixo e móvel, não houve diferenças significativas nas envoltórias.

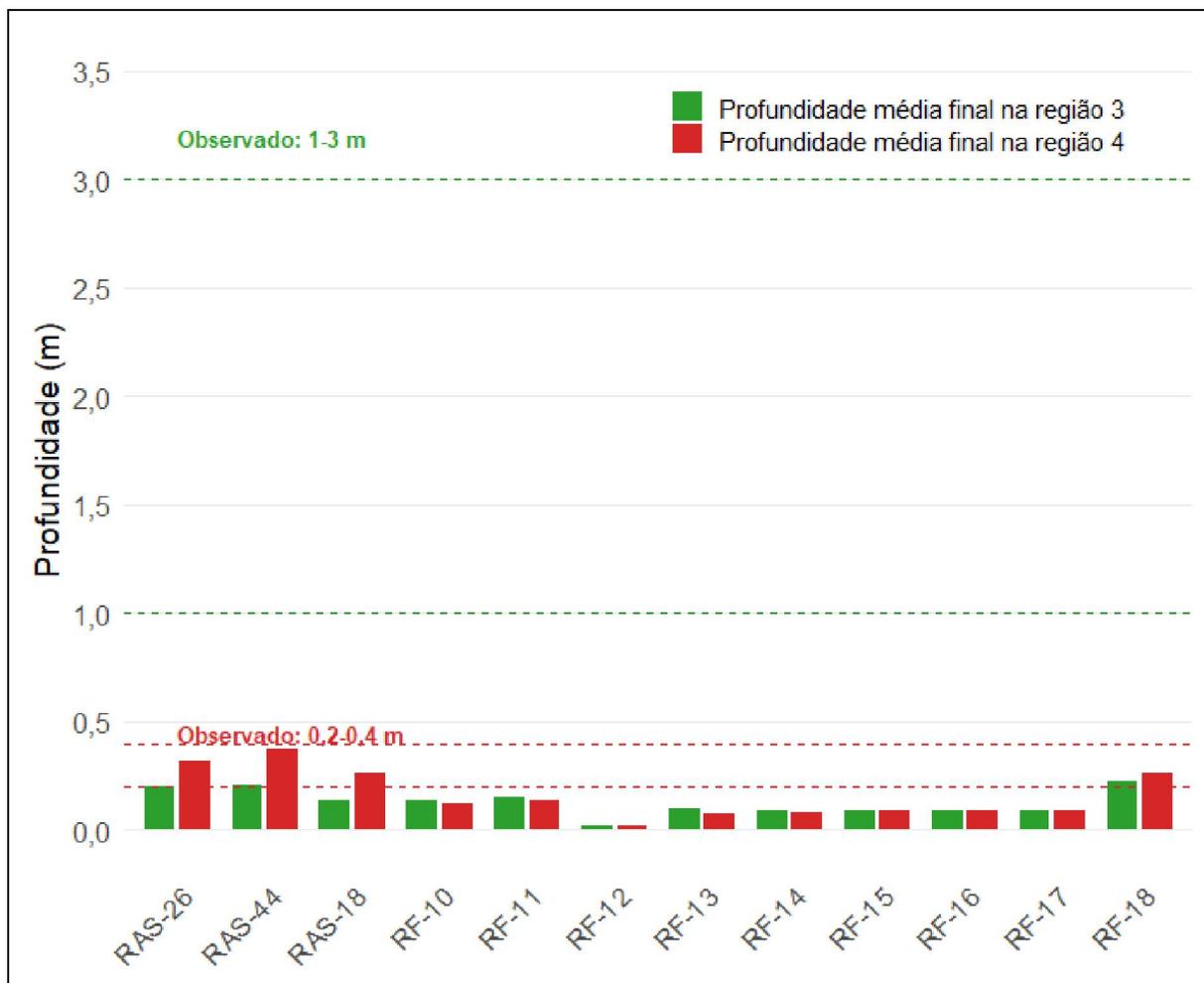
GRÁFICO 4-3 – COMPARAÇÃO – ENVOLTÓRIAS MÁXIMAS - BINGHAM – HEC-RAS e QUADRÁTICO – RIVERFLOW2D COM E SEM DEPOSIÇÃO



O GRÁFICO 4-4 apresenta a comparação entre a profundidade média final na região 3 para os modelos de Bingham no HEC-RAS sem deposição e Quadrático no RIVERFLOW2D com e sem deposição. Ambas as simulações performaram abaixo dos valores médios observados. As simulações do RIVERFLOW2D com deposição RF-13 a RF-17 tiveram pouca variação em relação ao cenário RF-10 sem deposição, exceto a simulação RF-18 (Equação de concentração de equilíbrio de Van Rijn) que teve uma profundidade média final de 22,4 cm em relação aos 14,4 cm do cenário RF-10, sendo um aumento de 55,7 %.

Como a simulação RF-18 foi a única que, ao considerar as equações de deposição, apresentou diferenças significativas nos resultados de profundidade, em relação ao cenário sem deposição, ela foi destacada e apresentada isoladamente nos gráficos a seguir.

GRÁFICO 4-4 – COMPARAÇÃO – PROFUNDIDADE MÉDIA FINAL NAS REGIÕES 3 E 4 - BINGHAM  
 – HEC-RAS e QUADRÁTICO – RIVERFLOW2D COM E SEM DEPOSIÇÃO



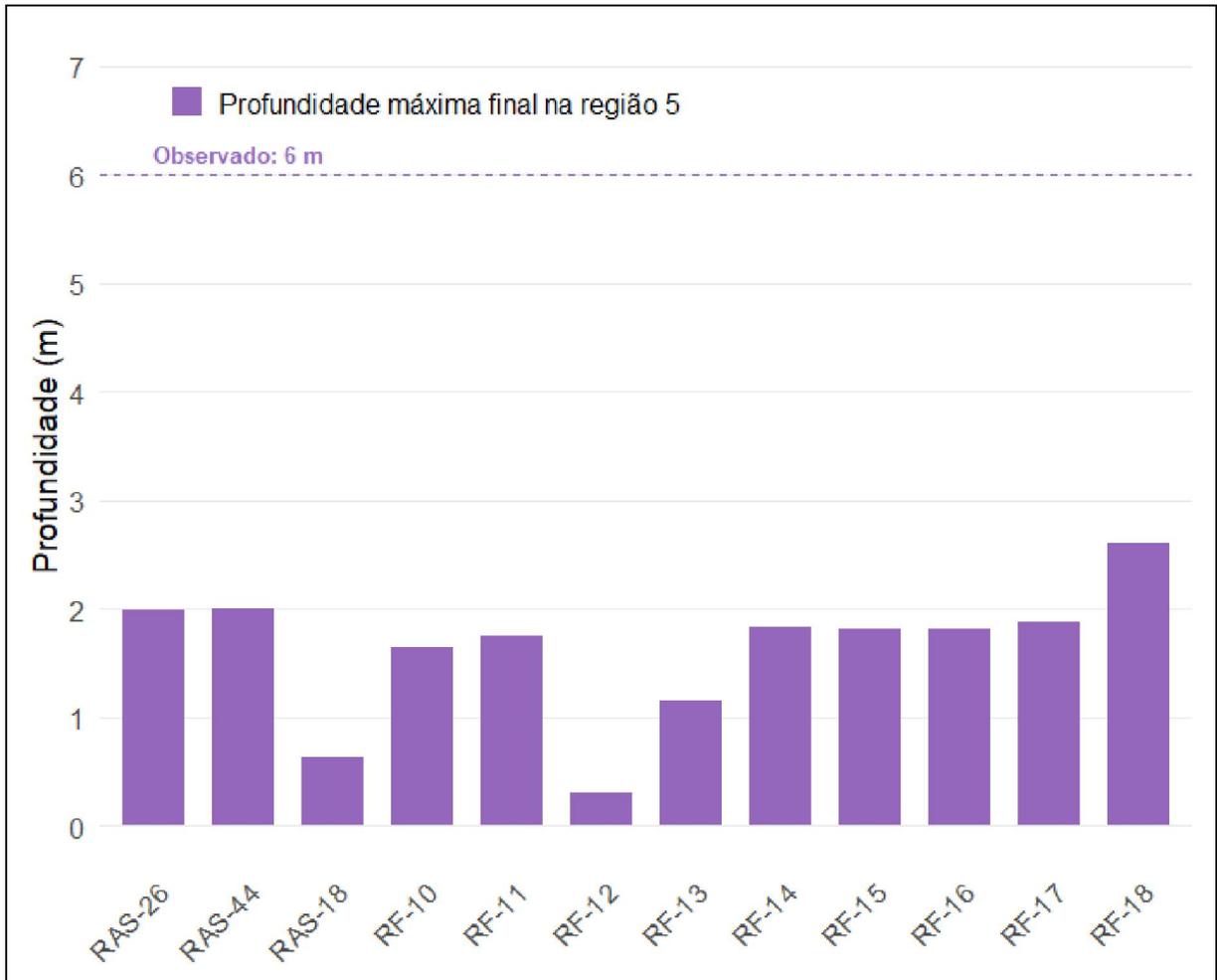
O GRÁFICO 4-4 apresenta a comparação entre a profundidade média final na região 4 para os modelos de Bingham no HEC-RAS sem deposição e Quadrático no RIVERFLOW2D com e sem deposição. O RIVERFLOW2D performou abaixo dos valores observados, exceto para a simulação RF-18 que teve um bom ajuste, assim como as simulações do HEC-RAS. As simulações com as equações de deposição RF-13 a RF-17 pouco variaram em relação ao cenário sem deposição RF-10, exceto para a RF-18 onde o aumento da profundidade final foi de 116% (12,2 cm para 26,4 cm).

A FIGURA 4-1 e a FIGURA 4-2 apresentam as profundidades finais no vale de jusante dos cenários simulados.

O GRÁFICO 4-5 apresenta a comparação entre as profundidades finais na região 5 para esse conjunto de simulações. Ambos os cenários performaram bem abaixo dos 6 metros observados. Os cenários com as equações de deposição RF-14 a RF-17 tiveram um incremento médio de 11,4 % em relação ao cenário sem

deposição RF-10, enquanto o cenário RF-18 foi de 58,3 % (1,65 m para 2,61 m). A simulação do HEC-RAS, correspondendo ao cenário RF-10, teve o valor obtido de 2,00 m.

GRÁFICO 4-5 – COMPARAÇÃO – PROFUNDIDADE MÁXIMA FINAL NA REGIÃO 5 - BINGHAM – HEC-RAS e QUADRÁTICO – RIVERFLOW2D COM E SEM DEPOSIÇÃO



O GRÁFICO 4-6 apresentam as profundidades máximas nas pontes. Em relação às simulações com e sem deposição no RIVERFLOW2D, não houve diferenças significativas.

Em relação a margem direita, em ambos os modelos numéricos foi possível obter o valor de 8,0 m, enquanto na margem esquerda, o valor de 18,0 m ficou mais próximo das simulações com menores resistências ao escoamento (RF-12 e RAS-18).

GRÁFICO 4-6 – COMPARAÇÃO – PROFUNDIDADE MÁXIMA NA MARGEM DIREITA - BINGHAM – HEC-RAS e QUADRÁTICO – RIVERFLOW2D COM E SEM DEPOSIÇÃO

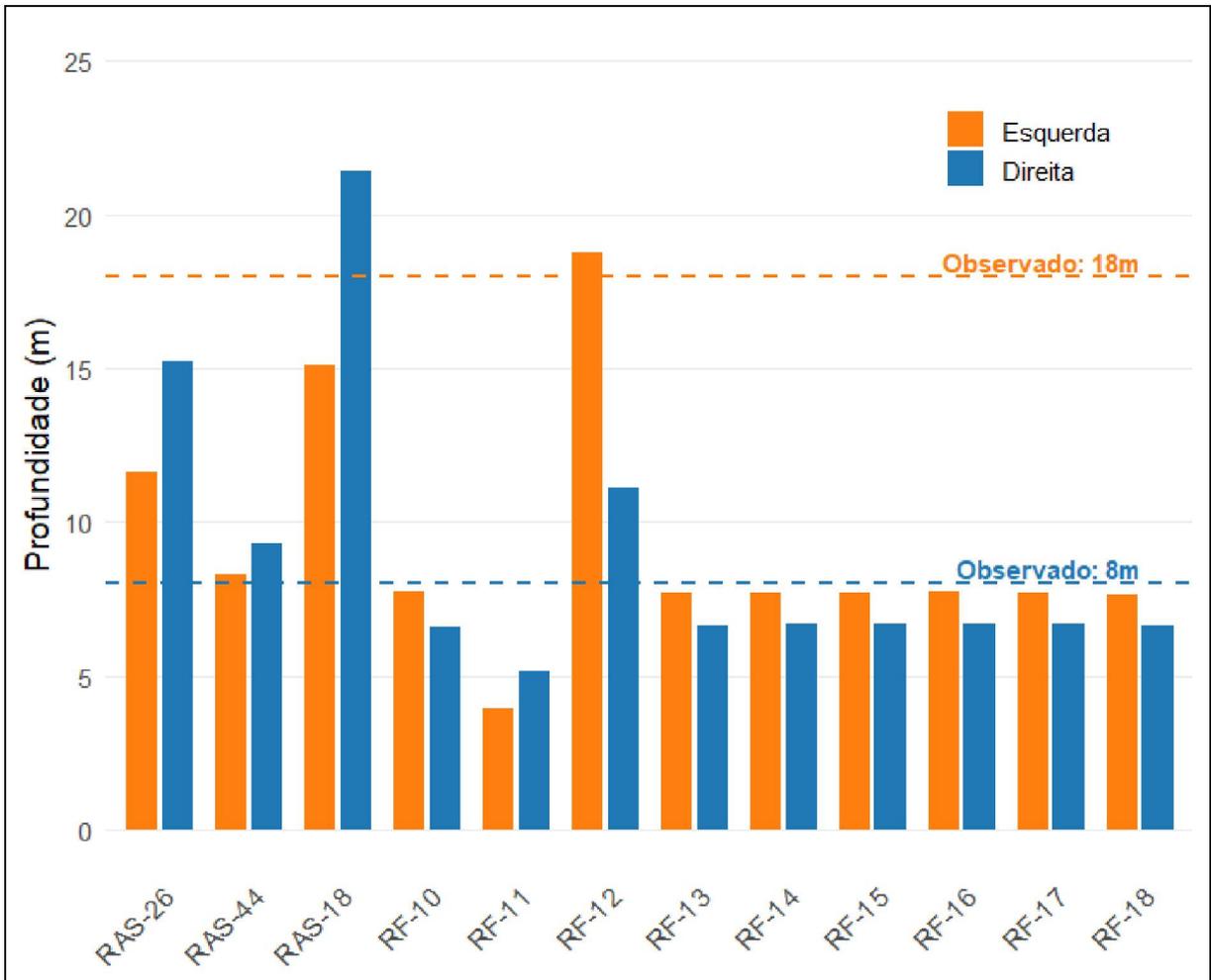


FIGURA 4-1 – COMPARAÇÃO DA PROFUNDIDADE FINAL ENTRE HEC-RAS SEM DEPOSIÇÃO E RIVERFLOW2D COM E SEM DEPOSIÇÃO

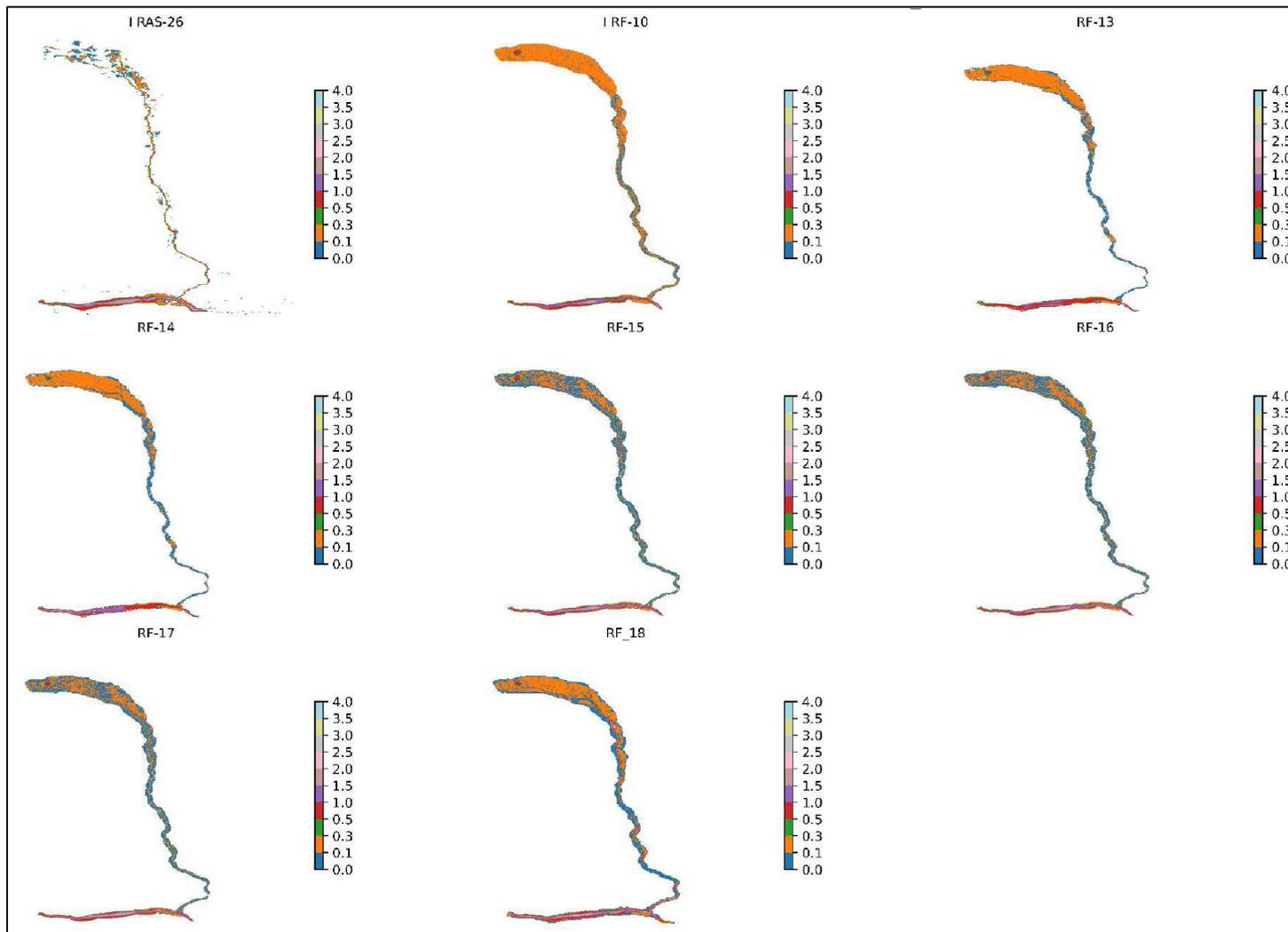
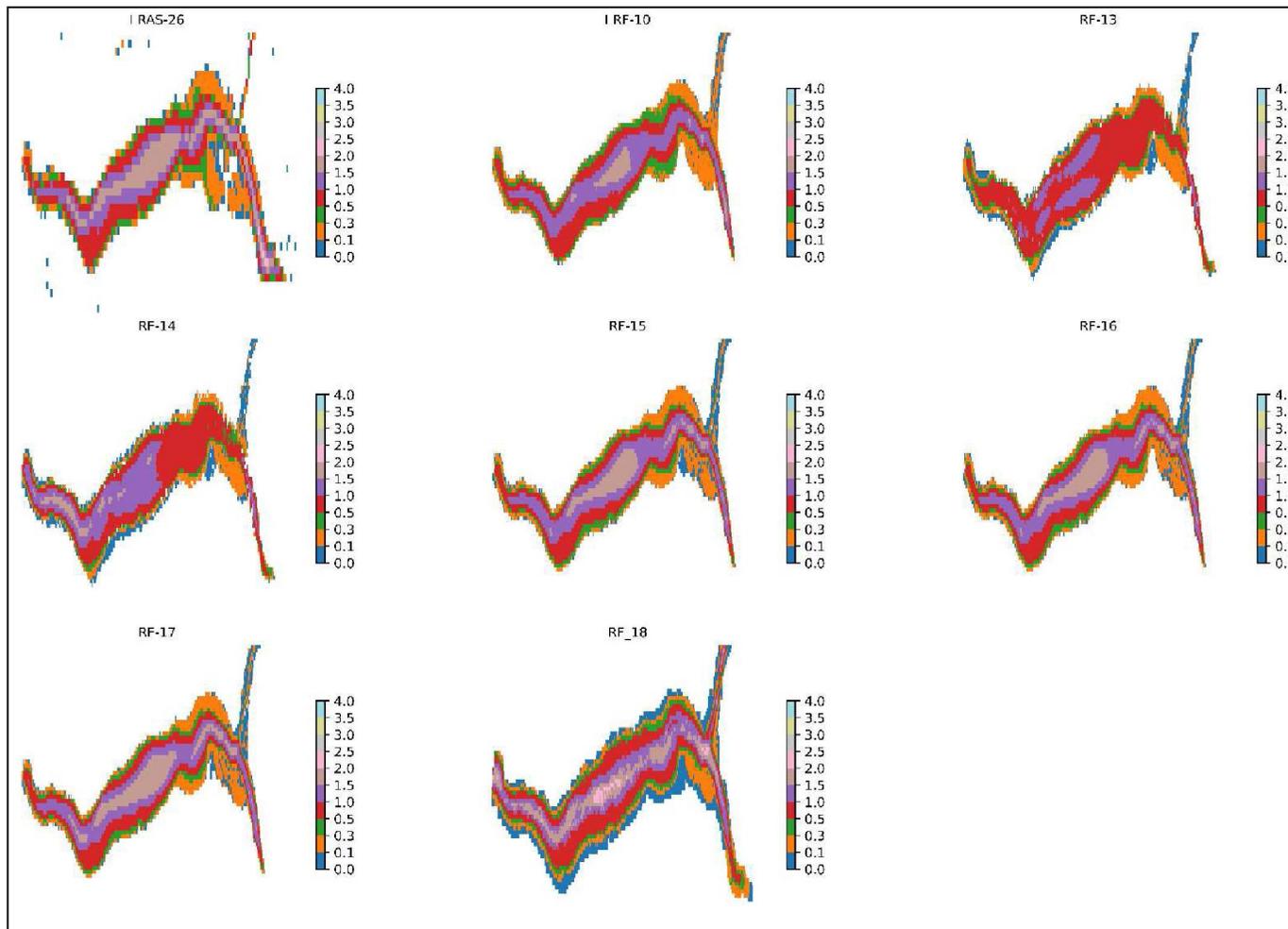


FIGURA 4-2 – COMPARAÇÃO DA PROFUNDIDADE FINAL ENTRE HEC-RAS SEM DEPOSIÇÃO E RIVERFLOW2D COM E SEM DEPOSIÇÃO

REGIÃO 5



## 5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS MODELOS REOLÓGICOS CLASTIC-GRAINFLOW-COULOMB NO HEC-RAS E TURBULENT-COULOMB NO RIVERFLOW2D

### 5.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO

A TABELA 5-1 apresenta os cenários com os modelos reológicos CLASTIC GRAINFLOW COULOMB no HEC-RAS e TURBULENT COULOMB no RIVERFLOW2D no módulo de leito fixo, enquanto o ANEXO 1 os resultados detalhados para consulta.

TABELA 5-1 – CENÁRIOS COM O MODELO REOLÓGICO CLASTIC-GRAINFLOW COULOMBO NO HEC-RAS E TURBULENT-COULOMB NO RIVERFLOW2D

ID	Modelo reológico	Coefficiente de rugosidade ( $m^{-1} s$ )	Ângulo de atrito interno (°)
RAS-1	<i>Clastic-Grainflow Coulomb</i>	0,040	2,5
RAS-2	<i>Clatic-Grainflow Coulomb</i>	0,040	5,0
RAS-3	<i>Clatic-Grainflow Coulomb</i>	0,040	8,0
RAS-4	<i>Clatic-Grainflow Coulomb</i>	0,040	12,0
RAS-5	<i>Clatic-Grainflow Coulomb</i>	0,040	15,0
RAS-6	<i>Turbulent-Coulomb</i>	0,040	2,5
RAS-7	<i>Turbulent-Coulomb</i>	0,040	5,0
RAS-8	<i>Turbulent-Coulomb</i>	0,040	8,0
RAS-9	<i>Turbulent-Coulomb</i>	0,040	12,0
RAS-10	<i>Turbulent-Coulomb</i>	0,040	15,0

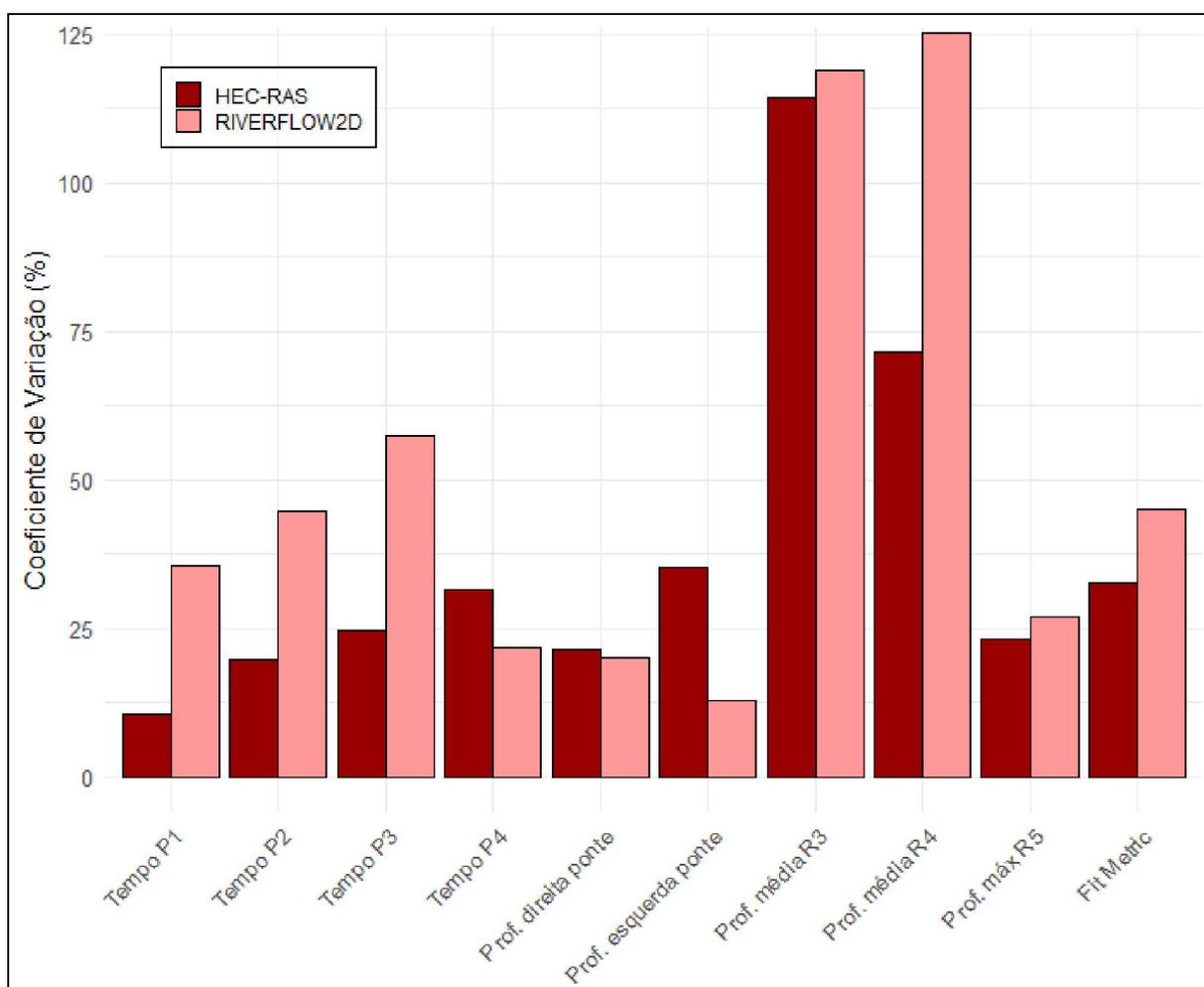
O GRÁFICO 5-1 sintetiza os coeficientes de variação obtidos para esse conjunto de simulações no HEC-RAS e RIVERFLOW2D.

A análise quantitativa dos resultados mostra que, para o tempo de chegada, o HEC-RAS apresentou 22% de variação, enquanto o RIVERFLOW2D teve 40%. Na profundidade nas pontes, o HEC-RAS registrou 28% de variação, contra 16% do RIVERFLOW2D. Para a profundidade média final nas regiões 3 e 4, o HEC-RAS teve 93% de variação, e o RIVERFLOW2D, 122%. Na profundidade máxima final na região 5, o HEC-RAS variou 23%, e o RIVERFLOW2D, 27%. Por fim, na métrica de ajuste,

o HEC-RAS apresentou 33% de variação, e o RIVERFLOW2D, 45%, com o RIVERFLOW2D novamente com maior variação.

Em resumo, o RIVERFLOW2D demonstrou maior sensibilidade em 4 dos 5 parâmetros analisados, porém em magnitudes semelhantes com o HEC-RAS, enquanto nele a maior variação foi na profundidade máxima das pontes. Ambos os modelos numéricos apresentaram maior sensibilidade nas profundidades finais nas regiões 3 e 4.

GRÁFICO 5-1 - COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO NO HEC-RAS E RIVERFLOW2D<sup>5</sup>



Fonte: O autor (2025)

O ângulo de atrito interno impactou significativamente o escoamento, com algumas simulações não atingindo pontos de interesse. No RIVERFLOW2D, com 8°, o escoamento não chegou ao ponto 4; com 12°, não atingiu os pontos 2, 3 e 4; e com

<sup>5</sup> O passo a passo para obtenção dos coeficientes de variação pode ser consultado no item 3.7.2 e a localização dos pontos e das regiões podem ser consultados na FIGURA 3-10

15°, não alcançou os pontos 1, 2, 3 e 4. No HEC-RAS, com 12° e 15°, o escoamento não alcançou os pontos 2, 3 e 4.

Por isso, nas análises seguintes, serão comparadas apenas as simulações do HEC-RAS com 2,5° e 5° e do RIVERFLOW2D com 2,5° e 5°, em relação aos modelos reológicos de Bingham (HEC-RAS) e Quadrático (RIVERFLOW2D). No item 6 é discutido sobre os ângulos obtidos em relação a literatura.

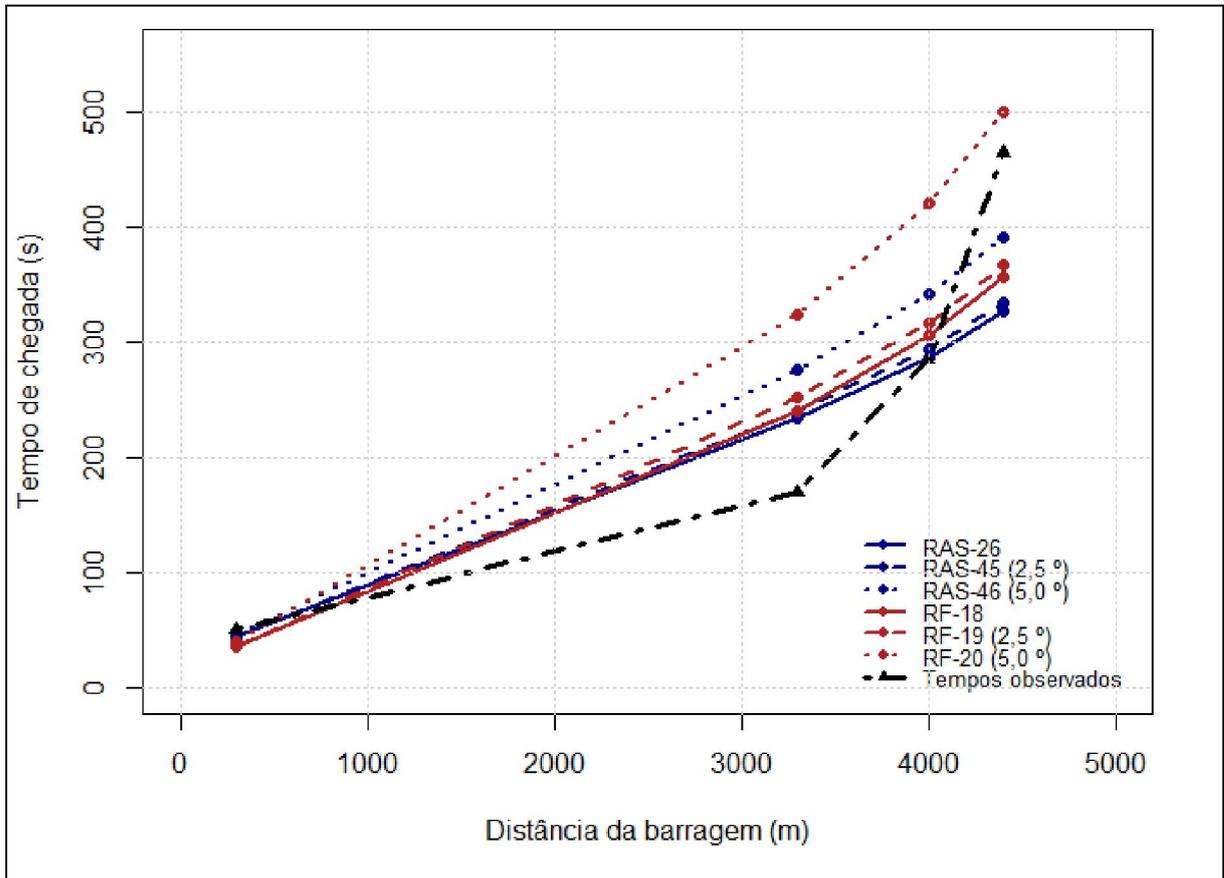
## 5.2 COMPARAÇÃO COM OS MODELOS REOLÓGICOS BINGHAM NO HEC-RAS E QUADRÁTICO NO RIVERFLOW2D

### 5.2.1 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS

Os gráficos deste subcapítulo apresentam a análise dos resultados simulados em comparação com os dados observados, que podem ser representados por um valor médio ou uma faixa de valores, conforme o banco de dados previamente apresentado. Por exemplo, as profundidades médias finais são representadas por meio de uma faixa de valores.

O GRÁFICO 5-2 apresenta a evolução dos tempos de chegada no vale de jusante do modelo numérico. Observa-se valores similares entre os modelos numéricos para o ângulo de 2,5°, se assemelhando aos cenários RF-18 e RAS-26. Com ângulo de 5,0°, o tempo de chegada no ponto 4 se aproxima ao observado.

GRÁFICO 5-2 – COMPARAÇÃO – TEMPO DE CHEGADA– BINGHAM (HEC-RAS), QUADRÁTICO (RIVERFLOW2D) E COULOMB (HEC-RAS/RIVERFLOW2D)<sup>6</sup>



O parâmetro de ajuste *FITMETRIC* apresentou uma relação inversa com o ângulo de atrito interno nos modelos reológicos de Coulomb em ambos os softwares, HEC-RAS e RiverFlow2D. Para o HEC-RAS, o melhor ajuste ocorreu com um ângulo de 2,5°, na simulação RAS-45 (66,43%), enquanto no RiverFlow2D o melhor ajuste também foi com 2,5°, na simulação RF-19 (62,20%). Para o ângulo de 5°, os valores obtidos foram de 63,59% no HEC-RAS e 59,40 % no RIVERFLOW2D. A partir desse ângulo, o ajuste piorou significativamente (RAS-49, 24,89%; RF-23, 17,75%).

O melhor ajuste *FITMETRIC*, de Coulomb no HEC-RAS (RAS-45, 66,43%), teve um ajuste superior ao modelo de Bingham (RAS-26, 62,74%). No RIVERFLOW2D, com o melhor ajuste *FITMETRIC* de Coulomb (RF-19, 62,2%) tendo um ajuste superior ao modelo Quadrático (RF-18, 57,29%).

A FIGURA 5-1 apresenta as envoltórias dos cenários RF-19 (2,5°), RF-20 (5°),

<sup>6</sup> A localização dos pontos e das regiões podem ser consultados na FIGURA 3-10.

RF-22 (12°), RAS-45 (2,5°), RAS-46 (5°), RAS-48 (12°), RF-18 (250 Pa, 10 Pa.s), RAS-26 (250 Pa, 10 Pa.s) e observada. Ambos os cenários foram simulados com rugosidade  $0,040 \text{ m}^{-\frac{1}{3}} \text{ s}$ . Observa-se tendência parecida entre modelos.

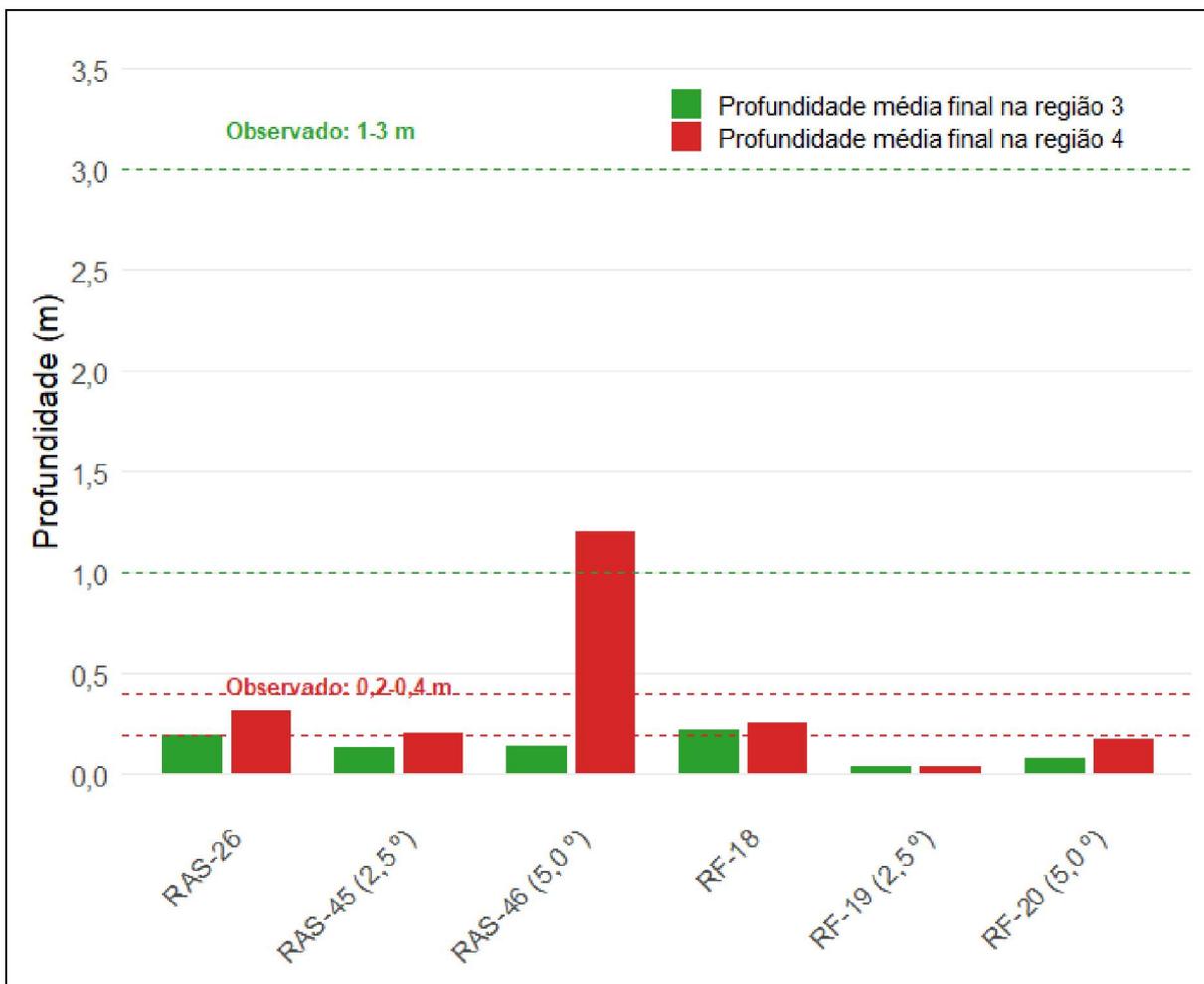
Em relação a profundidade média final na região 3, ambos os modelos reológicos e numéricos apresentaram valores inferiores aos observados conforme ilustrado no GRÁFICO 5-3, além de similares entre si.

Em relação a profundidade média final na região 4 (GRÁFICO 5-3), O modelo numérico HEC-RAS apresentou valores mais altos, enquanto o RiverFlow2D mostrou o oposto para o modelo de Coulomb. Já nas simulações RAS-26 e RF-18, os resultados foram próximos aos observados, conforme já discutido anteriormente.

FIGURA 5-1 – COMPARAÇÃO – ENVOLTÓRIA – BINGHAM (HEC-RAS), QUADRÁTICO (RIVERFLOW2D) E COULOMB (HEC-RAS/RIVERFLOW2D)

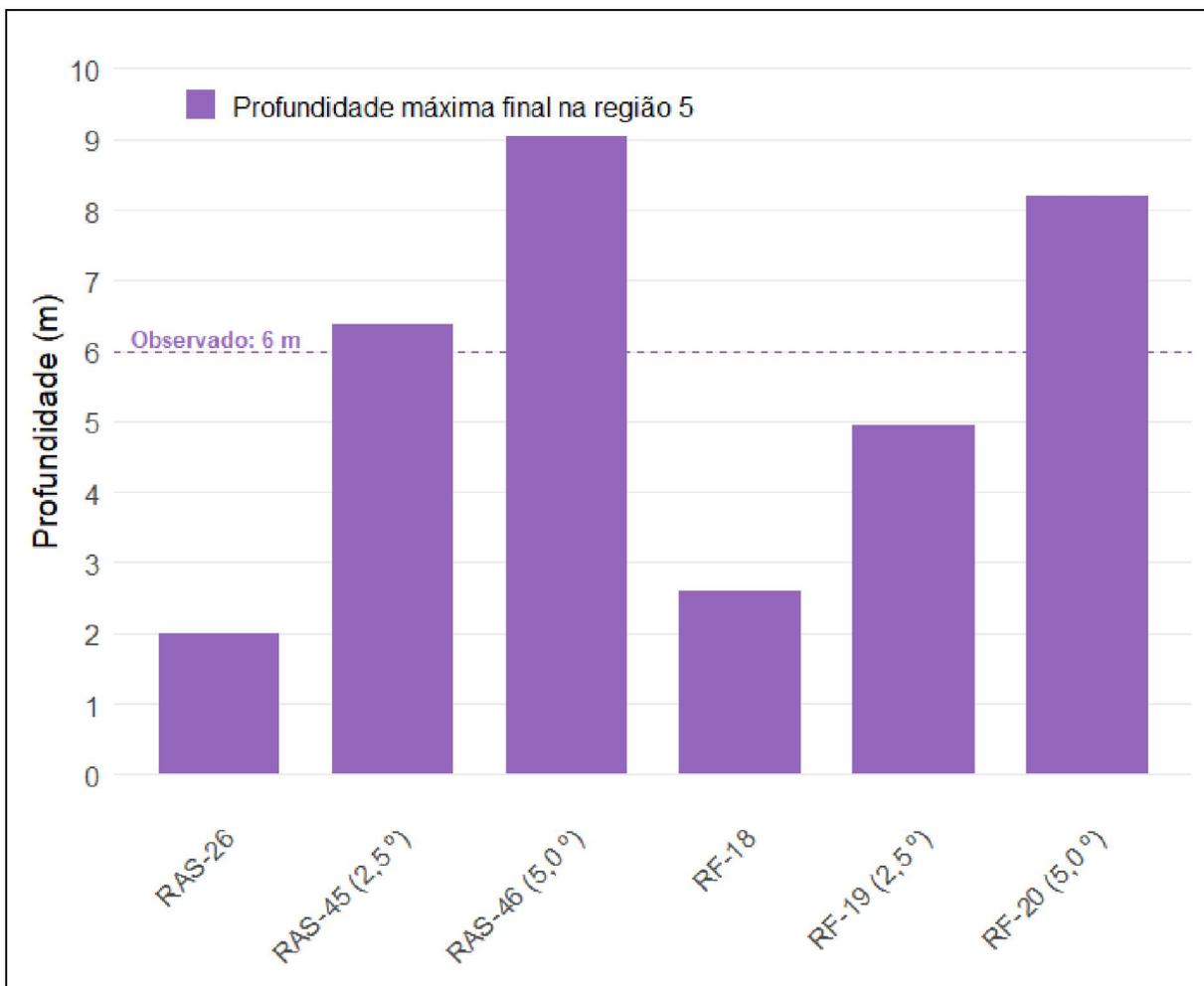


GRÁFICO 5-3 – COMPARAÇÃO – PROFUNDIDADE MÉDIA FINAL NAS REGIÕES 3 E 4 – BINGHAM (HEC-RAS), QUADRÁTICO (RIVERFLOW2D) E COULOMB (HEC-RAS/RIVERFLOW2D)



Em relação a profundidade final na região 5 (GRÁFICO 5-4) observa-se maior aderência aos dados observados com o modelo reológico de *Coulomb*. Sendo que para 2,5° foram obtidas as profundidades de 4,96 m e 6,37 m no RIVERFLOW2D e HEC-RAS, respectivamente, e para 5° de 8,20 m e 9,03 m, sendo que o valor observado foi de 6,0 m. Os cenários RAS-26 e RF-18 obtiveram, conforme já apresentado anteriormente, 2,00 m e 2,61 m, respectivamente.

GRÁFICO 5-4 – COMPARAÇÃO – PROFUNDIDADE MÁXIMA FINAL NA REGIÃO 5 – BINGHAM (HEC-RAS), QUADRÁTICO (RIVERFLOW2D) E COULOMB (HEC-RAS/RIVERFLOW2D)



Em relação as profundidades a montante das pontes, com o modelo reológico de *Coulomb*, os resultados não se aproximaram da diferença de 10 m entre as margens, obtendo valores próximos entre elas, para ambos os modelos numéricos.

No entanto, considerando a margem direita, os valores foram similares ao observado de 8 m.

A FIGURA 5-2 e a FIGURA 5-3 apresentam de forma espacial as profundidades finais nas regiões 3, 4 e 5 para análises detalhadas.

GRÁFICO 5-5 – COMPARAÇÃO – PROFUNDIDADE MÁXIMA NAS MARGENS DIREITA E ESQUERDA DA PONTE – BINGHAM (HEC-RAS), QUADRÁTICO (RIVERFLOW2D) E COULOMB (HEC-RAS/RIVERFLOW2D)

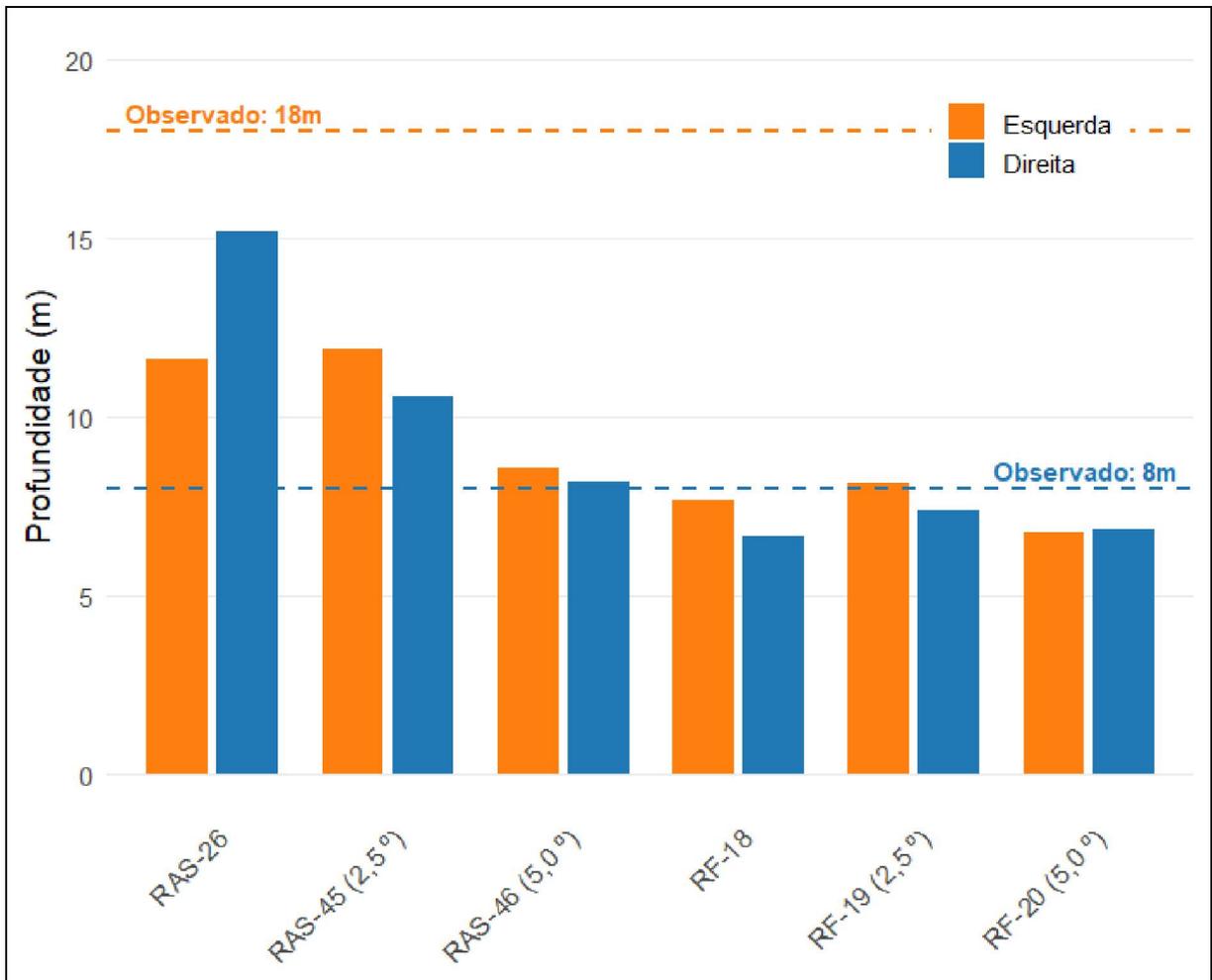


FIGURA 5-2 – COMPARAÇÃO – PROFUNDIDADE FINAL – BINGHAM (HEC-RAS), QUADRÁTICO (RIVERFLOW2D) E COULOMB (HEC-RAS/RIVERFLOW2D)

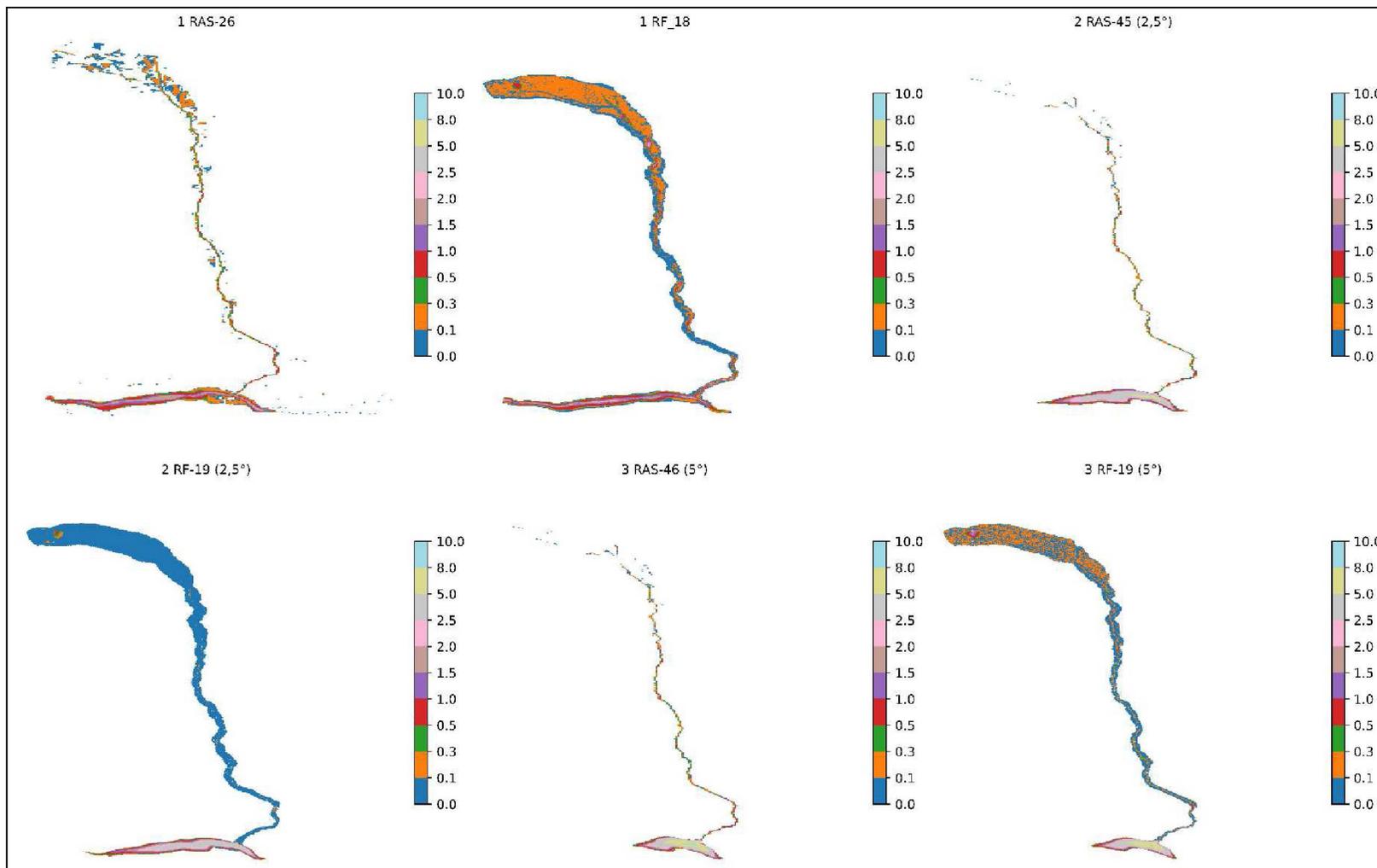
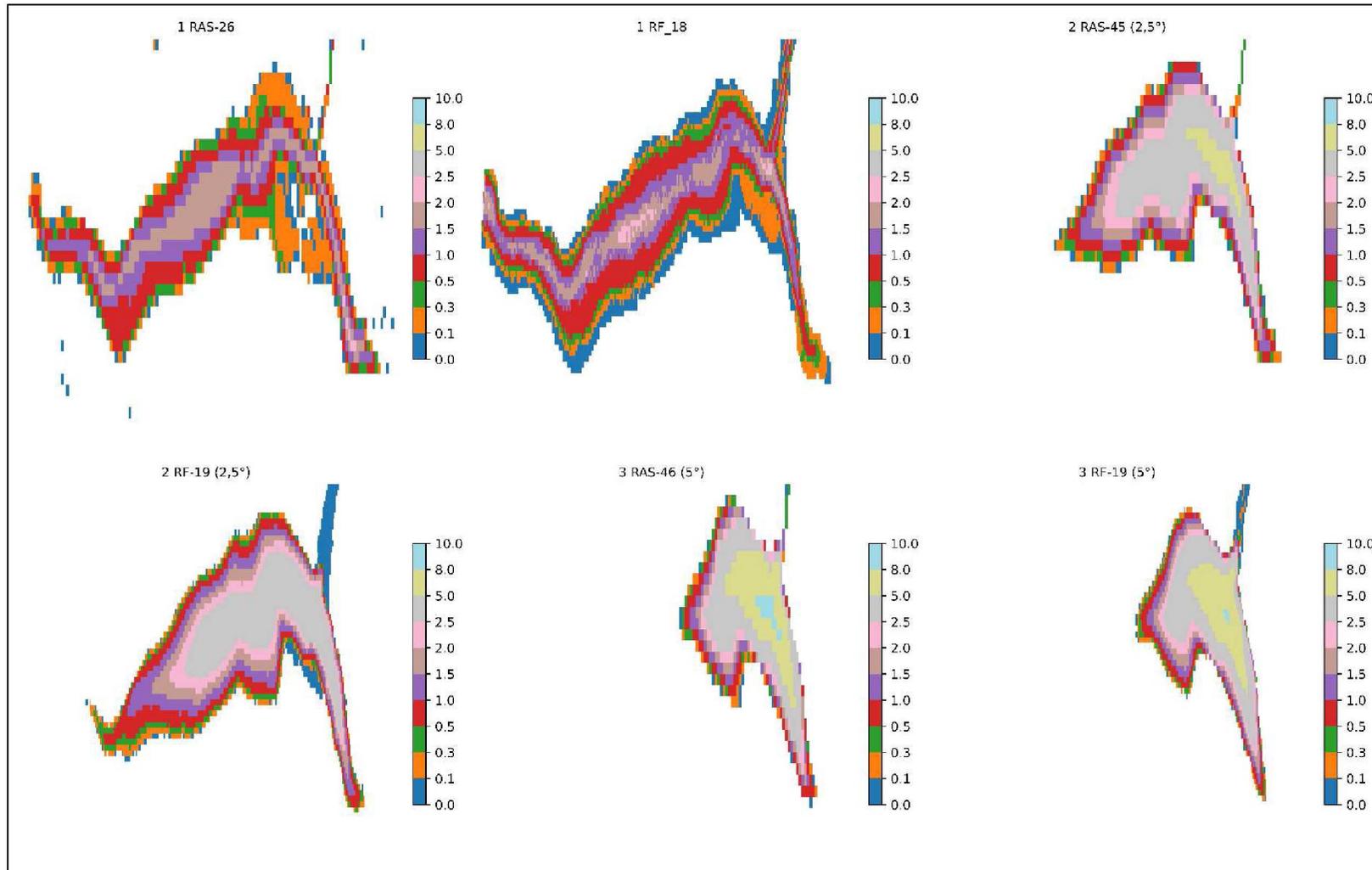


FIGURA 5-3 – COMPARAÇÃO – PROFUNDIDADE FINAL NA REGIÃO 5 – BINGHAM (HEC-RAS), QUADRÁTICO (RIVERFLOW2D) E COULOMB (HEC-RAS/RIVERFLOW2D)



## 5.2.2 AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO GLOBAL

A TABELA 5-2 apresenta a avaliação do índice de desempenho global dos cenários RF-18, RF-19, RF-20, RAS-26, RAS-45 e RAS-46. Os cenários RF-18 e RAS-26 correspondem aos modelos reológicos de Bingham e Quadrático (ambos com tensão limite de escoamento de 250 Pa, viscosidade de 10 Pa.s e rugosidade de *Manning* de  $0,040 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ , enquanto os demais cenários correspondem aos modelos reológicos baseado em *Mohr-Coulomb* com ângulos de atrito interno de  $2,5^\circ$  e  $5^\circ$ , com a componente de turbulência de fundo ativada com  $0,040 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ .

Salienta-se que a comparação entre os cenários RAS-26 e RF-18 deve ser feita com cautela, uma vez que os parâmetros do RIVERFLOW2D foram simulados com base no melhor ajuste obtido do HEC-RAS.

Os resultados do Índice de Desempenho para o tempo de chegada apresentaram melhores ajustes para o modelo numérico HEC-RAS. Em relação aos modelos reológicos Coulomb x Bingham, em ambos os modelos numéricos o índice ficou parecido entre eles, considerando a simulação de  $2,5^\circ$ .

Em relação as profundidades, as simulações de Coulomb com  $2,5^\circ$  desempenharam melhor, com valor ligeiramente superior no HEC-RAS.

Em relação ao *FITMETRIC*, para cada modelo numérico as simulações de Coulomb com  $2,5^\circ$  desempenharam melhor, sendo que as simulações no HEC-RAS tiveram valores superior ao RIVERFLOW2D (RAS-26: 62,7%, RAS-45: 66,4%, RAS-46: 63,6%, RF-18: 57,3%, RF-19: 62,2%, RF-20: 59,4%).

Por fim, o Índice de Desempenho Global apresentou que os modelos reológicos de *Coulomb* foram superiores em cada modelo numérico.

TABELA 5-2 – ÍNDICE DE DESEMPENHO GLOBAL – BINGHAM (HEC-RAS), QUADRÁTICO (RIVERFLOW2D) E COULOMB (HEC-RAS/RIVERFLOW2D)<sup>7</sup>

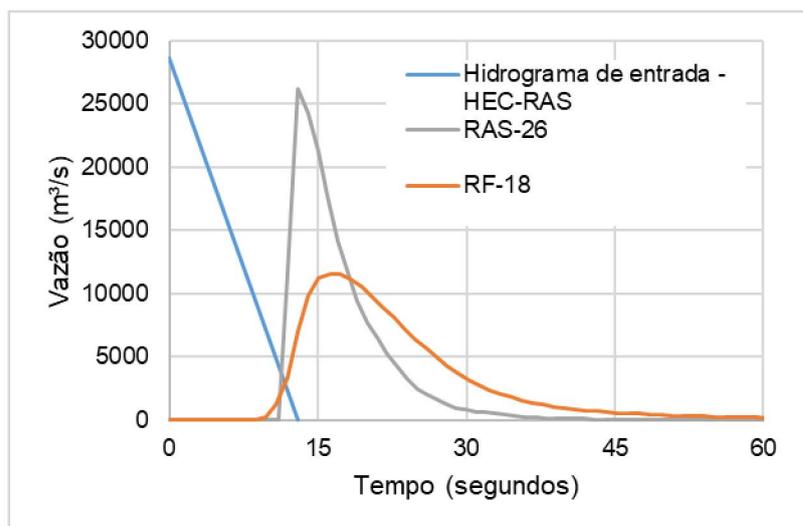
ID	Modelo Reológico	Coeficiente de rugosidade ( $m^{-1/3} s$ )	Tensão limite de escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)	Ângulo de atrito interno (°)	TEMPO DE CHEGADA					PROFUNDIDADE					ÁREA INUNDADA	GPI FINAL $\frac{a + b + c}{3}$	
						Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média (a)	ME Ponte Prof. Máxima	MD Ponte Prof. Máxima	Prof. Média Final Região 3	Prof. Média Final Região 4	Prof. Máxima Final Região 5	Média (b)		Fit Metric (c)
RAS-26	Bingham	0,04	250	10	-	0,00	1,00	1,00	0,00	0,50	1,00	0,09	1,00	1,00	0,00	0,62	0,00	0,37
RAS-45	Clastic Grain Flow Coulomb	0,04	-	-	2,5	0,00	0,88	0,87	0,13	0,47	0,34	0,00	0,00	0,92	1,00	0,45	1,00	0,64
RAS-46	Clastic Grain Flow Coulomb	0,04	-	-	5	1,00	0,00	0,00	1,00	0,50	0,00	1,00	0,14	0,00	0,27	0,28	0,24	0,34
RF-18	Quadrático	0,04	250	10	-	0,00	1,00	1,00	0,00	0,50	0,65	0,00	1,00	1,00	0,00	0,53	0,00	0,34
RF-19	Turbulent Coulomb	0,04	-	-	2,5	0,00	0,87	0,91	0,14	0,48	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,60	1,00	0,69
RF-20	Turbulent Coulomb	0,04	-	-	5	1,00	0,00	0,00	1,00	0,50	0,00	0,28	0,22	0,59	0,51	0,32	0,44	0,42
Alta classificação																		
Média classificação																		
Baixa classificação																		

<sup>7</sup> A localização dos pontos e das regiões podem ser consultados na FIGURA 3-10.

### 5.2.3 AVALIAÇÃO DOS HIDROGRAMAS DE RUPTURA

O GRÁFICO 5-6 apresenta os hidrogramas mobilizados no HEC-RAS e RIVERFLOW2D. Conforme descrito no item 3.5, o HEC-RAS teve como entrada um hidrograma de ruptura triangular com área igual ao volume mobilizado do evento, enquanto o RIVERFLOW2D foi um arquivo matricial feito com base nas informações geométricas disponíveis do empreendimento. Nessa gráfico, além do hidrograma triangular, são apresentados os hidrogramas propagados das simulações RAS-26 e RF-18 para comparação, localizadas a 100 m da base do talude de jusante do reservatório inferior. Observa-se que o hidrograma de ruptura do HEC-RAS já teve uma espalhamento inicial, porém com picos superiores ao mobilizado no RIVERFLOW2D. Foi calculado o volume desses dois hidrogramas propagados e obteve-se volumes mobilizados similares (diferença de 0,31%).

GRÁFICO 5-6 – COMPARAÇÃO – HIDROGRAMAS MOBILIZADOS – HEC-RAS E RIVERFLOW2D



O GRÁFICO 5-7 apresenta a comparação entre os modelos reológicos de Bingham (RF-26) e Coulomb (2,5° e 5°) no HEC-RAS, em uma seção a 500 m a jusante da base do talude de jusante, onde observa-se uma semelhança entre a propagação dos hidrogramas de ruptura. No GRÁFICO 5-8 é observada a mesma consideração para o RIVERFLOW2D. A tendência do hidrograma de ruptura dos cenários do HEC-RAS com maiores picos e menores base em relação ao RIVERFLOW2D se mantém. No GRÁFICO 5-9 e no GRÁFICO 5-10 as considerações acima são mantidas para uma seção localizada próximo ao ponto 3, a montante das pontes, exceto para as simulações com ângulo de 5° que já apresentam maior amortecimento do hidrograma.

GRÁFICO 5-7 – COMPARAÇÃO – ST-01 – HEC-RAS

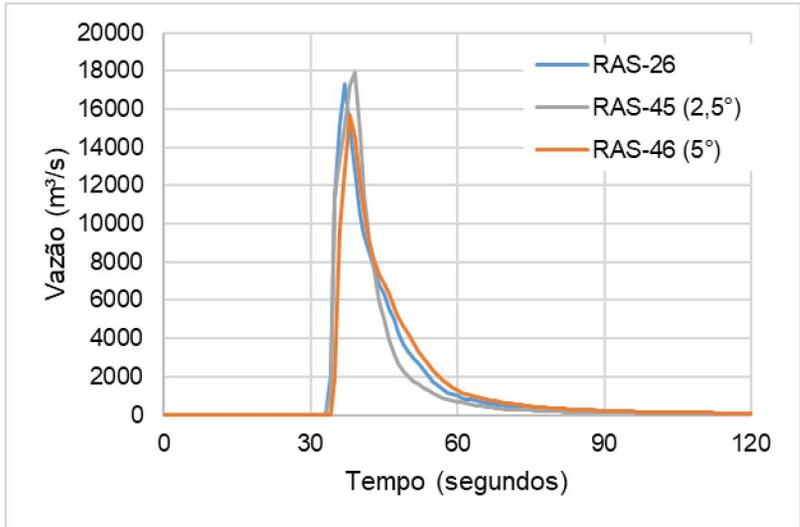


GRÁFICO 5-8 – COMPARAÇÃO – ST-01 – RIVERFLO2D

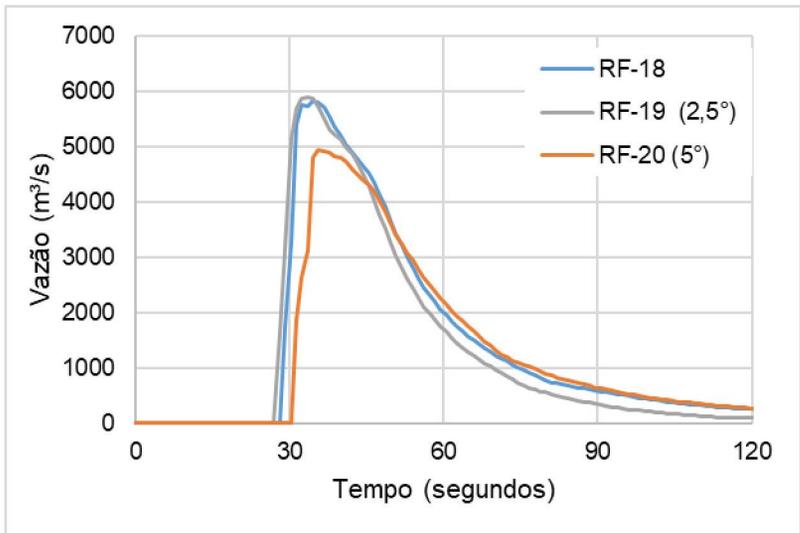


GRÁFICO 5-9 – COMPARAÇÃO – ST-02 – HEC-RAS

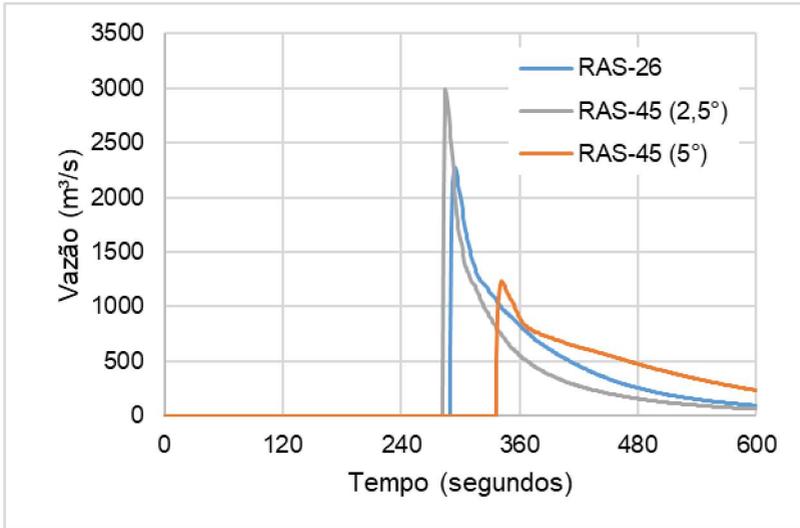
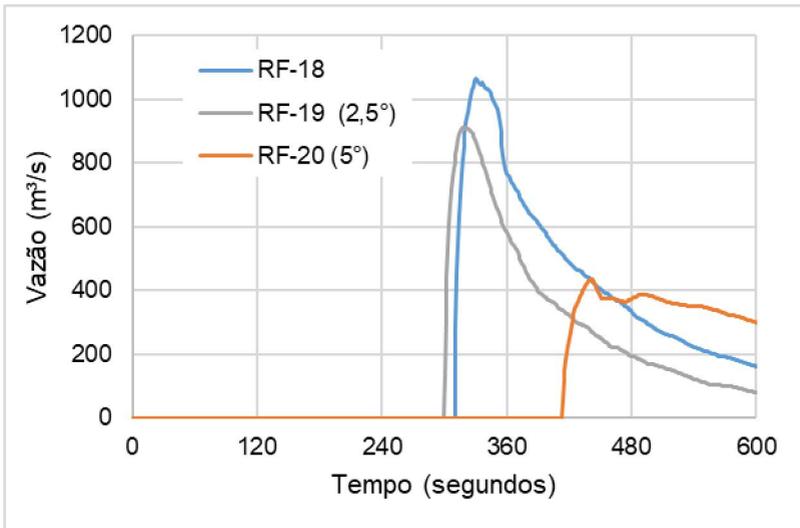


GRÁFICO 5-10 – COMPARAÇÃO – ST-02 – RIVERFLO2D



#### 5.2.4 AVALIAÇÃO DAS TENSÕES CISALHANTES

O vale a jusante do evento apresenta declividade entre 7% e 10%, com deságue em no rio Avisio em declividade inferior (região 5). Uma vez que a declividade do terreno influencia diretamente as velocidades e profundidades, é um fator importante para análises das tensões cisalhantes decorrentes dos dados de entrada.

Nesse capítulo serão apresentadas e discutidas as tensões cisalhantes de fundo (rugosidade), viscosas, limite de escoamento e de fricção de *Coulomb*, retomando a teoria dos equacionamentos apresentados no item 2.5.

Em relação a tensão cisalhante de fundo (rugosidade) temos ela descrita como *Bottom Turbulent Shear Stress* no HEC-RAS e *Turbulent Shear Stress* no RIVERFLOW2D. O equacionamento em ambos os modelos numéricos é similar, mantendo uma relação quadrática com a velocidade do escoamento.

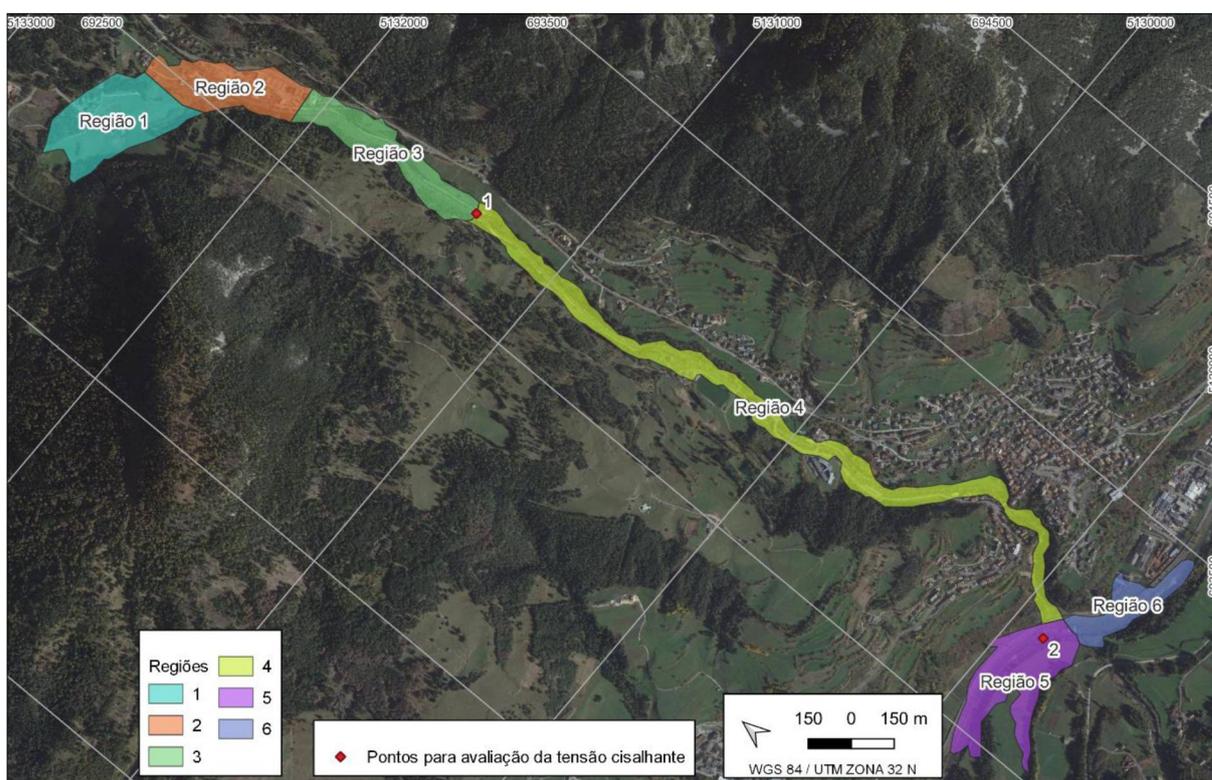
Em relação a tensão viscosa, dada pelo produto da viscosidade pela taxa cisalhante, ambos modelos numéricos utilizam a razão entre a velocidade e a profundidade do escoamento para estimativa da taxa cisalhante ( $\frac{3u}{h}$ ).

A tensão limite de escoamento é um valor introduzido pelo modelador (dado de entrada) a partir da interpretação dos ensaios reológicos ou referências bibliográficas. Uma vez que nesse estudo a concentração volumétrica não variou, essa tensão permaneceu constante a partir do valor de entrada inserido em cada simulação.

Por fim, a tensão de fricção baseada em Mohr-Coulomb apresenta em ambos os modelos numéricos uma relação direta com a profundidade do escoamento e a tangente do ângulo de atrito interno.

Para análises das tensões cisalhantes serão utilizados dois pontos no vale de jusante, sendo o primeiro na interseção entre as regiões 3 e 4, na calha do talvegue, para verificar as tensões em região com alta declividade, enquanto o segundo a 100 m da confluência entre o talvegue do empreendimento e o rio Avisio (Região 5) que apresenta declividade menor (FIGURA 5-4).

FIGURA 5-4 – PONTOS PARA ANÁLISE DAS TENSÕES CISALHANTES



A TABELA 5-3 apresenta as tensões cisalhantes no Ponto 1, enquanto a TABELA 5-4 as tensões no Ponto 2.

Ao comparar as simulações RAS-1 e RAS-7, que consideram uma variação da tensão limite de escoamento de 1 Pa a 500 Pa, observa-se que, na simulação RAS-1, a tensão de fundo alcança 491 Pa, valor significativamente superior à tensão limite de escoamento de apenas 1 Pa. Na simulação RAS-7, por sua vez, a tensão de fundo é de 694 Pa, com a tensão limite fixada em 500 Pa. Essa configuração reduz expressivamente a parcela da tensão atribuída à rugosidade, que passa a representar cerca de 50% da tensão total atuante.

No Ponto 2, onde as velocidades são menores, a fricção de fundo continua relevante na simulação RAS-1, devido ao reduzido valor da tensão limite de escoamento. No entanto, na simulação RAS-7, essa tensão limite corresponde a aproximadamente 97% do total das tensões atuantes. Esse comportamento está em conformidade com as análises de sensibilidade, nas quais se observou que a profundidade na Região 5 foi mais impactada pela variação da tensão limite de escoamento.

TABELA 5-3 – TENSÕES CISALHANTES NO MODELO NUMÉRICO HEC-RAS – PONTO 1

Cenário	Modelo reológico	Coeficiente de rugosidade $(m^{-1/3} s)$	Tensão limite de escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa,s)	Ângulo de atrito interno (°)	Profundidade máxima (m)	Velocidade máxima (m)	Máximas tensões cisalhantes (Pa)							
								Fricção de fundo	(%)	Tensão limite de escoamento	(%)	Viscosa	(%)	Coulomb	(%)
RAS-1	Bingham	0,018	1	0	0	8,9	12,5	491	100%	1	0%	0	0%	0	0%
RAS-7	Bingham	0,018	500	0	0	9,7	14,1	634	56%	500	44%	0	0%	0	0%
RAS-8	Bingham	0,018	0	1	0	8,8	13,3	486	89%	0	0%	60	11%	0	0%
RAS-12	Bingham	0,018	0	100	0	4,0	11,8	501	33%	0	0%	1004	67%	0	0%
RAS-13	Bingham	0,012	0	0	0	8,1	12,6	198	100%	0	0%	0	0%	0	0%
RAS-17	Bingham	0,040	0	0	0	4,0	13,5	3244	100%	0	0%	0	0%	0	0%
RAS-26	Bingham	0,040	100	10	0	9,5	15,1	3294	94%	100	3%	124	4%	0	0%
RAS-45	Clastic-Grain Flow Coulomb	0,040	0	0	2,5	9,4	16,3	634	17%	0	0%	0	0%	3138	83%
RAS-46	Clastic-Grain Flow Coulomb	0,040	0	0	5,0	8,2	13,2	634	10%	0	0%	0	0%	5536	90%

TABELA 5-4 – TENSÕES CISALHANTES NO MODELO NUMÉRICO HEC-RAS – PONTO 2

Cenário	Modelo reológico	Coeficiente de rugosidade $(m^{-1/3} s)$	Tensão limite de escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa,s)	Ângulo de atrito interno (°)	Profundidade máxima (m)	Velocidade máxima (m)	Máximas tensões cisalhantes (Pa)							
								Fricção de fundo	(%)	Tensão limite de escoamento	(%)	Viscosa	(%)	Coulomb	(%)
RAS-1	Bingham	0,018	1	0	0	3,0	4,5	102	99%	1	1%	0	0%	0	0%
RAS-7	Bingham	0,018	500	0	0	3,6	2,0	15	3%	500	97%	0	0%	0	0%
RAS-8	Bingham	0,018	0	1	0	3,0	4,5	88	91%	0	0%	9	9%	0	0%
RAS-12	Bingham	0,018	0	100	0	3,3	3,3	42	12%	0	0%	301	88%	0	0%
RAS-13	Bingham	0,018	0	0	0	2,9	5,1	57	100%	0	0%	0	0%	0	0%
RAS-17	Bingham	0,040	0	0	0	3,4	4,8	426	100%	0	0%	0	0%	0	0%
RAS-26	Bingham	0,040	100	10	0	3,7	3,9	276	90%	0	0%	31	10%	0	0%
RAS-45	Clastic-Grain Flow Coulomb	0,040	0	0	2,5	4,7	4,2	387	20%	0	0%	0	0%	1583	80%
RAS-46	Clastic-Grain Flow Coulomb	0,040	0	0	5,0	5,5	3,4	312	8%	0	0%	0	0%	3724	92%

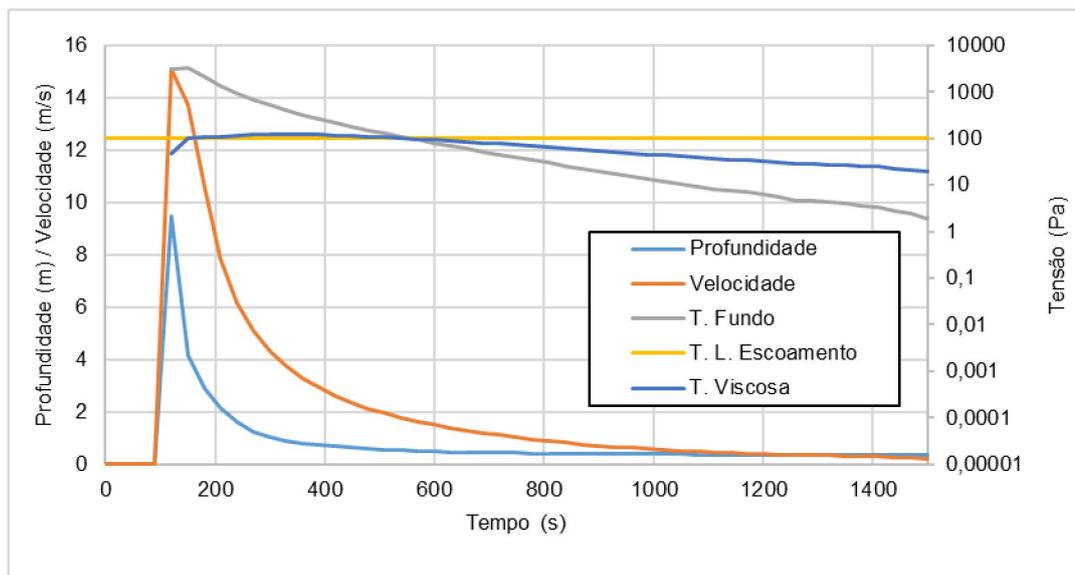
A comparação entre RAS-8 (1 Pa·s) e RAS-12 (100 Pa·s) evidencia o impacto da viscosidade na tensão viscosa, que aumenta de 60 Pa para 1001 Pa no Ponto 1 e de 9 Pa para 301 Pa no Ponto 2 — elevando sua contribuição relativa de 11% para 67% e de 9% para 88%, respectivamente, em relação a tensão de fundo. Esses resultados reforçam que a variação da viscosidade adotada na pesquisa influenciou significativamente as propriedades do escoamento.

A variação do coeficiente de *Manning* entre as simulações RAS-13 ( $0,012 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ ) e RAS-17 ( $0,040 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ ) refletiu-se diretamente nas tensões de fundo. No Ponto 1, os valores foram de 198 Pa e 3244 Pa, respectivamente, enquanto no Ponto 2 foram de 57 Pa e 426 Pa.

Em relação ao ângulo de atrito interno, tanto no ponto 1 quanto no ponto 2 e nas simulações RAS-45 e RAS-46, a tensão de Coulomb exerceu maior influência no escoamento comparada com a tensão de fundo.

Por fim, salienta-se que, nos cenários analisados, a concentração volumétrica foi mantida constante, o que resultou em parâmetros fixos de viscosidade e tensão limite de escoamento ao longo das simulações. Dessa forma, embora no pico do hidrograma, quase sempre, predominou as tensões viscosa e de rugosidade, é na recessão que a tensão limite de escoamento passa a exercer maior influência, pois permanece constante mesmo após a redução das demais tensões, contribuindo para a paralisação do escoamento. Essa análise pode ser visualizada no FIGURA 5-5.

FIGURA 5-5 – VARIAÇÃO DAS TENSÕES CISALHANTES, DA PROFUNDIDADE E DA VELOCIDADE NA SIMULAÇÃO RAS-26 NO PONTO 1



## 6 COMPARAÇÃO COM A LITERATURA

Os ângulos que proporcionaram o melhor ajuste no presente estudo variaram entre 2,5° e 5,0°, com uma tendência predominante para valores próximos a 2,5°. Os modelos reológicos friccionais CLASTIC-GRAIN-FLOW-COULOMB no HEC-RAS, Turbulento e Coulomb no RIVERFLOW2D, de Bingham no HEC-RAS e Quadrático no RIVERFLOW2D, testados neste estudo, demonstraram boa representatividade do evento após a escolha dos parâmetros. No entanto, os modelos friccionais apresentaram ajustes mais próximos aos observados, quando comparados aos demais, tanto no HEC-RAS quanto no RIVERFLOW2D. Em relação às análises de sensibilidade, o HEC-RAS apresentou menores variações nos resultados, especialmente na comparação entre os modelos reológicos Bingham e Quadrático. Isso levanta a hipótese de que o RIVERFLOW2D possa ser excessivamente sensível ou que o HEC-RAS seja excessivamente restritivo em suas simulações.

Este capítulo busca, portanto, realizar comparações com outros estudos para apoiar as análises e fornecer uma compreensão mais robusta dos resultados obtidos.

Berti et al. (1997 *apud* Pirulli et al., 2017) destacaram que a fricção desempenhou o papel mais significativo na determinação do comportamento do fluxo de detritos de Stava e subdividiram o processo de Stava em duas fases: deslizamento do fluxo (das barragens de rejeito até o riacho Stava) e fluxo de detritos (ao longo do vale do riacho Stava até a confluência do riacho Stava com o rio Avisio), e evidenciaram que o efeito de fricção prevaleceu sobre o comportamento do fluxo de detritos de Stava (Berti et al., 1997, *apud* Pirulli et al., 2017).

Pirulli (2017) estudou alguns cenários com os modelos reológicos Voellmy, Turbulento, Friccional e Bingham com o modelo numérico RASH 3D. Os resultados obtidos nas análises de Pirulli (2017) indicaram que a reologia de Voellmy, que combina um termo friccional e um turbulento, é a mais adequada para simular o evento de Stava, com a combinação mais simples de valores reológicos.

Em comparação, Naef et al. (2006) utilizaram 10° e 1,2° em diferentes modelos reológicos, testando o Turbulent Coulomb Yield (10°) e o Coulomb Viscous (1,2°), sendo que o primeiro considera também a influência da tensão de escoamento e o segundo, da viscosidade, mostrando assim a variabilidade desse parâmetro a depender do modelo reológico escolhido. Pirulli (2017) para o evento de STAVA-ITA com o modelo friccional utilizou valores entre 7° e 10° em seu modelo numérico.

Hydronia (2025) recomenda valores entre 1° e 8°, com um limite máximo de 15°, enquanto o USACE (2020) sugere uma faixa de 2,5° a 15°.

Dessa forma, conforme apresentado acima, o melhor ajuste obtido com os modelos friccionais está em conformidade com a literatura; no entanto, os ângulos obtidos foram inferiores aos utilizados nos estudos analisados, porém dentro da faixa de valores recomendadas pelos *softwares*. Vale ressaltar que, nos estudos apresentados, não foram utilizados modelos bidimensionais, como o RIVERFLOW2D e o HEC-RAS, o que limita uma comparação mais direta e precisa entre os resultados.

Ghahramani *et al* (2022) apresenta a retroanálise de STAVA-ITA utilizando diferentes modelos numéricos e reológicos. Ghahramani *et al* (2022) comenta ainda que ambos os modelos numéricos reproduziram o evento com um aceitável grau de incertezas, no entanto a seleção dos parâmetros reológicos adequados é a principal dificuldade, sendo os parâmetros não transferíveis entre modelos numéricos e reológicos. O presente estudo apresentou resultados que corroboram com esta afirmação, pois obteve para o mesmo conjunto de parâmetros, resultados distintos entre *softwares*, além de resultados similares no mesmo *software* com outro conjunto de parâmetros.

Pires, Teixeira e Fabiani (2024) testaram três combinações de parâmetros de tensão limite de escoamento e viscosidade para o evento de BRUMADINHO no HEC-RAS e RIVERFLOW2D e observou-se diferenças significativas nos resultados com os mesmo parâmetros reológicos entre modelos numéricos e que o RIVERFLOW2D apresentou maior sensibilidade no que tange a tensão limite de escoamento, também corroborando com os resultados obtidos no presente estudo.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 7.1 LIMITAÇÕES E CONSIDERAÇÕES DO ESTUDO

É fundamental ressaltar as características do evento e limitações do estudo, de modo a compreender a quais aspectos as análises podem ser representativas.

- O vale a jusante do evento apresenta declividade entre 7% e 10%, com deságue em um rio de declividade moderada;
- Durante o evento, aproximadamente 50.000 m<sup>3</sup> de árvores e detritos de construção foram arrastados, os quais não foram representados na modelagem atual, considerando-se apenas o volume inicial;
- A barragem possui uma caracterização granulométrica com duas regiões distintas, variando entre silte e areia. Os cenários realizados não englobaram a variação heterogênea do material da barragem;
- As pontes romana e nova, que não foram destruídas durante o evento, não foram incluídas no modelo atual, o que pode ter influenciado os resultados obtidos;
- O modelo digital de terreno não constitui àquele presente na ruptura desse empreendimento;
- A utilização de leito móvel no RIVERFLOW2D foi realizada com a erosão limitada a zero, permitindo apenas deposição em relação ao leito original.
- Os métodos de inserção do volume mobilizado nos modelos numéricos utilizados são distintos. Enquanto no HEC-RAS foi empregado um hidrograma triangular com área equivalente ao volume mobilizado da barragem, no RIVERFLOW2D utilizou-se um arquivo matricial baseado na conformação dos reservatórios inferior e superior. Essa consideração provocou maior pico e menor base no hidrograma de ruptura do HEC-RAS em relação ao RIVERFLOW2D, mas mantendo o volume mobilizado;
- Análise determinística de variação de parâmetros; e
- Não foi considerada vazão natural no rio Avisio, localizado na região 5.

## 7.2 CONCLUSÕES

Os modelos HEC-RAS 6.5 e RIVERFLOW2D 8.12.04 usam nomenclaturas diferentes para a mesma proposta de modelo reológico (Bingham no HEC-RAS e Quadrático no RiverFlow2D).

O modelo Quadrático no RIVERFLOW2D mostrou maior sensibilidade que o modelo Bingham no HEC-RAS, indicando que a análise de incertezas para o RIVERFLOW2D deve ser mais robusta. Contudo, o presente estudo não tem como objetivo afirmar se a variação dos resultados com a mudança dos parâmetros de entrada deva ser mais ou menos restrita.

A viscosidade e a rugosidade tiveram maior influência nas regiões 1 a 4, onde altas declividades geram maiores velocidades e tensões, enquanto a tensão limite de escoamento impactou principalmente as profundidades finais, especialmente na região de menor declividade ao final do domínio.

O encaixe da envoltória de inundação apresentou pouca variação na análise de sensibilidade, possivelmente devido ao vale de jusante ser encaixado e íngreme.

A entrada dos mesmos parâmetros em cada modelo numérico, mesmo com modelos reológicos similares, produziu resultados distintos, indicando que os parâmetros não são transferíveis entre modelos.

O modelo RIVERFLOW2D com erosão limitada a zero e deposição ativa, usando o modelo reológico Quadrático, apresentou melhor ajuste apenas na profundidade final, especialmente na região 5 de menor declividade, quando aplicado o cenário com a equação de concentração de equilíbrio de Van Rijn. As demais propriedades hidráulicas foram similares entre os cenários com e sem deposição.

Dessa forma, considerando que a legislação atual exige robustez tanto para resultados máximos quanto finais, recomenda-se que o modelador priorize, com base nos parâmetros avaliados neste estudo, o levantamento das propriedades reológicas, da rugosidade e das características geotécnicas do material da barragem. Isso não exclui a importância de outras incertezas, como a variabilidade hidrológica e do volume mobilizado.

A depender do objetivo, a análise de sensibilidade pode ser focada em menos parâmetros — por exemplo, em regiões planas e com baixas velocidades, a tensão limite de escoamento pode exigir maior atenção; já em trechos com maior declividade, altas velocidades e baixos parâmetros reológicos, esses parâmetros tendem a ter

menor influência, não necessitando de análises aprofundadas, pois a tensão de fundo predomina no escoamento.

A variação do ângulo de atrito interno impactou significativamente os resultados, com comportamentos semelhantes entre os dois softwares para os mesmos ângulos. Os melhores ajustes foram obtidos com ângulos de atrito interno entre 2,5° e 5°, enquanto valores acima de 8° resultaram em parada precoce da mancha de inundação. Os cenários com ângulo de 2,5° tiveram os melhores FITMETRIC e maiores Índices de Desempenho Global, superiores aos modelos de Bingham no HEC-RAS e Quadrático no RiverFlow2D.

Dessa forma, o uso de um modelo reológico que combine as tensões de fundo e de *Mohr-Coulomb* pode ser uma alternativa viável nas análises de sensibilidade em casos com concentrações volumétricas próximas de 50% e alta probabilidade de incorporação de vegetação densa e detritos no vale de jusante.

Por fim, salienta-se que é fundamental analisar viscosidade, rugosidade e ângulo de atrito interno em termos de tensão cisalhante (Pa), em conjunto com a tensão limite de escoamento, permitindo comparações diretas e melhor avaliação da influência de cada parâmetro conforme a topografia, profundidade e velocidade.

### 7.3 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Dessa forma, tem-se as seguintes recomendações futuras:

- Ampliar o detalhamento dos cenários simulados, considerando as limitações apresentadas no item 7.1 e buscando alternativas para contorná-las;
- Avaliar leito móvel com RiverFlow2D com maior detalhamento e outros modelos, como FLO2D, incluindo erosão do leito, para diferentes eventos históricos;
- Estudar a variação dos parâmetros reológicos em modelos reduzidos e seu impacto nos resultados para subsidiar tomadas de decisão em resultados de modelos numéricos;
- Estudo com objetivos similares com modelos reológicos para eventos em terrenos de baixa declividade, como, por exemplo, Merriespruit, na África do Sul.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adria, D. A. M., Ghahramani, N., Rana, N. M., Evans, S. G., & Take, W. A. (2023). Insights from the Compilation and Critical Assessment of Breach and Runout Characteristics from Historical Tailings Dam Failures: Implications for Numerical Modelling. *Mine Water and the Environment*, 42, 650–669. <https://doi.org/10.1007/s10230-023-00964-0>.

ANDRADE, S. B; SOUZA, W. L; ARAÚJO, A. C. G de; BECKER, A. C. C; VALE, V. L. Avaliação de softwares de modelos numéricos 2D e 3D para estudos de ruptura hipotética de barragens. II FluHidros e XVI ENES, 2024.

Bagnold, R. A. (1973): "The nature of saltation and of bed-load transport in water," *Proc. of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 332(1591), 473-504.

CDA. Technical bulletin on tailings dam breach analyses. 2021.

Chandler, R.J., Tosatti, G., 1995. The Stava tailings dams failure, Italy, July 1985. *Proc. Inst. Civ. Eng.- Geotech. Eng.* 113, 67–79. <https://doi.org/10.1680/igeng.1995.27586>.

Chen, H., Becker, D., 2014. Dam Breach Tailings Runout Analysis. Canadian Dam Association 2014 Annual Conference Banff, Alberta.

Cheng, N. S. (1997): "Simplified settling velocity formula for sediment particles," *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(2), 149-152.

EIDG. FORSCHUNGSANSTALT WSL. Geröll und Geschiebe im Illgraben: Wie kann sich die Bergbevölkerung vor Murgängen schützen? (Rochas soltas e sedimentos no Illgraben: Como a população montanhosa pode se proteger contra deslizamentos de terra?). YouTube, 2023. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=xyfreVn-j2s>. Acesso em: 29 jan. 2025.

FABIANI, A. L. T. Estudo da equação de Boussinesq em duas dimensões horizontais. Tese de Doutorado. UFPR - Programa de pós-graduação em engenharia de Recursos hídricos e ambiental (PPGERHA). Curitiba, 2016.

FABIANI, A. L. T. Notas de aulas: Escoamento não permanente em canais. UFPR - Programa de pós-graduação em engenharia de Recursos hídricos e ambiental (PPGERHA). Curitiba, 2021.

Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM). Termo de Referência para a Entrega de Estudos de Ruptura Hipotética de Barragens: Requisitos, Premissas e Conteúdo Mínimo. Belo Horizonte, MG, 2019. Disponível em: <http://www.feam.br>. Acesso em: 3 fev. 2025.

Ghahramani, N., Mitchell, A., Rana, N.M., McDougall, S., Evans, S.G., Take, W.A., 2020. Tailings-flow runout analysis: examining the applicability of a semi-physical area volume relationship using a novel database. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 20, 3425–3438. <https://doi.org/10.5194/NHESS-20-3425-2020>.

Ghahramani N, Chen HJ, Clohan D, Liu S, Llano-Serna M, Rana NM, McDougall S, Evans SG, Take WA (2022) A benchmarking study of four numerical runout models for the simulation of tailings flows. *Sci Total Environment* 827:154245. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154245>.

Ghahramani, Masoumeh (Negar). (2023). Improved Empirical and Numerical Predictive Modelling of Potential Tailings Dam Breaches and Their Downstream Impacts (Tese de doutorado). Universidade de British Columbia, Vancouver.

Ghahramani N, Adria DAM, Rana NM, Llano-Serna M, McDougall S, Evans SG, Take WA (2024) Analysis of Uncertainty and Sensitivity in Tailings Dam Breach-Runout Numerical Modelling. *Mine Water Environment*. <https://doi.org/10.1007/s10230-024-00970-w>.

GIANTOMASO, C. E. F. Análise de sensibilidade da utilização do software Riverflow2D na modelagem numérica de ruptura de barragem de rejeitos. 2023. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

Jiménez, J. A. & Madsen, O. S. (2003): "A simple formula to estimate settling velocity of natural sediments," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 129(2), 70-78.

Julien, P. Y. (1995): *Erosion and Sedimentation*, Cambridge University Press, Cambridge.

Julien, P.Y., and Leon, 2000. Mudfloods, mudflows, and debris flow: classification, rheology and structural design, International Seminar on the Debris Flow Disaster of December 1999. Caracas, Venezuela.

Iverson, R.M., and Denlinger, R.P. 2001. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain. Coulomb mixture theory. *J. Geophys. Res.*, 106(B1), 537–552.

Hydronia. Two-Dimensional Flood and River Dynamics Mode I– RiverFlow2D. Reference Manual. Janeiro de 2025.

Fondazione Stava 1985. <https://www.stava1985.it/>. Acessado em 21/08/2024.

Lei Estadual nº 23.291, de 29 de março de 2019. Institui a política estadual de segurança de barragens de Minas Gerais e dá outras providências. *Diário do Executivo*, Belo Horizonte, MG, 29 mar. 2019. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/>. Acesso em: 3 fev. 2025.

Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Institui a Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 20 set. 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm). Acesso em: 3 fev. 2025.

Lei Federal nº 14.066, de 16 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 16 set. 2020. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2020-2022/2020/lei/l14066.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2020-2022/2020/lei/l14066.htm). Acesso em: 3 fev. 2025.

Luino, F. and De Graff, J. V.: The Stava mudflow of 19 July 1985 (Northern Italy): a disaster that effective regulation might have prevented, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 1029–1044, <https://doi.org/10.5194/nhess-12-1029-2012>, 2012.

LUMBROSO, Darren; DAVISON, Mark; BODY, Richard; PETKOVŠEK, Gregor. Modelling the Brumadinho tailings dam failure, the subsequent loss of life and how it could have been reduced. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 21, p. 21-37, 2021. DOI: 10.5194/nhess-21-21-2021. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-21-2021>.

Mahdi, A., Shakibaeinia, A., & Dibike, Y. (2019). Numerical modelling of oil-sands tailings dam breach runout and overland flow. *Science of The Total Environment*, 666, 457-468. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.205>

Melo, M. Eleutério, J. Probabilistic Analysis of Floods from Tailings Dam Failures: A Method to Analyze the Impact of Rheological Parameters on the HEC-RAS Bingham and Herschel-Bulkley Models. *Water* 2023, 15(16), 2866; <https://doi.org/10.3390/w15162866>.

Mezger, T, G. *The Rheology Handbook*. Quarta edição. Vicentz. 2014.

Mezger, T, G. *Reologia Aplicada*. 2018.

Naef, D., Rickenmann, D., Rutschmann, P., and McArdell, B. W.: Comparison of flow resistance relations for debris flows using a one-dimensional finite element simulation model, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 155–165,

O'Brien, J.S., and Julien, P.Y. Physical properties, and mechanics of Hyperconcentrated sediment flows, *Proc. ASCE Hyd. Deiv. Spec. Conf. Delineation of Landslides, Flash Flood, and Debris Flow Hazards*, Logan Utah, June 1984, 260–279.

PIRES, Jhony Maicon de Picoli; TEIXEIRA, Sidnei Helder Cardoso; FABIANI, André Luiz Tonso. Estudo comparativo de propagação hidrodinâmica de fluidos não newtonianos entre HEC-RAS e RiverFlow2D. II FluHidros e XVI ENES. 2024.

Pirulli, M., Barbero, M., Marchelli, M., & Scavia, C. (2017). The failure of the Stava Valley tailings dams (Northern Italy): Numerical analysis of the flow dynamics and rheological properties. *Geoenvironmental Disasters*. <https://doi.org/10.1186/s40677-016-0066-9>

Raudkivi, A. J. (1990): *Loose Boundary Hydraulics*, 3rd ed., Pergamon Press, Oxford.

Resolução Normativa nº 95, de 19 de novembro de 2020. Estabelece os critérios técnicos para a segurança de barragens de mineração. Agência Nacional de Mineração (ANM), Brasília, DF, 19 nov. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br>. Acesso em: 3 fev. 2025.

Resolução Normativa nº 130, de 25 de julho de 2023. Altera a Resolução Normativa nº 95, de 2020, da ANM, sobre segurança de barragens de mineração. Agência Nacional de Mineração (ANM), Brasília, DF, 25 jul. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br>. Acesso em: 3 fev. 2025.

Resolução Normativa nº 175, de 16 de janeiro de 2024. Altera a Resolução Normativa nº 95, de 2020, da ANM, sobre segurança de barragens de mineração. Agência

Nacional de Mineração (ANM), Brasília, DF, 16 jan. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br>. Acesso em: 3 fev. 2025.

Richardson, J. F. & Chhabra, R. P. *Non-newtonian flow and applied rheology*. Segunda edição. 2008.

Rubey, W. W. (1933): "Settling velocities of gravel, sand, and silt particles," *American Journal of Science*, 25(148), 325-338.

Sreekumar, U., Gildeh, H. K., Mohammadian, A., Rennie, C., & Nistor, I. (2024). *Tailings dam breach outflow modelling: A review*. *Mine Water and the Environment*. Springer.

Takahashi, T. 1991. *Debris flows*. Rotterdam: IAHR Monograph, Balkema.

Takahashi, T. 2014. Second Edition. *Debris flow: mechanics, prediction, and countermeasures*. CRC Press, London (2014).

Tarquini S., Isola I., Favalli M., Battistini A. (2007). TINITALY, a digital elevation model of Italy with a 10 meters cell size (Version 1.0) [Data set]. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/tinitaly/1.0>.

Van Rijn, L. C. (1984a): "Sediment transport, Part I: Bed load transport," *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), 1431-1456.

Van Rijn, L. C. (1984b): "Sediment transport, Part II: Suspended load transport," *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(11), 1613-1641.

Voellmy, A. 1955. *Über die Zerstörungskraft von Lawinen*. *Schweiz. Bauztg*, 73, 212–217.

USACE. *Hydraulic Reference Manual*. Version 6.6. Setembro de 2024.

USACE. *Mud and Debris Flow Manual*. Version 6.0. Setembro de 2020.

Wu, W. & Wang, S. S. Y. (2006): "Formulas for sediment porosity and settling velocity," *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(8), 858-862.

Wu, W. (2008): *Computational River Dynamics*, Taylor & Francis, London.

Zanke, U. (1977): "Berechnung der Sinkgeschwindigkeiten von Sedimenten," *Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Technischen Universität Hannover*, 46, 243-258.

Zhang, R. J. (1961): "Study on the settling velocity of sediment particles," Journal of Hydraulic Engineering, 87(3), 1-20.

Zhang, R. J. & Xie, J. H. (1993): Sediment Research in China, China Water & Power Press, Beijing.

**ANEXO 1 – RESULTADOS TABELADOS**

ID	Modelo Reológico	Coeficiente de rugosidade $\frac{-1}{(m^3 s)}$	Tensão limite de escoamento (PA)	Viscosidade (Pa.s)	Ângulo de atrito interno	TEMPO DE CHEGADA (SEG)								PROFUNDIDADE (m)								ÁREA INUNDADA F (%)		
						1		2		3		4		Pmáx Ponte Esq. (m) P = 18 m	Δ obs (m)	Pmáx Ponte Dir. (m) P = 8 m	Δ obs (m)	Pméd final R3 (m) P = 2 m	Δ obs (m)	Pméd final R4 (m) P = 0,3 m	Δ obs (m)		Pmáx final R5 (m) P = 6 m	Δ obs (m)
						t = 50 s	Δ (s)	t = 170 s	Δ (s)	t = 285 s	Δ (s)	t = 465 s	Δ (s)											
RAS-1	Bingham	0,018	1	0	-	41	-9	204	34	246	-39	280	-185	22,22	14,22	15,87	-2,13	0,12	-1,88	0,21	0,00	0,63	-5,37	61,31
RAS-2	Bingham	0,018	5	0	-	41	-9	205	35	247	-38	281	-184	22,23	14,23	15,86	-2,14	0,12	-1,88	0,22	0,01	0,63	-5,37	61,29
RAS-3	Bingham	0,018	10	0	-	41	-9	205	35	248	-37	281	-184	22,21	14,21	15,83	-2,17	0,12	-1,88	0,22	0,01	0,63	-5,37	61,22
RAS-4	Bingham	0,018	50	0	-	41	-9	207	37	250	-35	283	-182	22,22	14,22	15,80	-2,20	0,14	-1,86	0,25	0,04	0,64	-5,36	61,50
RAS-5	Bingham	0,018	100	0	-	42	-8	210	40	254	-31	288	-177	21,68	13,68	15,46	-2,54	0,18	-1,82	0,29	0,08	1,51	-4,49	61,51
RAS-6	Bingham	0,018	250	0	-	42	-8	212	42	256	-29	291	-174	21,49	13,49	15,23	-2,77	0,19	-1,81	0,30	0,09	1,98	-4,02	61,88
RAS-7	Bingham	0,018	500	0	-	43	-7	216	46	262	-23	297	-168	20,41	12,41	14,49	-3,51	0,24	-1,76	0,34	0,13	3,34	-2,66	63,39
RAS-8	Bingham	0,018	0	1	-	41	-9	206	36	248	-37	282	-183	22,12	14,12	15,75	-2,25	0,12	-1,88	0,23	0,02	0,63	-5,37	61,49
RAS-9	Bingham	0,018	0	5	-	42	-8	209	39	253	-32	287	-178	21,53	13,53	15,27	-2,73	0,14	-1,86	0,26	0,05	0,63	-5,37	62,03
RAS-10	Bingham	0,018	0	10	-	42	-8	212	42	256	-29	291	-174	21,05	13,05	14,81	-3,19	0,16	-1,84	0,28	0,07	0,63	-5,37	62,42
RAS-11	Bingham	0,018	0	50	-	43	-7	227	57	277	-8	315	-150	16,76	8,76	12,30	-5,70	0,22	-1,78	0,37	0,16	0,67	-5,33	62,06
RAS-12	Bingham	0,018	0	100	-	44	-6	248	78	306	21	350	-115	10,79	2,79	9,58	-8,42	0,25	-1,75	0,41	0,20	0,81	-5,19	59,95
RAS-13	Newtoaniano	0,012	0	0	-	40	-10	200	30	241	-44	274	-191	22,86	14,86	16,38	-1,62	0,12	-1,88	0,21	0,00	0,63	-5,37	60,80
RAS-14	Newtoaniano	0,018	0	0	-	40	-10	203	33	245	-40	279	-186	22,20	14,20	15,79	-2,21	0,12	-1,88	0,22	0,01	0,63	-5,37	61,57
RAS-15	Newtoaniano	0,025	0	0	-	40	-10	207	37	251	-34	285	-180	21,15	13,15	14,94	-3,06	0,12	-1,88	0,22	0,01	0,63	-5,37	62,43
RAS-16	Newtoaniano	0,030	0	0	-	41	-9	211	41	256	-29	290	-175	20,17	12,17	14,17	-3,83	0,12	-1,88	0,22	0,01	0,48	-5,52	63,24
RAS-17	Newtoaniano	0,040	0	0	-	41	-9	222	52	270	-15	307	-158	16,99	8,99	12,24	-5,76	0,12	-1,88	0,22	0,01	0,48	-5,52	64,11
RAS-18	Bingham	0,018	1	10	-	42	-8	209	39	253	-32	287	-178	21,40	13,40	15,09	-2,91	0,14	-1,86	0,26	0,05	0,63	-5,37	62,10
RAS-19	Bingham	0,018	50	10	-	42	-8	211	41	255	-30	290	-175	21,30	13,30	15,01	-2,99	0,15	-1,85	0,27	0,06	0,68	-5,32	61,90
RAS-20	Bingham	0,018	250	10	-	43	-7	215	45	261	-24	296	-169	20,60	12,60	14,60	-3,40	0,20	-1,80	0,31	0,10	1,98	-4,02	62,00
RAS-21	Bingham	0,030	1	10	-	42	-8	217	47	263	-22	299	-166	19,40	11,40	13,67	-4,33	0,14	-1,86	0,27	0,06	0,49	-5,51	63,10
RAS-22	Bingham	0,030	50	10	-	42	-8	218	48	265	-20	301	-164	19,20	11,20	13,56	-4,44	0,15	-1,85	0,28	0,07	0,67	-5,33	62,70
RAS-23	Bingham	0,030	250	10	-	43	-7	223	53	272	-13	309	-156	18,40	10,40	13,05	-4,95	0,19	-1,81	0,31	0,10	1,98	-4,02	62,60
RAS-24	Bingham	0,040	1	10	-	43	-7	228	58	278	-7	316	-149	16,40	8,40	11,97	-6,03	0,14	-1,86	0,27	0,06	0,49	-5,51	63,40
RAS-25	Bingham	0,040	50	10	-	43	-7	230	60	280	-5	318	-147	16,30	8,30	11,94	-6,06	0,15	-1,85	0,28	0,07	0,67	-5,33	63,10
RAS-26	Bingham	0,040	250	10	-	44	-6	235	65	287	2	327	-138	15,20	7,20	11,60	-6,40	0,20	-1,80	0,32	0,11	1,99	-4,01	62,70
RAS-27	Bingham	0,018	1	50	-	43	-7	218	48	265	-20	301	-164	19,20	11,20	13,63	-4,37	0,20	-1,80	0,33	0,12	0,59	-5,41	62,10

ID	Modelo Reológico	Coeficiente de rugosidade $\frac{-1}{(m^{-3} s)}$	Tensão limite de escoamento (PA)	Viscosidade (Pa.s)	Ângulo de atrito interno	TEMPO DE CHEGADA (SEG)								PROFUNDIDADE (m)								ÁREA INUNDADA F (%)		
						1	$\Delta$ (s)	2	$\Delta$ (s)	3	$\Delta$ (s)	4	$\Delta$ (s)	Pmáx Ponte Esq. (m)	$\Delta$ obs (m)	Pmáx Ponte Dir. (m)	$\Delta$ obs (m)	Pméd final R3 (m)	$\Delta$ obs (m)	Pméd final R4 (m)	$\Delta$ obs (m)		Pmáx final R5 (m)	$\Delta$ obs (m)
						t = 50 s		t = 170 s		t = 285 s		t = 465 s		P = 18 m		P = 8 m		P = 2 m		P = 0,3 m			P = 6 m	
RAS-28	Bingham	0,018	50	50	-	43	-7	220	50	267	-18	303	-162	19,00	11,00	13,44	-4,56	0,21	-1,79	0,34	0,13	0,76	-5,24	61,90
RAS-29	Bingham	0,018	250	50	-	43	-7	224	54	274	-11	311	-154	18,00	10,00	12,87	-5,13	0,20	-1,80	0,32	0,11	2,00	-4,00	61,90
RAS-30	Bingham	0,030	1	50	-	43	-7	227	57	277	-8	315	-150	16,60	8,60	12,12	-5,88	0,20	-1,80	0,34	0,13	0,59	-5,41	62,50
RAS-31	Bingham	0,030	50	50	-	43	-7	228	58	279	-6	317	-148	16,40	8,40	12,05	-5,95	0,21	-1,79	0,34	0,13	0,76	-5,24	62,40
RAS-32	Bingham	0,030	250	50	-	44	-6	233	63	286	1	326	-139	15,00	7,00	11,69	-6,31	0,21	-1,79	0,33	0,12	1,99	-4,01	62,10
RAS-33	Bingham	0,040	1	50	-	44	-6	239	69	292	7	333	-132	13,00	5,00	10,82	-7,18	0,20	-1,80	0,34	0,13	0,58	-5,42	62,60
RAS-34	Bingham	0,040	50	50	-	44	-6	240	70	295	10	336	-129	12,80	4,80	10,74	-7,26	0,21	-1,79	0,34	0,13	0,76	-5,24	62,20
RAS-35	Bingham	0,040	250	50	-	44	-6	246	76	303	18	345	-120	12,00	4,00	10,29	-7,71	0,21	-1,79	0,34	0,13	2,00	-4,00	61,20
RAS-36	Bingham	0,018	1	100	-	43	-7	229	59	280	-5	319	-146	15,80	7,80	12,00	-6,00	0,23	-1,77	0,38	0,17	0,70	-5,30	61,80
RAS-37	Bingham	0,018	50	100	-	43	-7	231	61	282	-3	322	-143	15,30	7,30	11,87	-6,13	0,24	-1,76	0,38	0,17	0,85	-5,15	61,60
RAS-38	Bingham	0,018	250	100	-	44	-6	236	66	290	5	330	-135	13,70	5,70	11,38	-6,62	0,21	-1,79	0,36	0,15	2,00	-4,00	61,00
RAS-39	Bingham	0,030	1	100	-	43	-7	238	68	293	8	334	-131	12,60	4,60	10,78	-7,22	0,23	-1,77	0,38	0,17	0,70	-5,30	61,70
RAS-40	Bingham	0,030	50	100	-	44	-6	240	70	295	10	337	-128	12,40	4,40	10,65	-7,35	0,24	-1,76	0,38	0,17	0,85	-5,15	61,20
RAS-41	Bingham	0,030	250	100	-	44	-6	246	76	303	18	346	-119	11,50	3,50	10,08	-7,92	0,21	-1,79	0,36	0,15	2,00	-4,00	60,30
RAS-42	Bingham	0,040	1	100	-	44	-6	251	81	308	23	351	-114	10,10	2,10	8,95	-9,05	0,23	-1,77	0,38	0,17	0,70	-5,30	60,50
RAS-43	Bingham	0,040	50	100	-	45	-5	252	82	310	25	354	-111	10,00	2,00	8,82	-9,18	0,24	-1,76	0,38	0,17	0,85	-5,15	60,00
RAS-44	Bingham	0,040	250	100	-	45	-5	259	89	320	35	365	-100	9,30	1,30	8,31	-9,69	0,21	-1,79	0,37	0,16	2,00	-4,00	59,30
RAS-45	Clastic Grain Flow - Coulomb	0,040	-	-	2,5	44	-6	240	70	294	9	335	-130	10,55	2,55	11,89	-6,11	0,13	-1,87	0,21	0,00	6,37	0,37	66,43
RAS-46	Clastic Grain Flow - Coulomb	0,040	-	-	5	46	-4	276	106	342	57	391	-74	8,19	0,19	8,56	-9,44	0,14	-1,86	1,21	1,00	9,03	3,03	63,59
RAS-47	Clastic Grain Flow - Coulomb	0,040	-	-	8	48	-2	353	183	471	186	599	134	6,91	-1,09	5,74	-12,26	0,34	-1,66	2,21	2,00	10,27	4,27	56,55
RAS-48	Clastic Grain Flow - Coulomb	0,040	-	-	12	53	3	Não atinge	-	Não atinge	-	Não atinge	-	Não atinge	-	Não atinge	-	2,89	0,89	3,21	3,00	Não atinge	-	37,36
RAS-49	Clastic Grain Flow - Coulomb	0,040	-	-	15	57	7	Não atinge	-	Não atinge	-	Não atinge	-	Não atinge	-	Não atinge	-	2,39	0,39	4,21	4,00	Não atinge	-	28,86
RF-1	Quadrático	0,012	0	0	-	25	-25	119	-51	158	-127	187	-278	27,35	9,35	11,49	3,49	0,00	-2,00	0,00	-0,21	0,17	-5,83	41,51
RF-2	Quadrático	0,025	0	0	-	29	-21	169	-1	214	-71	250	-215	16,85	-1,15	12,49	4,49	0,00	-2,00	0,00	-0,21	0,18	-5,82	60,79
RF-3	Quadrático	0,040	0	0	-	36	-14	220	50	277	-8	324	-141	10,52	-7,48	7,9	-0,1	0,00	-2,00	0,00	-0,21	0,20	-5,80	61,55
RF-4	Quadrático	0,018	1	0	-	29	-21	140	-30	184	-101	216	-249	20,88	2,88	10,69	2,69	0,01	-1,99	0,01	-0,20	0,18	-5,82	56,88
RF-5	Quadrático	0,018	100	0	-	29	-21	141	-29	187	-98	223	-242	19,37	1,37	11,05	3,05	0,08	-1,92	0,07	-0,14	0,78	-5,22	57,29
RF-6	Quadrático	0,018	500	0	-	29	-21	162	-8	205	-80	245	-220	16,59	-1,41	9,7	1,7	0,19	-1,81	0,18	-0,03	2,78	-3,22	61,60

ID	Modelo Reológico	Coeficiente de rugosidade $\frac{-1}{(m^{-3} s)}$	Tensão limite de escoamento (PA)	Viscosidade (Pa.s)	Ângulo de atrito interno	TEMPO DE CHEGADA (SEG)								PROFUNDIDADE (m)										ÁREA INUNDADA F (%)
						1	$\Delta$ (s)	2	$\Delta$ (s)	3	$\Delta$ (s)	4	$\Delta$ (s)	Pmáx Ponte Esq. (m)	$\Delta$ obs (m)	Pmáx Ponte Dir. (m)	$\Delta$ obs (m)	Pméd final R3 (m)	$\Delta$ obs (m)	Pméd final R4 (m)	$\Delta$ obs (m)	Pmáx final R5 (m)	$\Delta$ obs (m)	
						t = 50 s		t = 170 s		t = 285 s		t = 465 s		P = 18 m		P = 8 m		P = 2 m		P = 0,3 m		P = 6 m		
RF-7	Quadrático	0,018	0	1	-	29	-21	140	-30	187	-98	220	-245	20,55	2,55	10,78	2,78	0,00	-2,00	0,00	-0,21	0,23	-5,77	56,29
RF-8	Quadrático	0,018	0	10	-	29	-21	155	-15	198	-87	234	-231	18,66	0,66	11,56	3,56	0,00	-2,00	0,01	-0,20	0,32	-5,68	58,13
RF-9	Quadrático	0,018	0	100	-	32	-18	230	60	299	14	353	-112	6,27	-11,73	5,84	-2,16	0,00	-2,00	0,04	-0,17	0,57	-5,43	55,69
RF-10	Quadrático	0,040	250	10	-	36	-14	241	71	306	21	356	-109	7,75	-10,25	6,6	-1,4	0,14	-1,86	0,12	-0,09	1,65	-4,35	57,48
RF-11	Quadrático	0,040	250	100	-	37	-13	299	129	385	100	454	-11	3,90	-14,10	5,14	-2,86	0,15	-1,85	0,14	-0,07	1,75	-4,25	54,02
RF-12	Quadrático	0,018	1	10	-	29	-21	156	-14	199	-86	235	-230	18,77	0,77	11,11	3,11	0,02	-1,98	0,02	-0,19	0,31	-5,69	58,83
RF-13	Quadrático - WuWong / Bagnold / 0,11 mm	0,040	250	10	-	36	-14	241	71	306	21	357	-108	7,69	-10,31	6,66	-1,34	0,10	-1,90	0,07	-0,14	1,15	-4,85	56,54
RF-14	Quadrático - WuWong / Wu / 0,11 mm	0,040	250	10	-	36	-14	241	71	306	21	356	-109	7,68	-10,32	6,68	-1,32	0,09	-1,91	0,08	-0,13	1,83	-4,17	57,04
RF-15	Quadrático - WuWong / Bagnold / 0,007 mm	0,040	250	10	-	36	-14	241	71	306	21	356	-109	7,68	-10,32	6,67	-1,33	0,09	-1,91	0,09	-0,12	1,82	-4,18	57,31
RF-16	Quadrático - WuWong / Wu / 0,007 mm	0,040	250	10	-	36	-14	241	71	306	21	357	-108	7,72	-10,28	6,72	-1,28	0,09	-1,91	0,09	-0,12	1,82	-4,18	57,11
RF-17	Quadrático - WuWong / Van Rijn / 0,007 mm	0,040	250	10	-	36	-14	241	71	306	21	357	-108	7,70	-10,30	6,67	-1,33	0,09	-1,91	0,09	-0,12	1,88	-4,12	57,23
RF-18	Quadrático - WuWong / Van Rijn / 0,11 mm	0,040	250	10	-	36	-14	241	71	306	21	357	-108	7,65	-10,35	6,64	-1,36	0,22	-1,78	0,26	0,05	2,61	-3,39	57,29
RF-19	Turbulent Coulomb	0,040	-	-	2,5	36	-14	252	82	317	32	367	-98	8,13	-9,87	7,39	-0,61	0,04	-1,96	0,04	-0,17	4,96	-1,04	62,17
RF-20	Turbulent Coulomb	0,040	-	-	5	40	-10	324	154	422	137	500	35	6,77	-11,23	6,85	-1,15	0,08	-1,92	0,17	-0,04	8,20	2,20	59,43
RF-21	Turbulent Coulomb	0,040	-	-	8	47	-3	580	410	910	625	Não atinge	-	Não atinge	-	4,95	-3,05	0,29	-1,71	0,50	0,29	8,47	2,47	50,91
RF-22	Turbulent Coulomb	0,040	-	-	12	75	25	Não atinge	-	Não atinge	-	Não atinge	-	Não atinge	-	Não atinge	-	2,27	0,27	1,72	1,51	Não atinge	-	28,33
RF-23	Turbulent Coulomb	0,040	-	-	15	Não atinge	-	Não atinge	-	Não atinge	-	Não atinge	-	Não atinge	-	Não atinge	-	1,65	-0,35	Não atinge	-	Não atinge	-	17,75

Fonte = O autor (2025)

## **ANEXO 2 – LEGISLAÇÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITOS**

Esse item apresenta uma síntese da legislação de segurança de barragens de rejeitos no Brasil com ênfase a ERHB de Rejeitos.

A Lei Federal nº 12.334/2010, alterada pela Lei Federal nº 14.066/2020, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens.

Esta Lei aplica-se a barragens destinadas aos usos acima citados que apresentem pelo menos uma das seguintes características:

- I. Altura do maciço, medida do encontro do pé do talude de jusante com o nível do solo até a crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15 (quinze) metros;
- II. Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m<sup>3</sup> (três milhões de metros cúbicos);
- III. reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- IV. Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 6º desta Lei.
- V. Categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 7º desta Lei;
- VI. Categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador, conforme definido no art. 7º desta Lei.

A Lei também traz definições importantes para ERHB de rejeitos, tais como:

- Dano Potencial Associado à Barragem: dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, a ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas e os impactos sociais, econômicos e ambientais;

- Categoria de Risco: classificação da barragem de acordo com os aspectos que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente ou desastre;
- Zona de Autossalvamento (ZAS): trecho do vale a jusante da barragem em que não haja tempo suficiente para intervenção da autoridade competente em situação de emergência, conforme mapa de inundação;
- Zona de Segurança Secundária (ZSS): trecho constante do mapa de inundação não definido como ZAS;
- Mapa de Inundação: produto do estudo de inundação que compreende a delimitação geográfica georreferenciada das áreas potencialmente afetadas por eventual vazamento ou ruptura da barragem e seus possíveis cenários associados e que objetiva facilitar a notificação eficiente e a evacuação de áreas afetadas por essa situação;

O Plano de Segurança de Barragem (PSB) de acordo com o artigo sexto desta Lei é um dos instrumentos da PNSB, e deve apresentar, entre outros itens, o Plano de Ação de Emergência (PAE), a Revisão Periódica de Segurança (RPSB) e o mapa de inundação, considerando o pior cenário identificado.

De acordo com esta Lei, o PAE é obrigatório para todas as barragens classificadas como dano potencial associado médio e alto ou alto risco, a critério do órgão fiscalizador. No entanto, todas as barragens destinadas à acumulação ou à disposição de rejeitos de mineração é obrigatória a elaboração do PAE.

Conforme o artigo 12º desta Lei, o PAE estabelecerá as ações a serem executadas pelo empreendedor da barragem em caso de situação de emergência, bem como identificará os agentes a serem notificados dessa ocorrência.

Esta Lei não traz requisitos ou critérios com ênfase ao Estudo de Ruptura Hipotético de Barragem, mas estabelece como um dos instrumentos da PNSB as guias de boas práticas em segurança de barragens.

A fiscalização de barragens dá-se aos órgãos ambientais integrantes do Sistema Nacional de Meio Ambiente a depender do uso da barragem e reservatório em questão, citando como exemplo a Agência Nacional de Mineração (ANM), Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e órgãos estaduais ambientais e de resíduos industriais.

No que tange o setor de mineração, a ANM publicou a Resolução Normativa nº 95/20, alteradas pelas Resoluções Normativas nº 130/2023 e nº 175/2024, para definir as medidas regulatórias aplicáveis as barragens de mineração. Em relação ao escopo do presente trabalho, são apresentadas a seguir algumas definições trazidas pela ANM nestas resoluções normativas:

- Barragens de Mineração: a) barragens, barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, construídos em cota superior à da topografia original do terreno, utilizados em caráter temporário ou definitivo para fins de contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos ou de sedimentos provenientes de atividades de mineração com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas, excluindo-se deste conceito as barragens de contenção de resíduos industriais; e b) estruturas construídas por meio de disposição hidráulica de rejeitos, como um maciço permeável, dotado de sistema de drenagem de fundo, suscetíveis à liquefação;
- Desastre: resultado de evento adverso, de origem natural ou induzido pela ação humana, sobre ecossistemas e populações vulneráveis, que causa significativos danos humanos, materiais ou ambientais e prejuízos econômicos e sociais;
- Estrutura de Contenção a Jusante (ECJ): estrutura construída a jusante de uma barragem de mineração ou empilhamento drenado com disposição hidráulica de rejeitos e suscetíveis à liquefação, com o objetivo de reter os efluentes desta no evento de ruptura ou funcionamento inadequado;
- Estudo de ruptura hipotética: estudo capaz de caracterizar adequadamente os potenciais impactos, provenientes do processo de inundação em virtude de ruptura ou mau funcionamento da Barragem de Mineração, que deverá ser feito por profissional legalmente habilitado para essa atividade, cuja descrição e justificativa deverá, necessariamente, constar no PSB, sendo de responsabilidade do empreendedor e deste profissional a escolha da melhor metodologia para sua elaboração;

- Mapa de inundação: produto do estudo de inundação, compreendendo a delimitação geográfica georreferenciada das áreas potencialmente afetadas por eventual vazamento ou ruptura da barragem e seus possíveis cenários associados, que objetiva facilitar a notificação eficiente e a evacuação de áreas afetadas por esta situação;

Além de trazer critérios técnicos para delimitações da ZAS e ZSS, sendo a ZAS delimitada pela distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a 30 (trinta) minutos ou 10 km (dez quilômetros), estas resoluções trazem algumas regulamentações para ERHB de rejeitos, tais como:

- Para as barragens de mineração com DPA médio, quando o item "existência de população a jusante" atingir 10 pontos ou o item "impacto ambiental" atingir 10 pontos no quadro de Dano Potencial Associado, ou DPA alto, o mapa de inundação deve ser detalhado e deve exibir, em gráficos e mapas georreferenciados, as áreas a serem inundadas, os tempos de chegada da frente e do pico de onda de inundação, os níveis máximos atingidos em termos de cota e altura da onda, a velocidade máxima, o risco hidrodinâmico, a vazão máxima e o tempo de duração da fase crítica da inundação, abrangendo os corpos hídricos e possíveis impactos ambientais.
- O deslocamento da frente de onda deve ser feito considerando, minimamente, modelos 2D, devendo o empreendedor executar ou considerar minimamente: I - a caracterização geotécnica e reológica dos rejeitos passíveis de mobilização na ruptura; II - a classificação dos rejeitos ou sedimentos armazenados no reservatório segundo a norma ABNT/NBR 10.004 ou norma que a suceda; e III - a topografia atual e primitiva do reservatório.
- Nas situações em que houver barragens localizadas a jusante da estrutura objeto da avaliação e que estejam dentro da área de influência da inundação, o estudo e o mapa de inundação devem considerar também uma análise conjunta das estruturas.
- Os estudos de ruptura e mapas de inundação devem considerar o modo de falha que ocasione o cenário de maior dano, independentemente da probabilidade de ocorrência, sendo que, para

ocaso de modo de falha por liquefação, quando aplicável, devem ser consideradas as mobilizações máximas, fisicamente possíveis, dos volumes do maciço e dos materiais contidos no reservatório, com apresentação da metodologia utilizada para definição do volume mobilizável e observando-se as condições reológicas dos materiais.

- O estudo de ruptura hipotética deve conter explicitamente os critérios técnicos que justifiquem os limites da área de estudo e a delimitação da mancha de inundação.
- Os mapas de inundação devem ser executados com base topográfica atualizada em escala apropriada, de acordo com as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Brasileira, constantes no Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, ou norma que a suceda, ou a critério da ANM.
- O mapa de inundação deve estar atualizado refletindo o cenário atual da barragem de mineração e devendo estar em conformidade com sua cota licenciada.

Com os casos de rupturas das barragens de rejeito em Brumadinho e Mariana nesse século, o Estado de Minas Gerais avançou na legislação de Segurança de Barragens voltadas ao setor de mineração de forma mais robusta comparada com os demais estados brasileiros.

A Lei nº 23.291/2019 institui a política estadual de segurança de barragens de Minas Gerais, implementada de forma articulada com a Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB –, estabelecida pela Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, e com as Políticas Nacional e Estadual de Meio Ambiente e de Proteção e Defesa Civil.

Esta lei aplica-se a barragens destinadas à acumulação ou à disposição final ou temporária de rejeitos e resíduos industriais ou de mineração e a barragens de água ou líquidos associados a processos industriais ou de mineração, que apresentem, no mínimo, uma das características a seguir:

- I. Altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 10m (dez metros);
- II. Capacidade total do reservatório maior ou igual a 1.000.000m<sup>3</sup> (um milhão de metros cúbicos);

- III. reservatório com resíduos perigosos;
- IV. Potencial de dano ambiental médio ou alto, conforme regulamento.

Esta Lei traz requisitos de licenciamento ambiental e fiscalização de barragens.

O Plano de Ação de Emergência, estabelecido no art. 9º da Lei 23.291/2019, regulamenta os procedimentos para análise e aprovação do PAE no Estado de Minas Gerais para os empreendimentos enquadrados na supracitada lei.

O PAE, em observância da Política Estadual de Segurança de Barragens de Minas Gerais, compõe um plano único e complementa a Política Nacional de Segurança de Barragens, e é dividido em cinco seções específicas, nos seguintes termos:

- Primeira seção atenderá às exigências das entidades fiscalizadoras identificadas pela Política Nacional de Segurança de Barragens;
- Segunda seção atenderá às exigências GMG-Cedec;
- Terceira seção atenderá as exigências dos órgãos e das entidades integrantes do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Sisema;
- Quarta seção atenderá às exigências dos entes de proteção ao patrimônio cultural;
- Quinta seção atenderá às exigências do Instituto Mineiro de Agropecuária – IMA.

No que tange o escopo do presente trabalho, na seção III supracitada, foi publicado pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) o Termo de Referência para a Entrega de Estudos de Ruptura Hipotética de Barragens: Requisitos, Premissas e Conteúdo Mínimo.

Esse termo de referência aborda os cenários de simulação, os estudos hidrológicos na área de contribuição da barragem e no vale de jusante, a elaboração do hidrograma e ruptura com a caracterização do reservatório e do volume mobilização, a propagação dos hidrogramas com a descrição do trecho modelado, a base topo altimétrica e a necessidade de ruptura em cascata quando necessário.

Ademais, este termo de referência padroniza as entregas de relatório técnico, mapas de inundação e dados digitais geoespaciais vetoriais. A modelagem bidimensional e Modelo Digital de Terreno com precisão de 1 m x 1 m são requisitados

neste termo de referência. Ademais, é indicado o uso de modelo matemático-computacional, de licença livre ou paga, que possua no mínimo as funcionalidades de simular o processo de propagação da cheia ao longo do vale de jusante, simular o desenvolvimento da brecha de ruptura, fornecer as manchas de inundação, fornecer os hidrogramas efluentes e fornecer dados hidrodinâmicos nas seções transversais de referência como tempo de chegada, velocidade, profundidade, tempo de chegada de pico e vazão de cheia.

Os cenários obrigatórios no termo de referência consistem em cenário sem ruptura, considerando a operação hidráulica extrema, e cenários de ruptura propriamente dita, tanto na ruptura mais provável como na extrema, além de outros cenários representativos, se necessário. Os cenários de ruptura devem avaliar os seguintes modos de falha: *piping*, galgamento, liquefação do maciço e liquefação da fundação.

O reservatório deve ser caracterizado com a batimetria atualizada, informações geotécnicas, assim como do maciço, e identificação das superfícies preferenciais de ruptura. O volume mobilizado pode ser estimado por equações empíricas, verificando a razoabilidade frente às condições locais, e na hipótese de liquefação, preferencialmente 100% do volume do maciço da barragem deve ser considerado como mobilizável. Na hipótese de modo de falha de *piping* ou galgamento, preferencialmente 100% do volume da brecha deve ser considerado como material mobilizado. Caso o responsável pelo estudo não adote o valor de 100%, deverá ser apresentada justificativa técnica.

Deverão ser mapeados, pelo menos, os seguintes parâmetros de inundação:

- A envoltória máxima de inundação;
- Tempo para a chegada da onda, considerando a sobre elevação de 60 cm de inundação;
- Profundidade de inundação;
- Velocidade de fluxo e propagação de inundação;
- Risco hidrodinâmico

Este termo de referência possui como objetivo padronizar a apresentação e premissas principais de Estudos de Ruptura Hipotética de Barragens, sem determinar as metodologias a serem utilizadas em cada etapa do estudo, ficando a critério do responsável técnico do estudo.

### ANEXO 3 – EQUACIONAMENTO DE SAINT-VENANT

Esse capítulo apresenta as equações de Saint-Venant em uma dimensão conforme apresentado por Fabiani (2016; 2021).

As hipóteses básicas para os equacionamentos apresentados a seguir são:

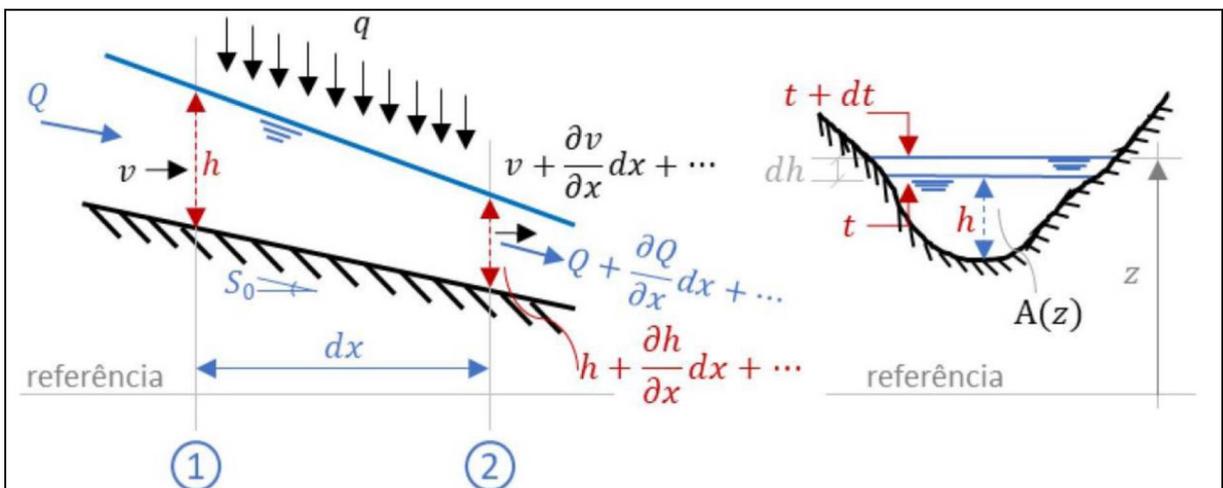
- Distribuição hidrostática de pressões;
- Fluido incompressível e homogêneo (densidade e viscosidade do fluido constantes);
- Canal de baixa declividade, de modo que o cosseno do ângulo de inclinação se aproxima de 1 e a tangente desse ângulo se aproxima do seno, correspondendo à declividade do fundo do canal; e
- Perdas de atrito iguais a um escoamento permanente com as mesmas características de velocidade e profundidade.

As equações de Saint-Venant correspondem a conservação da massa de acordo com a Equação da Continuidade e a conservação da quantidade de movimento de tal forma a determinar as duas variáveis dependentes do sistema (profundidade e velocidade).

A seguir são apresentadas as equações de Saint-Venant para um escoamento unidimensional em função da vazão e área.

A conservação da massa dá-se pelo balanço de massas de entrada e saída de uma parcela de volume de fluido (FIGURA A3-1).

FIGURA A3-1–CONSERVAÇÃO DA MASSA EM UMA PARCELA DE FLUIDO



FONTE: Fabiani, A, L, 2021.

A EQUAÇÃO A3-1 apresenta as componentes da conservação de massa, considerando que a entrada lateral de fluido no sistema é dada pelo produto da vazão específica pela discretização espacial adotada ( $q * \partial x$ ). Já a massa lateral de entrada dá-se por essa vazão lateral multiplicada pela densidade do fluido e pelo intervalo de tempo, obtendo assim a massa de entrada lateral ( $q * \partial x * \rho * dt$ ). Enquanto a massa na seção de montante da parcela de fluido é dada pelo produto entre a vazão, a densidade e a parcela de tempo ( $Q * \rho * \partial t$ ), a massa na seção de jusante é dada pela mesma lógica, considerando um adicional da variação da taxa de vazão na discretização espacial adotada ( $Q + \frac{Q}{\partial x} \partial x$ ). Por fim, esse balanço de massas deve corresponder a variação no tempo da massa, dado produto entre a área da seção transversal, a discretização espacial e a densidade do fluido ( $\rho * A * \partial x$ ).

$$\begin{aligned}
 & q * \partial x * \rho * dt + Q * \rho * \partial t \\
 & + \left( Q + \frac{Q}{\partial x} \partial x \right) * \rho * \partial t \\
 & = \frac{\partial \rho * A * \partial x * \partial t}{\partial t}
 \end{aligned}
 \tag{EQUAÇÃO A3-1}$$

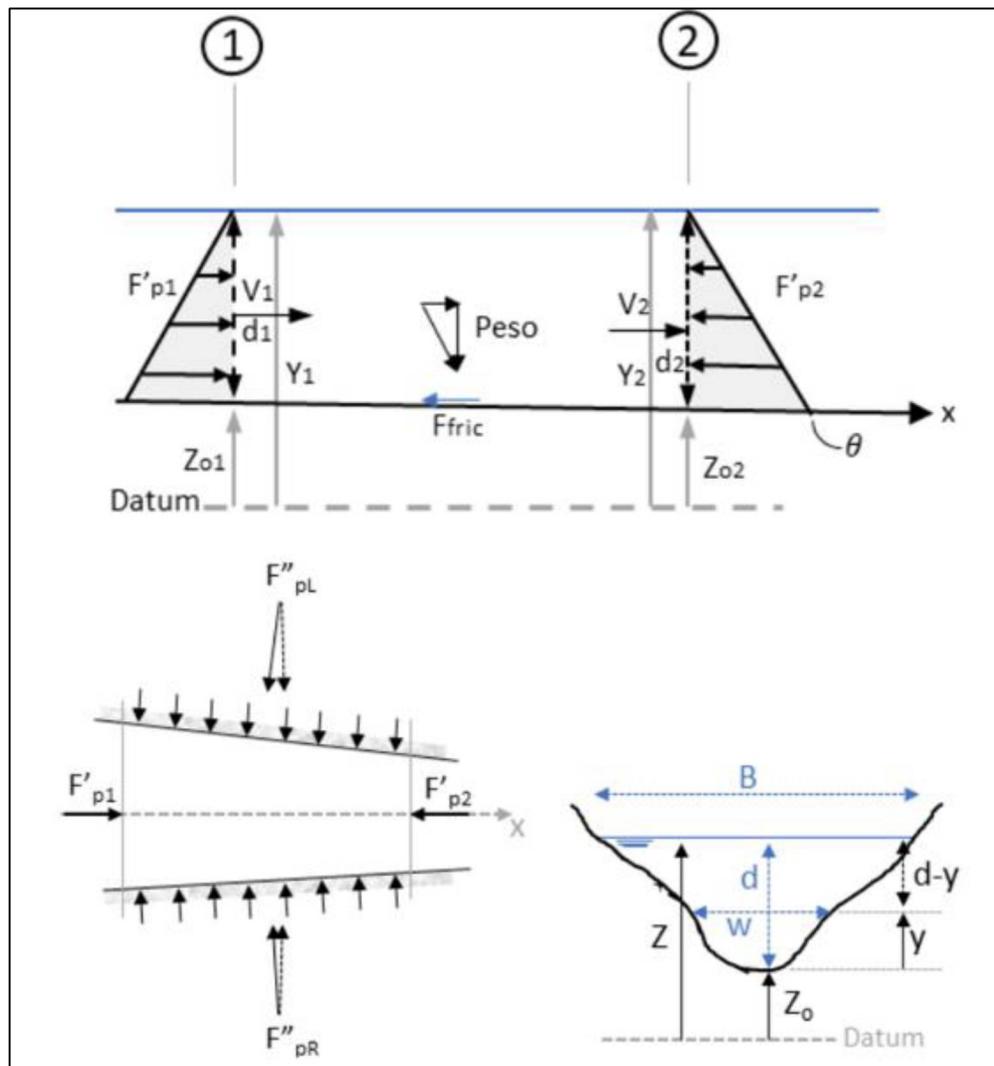
Simplificando a EQUAÇÃO A3-1 com a anulação da vazão inicial ( $Q * \rho * \partial t$ ) e dividindo por  $\partial t * \partial x * \rho$  resulta na Equação da Continuidade, considerada a primeira das equações de Saint-Venant (EQUAÇÃO A3-2).

$$q = \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x}
 \tag{EQUAÇÃO A3-2}$$

Já a segunda equação de Saint-Venant dá-se pela conservação da quantidade de movimento que, por sua vez, corresponde a igualdade entre o somatório das forças internas de uma parcela de fluido ( $\sum Fi$ ) com as variações no tempo e espaço da quantidade de movimento ( $\frac{\partial Qm}{\partial t} + \frac{\partial Qm}{\partial x}$ ) conforme apresentado na EQUAÇÃO A3-3 e esquematizado na FIGURA A3-2.

$$\sum Fi = \frac{\partial Qm}{\partial t} + \frac{\partial Qm}{\partial x}
 \tag{EQUAÇÃO A3-3}$$

FIGURA A3-2—CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO EM UMA PARCELA DE FLUIDO



FONTE: Fabiani, A, L, 2021.

São quatro forças principais que atuam nesta parcela de fluido:

- Forças de fricção;
- Força gravitacional;
- Forças de pressão; e
- Forças laterais.

A força gravitacional ( $F_g$ ) é dada pela EQUAÇÃO A3-4 que corresponde a componente do peso da parcela de fluido na direção do fluxo, sendo a massa dada pelo produto do volume ( $A * \partial x$ ) pela densidade ( $\rho$ ), e considerando a simplificação que tangente desse ângulo se aproxima do seno, correspondendo à declividade do fundo do canal ( $S_0$ ).

$$Fg = m * g = \rho * (A * \partial x) * g * S_0 \quad \text{EQUAÇÃO A3-4}$$

A força de fricção ou viscosa corresponde a resistência ao escoamento do fluido no fundo do canal conforme dado pela EQUAÇÃO A3-5. No fundo do canal, existe uma tensão cisalhante ( $\tau$ ) que atua na área molhada da parcela de fluido, sendo essa calculada pelo produto do perímetro molhado pela discretização espacial ( $P * \partial x$ ). Essa equação deriva da definição de tensão, que relaciona uma força aplicada a uma área.

$$F\tau = -\tau * P * \partial x \quad \text{EQUAÇÃO A3-5}$$

Considerando as equações de perda de carga hidráulica representadas por  $S_f$ , a força cisalhante pode ser dada pela EQUAÇÃO A3-6.

$$F\tau = \rho * g * S_f * (A * \partial x) \quad \text{EQUAÇÃO A3-6}$$

A força de pressão ( $F_p$ ), assumindo a distribuição hidrostática, é estimada usando a profundidade do fluido e o peso da coluna de fluido no fundo do canal, pois a pressão aumenta com a profundidade ( $\rho * g * [d - y]$ ), e a força resultante devido a essa variação de pressão é aplicada no centro de gravidade da área da seção, conforme apresentado na EQUAÇÃO A3-7 para uma força de pressão geral e a EQUAÇÃO A3-8 para a seção a montante. No caso da força de pressão na seção a jusante, conforme apresentado na EQUAÇÃO A3-9, considera-se a variação da área e profundidade do fluido de acordo com as respectivas taxas para uma discretização espacial adotada ( $\frac{dA}{dx} dx$  e  $\frac{d\bar{h}}{dx} dx$ ). A EQUAÇÃO A3-10 apresenta a diferença entre as forças de pressão, desprezando os termos de ordem superior que se tornam insignificantes para pequenas discretizações espaciais.

$$F_p = \rho * g * (d - y) * b * \partial y \quad \text{EQUAÇÃO A3-7}$$

$$F_{p1} = \rho * g * h1 * A1 \quad \text{EQUAÇÃO A3-8}$$

$$F_{p2} = \rho g \left[ \left( A + \frac{dA}{dx} dx \right) \left( \bar{h} + \frac{d\bar{h}}{dx} dx \right) \right] \quad \text{EQUAÇÃO A3-9}$$

$$F_{p2} - F_{p1} = \rho g \frac{d}{dx} (A\bar{h}) dx \quad \text{EQUAÇÃO A3-10}$$

A força exercida pelo fluido em uma superfície lateral é derivada da pressão hidrostática que depende da altura do fluido e da densidade do fluido  $\rho$ . No caso de um canal, a força lateral é distribuída ao longo da profundidade da parede lateral. A profundidade do fluido influencia diretamente a força hidrostática, pois a pressão em um fluido depende da profundidade. Para fluidos em canais inclinados ou irregulares,

a variação da profundidade afeta a distribuição de pressão nas laterais. Se o canal possui paredes divergentes ou convergentes (como ocorre em canais não retangulares), a variação da largura ao longo do canal também influencia a força lateral. A taxa de variação da largura do canal é relevante na determinação do perfil de pressão lateral, pois influencia a distribuição da pressão ao longo das laterais. A resultante das forças laterais estará a favor ou contra o fluxo a depender se a seção do canal se estreita ou alarga. A EQUAÇÃO A3-11 apresenta a resultante da força lateral, enquanto a EQUAÇÃO A3-12 apresenta as forças de pressão na área de escoamento somadas às forças laterais.

$$F_l = \int_0^h \rho g (d - y) \cdot b \frac{db}{dx} \Big|_{y=y_0} dx dy \quad \text{EQUAÇÃO A3-11}$$

$$F_p = \rho g A \frac{dh}{dx} dx \quad \text{EQUAÇÃO A3-12}$$

A quantidade de movimento do fluxo de entrada, saída e no tempo é dada da EQUAÇÃO A3-13 a EQUAÇÃO A3-15.

$$(QMov)_{\text{entra}} = (\rho Q v)_{\text{entra}} = \rho v^2 A \quad \text{EQUAÇÃO A3-13}$$

$$(QMov)_{\text{sai}} = (\rho Q v)_{\text{sai}} = \rho v^2 A + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v^2 A) \cdot dx \quad \text{EQUAÇÃO A3-14}$$

$$(\text{variação } QMov)_{\text{tempo}} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho Q) \cdot dx \quad \text{EQUAÇÃO A3-15}$$

Desse modo, inserindo as componentes de forças internas e de quantidade de movimento na EQUAÇÃO A3-3, temos a EQUAÇÃO A3-16.

$$\begin{aligned} \rho g A S_o - \rho g A S_f - \rho g A \frac{\partial h}{\partial x} dx \\ = \left( \rho v^2 A + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v^2 A) dx - \rho v^2 A \right) \\ + \frac{\partial}{\partial t} (\rho Q) dx \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{EQUAÇÃO} \\ \text{A3-16} \end{array}$$

Considerando que a densidade do fluxo é constante e que  $v^2 A = \frac{Q^2}{A}$ , temos a segunda equação de Saint-Venant apresentada na EQUAÇÃO A3-17.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g A \frac{\partial h}{\partial x} = g A (S_o - S_f) \quad \begin{array}{l} \text{EQUAÇÃO} \\ \text{A3-17} \end{array}$$

Sendo:

- $\frac{\partial Q}{\partial t}$  = Parcela transiente de aceleração local;
- $\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right)$  = Parcela de inércia ou aceleração convectiva;
- $gA \frac{\partial h}{\partial x}$  = Parcela de pressão;
- $gA(S_0)$  = Parcela da gravidade; e
- $gA(S_f)$  = Parcela de fricção.

A forma apresentada das equações de Saint-Venant na EQUAÇÃO A3-2 e na EQUAÇÃO A3-17 corresponde a forma não-conservativa. A forma conservativa permite uma preservação da massa no sistema de maneira mais precisa com a equação da continuidade dentro da equação de quantidade de movimento, respeitando a continuidade em uma escala menor do sistema.