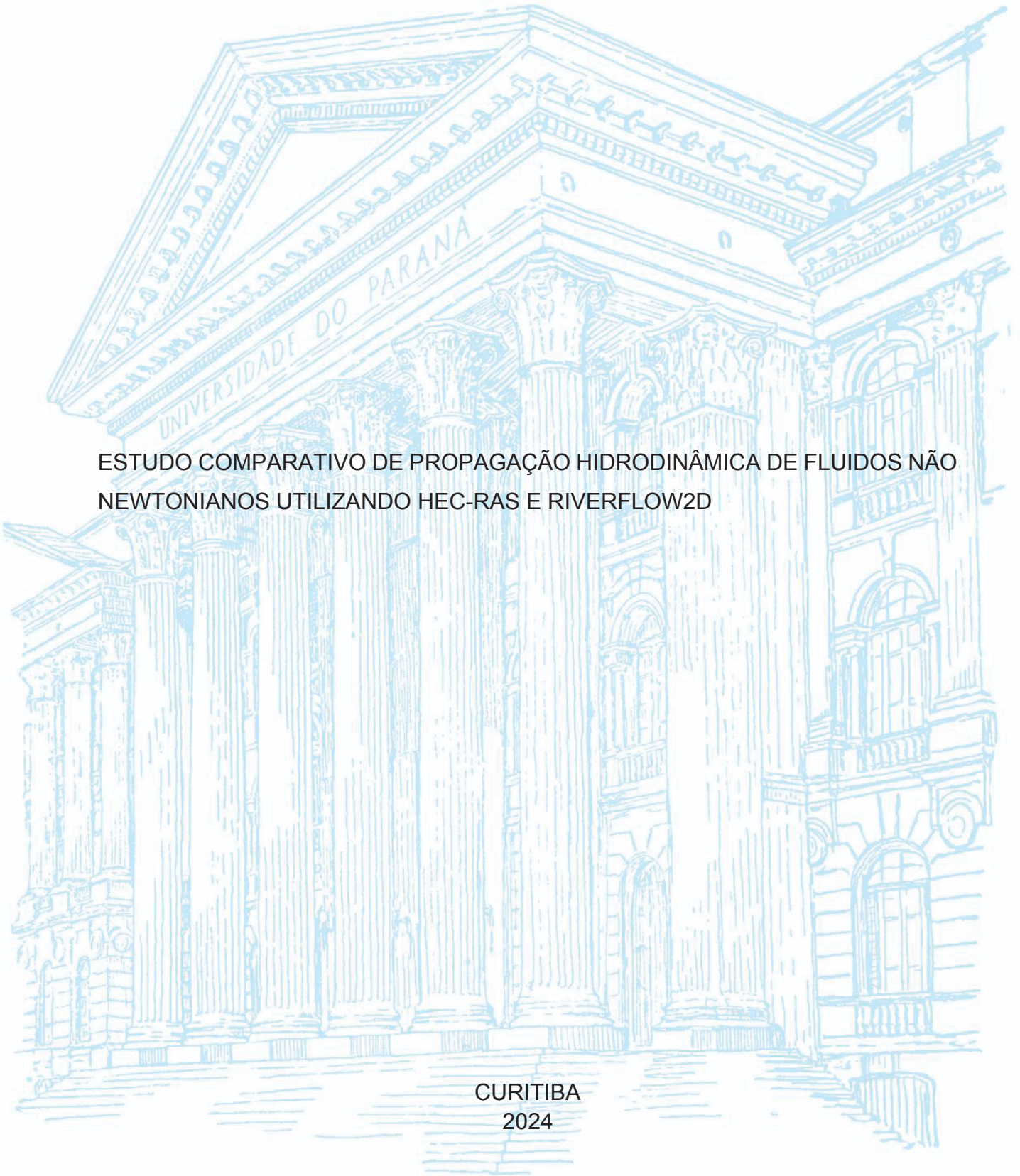


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JHONY MAICON DE PICOLI PIRES

ESTUDO COMPARATIVO DE PROPAGAÇÃO HIDRODINÂMICA DE FLUIDOS NÃO  
NEWTONIANOS UTILIZANDO HEC-RAS E RIVERFLOW2D

CURITIBA  
2024



JHONY MAICON DE PICOLI PIRES

ESTUDO COMPARATIVO DE PROPAGAÇÃO HIDRODINÂMICA DE FLUIDOS NÃO  
NEWTONIANOS UTILIZANDO HEC-RAS E RIVERFLOW2D

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

Orientador: Prof. Dr André Luiz Tonso Fabiani  
Co-Orientador: Prof. Dr. Sidnei Helder Cardoso  
Teixeira

CURITIBA  
2024

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

Pires, Jhony Maicon de Picoli

Estudo comparativo de propagação hidrodinâmica de fluidos não newtonianos utilizando HEC-RAS e RiverFlow2D / Jhony Maicon de Picoli Pires. – Curitiba, 2024.

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: André Luiz Tonso Fabiani

Coorientador: Sidnei Helder Cardoso Teixeira

1. Hidrodinâmica. 2. Fluidos não-newtonianos. 3. Barragens de rejeitos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. III. Fabiani, André Luiz Tonso. IV. Teixeira, Sidnei Helder Cardoso. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



## 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 **JHONY MAICON DE PICOLI PIRES** intitulada: **ESTUDO COMPARATIVO DE PROPAGAÇÃO HIDRODINÂMICA DE FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS UTILIZANDO 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, 19 de Abril de 2024.

Assinatura Eletrônica

22/04/2024 14:16:42.0

ANDRE LUIZ TONSO FABIANI  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

23/04/2024 16:01:03.0

MARCOS CRISTIANO PALU

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ )

Assinatura Eletrônica

22/04/2024 15:25:34.0

SIDNEI HELDER CARDOSO TEIXEIRA

Coorientador(a)

Assinatura Eletrônica

23/04/2024 11:01:06.0

JOSÉ JUNJI OTA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

23/04/2024 21:43:54.0

ALEXANDRE KOLODYNISKIE GUETTER

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus estimados professores, agradeço por compartilharem seu conhecimento, inspiração e dedicação. Suas aulas foram verdadeiras fontes de aprendizado e motivação, e sou imensamente grato por cada lição que aprendi com vocês.

Aos meus queridos amigos, obrigado por estarem sempre ao meu lado, oferecendo seu apoio, encorajamento e risadas em momentos de alegria e desafio. Sua amizade tornou esta jornada mais significativa e memorável.

E, por fim, à minha amada família, meu mais profundo agradecimento por seu amor incondicional, apoio inabalável e sacrifícios incontáveis. Vocês foram minha rocha durante os momentos difíceis e minha luz nos momentos de triunfo. Não há palavras suficientes para expressar minha gratidão por tudo que vocês fizeram por mim.

Que esta jornada de aprendizado e crescimento continue, e que possamos compartilhar muitas mais vitórias juntos no futuro.

## RESUMO

O estudo de ruptura hipotética de barragens tem o objetivo de investigar o escoamento, pelo vale a jusante, do volume liberado por uma barragem em colapso parcial ou total. O objetivo geral do trabalho é avaliar a aplicabilidade de métodos e critérios adotados em estudos de ruptura de barragens de contenção de fluidos não newtonianos bidimensional implementados pelos softwares HEC-RAS e RiverFlow2D, nos resultados obtidos na simulação hidrodinâmica da ruptura da barragem B1, em Brumadinho, Minas Gerais. De cada cenário foram extraídos os resultados de área atingida, profundidade, velocidade e tempo de chegada da onda de inundação, assim como, os valores de pico de vazão da onda de ruptura, acompanhado do tempo de ocorrência. As informações conhecidas do evento de ruptura real foram utilizadas como parâmetros de comparação dos resultados das simulações. Os parâmetros reológicos do rejeito foram determinados com base em referências bibliográficas, sendo realizada uma análise crítica da aplicabilidade dos parâmetros com relação os resultados obtidos, sempre comparados ao evento observado. Em síntese, os resultados do estudo evidenciam o potencial do HEC-RAS na simulação hidrodinâmica de fluidos não newtonianos como ferramenta relevante para avaliação da segurança de estruturas hidráulicas, com especial enfoque na previsão do comportamento do fluxo não newtoniano em cenários críticos. Contudo, faz-se necessário enfatizar a necessidade de cuidadosa avaliação e calibração do modelo, aliada à complementação por outras ferramentas de análise, para garantir a confiabilidade dos resultados.

Palavras-chave: Simulação de Ruptura. Barragens de Rejeito. Fluido Não Newtoniano. HEC-RAS. River-Flow2D.

## **ABSTRACT**

The study of hypothetical dam breaches aims to investigate the downstream flow of the volume released by a partially or totally collapsed dam. The general objective of the work is to evaluate the applicability of methods and criteria adopted in studies of dam breach of containment dams for non-Newtonian fluids implemented by the HEC-RAS and River-Flow2D software, in the results obtained in the hydrodynamic simulation of the breach of dam B1 in Brumadinho, Minas Gerais. From each scenario, the results of the affected area, depth, velocity, and arrival time of the flood wave were extracted, as well as the peak discharge values of the breach wave, accompanied by the time of occurrence. The known information of the real breach event was used as parameters for comparing the results of the simulations. The rheological parameters of the tailings were determined based on bibliographic references, with a critical analysis of the applicability of the parameters concerning the results obtained, always compared to the observed event. In summary, the results of the study highlight the potential of HEC-RAS in the hydrodynamic simulation of non-Newtonian fluids as a relevant tool for the evaluation of the safety of hydraulic structures, with a special focus on predicting the behavior of non-Newtonian flow in critical scenarios. However, it is necessary to emphasize the need for careful evaluation and calibration of the model, combined with supplementation by other analysis tools, to ensure the reliability of the results.

Keywords: Rupture Simulation. Tailings Dams. Non-Newtonian Fluid. HEC-RAS. River-Flow2D.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de alteamento em barragens de rejeito. ....	23
Figura 2 – Causa de incidentes com barragens. ....	24
Figura 3 – Liquefação devido a carregamento estático ou cíclico. ....	25
Figura 4 – Modelos relógios de fluidos. ....	27
Figura 5 - Correlação entre tensão de escoamento e concentração volumétrica. ....	29
Figura 6 - Correlação entre viscosidade e concentração volumétrica. ....	30
Figura 7 - Malha computacional 2D. ....	38
Figura 8 - Representação gráfica – Modelo de Bingham. ....	40
Figura 9 - Representação uniforme por partes das variáveis do fluxo. ....	43
Figura 10 – Localização da Barragem B1. ....	46
Figura 11 – Etapas construtivas da barragem. ....	49
Figura 12 – Diferença de altura entre as topografias originais e pré-rompimento, incluindo o maciço e os rejeitos sob o maciço. ....	50
Figura 13 – Curva cota-volume do reservatório e maciço. ....	51
Figura 14 - Curvas de nível do MDE (10 metros) ....	54
Figura 15 - Perfil do terreno ao longo do talvegue de jusante. ....	54
Figura 16 – Nível d’água no talvegue - Parâmetros Garcia e Tribist-Correa (2020). ....	56
Figura 17 - Rugosidades adotadas no modelo hidrodinâmico. ....	58
Figura 18 - Malha computacional utilizada do HEC-RAS. ....	59
Figura 19 – Brecha de rompimento da barragem (HEC-RAS). ....	60
Figura 20 – Vazão do aferida no Rio Paraopeba. ....	61
Figura 21 - Malha computacional triangular utilizado no RiverFlow 2D (região da barragem). ....	64
Figura 22 - Região afetada pela ruptura da Barragem I. ....	66
Figura 23 - Estimativa de velocidade no início da propagação – 280 metros em 12 segundos. ....	67
Figura 24 – Estação fluviométrica 40740000. ....	68
Figura 25 – Localização da estação fluviométrica. ....	68
Figura 26 - Seções Transversais no vale a jusante da barragem. ....	71

Figura 27 – Caracterização fotográfica das seções.....	72
Figura 28 – Propagação de vazão – Parâmetros de Machado (2017) – Bingham.....	73
Figura 29 – Propagação de Vazão – Parâmetros de Ribeiro (2015) – Bingham.....	74
Figura 30 – Propagação de vazão – Parâmetros de Silva (2020) – Bingham.....	75
Figura 31 – Propagação de vazão – Fluido Newtoniano (Água). ....	76
Figura 32 - Elevação do nível d'água – Parâmetros Silva (2020).....	78
Figura 33 - Elevação do nível d'água – Parâmetros Machado (2017).....	79
Figura 34 - Elevação do nível d'água – Parâmetros Ribeiro (2015). ....	79
Figura 35 - Elevação do nível d'água – Fluido Newtoniano (Água).....	80
Figura 36 – Máxima elevação da inundação – Parâmetros de Silva (2020).	81
Figura 37 – Máxima Profundidade da inundação – Parâmetros de Silva (2020).....	82
Figura 38 – Máxima Inundação na Seção 04. ....	83
Figura 39 – Velocidade máxima – Parâmetros de Silva (2020).....	85
Figura 40 – Tempo de Chegada – Parâmetros de Silva (2020). ....	87
Figura 41 – Risco Hidrodinâmico – Parâmetros de Silva (2020). ....	90
Figura 42 - Manchas de ruptura – HEC-RAS. ....	94
Figura 43. Manchas de ruptura – RiverFlow 2D. ....	94
Figura 44 - Comparação de versões do RF2D. ....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equações Reológicas de fluidos não newtonianos.....	27
Tabela 2 – Parâmetros reológicos de amostras pós-ruptura Barragem I. ....	32
Tabela 3 – Classificação dos tipos de escoamento.....	34
Tabela 4 - Parâmetros reológicos utilizados nas modelagens.....	55
Tabela 5 – Coeficiente de Manning por classe de cobertura.....	57
Tabela 6 - Vazão de pico do hidrograma de brecha.....	70
Tabela 7 – Distância das seções transversais em relação a Barragem .....	72
Tabela 8 – Comparativo de vazões nos modelos – Bingham.....	77
Tabela 9 - Critérios para classificação do perigo de inundações para os seres humanos.....	88
Tabela 10 - Critérios para classificação do perigo de inundações para as edificações. ....	89
Tabela 11 – Resultados da simulação – Parâmetros de Machado (2017). ..	92
Tabela 12 – Resultados da simulação – Parâmetros de Ribeiro (2015).....	92
Tabela 13 – Resultados da simulação – Parâmetros de Silva (2020). ....	93
Tabela 14 – Resultados da simulação – Fluido Newtoniano (Água). ....	93
Tabela 15 – Comparação dos tempos de chegada em relação ao observado (Seção 04).....	97

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

2D - Bidimensional

ANM - Agência Nacional de Mineração

ANA – Agência Nacional de Águas

B1 - Barragem 1

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

HEC - Hydrologic Engineering Center's (Centro de Engenharia Hidrológica)

RAS – River Analysis System (Sistema de Análises de Rios)

RF2D – RiverFlow 2D

PAE - Plano de Ações Emergenciais

PAEBM - Plano de Ações Emergenciais de Barragens de Mineração

PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens

USACE - United States Army Corps of Engineers (Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América)

ICOLD - International Commission on Large Dams (Comissão Internacional sobre Grandes Barragens)

$A$  - área

$g$  - aceleração da gravidade

$\phi$  - ângulo de atrito (do material sólido ou solo)

$\phi'$  - ângulo de atrito efetivo (do material sólido ou solo)

$n$  - coeficiente de Manning

$C_w$  - concentração de sólidos por peso

$C_V$  - concentração volumétrica

$S_0$  - declividade do leito do canal

$G$  - densidade dos grãos

$dx$  - derivada no espaço

$dt$  - derivada no tempo

$\partial x$  - derivada parcial no espaço

$\partial t$  - derivada parcial no tempo

$\partial Q$  - derivada parcial da vazão

$\partial A$  - derivada parcial da área

$\partial u$  - derivada parcial da velocidade

$\partial y$  - derivada parcial da altura de escoamento

$\tau_c$  - forças coesivas

$F_g$  - força gravitacional atuante no escoamento em canal

$F_\tau$  - forças viscosas no escoamento em canal

$F_p$  - força de pressão no escoamento em canal

$F_l$  - força lateral atuante no escoamento em canal

$\partial u / \partial y$  - gradiente de velocidade

$\alpha$  - inclinação do fluxo de lama

$\beta$  - inclinação do terreno (fluxo de material)

$\theta$  - inclinação do terreno (fluxo em canal)

$\rho$  - massa específica do material

$p'$  - média das tensões efetivas

$S_f$  - perdas por atrito (adimensional)

$\gamma_w$  - peso específico da água

$\gamma_s$  - peso específico dos sólidos

$\gamma$  - peso específico do material

$\gamma_{sat}$  - peso específico do material saturado

$\gamma_{sub}$  - peso específico do material submerso

$P_w$  - peso da água

$P_s$  - peso do material sólido

$P$  - peso do líquido no canal

$p$  - pressão

$R$  - raio hidráulico

$h$  - profundidade do escoamento

$\tau$  - tensão cisalhante ou tensão de cisalhamento

$\tau_y$  - tensão crítica ou tensão limite de escoamento ou tensão de escoamento

$\tau y'$  - tensão de escoamento adimensional

$\tau$  - tensão de cisalhamento

$\tau_d$  - tensão dispersiva

$\tau_f$  - tensão friccional tipo Coulomb

$\sigma$  - tensão normal

$\sigma_1$  - tensão principal maior

$\sigma_3$  - tensão principal menor

$\tau_t$  - tensão turbulenta

$\tau_\mu$  - tensão viscosa

$Q$  - vazão

$v$  - velocidade

$\nu$  - viscosidade cinemática

$\mu$  - viscosidade dinâmica

$\mu_n$  - viscosidade dinâmica para fluido pseudoplástico ou dilatante

$\mu_B$  - viscosidade plástica

$V_w$  - volume de água

$V_f$  - volume do fluxo de lama por unidade de largura

$V_s$  - volume de sólidos

$V_T$  - volume total

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	19
1.2	OBJETIVO.....	21
1.2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>22</b>
2.1	Estudos de ruptura de barragens de rejeitos.....	22
2.1.1	Modos de falha.....	22
2.1.2	Mecanismo de ruptura de barragens de rejeito.....	24
2.1.3	Reologia do escoamento de rejeitos .....	26
2.1.4	Parâmetros reológicos de rejeitos.....	28
2.2	Propagação de fluidos não newtonianos .....	32
2.2.1	Equações constitutivas .....	32
2.2.2	Classificação dos tipos de escoamento .....	34
2.3	Modelos hidrodinâmicos.....	35
2.3.1	Modelo HEC-RAS .....	35
2.3.2	Modelo RiverFlow 2D.....	41
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>46</b>
3.1	Características da barragem .....	46
3.1.1	Localização da barragem.....	46
3.1.2	Construção da barragem .....	47
3.1.3	Volume armazenado .....	49
3.1.4	Características dos rejeitos armazenados .....	51
3.2	Modelo digital de elevação (MDE).....	53
3.3	Determinação dos parâmetros reológicos .....	55
3.4	Resistência superficial ao escoamento .....	57

3.5	Modelo hidrodinâmico (HEC-RAS).....	58
3.5.1	Malha computacional .....	58
3.5.2	Condições de contorno .....	60
3.5.3	Critério de Courant e intervalo de tempo .....	61
3.5.4	Efeito de Coriolis .....	61
3.5.5	Sistema de Equações e modelo reológico .....	62
3.5.6	Solucionador de Matriz .....	63
3.6	Modelo hidrodinâmico (RiverFlow 2D).....	63
3.6.1	Malha computacional .....	63
3.6.2	Condições de contorno .....	64
3.6.3	Critério de Courant e intervalo de tempo .....	64
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>66</b>
4.1	Evento observado.....	66
4.2	Apresentação dos resultados .....	69
4.2.1	Hidrograma de ruptura .....	69
4.2.2	Resultados da modelagem hidráulica .....	71
4.2.3	Propagação de vazão .....	72
4.2.4	Elevação do nível d'água .....	78
4.2.5	Velocidade máxima da inundação .....	84
4.2.6	Tempo de chegada .....	86
4.2.7	Risco hidrodinâmico .....	88
4.3	Avaliação dos resultados.....	92
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>99</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>101</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>106</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas construídas para armazenar água, rejeitos de mineração, resíduos industriais, entre outros materiais. Existem diferentes tipos de barragens, que variam de acordo com a finalidade e o material armazenado.

As barragens de terra é o tipo mais comum e mais antigo. Ela é construída com terra compactada e pode ter diferentes formatos, como em degraus, lineares ou arqueadas em relação ao vale. Esse tipo de barragem é geralmente utilizado para armazenar água para irrigação, geração de energia ou abastecimento público.

Já a barragem de enrocamento é construída com pedras e cascalhos e é mais comumente usada para armazenar água ou para proteger a encosta contra a erosão. Normalmente possui núcleo argiloso para impermeabilização, e pode ser revestida com concreto para aumentar sua resistência a deslizamentos superficiais, aumentando assim sua durabilidade.

A barragem de concreto é construída com concreto armado ou concreto ciclópico e é mais comumente usada para armazenar água para consumo ou para geração de energia elétrica.

Outro tipo de barragem é a barragem de rejeitos, que é construída para armazenar os resíduos gerados por processos de mineração. Essa barragem é geralmente construída com aterro compactado ou com o próprio rejeito e pode ter o reservatório revestido com membranas poliméricas para evitar a contaminação do meio ambiente.

Entrando especificamente no tema barragens de rejeito, elas são uma realidade presente em diversas regiões do país, especialmente nas áreas de mineração de ferro, alumínio e ouro. No entanto, essas estruturas têm se tornado cada vez mais controversas, especialmente após os desastres em Mariana (2015) (19 mortes e 362 famílias desabrigadas) e Brumadinho (2019) que resultaram em 272 de mortes e danos ambientais irreparáveis, conforme noticiado pela imprensa.

Após esses desastres, em específico, houve um aumento por parte da pressão pública para aprimorar as regulamentações e fiscalizações das barragens de rejeito no Brasil. O Conselho Nacional de Política Ambiental (CONAMA) e a Agência Nacional de Mineração (ANM) emitiram novas regulamentações e diretrizes para

garantir a segurança dessas estruturas. No entanto, muitos especialistas consideram que essas medidas ainda são insuficientes para evitar novos desastres.

Um dos principais problemas relacionados às barragens de rejeito é a sua fragilidade estrutural. Grande parte dessas estruturas são construídas com base em técnicas não mais permitidas, como o alteamento a montante e sem a devida manutenção, o que as torna vulneráveis a colapsos e rompimentos. Além disso, muitas vezes as empresas responsáveis pela construção e manutenção dessas barragens não realizam estudos detalhados sobre a segurança das estruturas e ignoram alertas de risco.

Nesse contexto de fragilidade estrutural frente aos demais tipos de barragem, a propagação de rejeitos de mineração é um problema ambiental grave observado quando ocorre o vazamento ou rompimento de barragens que armazenam os resíduos gerados pela atividade de mineração. Quando isso acontece, os rejeitos são lançados no meio ambiente, contaminando a água, o solo e afetando a fauna e a flora da região.

A dinâmica da propagação do fluido em uma barragem de rejeito é aspecto relevante no estudo desses fenômenos, tanto que vem sendo estudado sob diversas óticas e diferentes metodologias. Num eventual evento catastrófico de ruptura de barragem, o conhecimento da forma de propagação de fluido é de fundamental importância na tomada de ações pelos órgãos competentes.

De acordo com a Lei 12.334/2010 (revisada pela lei n. 14066/2020), que estabelece a política nacional de segurança de barragens, em cenários emergenciais, o conhecimento da dinâmica de escoamento do material contido em uma eventual ruptura é essencial para a tomada de ações das entidades de proteção a vida, como defesa civil, corpo de bombeiros, assistência social, entre outras, de forma que a simulação de ruptura do empreendimento é obrigatória. Nesse sentido, dentre os itens mínimos a serem determinados por simulação de ruptura da barragem estão a distância de propagação, a velocidade e altura do fluxo; o conhecimento dessas variáveis é possível somente através da modelagem matemática ou de observação.

É importante ressaltar que o tema de ruptura de barragens vem sendo abordado em artigos técnicos, dissertações de mestrado e teses de doutorado a fim de trazer mais entendimento sobre os fenômenos (Monte-Mor, 2004; Brasil, 2005; Balbi, 2008; Saliba, 2009; Lauriano, 2009; Melo, 2013 e Silva, 2020). Com exceção de Saliba (2009), no qual foram analisados processos físicos à formação da brecha de

ruptura, os demais analisaram somente cenários de ruptura e sua propagação, sob diferentes metodologias e diferentes fluidos.

Em eventos catastróficos, o conhecimento da propagação e de informações a respeito da dinâmica do fluido, são relevantes para o gerenciamento das ações a serem tomadas, em seu devido tempo, conforme portaria DNPM n°526, “*Seção 1 – Art.20. XII – Estudos de cenários: estudo realizado capaz de caracterizar adequadamente os possíveis cenários que ocorrerão em virtude de uma eventual ruptura da barragem onde os métodos para tal estudo devem ser explicitados...*”

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Os rejeitos têm comportamento de fluido não newtoniano, isto é, a relação entre tensão e velocidade de deformação, não é constante, com essa variação sendo distinta conforme modelo utilizado (USACE,2020).

A propagação de fluidos não newtonianos é um fenômeno complexo que usualmente é modelado usando softwares de simulação hidrodinâmica, como o HEC-RAS e o RiverFlow 2D. Esses softwares são amplamente utilizados na engenharia civil e ambiental para prever os efeitos da propagação de fluidos em diferentes cenários.

O HEC-RAS é um software de modelagem hidrodinâmica que é amplamente utilizado para simular a propagação de fluidos – normalmente água – em rios e canais. Ele usa uma abordagem de volumes finitos para resolver as equações de Navier-Stokes – ou Equações de Águas Rasas 2D - com algumas simplificações para ser utilizadas em duas dimensões, sendo essas as equações que descrevem o comportamento dos fluidos newtonianos e não newtonianos (USACE, 2020). O HEC-RAS também permite a modelagem de diferentes tipos de fluidos não newtonianos, como lama, sedimentos e detritos, que são comumente encontrados em aplicações de engenharia.

Por outro lado, o RiverFlow 2D é um software de simulação hidrodinâmica que usa o método de volumes finitos para modelar a propagação de fluidos em rios e canais. Ele também pode modelar diferentes tipos de fluidos não newtonianos, como fluidos com comportamento viscoelástico e tixotrópico.

Ambos os softwares são capazes de modelar a propagação de fluidos não newtonianos, mas suas abordagens são diferentes. O HEC-RAS usa uma abordagem baseada em volumes finitos, que divide o domínio de simulação em uma malha ortogonal de células e resolve as equações de Navier-Stokes em cada célula. Já o RiverFlow 2D usa uma abordagem baseada em volumes finitos, que divide o domínio de simulação em elementos triangulares e resolve as equações de Navier-Stokes em cada elemento.

Embora os métodos de tratamento do fluido sejam semelhantes nos softwares de modelagem, HEC-RAS ou RiverFlow 2D, a forma de implementação matemática de cada um desses é diferente, seja na resolução das matrizes, ou na malha

computacional utilizada (USACE, 2020). O objetivo de pesquisa consiste em identificar as diferenças entre a modelagem matemática de cada software e o impacto os resultados da propagação do fluido.

A utilização do RiverFlow 2D possui ampla aceitação para simulação de ruptura de barragens de rejeitos, seja devido a suas ferramentas exclusivas para estimativa de parâmetros para a ruptura, ou pela sua velocidade de processamento, uma vez que utiliza a placa gráfica para realização dos cálculos da simulação (Hydronia, 2018).

De maneira oposta, existem poucas publicações a respeito da utilização do software HEC-RAS na simulação de eventos envolvendo fluidos não newtonianos. Desta forma, a pesquisa buscará elucidar a aplicabilidade de tal software na simulação desses eventos. Tal situação se justifica dada a gratuidade do software, sendo esse desenvolvido por uma instituição pública.

Como esta pesquisa foi desenvolvida em uma instituição pública federal, é do interesse da sociedade como um todo que seus resultados sejam aplicados em benefício das pessoas e empresas aqui locadas, mitigando a fuga de capital para aquisição de propriedades privados e externas.

Ressalta-se que o custo de aquisição do software não é uma barreira para as empresas de consultoria especializadas nesse tipo de análise, tampouco para as mineradoras, sendo apenas uma trava para aquisição das entidades públicas, e instituições de pesquisa e ensino, que tem interesse na verificação e estudo dos resultados desse tipo de análise.

Sendo assim, a utilização do software HEC-RAS para ruptura de barragens de rejeitos, dado a inexistência da barreira do custo de aquisição, seria capaz criar sinergia de conhecimentos entre o que já é aplicado na simulação de ruptura de barragens de água. Tal sinergia poderia facilitar as ações emergenciais dos órgãos competentes, uma vez que esses já estão familiarizados com o HEC-RAS devido a própria capacitação promovida por outros órgãos governamentais, como a ANA (Agência Nacional de Águas).

## 1.2 OBJETIVO

O objetivo geral do trabalho é avaliar a aplicabilidade de métodos e critérios adotados em estudos de ruptura de barragens de contenção para fluidos não newtonianos, em escoamento bidimensional, implementados pelos softwares HEC-RAS e RiverFlow 2D, especificamente rejeitos de mineração, na previsão da inundação associada ao rompimento.

### 1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dentre os objetivos específicos para que o objetivo geral seja atingido, estão:

- Delimitar a inundação observada na ruptura da barragem da Mina do Córrego do Feijão, ocorrida em janeiro de 2019 em Brumadinho/MG;
- Realizar uma análise crítica a respeito dos resultados de cada um dos softwares utilizados na simulação;
- Realizar uma análise de sensibilidade para avaliar as perdas e ganhos das simplificações e das implementações de cada uma das ferramentas utilizadas;
- Estudar as implicações que uma variação da concentração volumétrica do rejeito traz na previsão de inundação principalmente em aspectos relevantes à tomada de decisão em situação de emergência, como tempo de chegada da frente de onda e nível da inundação; e
- Criar base teórica de forma a possibilitar conclusões a respeito da aplicabilidade do HEC-RAS para a simulação de fluidos não newtonianos, especificamente rejeitos.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesse capítulo estão apresentadas as principais referências bibliográficas a respeito do tema de ruptura de barragens de rejeito, assim como uma introdução à fundamentação teórica a respeito da propagação de fluidos não newtonianos.

### 2.1 ESTUDOS DE RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITOS

#### 2.1.1 Modos de falha

Conforme ICOLD (2001), alguns eventos adversos e circunstâncias anômalas que podem desencadear a ruptura de uma barragem são:

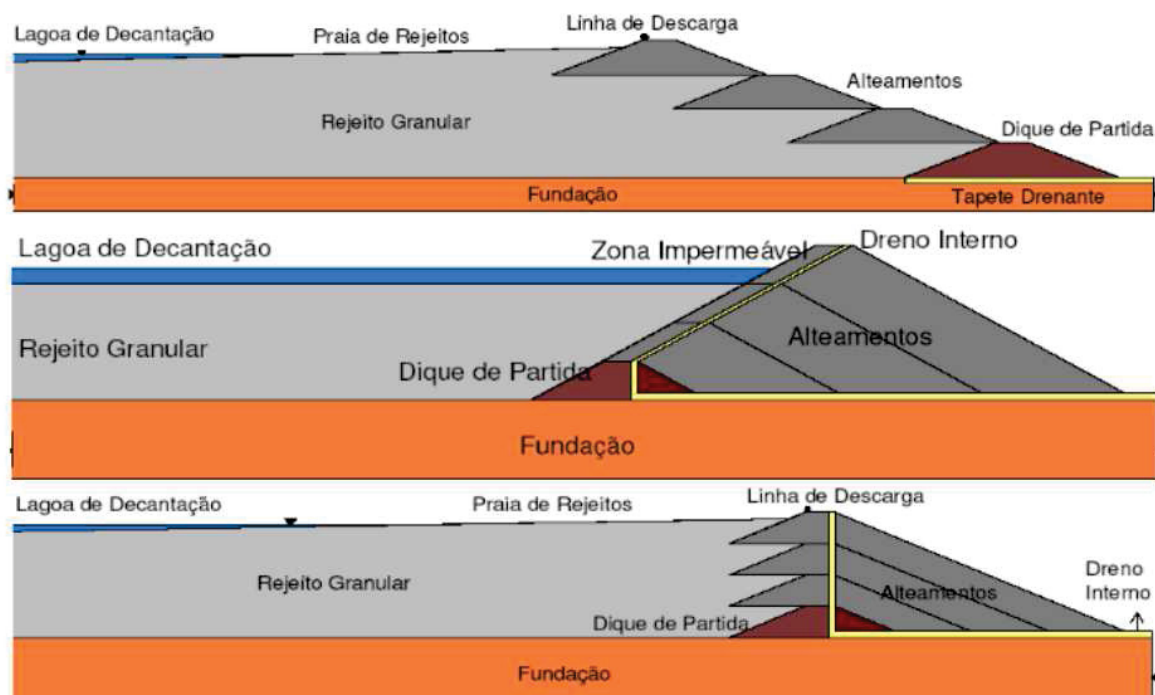
- a) Evento extremo de precipitação;
- b) Obstrução do sistema extravasor da barragem;
- c) Abalos sísmicos;
- d) Recalques ou colapso da fundação; e
- e) Colmatação da drenagem interna.

Essas circunstâncias levam a barragem a romper pelos seguintes mecanismos de ruptura:

- a) Galgamento (overtopping);
- b) Erosão interna (piping);
- c) Liquefação; ou
- d) Instabilidade estrutural.

Dados divulgados pela International Commission on Large Dams (2001) - ICOLD, classificou os incidentes que ocorrem entre barragens de rejeito, em relação a metodologia construtiva do alteamento, sendo essas: Jusante, Montante e Linha de centro, conforme ilustra a Figura 1.

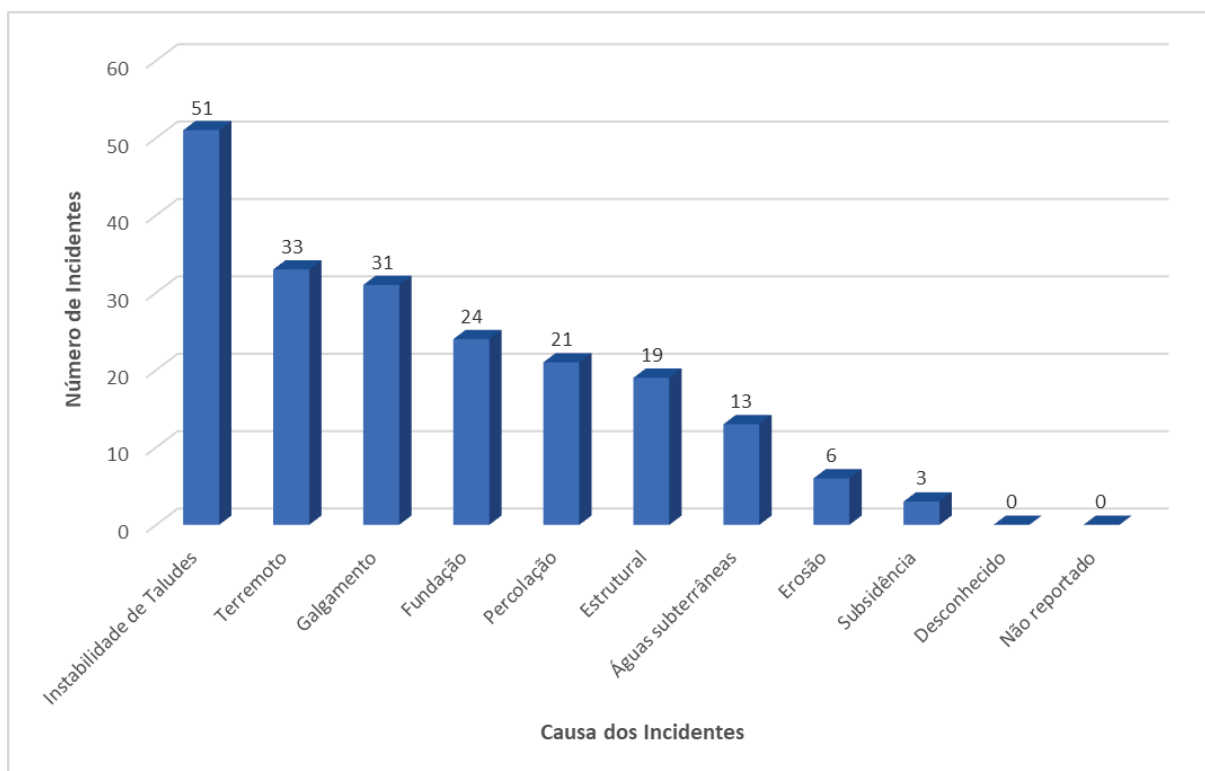
Figura 1 – Tipos de alteamento em barragens de rejeito.



Fonte: Silva (2020).

O ICOLD reitera, ainda, que é importante observar que existe maior número de barragens com alteamento a montante do que em relação aos outros tipos apresentados. A compilação das informações relacionadas às causas dos incidentes com barragens é mostrada na Figura 2.

Figura 2 – Causa de incidentes com barragens.



Fonte: International Commission on Large Dams (2001).

Duas das causas mais levantadas de incidentes com barragens envolvem instabilidade de taludes e terremotos. No Brasil, dada a baixa frequência de eventos sísmicos, apenas a instabilidade de taludes provoca grande preocupação com relação à segurança de barragens. Para monitoramento desse fator, é necessário realizar ensaios para identificação dos parâmetros geotécnicos do solo, tanto dos rejeitos que são contidos quanto do solo que compõe o barramento, e realizar análises de estabilidade global para conhecimento do comportamento da estrutura.

### 2.1.2 Mecanismo de ruptura de barragens de rejeito

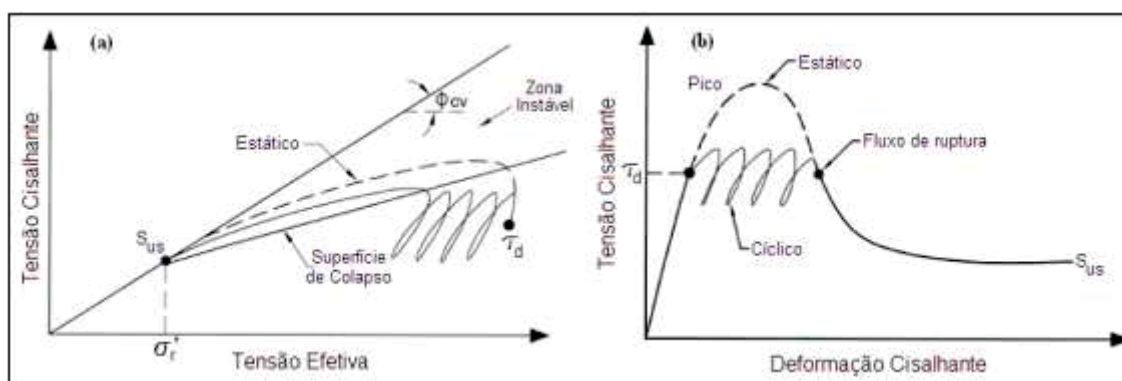
A liquefação é o principal mecanismo ligado à ruptura em barragens de rejeito (BISHOP, 1973). No entanto, os fenômenos que desencadeiam o escoamento de rejeitos por liquefação ainda são incompreendidos. Muitas das variáveis só foram investigadas por métodos indiretos, o que requer medições diretas durante o fenômeno, mas tais medições na prática são inviáveis devido à magnitude dos eventos (VICK, 1991).

A liquefação pode ser ativada tanto por carregamentos estáticos quanto por carregamentos cíclicos. Quando a carga é aumentada durante um carregamento estático, os deslocamentos ocorrem em apenas uma direção. Já os carregamentos cíclicos causam tensões cisalhantes reversas que podem ser muito efetivas para induzir uma tendência de contração com um resultante crescimento de poro-pressões (SOUZA, 2018).

O gatilho estático envolve uma condição tal como a de um aterro ou dique apoiado sobre um solo suscetível à liquefação, o que induz uma tensão cisalhante estática no solo de fundação. A liquefação será ativada se a resistência de pico deste solo for ultrapassada devido a um carregamento adicional aplicado (SOUZA, 2018).

A liquefação também pode ser provocada por carregamentos cíclicos, tais como aqueles provocados por terremotos, detonações e até mesmo vibrações por tráfego de equipamentos. A Figura 3 ilustra as duas situações de carregamento causadoras de liquefação.

Figura 3 – Liquefação devido a carregamento estático ou cíclico.



Fonte: Modificado de Davies et al., 2002.

As trajetórias de tensões efetivas para uma areia fofa saturada mediante carregamento não drenado, cíclico ou estático, são mostradas na Figura 3(a). As respostas tensão deformação correspondentes estão mostradas Figura 3(b). Uma vez que a trajetória de tensões ultrapassa a superfície de colapso, atingindo a zona instável, a resistência do solo é reduzida até alcançar o valor de estado permanente.

### 2.1.3 Reologia do escoamento de rejeitos

A reologia é a ciência que estuda as propriedades de deformação e do escoamento da matéria quando submetida a esforços (VLIET; LYKLEMA, 2005). A aplicação da reologia na mecânica dos rejeitos se faz quando o mesmo se comporta como um fluido, como no transporte de polpas de rejeito, utilizado na avaliação de corridas de rejeitos nos estudos de ruptura hipotética de barragens - Dam Break.

Enquanto no estudo da deformação de sólidos o parâmetro mais importante é o módulo de elasticidade, na reologia a viscosidade ( $\mu$ ) assume este papel. Trata-se de uma razão que descreve a relação entre a tensão cisalhante ( $\tau$ ) e a taxa de deformação cisalhante ( $\partial u / \partial y$ ), sendo  $u$  a velocidade de deformação e  $y$  o deslocamento, também conhecida como lei de Newton para viscosidade, como mostrado na equação a seguir:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

A viscosidade é função de seis variáveis independentes, a saber: temperatura, pressão, taxa de cisalhamento, natureza físico-química da substância, campo elétrico e o tempo de cisalhamento (GALINDO, 2013).

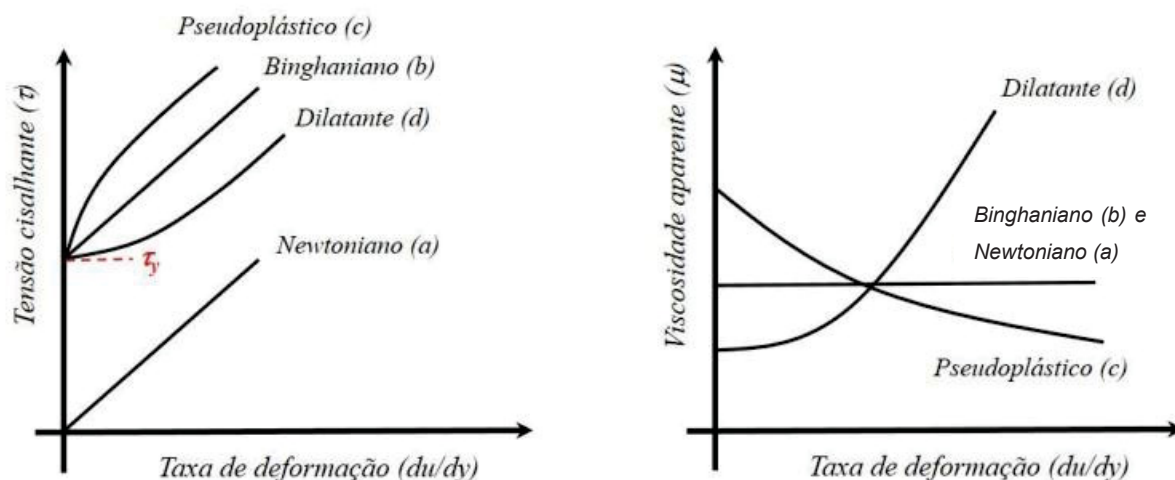
De acordo com Oliveira Filho & Abrão (2015), a viscosidade dos rejeitos varia com a mineralogia, concentração de sólidos, granulometria, pH e resistência iônica. Os rejeitos sob baixas concentrações (polpas) são fluidos reais, classificados como newtonianos quando a viscosidade é independente da tensão de escoamento ( $\tau y$ ). Nesta situação o escoamento se inicia imediatamente após a aplicação das tensões cisalhantes (Figura 4.(a)). A relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação indica viscosidade constante.

Todavia, quando do desaguamento dos rejeitos (espessados e pasta) a maior parte passa ao comportamento não-newtoniano. O escoamento nesta situação depende da tensão de escoamento, iniciando o fluxo somente após vencê-la (Figura 4.(b) (c) e (d)).

Galindo (2013) explica que os fluidos não-newtonianos são subdivididos em três classes: os independentes do tempo, os dependentes do tempo, e os viscoelásticos. Os fluidos não newtonianos independentes do tempo têm viscosidade

alterada somente pela taxa de cisalhamento, sendo divididos em três modelos: pseudoplásticos, dilatantes, e viscoplásticos ou binghamianos. A Figura 4.a ilustra os modelos supracitados.

Figura 4 – Modelos relógios de fluidos.



Fonte: Modificado de Boger (2013 e Ribeiro, V. Q. F (2015).

No modelo proposto por Bingham a viscosidade aparente é constante, similar ao modelo newtoniano, sendo o mais utilizado para rejeitos. Os modelos pseudoplástico e dilatante se caracterizam pela variação da viscosidade com a taxa de cisalhamento, enquanto no primeiro ocorre uma redução, no segundo há um acréscimo da viscosidade.

A Tabela 1 expõe alguns modelos matemáticos que mostram a relação existente entre a tensão e a taxa de cisalhamento observada na prática.

Tabela 1 – Equações Reológicas de fluidos não newtonianos.

<b>Tipo de fluido</b>	<b>Equação reológica</b>
Fluido plástico de Bingham	$\tau = \tau_b + \eta \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2)$
Fluido pseudo-plástico $m < 1$ Fluido Dilatante $m < 1$	$\tau = K \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^m \quad (3)$
Fluido pseudo-plástico com tensão de escoamento	$\tau = \tau_y + K \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^m \quad (4)$

Fonte: Adaptado de Boger (2013)

#### 2.1.4 Parâmetros reológicos de rejeitos

Em relação à determinação dos parâmetros reológicos de solos, várias pesquisas foram realizadas para estudar as corridas de massa, incluindo trabalhos de O'Brien & Julien (1988), Julien & León (2000), Egashira et al. (2001), Huang & Aode (2009) e Boniello et al. (2010). Esses estudos demonstraram que tanto a viscosidade quanto a tensão de escoamento aumentam de forma exponencial com a concentração de sólidos ( $C_v$ ), conforme mostrado nas Equações (5) e (6), bem como Figura 5 e Figura 6.

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad (5)$$

$$\tau = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad (6)$$

Onde:

$\tau$  - Tensão de escoamento Limite (Pa)

$\eta$  - Viscosidade (Pa.s)

$C_v$  -  $V_s$  (volume de sólidos) /  $V_t$  (volume de água mais sólidos)

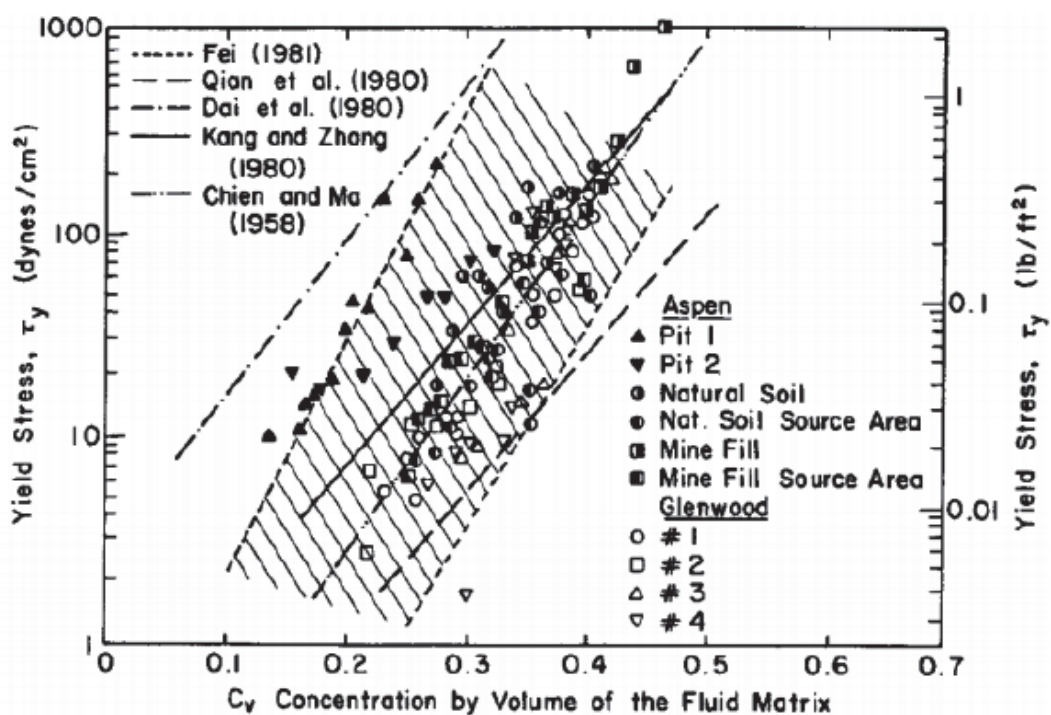
$\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$  - Coeficientes empíricos de ajuste.

A correlação entre densidade e concentração volumétrica de rejeitos geralmente segue uma relação direta. Isso significa que, à medida que a concentração volumétrica de rejeitos aumenta, a densidade do material também tende a aumentar.

Isso ocorre porque, à medida que a concentração volumétrica de rejeitos aumenta, há uma maior quantidade de partículas sólidas presentes em relação ao volume total do material. Como as partículas sólidas tendem a ter uma densidade maior do que o líquido ou o meio em que estão suspensas, a densidade do material como um todo aumenta à medida que mais partículas sólidas são adicionadas.

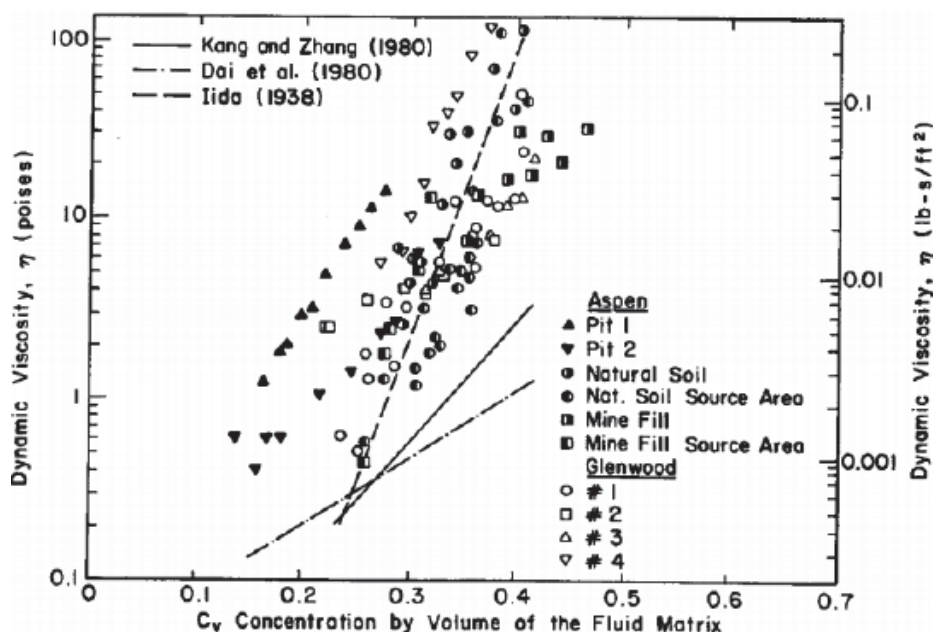
No entanto, a relação exata entre densidade e concentração volumétrica de rejeitos pode variar dependendo das propriedades específicas dos materiais envolvidos, como o tipo e o tamanho das partículas sólidas, a densidade do líquido em que estão suspensas, e quaisquer interações entre as partículas e o meio circundante.

Figura 5 - Correlação entre tensão de escoamento e concentração volumétrica.



Fonte: O'Brien & Julien (1988).

Figura 6 - Correlação entre viscosidade e concentração volumétrica.



Fonte: O'Brien & Julien (1988).

Entre os estudos para determinação das propriedades reológicas de rejeitos, destacam-se os de Ribeiro (2015) e Machado (2017), que utilizaram diferentes amostras de rejeitos para avaliar suas propriedades de fluxo e viscoelasticidade.

Ambas as amostras de rejeito utilizadas nas pesquisas supracitadas são de minério de ferro, sendo as amostras de Ribeiro (2015) caracterizadas como provenientes) de “processo de beneficiamento do minério de ferro do quadrilátero ferrífero-MG”. não há maiores informações relacionadas ao ponto de coleta do material.

Machado (2017) realizou seus trabalhos baseada na reconstituição do rejeito pós ruptura da barragem da SAMARCO, denominada “Barragem do Fundão”. As amostras foram coletadas das margens do vale atingido pela rutura da barragem, ocorrida em 05/11/2015, e atingindo o subdistrito de Bento Rodrigues.

Os resultados obtidos mostraram que os rejeitos apresentaram comportamento viscoplástico e que suas viscosidades aparentes aumentaram com o aumento da concentração de sólidos. Indicaram, ainda, que o rejeito apresentou um comportamento não-newtoniano e que a viscosidade aparente variou de acordo com

as condições de teste. Esses estudos são importantes para compreender as propriedades reológicas de rejeitos e para auxiliar na definição de estratégias adequadas de disposição e gestão desses materiais.

Machado (2017), apresentou os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  nos mesmos termos de O'Brien & Julien (1988), dessa forma as equações de correlação de tensão limite de escoamento e viscosidade em relação a concentração volumétrica apresentam a seguinte forma.

$$\eta = 0,000004e^{20,969C_v} \quad (7)$$

$$\tau = 0,0000001e^{39,278C_v} \quad (8)$$

As correlações obtidas por Ribeiro (2015), advém do ajuste exponencial dos resultados obtidos nos ensaios realizados com o viscosímetro. As equações de correlação das variáveis reológicas em relação a concentração volumétrica são apresentadas a seguir.

$$\eta = 1,9421.C_v^{1,7811} \quad (9)$$

$$\tau = 514,2.C_v^{2,2424} \quad (10)$$

Ambas as equações foram traçadas para rejeito de minério de ferro, portanto devem ser aplicadas somente nesse contexto.

Silva (2020), realizou ensaios em amostras reconstituídas do rejeito deslocado da Barragem B1, em Brumadinho/MG. Em seus estudos foram analisadas duas concentrações volumétricas hipotéticas, sendo essas 35% e 40%. Os resultados obtidos convergem para ordens de grandeza completamente distintas das obtidas tanto por Machado (2017), como Ribeiro (2015). A Tabela 2 apresenta os parâmetros reológicos a concentração volumétrica pré-determinada.

Tabela 2 – Parâmetros reológicos de amostras pós-ruptura Barragem I.

<b>Concentração volumétrica (%)</b>	<b>Tensão de escoamento limite (Pa)</b>	<b>Viscosidade (Pa.s)</b>
35%	5,73	119,37
40%	6,31	467,40

Fonte: Silva, 2020.

## 2.2 PROPAGAÇÃO DE FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS

### 2.2.1 Equações constitutivas

As equações de Navier-Stokes descrevem o movimento dos fluidos em três dimensões. No contexto da modelização dos canais e das inundações, são impostas novas simplificações. Um conjunto simplificado de equações são as equações de águas rasas (SWE – Shallow Water Equations). O fluido incompressível, a densidade uniforme e a pressão hidrostática são assumidas e as equações são calculadas para que o movimento turbulento seja aproximado usando viscosidade de turbilhonamento (USACE, 2020).

Assume-se também que a escala de comprimento vertical é muito menor do que as escalas de comprimento horizontal. Como consequência, a velocidade vertical é pequena e a pressão é hidrostática, levando à forma diferencial das equações SW derivadas em seções subsequentes.

Essas equações foram desenvolvidas por Adhémar Jean Claude Barré, conde de Saint-Venant, e foram originalmente formuladas para entender e modelar a propagação de ondas em canais, mas rapidamente se tornaram uma ferramenta fundamental para a hidrodinâmica, ajudando na previsão de inundações, erosão e outros problemas relacionados à água em rios e canais.

As equações de Saint-Venant são expressas em termos de duas variáveis: a profundidade da água e a velocidade horizontal do escoamento. Elas descrevem a conservação da massa e do momento, e podem ser escritas de forma simplificada como um sistema de duas equações diferenciais parciais não-lineares, uma para a profundidade e outra para a velocidade. No entanto, a solução analítica exata dessas

equações é geralmente difícil ou impossível de ser encontrada para situações reais; por isso, métodos numéricos são frequentemente usados.

Para fluidos com densidade constante a equação pode ser descrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \rightarrow \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{dh}{dx} = gA(S_0 - S_f) \quad (11)$$

Para fluidos não newtonianos a diferença está nas forças de atrito ( $S_f$ ), justamente pelo fluido não apresentar uma relação linear entre a tensão cisalhante como descrito para a água. Os termos de resistência  $S_f$  variam de acordo com o modelo reológico adotado, onde o modelo reológico de Bingham é representado pela parcela  $\tau_0$ , na equação existente utilizada para propagação de fluidos newtonianos, onde temos o seguinte:

$$S_f = \frac{\tau_0}{\rho gh} \quad (12)$$

Os valores de  $\tau_0$  podem ser expressos da seguinte forma:

- Bingham Completo:

$$2\tau_0^3 - 3(\tau_y + 2\tau_\mu)\tau_0^2 + \tau_y^3 = 0 \quad (13)$$

- Bingham Simplificado:

$$\tau_0 = 1,5\tau_y + 3\tau_\mu \quad (14)$$

$$\tau_\mu = \mu \frac{q}{h^2} \quad (15)$$

Onde:

$\tau_0$  -Tensão cisalhante (Pa);

$\tau_y$  -Tensão de escoamento (Pa)

$\mu$  - Viscosidade do fluido de Bingham (Pa.s);

$h$  - Profundidade, em metros (m);

$q$  - Vazão específica – vazão por metro de largura da seção (m<sup>3</sup>/s.m).

## 2.2.2 Classificação dos tipos de escoamento

Antes de qualquer propagação, é necessário realizar uma análise da concentração volumétrica (ou teor de sólidos) presente no reservatório da barragem (ROCHA, 2015). Essa análise tem como objetivo avaliar a relação entre o volume de sólidos e o volume total. Se essa relação for superior a 20%, o fluido pode ser considerado como hiperconcentrado (O'BRIEN & JULIEN, 1985). Essa categorização, baseada na faixa de concentração, permite prognosticar o comportamento do fluxo, ajudando a definir o modelo mais adequado a ser adotado.

O Tabela 3 apresenta de forma compilada o tipo de escoamento conforme a concentração volumétrica do rejeito.

Tabela 3 – Classificação dos tipos de escoamento.

Escoamento	Concentração Volumétrica – Cv %	Descrição
Escorregamento	0,53 - 0,90	Sem escoamento.
	0,50 - 0,53	Deformações internas e movimento lento devido às tensões.
Lama plástica	0,48 - 0,50	Escoamento evidente, porém, lento. Deformações plásticas sem espriamento sobre superfícies adjacentes.
	0,45 - 0,48	Início de espriamento, apesar da atuação de forças coesivas.
Corrida de lama	0,40 - 0,45	Mistura-se com facilidade. Apresenta fluidez na deformação alastrando-se sobre superfícies horizontais. Durante movimento a superfície do fluido apresenta considerável declividade. Aparecimento de ondas com dissipação rápida.
	0,35 - 0,40	Acentuada sedimentação. Alastra-se quase por completo sobre superfícies horizontais. Identificação de duas fases, a fase líquida fica evidente. Ondas se propagam por distâncias consideráveis.
	0,30 - 0,35	Separação de água na superfície. Ondas propagam-se com facilidade. Decantação de partículas granulares.
	0,20 - 0,30	Ação de ondas distinta. superfície fluida. Todas as partículas foram decantadas.
Água	< 0,20	Inundação provocada por propagação de onda no estado líquido com carga de sedimento suspensos

Fonte: Machado, 2017 (Tradução e adaptação de O'Brien e Julien, 1985).

Essa categorização dos fluidos hiperconcentrados, com base em suas concentrações volumétricas, permite prognosticar o comportamento do fluxo e ajuda a definir os modelos hidráulicos que melhor representam o fenômeno físico em análise. Com esse objetivo, o National Resources Council elaborou um documento sobre metodologias de previsão de fluxos de lama (NRC, 1982), no qual são delineados os tipos de escoamentos para fluxos hiperconcentrados e de transporte de massa, sendo propostas quatro categorias: escoamento aquoso, corrida de lama, lama plástica e escorregamentos.

## 2.3 MODELOS HIDRODINÂMICOS

### 2.3.1 Modelo HEC-RAS

Este capítulo tem como objetivo apresentar as metodologias utilizadas para realizar cálculos unidimensionais (1D) de fluxo permanente e não permanente, bem como cálculos bidimensionais (2D) de fluxo instável dentro do HEC-RAS. Para isso, são apresentadas as equações básicas e seus termos, além de esquemas de solução para as diferentes equações. Discute-se também como essas equações devem ser aplicadas e suas limitações.

A base teórica para o cálculo do movimento dos fluidos em termos de inundação é descrita de forma tridimensional, mas para simplificar as equações de Navier-Stokes são utilizadas as equações de Águas Rasas (Shallow Water - SW). Nessas simplificações, o fluido é considerado incompressível, com densidade e pressão hidrostática constantes. Além disso, é assumido que a escala de comprimento vertical é muito menor do que as escalas de comprimento horizontal, o que resulta em uma velocidade vertical de pequena magnitude (USACE, 2020). A partir dessas considerações, tem-se a equação de continuidade:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (16)$$

Onde  $t$  é o tempo,  $u$  e  $v$  são os componentes de velocidade na direção  $x$  e  $y$ , respectivamente, e  $q$  é um termo de fluxo (fonte ou sumidouro).

A equação de quantidade de movimento utilizada no modelo é descrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f_c v = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_{xx} h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_{yy} h \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{b,x}}{\rho R} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho h} - \frac{\partial p_{um}}{\rho \partial x} \quad (17)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - f_c u = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_{xx} h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_{yy} h \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{b,y}}{\rho R} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho h} - \frac{\partial p_{um}}{\rho \partial y} \quad (18)$$

Onde

$H$  - Elevação da superfície do fluido (m);

$t$  - Tempo (s);

$h$  - Profundidade (m);

$g$  - Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );

$u, v$  - Velocidade nas direções cartesianas (m/s);

$v_{xx}, v_{yy}$  - Coeficiente de viscosidade turbulenta nas componentes  $x$  e  $y$  ( $m^2/s$ );

$\tau_{b,x}, \tau_{b,y}$  - Tensões inferiores nas direções  $x$  e  $y$  ( $N/m^3$ )

$\tau_{s,x}, \tau_{s,y}$  - Tensões do vento na superfície nas direções  $x$  e  $y$  ( $N/m^3$ )

$f_c$  - Força de Coriolis referente a força centrífuga do movimento rotacional da Terra ( $m/s^2$ );

Alguns dos parâmetros apresentados possuem ordem de grandeza irrelevantes frente a energia do fluido de ruptura, como viscosidade turbulenta, tensão de vento e força de Coriolis, porém ainda fazem parte da equação completa implementada pelo modelo.

A tensão de cisalhamento inferior é dada pelo produto entre o coeficiente de arrasto, velocidade absoluta e densidade, a equação toma a seguinte forma:

$$\tau_b = \rho C_d |V| V \quad (19)$$

O coeficiente de arrasto está relacionado com o coeficiente de atrito da superfície do fundo,  $c_f$ , é representado pelo coeficiente de rugosidade de Manning  $n$  obtido através da fórmula de Manning apresentada na Equação (20) (USACE, 2020):

$$C_f = \frac{Cd}{R} V = \frac{n^2 g}{R^{4/3}} V \quad (20)$$

Onde:

n - Coeficiente de rugosidade de Manning;

g - Aceleração da gravidade (m<sup>2</sup>);

R - Raio hidráulico em metros (m);

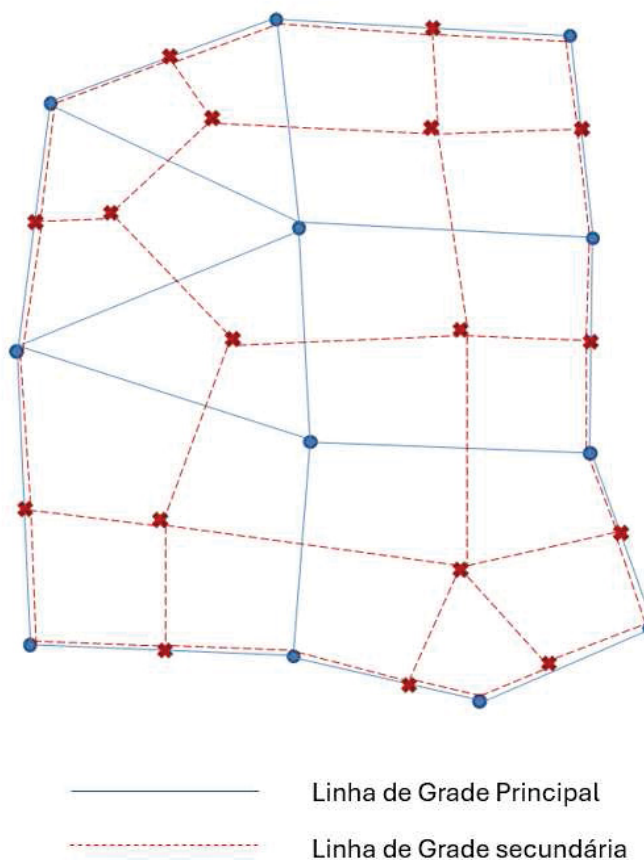
V - Velocidade absoluta (m/s).

A Equação (16) é utilizada para determinar a elevação do fluido nas direções X e Y, enquanto as Equações (17) e (18) são usadas para calcular a velocidade do fluido e seu direcionamento em cada célula. Na parte esquerda da equação de momento estão os termos relacionados à aceleração do fluido, enquanto a parte direita representa o conjunto de forças internas e externas que agem sobre o fluido, organizados de forma a estar de acordo com a segunda lei de Newton (USACE, 2020).

Apesar de todo o processo de cálculo do comportamento do fluido ser realizado sobre a base topográfica, a resolução espacial dos dados topográficos fornecidos pelo sensoriamento remoto aerotransportado tem melhorado significativamente. No entanto, em muitos casos, os dados são tão densos que não podem ser usados diretamente como malha de cálculo para o modelo numérico hidrodinâmico, o que cria uma barreira computacional. Isso dificulta a compatibilização entre uma topografia altamente detalhada e o modelo matemático que utiliza uma malha de cálculo mais esparsa na simulação do fluido (USACE, 2020).

Para solucionar essa questão, o modelo HEC-RAS adota o método de cálculo de sub malha batimétrica, ilustrado na Figura 7. Esse método pré-processa as informações de raio hidráulico, volume e área da seção das células da malha de cálculo (malha 2D), representada pelas linhas sólidas, a partir da topografia, representada pela malha tracejada. Embora alguns detalhes topográficos sejam perdidos, informações precisas são preservadas para garantir que o método numérico esperso seja capaz de explicar a influência do terreno por meio da conservação de massa (USACE, 2020).

Figura 7 - Malha computacional 2D



Fonte: USACE, 2020.

Na Figura 7, os nós e arestas da grade são representados por pontos e linhas sólidas; os nós e arestas de grade dupla são representados por cruzamentos e linhas tracejadas.

Do ponto de vista matemático, O cruzamento das malhas tracejadas e solidas representam pontos adicionais de cálculo. Com essas adições extras, a grade principal (sólida) e sua dupla (tracejada) têm algumas propriedades interessantes. Por exemplo, as arestas duplas cruzam as arestas regulares e os dois grupos estão em uma correspondência um-para-um. Da mesma forma, as células duplas estão em uma correspondência um-para-um com os nós de grade, e os nós duplos estão em uma correspondência um-para-um com as células de grade. Além disso, a dupla da grade secundária é a grade original.

No contexto das equações descritas neste documento, é conveniente calcular numericamente: a elevação da superfície da água nos centros celulares da grade

(incluindo células artificiais), a velocidade perpendicular às faces (determinando a transferência de fluxo através das faces) e o vetor de velocidade nos pontos da face.

O intervalo de tempo em que a propagação do fluido é calculada é um elemento que deve ser configurado e que influencia diretamente a estabilidade do modelo assim como a qualidade dos resultados obtidos

A condição de Courant, também conhecida como critério CFL (Courant-Friedrichs-Lewy), é uma limitação sobre o tamanho do passo de tempo que pode ser usado em uma simulação para garantir a estabilidade numérica. Ela é baseada na relação entre o tamanho do passo de tempo, a velocidade do fenômeno sendo simulado e o tamanho da grade espacial (ou elementos finitos) da simulação. A condição de Courant controla o intervalo de tempo da simulação, conforme mostrado na equação (21) (USACE, 2020).

$$C = V_w \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (21)$$

Onde,

C - Número de Courant, adimensional;

$V_w$  - Velocidade no sentido longitudinal do escoamento (m/s);

$\Delta t$  - Intervalo de tempo para cálculo, (s);

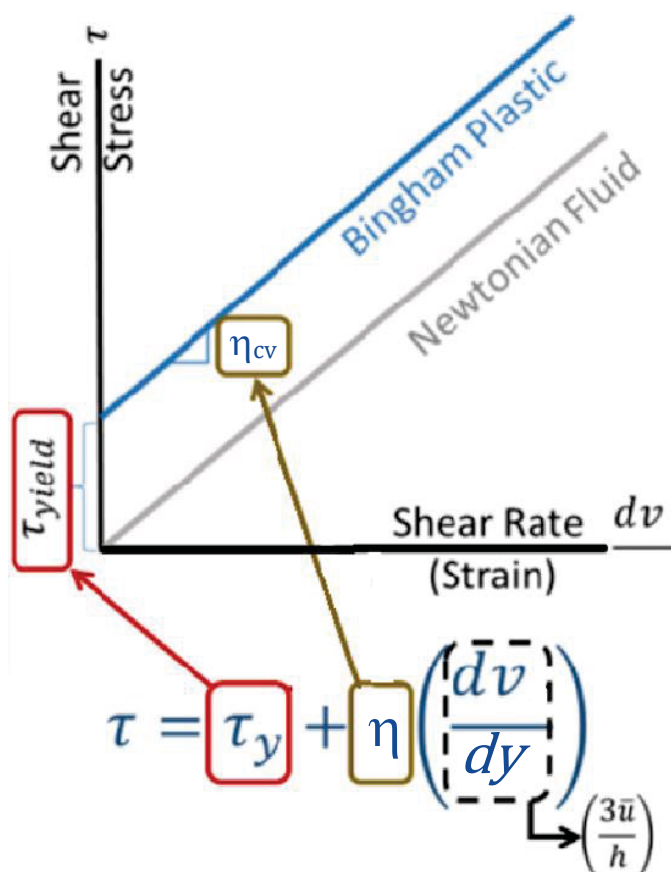
$\Delta x$  - Intervalo de discretização do trecho para cálculo, (m)

As condições de contorno do modelo estão associadas aos locais de entrada e de saída de fluido no modelo. As condições de contorno de montante e de jusante são necessárias em função da onda de ruptura possuir natureza transiente e, por isso, ser representada pelo regime de escoamento não uniforme (MACHADO, 2017).

A partir da versão 6.0 do HEC-RAS, incorporou alguns modelos de propagação de fluidos hiperconcentrados, dentre os quais é possível destacar a equação de Bingham, sendo frequentemente aplicada a fluxos hiperconcentrados e fluxos de lama. Em teoria, esses fluxos de concentração mais baixos se encaixam

melhor no modelo linear (USACE,2020). Sua formulação relativamente simples facilita a calibração, porém menos parâmetros livres o tornam menos vulnerável a problemas de equifinalidade. A Figura 8 apresenta graficamente o esquema do modelo.

Figura 8 - Representação gráfica – Modelo de Bingham.



Fonte: Adaptado (USACE,2020)

O modelo de Bingham requer apenas duas entradas do usuário: a resistência ao escoamento (a interceptação da relação tensão-deformação) e a viscosidade carregada de sedimentos (a inclinação da relação tensão-deformação), conforme expresso na Equação (22).

$$\tau = \tau_y + \eta \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (22)$$

Onde,

$\tau$  - Tensão cisalhante, em segundos Pascal (Pa);

$(\partial v/\partial y)$  - Taxa de cisalhamento;

$\tau_y$  - Tensão limite de escoamento, em segundos Pascal (Pa)

$\eta$  - Viscosidade dinâmica, em Pascal.segundo (Pa.s);

### 2.3.2 Modelo RiverFlow 2D

Os fluxos de água rasa podem ser descritos matematicamente por equações de conservação de massa e momentum médios em profundidade, com todas as suposições associadas (Vreugdenhil 1994). Esse sistema de equações diferenciais parciais será formulado aqui de forma conservativa da seguinte maneira:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} = S(U, x, y) \quad (23)$$

onde  $U=(h,q_x,q_y)^T$  é o vetor de variáveis conservadas com  $h$  representando a profundidade da água,  $q_x=uh$  e  $q_y=vh$  as descargas unitárias, com  $(u,v)$  os componentes médios em profundidade do vetor de velocidade  $\bar{u}$  ao longo das coordenadas  $(x,y)$  respectivamente. Os vetores de fluxo são dados por:

$$\mathbf{F} = \left( q_x, \frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2, \frac{q_x q_y}{h} \right)^T, \mathbf{G} = \left( q_y, \frac{q_x q_y}{h}, \frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2 \right)^T \quad (24)$$

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

$$\mathbf{S} = \left( 0, gh(S_{0x} - S_{fx}), gh(S_{0y} - S_{fy}) \right)^T \quad (25)$$

onde os declives do leito do nível inferior  $Z_b$  são

$$S_{0x} = -\frac{\partial Z_b}{\partial x}, S_{0y} = -\frac{\partial Z_b}{\partial y} \quad (26)$$

e a contribuição do estresse do leito é modelada usando a lei de atrito de Manning, de modo que:

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

Com  $n$  sendo o coeficiente de rugosidade.

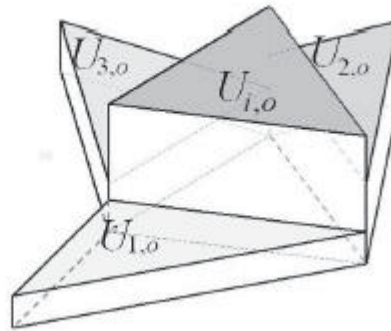
Com essa opção, o modelo pode considerar a variação de temperatura e seu efeito na densidade e viscosidade, mas a temperatura do fluido é assumida como prescrita pelo usuário e não depende de mudanças ambientais durante a simulação.

Para introduzir o esquema de volume finito, a equação (5.1) é integrada em um volume ou célula de grade  $\Omega$  usando o teorema de Gauss:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \mathbf{U} d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \mathbf{E} n dl = \int_{\Omega} \mathbf{S} d\Omega \quad (28)$$

onde  $\mathbf{E} = (F, G)$  e  $\mathbf{n} = (n_x, n_y)$  é o vetor normal unitário exterior ao volume  $\Omega$ . Para obter uma solução numérica do sistema (28), o domínio é dividido em células computacionais,  $\Omega_i$ , usando uma malha fixa. Supondo uma representação por partes das variáveis conservadas (Figura 9) e uma formulação de fluxos e termos fonte unificada e direcionada a montante (Murillo & García-Navarro 2010b).

Figura 9 - Representação uniforme por partes das variáveis do fluxo



Fonte: Hydronia LLC, 2023.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_i} \mathbf{U} d\Omega + \sum_{k=1}^{NE} (\mathbf{E}_n - \bar{\mathbf{S}})_k l_k = 0 \quad (29)$$

A solução aproximada pode ser definida utilizando uma matriz Jacobiana aproximada  $\mathbf{eJ}_{n,k}$  (Roe, 1981) do fluxo normal não linear  $\mathbf{E}_n$  e duas matrizes aproximadas  $\mathbf{eP}=(\mathbf{e1},\mathbf{e2},\mathbf{e3})$  e  $\mathbf{eP}_{-1}$ , construídas usando os autovetores da Jacobiana.

O método de volume finito pode ser escrito usando uma formulação compacta de divisão de ondas da seguinte forma:

$$\mathbf{U}_i^{n+1} = \mathbf{U}_i^n - \sum_{k=1}^{NE} (\delta \mathbf{M}_{i,k}^-)^n \frac{l_k}{A_i} \Delta t \quad (30)$$

O uso de (30) é eficiente ao lidar com condições de contorno. Ao mesmo tempo, garante a conservação. Em (Murillo & García-Navarro 2010b), foi demonstrado como, para um esquema numérico escrito na forma de divisão, a quantidade total de contribuições calculadas dentro do domínio em cada borda da célula é igual ao equilíbrio de fluxos que atravessam a fronteira do domínio, provando a conservação exata.

Uma vez que correções numéricas são aplicadas, a região de estabilidade para o caso homogêneo pode ser usada para calcular o tamanho do passo de tempo. No contexto 2D, considerando malhas não estruturadas, a distância relevante, que será referida como  $\chi_i$  em cada célula  $i$ , deve considerar o volume da célula e o comprimento das arestas  $k$  compartilhadas.

$$\chi_i = \frac{A_i}{\max_{k=1,NE} l_k} \quad (31)$$

Considerando que cada  $k$  RP é usado para fornecer informações a um par de células vizinhas de tamanhos diferentes, a distância  $\min(A_i, A_j)/l_k$  é relevante. O passo de tempo é limitado por

$$\Delta t \leq CFL \Delta t^{\tilde{\lambda}} \quad \Delta t^{\tilde{\lambda}} = \frac{\min(\chi_i, \chi_j)}{\max|\tilde{\lambda}^m|} \quad (32)$$

com  $CFL=1/2$ , já que a construção de esquemas de volume finito a partir da aplicação direta de fluxos unidimensionais leva a intervalos de estabilidade reduzidos (Toro 2001).

O método de solução RiverFlow2D utiliza passos de tempo variáveis. O passo de tempo máximo permitido é controlado pelo número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) definido pelo usuário, que é proporcional ao tamanho local da célula, mas também inversamente proporcional à velocidade e profundidade. Células menores levam a passos de tempo menores. O valor CFL teórico máximo é 1, mas em algumas execuções pode ser necessário reduzir esse número para valores mais baixos.

Na abordagem aos fluidos não-newtonianos, o modelo matemático adotado no modelo é baseado no de (Murillo & García-Navarro 2011), considerando condições de leito fixo e a resistência basal para fluxo de superfície livre variando de água clara a misturas hiperconcentradas de sedimentos.

O modelo envolve as seguintes suposições:

- O fluxo está confinado a uma camada que é fina em comparação com a escala horizontal de interesse.
- O fluxo é governado pela equação (23) com os termos de resistência avaliados conforme explicado abaixo.
- A mistura de água e sedimentos é descrita usando a abordagem contínua, sem distinguir a fase líquida da sólida.
- O leito do rio não erode, portanto, o transporte/deposição de material não é possível.
- O fluido é assumido como uma mistura homogênea de uma única fase de água e sedimento e possui propriedades constantes: por exemplo, densidade, viscosidade, tensão de cedência, ângulo de atrito basal, etc. A pressão do fluido poroso também é considerada hidrostática.
- O sistema de coordenadas de referência é horizontal-vertical e as forças de pressão e estresse atuam ao longo da direção horizontal.

Considerando os fluxos turbulentos coesivos, a combinação de uma resistência coesiva, estresse viscoso e a contribuição turbulenta/dispersiva leva à formulação quadrática (Julien & Lan 1991) para fluxos turbulentos hiperconcentrados com estresse coesivo dominante em baixas taxas de cisalhamento. Para este modelo aditivo, os módulos de resistência basal  $\tau_b$  podem ser expressos como:

$$\tau_b = \tau_y + \frac{k_0}{8} \mu_B \frac{|\mathbf{u}|}{h} + \rho g_\psi \frac{n^2 |\mathbf{u}|^2}{h^{1/3}} \quad (33)$$

Onde  $\mu_B$  [Pa · s] é a viscosidade plástica do material e  $k_0$  é um parâmetro de resistência. No caso particular de fluxo laminar em canais lisos, retangulares e largos,  $k_0=24$  é geralmente adequado, mas ele aumenta com a rugosidade e geometria irregular do canal (O'Brien, Julien & Fullerton 1993). Esse modelo tem a denominação “quadratic” nas opções de seleção do software.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

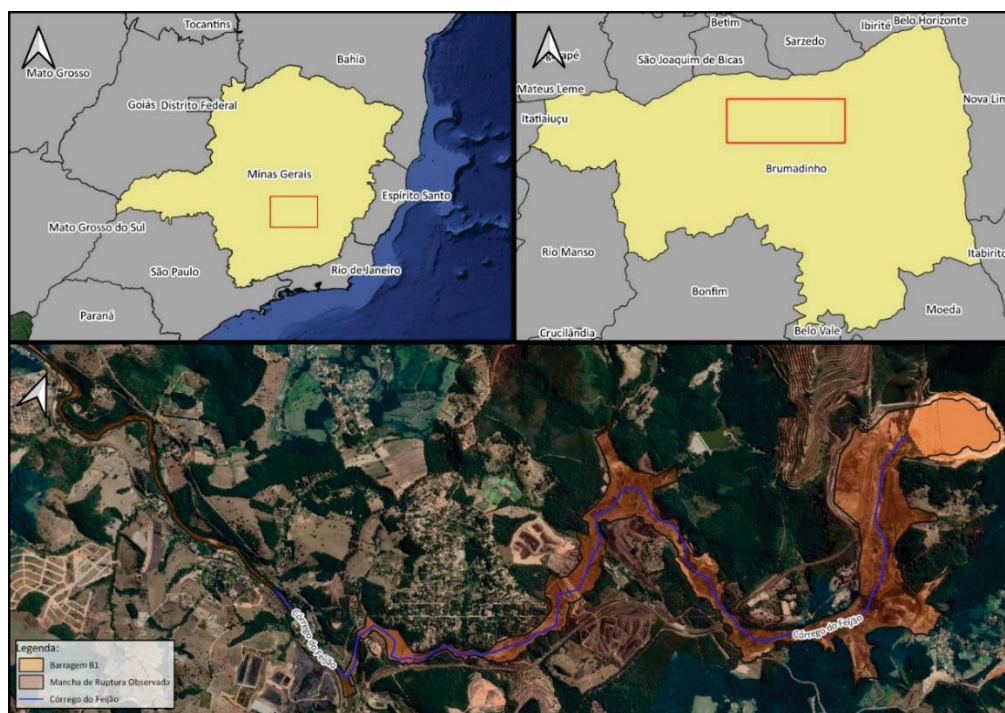
#### 3.1 CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM

A seguir são apresentados os principais aspectos relacionados a Barragem I, na Mina do Córrego do Feijão, no município e Brumadinho, MG, utilizada como estudo de caso.

##### 3.1.1 Localização da barragem

A Barragem B1 está localizada no Córrego da Mina do Feijão, em Brumadinho, Minas Gerais. Esta barragem faz parte de uma estrutura maior, que compreende várias barragens e instalações associadas, destinadas ao armazenamento de rejeitos de mineração. O Córrego da Mina do Feijão é um curso d'água que atravessa a região e foi represado para formar o reservatório contido pela Barragem B1. A Figura 10 apresenta o mapa com a localização da Barragem.

Figura 10 – Localização da Barragem B1.



Fonte: O Autor (2024).

### 3.1.2 Construção da barragem

A Barragem B1 foi desenvolvida para armazenar rejeitos produzidos durante as operações de mineração na mina Córrego do Feijão. A barragem foi construída em uma área com rochas de gnaisses e solos saprolíticos, residuais e coluviais (Robertson et al., 2019).

Os gnaisses são um tipo de rocha metamórfica de granulação média a grossa, formada por um processo metamórfico em que rochas pré-existentes, como granito, sedimentares ou outras rochas metamórficas, são submetidas a altas pressões e temperaturas. Os gnaisses têm uma textura característica de bandas ou camadas alternadas de minerais claros e escuros, como quartzo, feldspato, mica e anfibólio.

O quartzo, é composto principalmente de dióxido de silício, destaca-se por sua dureza e resistência à erosão, enquanto os feldspatos, que compreendem cerca de 60% da crosta terrestre, são compostos de alumínio, silício e outros elementos, frequentemente associados com sódio, potássio ou cálcio. As micas, caracterizadas por sua estrutura laminar, são compostas principalmente de silicatos de alumínio e são encontradas em uma variedade de cores em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. Os anfibólios, um grupo de minerais silicatados, possuem estrutura cristalina em forma de agulha ou prisma e são compostos de silício, oxigênio, ferro, magnésio e alumínio, encontrados em rochas metamórficas e ígneas.

Os solos saprolíticos são solos formados pela decomposição química e física in situ de rochas e minerais, geralmente em climas quentes e úmidos. Esses solos retêm algumas características da rocha original de onde se originaram, como a composição mineralógica, mas geralmente são mais friáveis, porosos e ricos em matéria orgânica do que as rochas não intemperizadas.

Os solos residuais são formados pela decomposição in situ de rochas subjacentes, sem serem deslocados ou transportados de sua posição original. Eles mantêm uma relação genética direta com as rochas subjacentes e geralmente compartilham características semelhantes àquelas rochas, como composição mineralógica e estrutura geológica.

Os solos coluviais são solos depositados por processos de movimentação de massa, como deslizamentos de terra, em encostas ou declives. Esses solos são transportados por gravidade, geralmente por meio de deslizamentos ou quedas, e se acumulam na base das encostas ou em terrenos inclinados adjacentes.

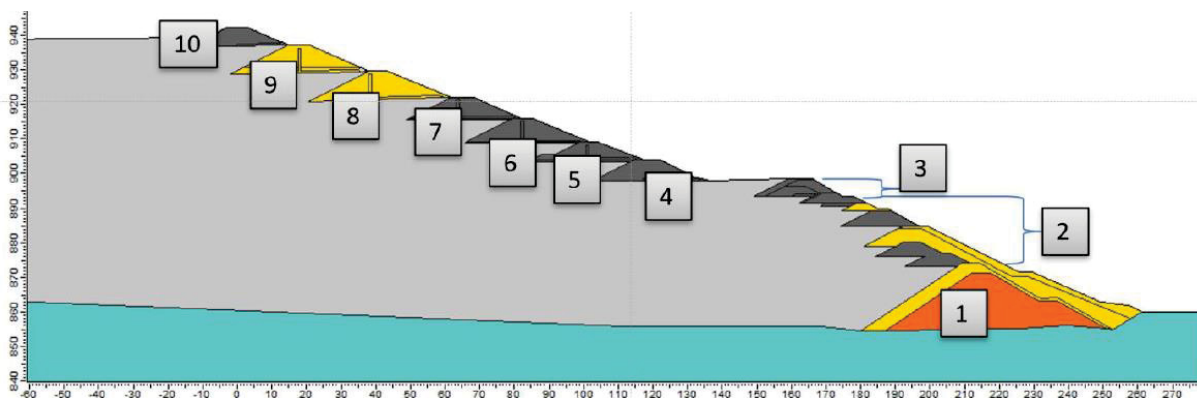
Esses termos são importantes na geotecnia, pois cada tipo de solo ou rocha possui propriedades geotécnicas distintas que afetam sua estabilidade, permeabilidade, capacidade de suporte de carga e outras características relevantes para a engenharia geotécnica de barragens.

Conforme o relatório Revisão Periódica de Segurança da TÜV SÜD de 2018, a Barragem B1 é formada por 10 alteamentos ao longo de 37 anos, sendo o último em 2013. A barragem foi construída usando o método a montante, com cada alteamento consistindo em uma berma construída sobre os rejeitos previamente depositados e drenados.

O processo de alteamento da barragem resultou em deslocamento da crista a montante ao longo do tempo, conforme ilustrado na Figura 11. Usando esse método, a barragem foi construída a uma altura total de 86 m (pé a crista), com a cota final da crista de 942 metros acima do nível médio do mar do e um comprimento de crista de 720 m.

A altura de cada alteamento variou de 5 a 18 m. Os taludes a montante e a jusante das bermas construídas em cada alteamento variaram de 1,5 na horizontal a 1 na vertical (1,5H:1V) a 2,5H:1V; no entanto, inclinações de 2H:1V foram usadas na maioria dos casos.

Figura 11 – Etapas construtivas da barragem.



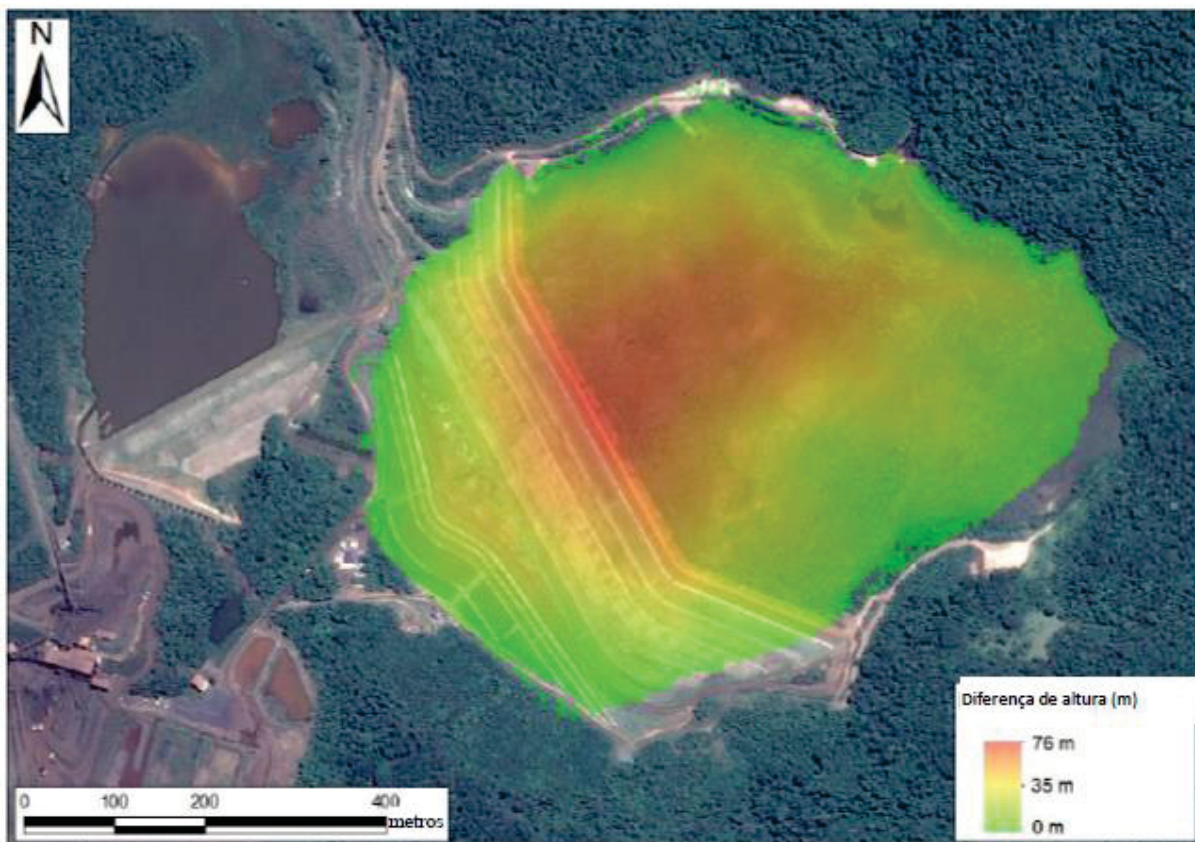
Fonte: Robertson et al. (2019)

### 3.1.3 Volume armazenado

Robertson et al., (2019), teve acesso aos dados topográficos anteriores a construção da Barragem I, dados de LiDAR (da sigla em inglês Light Detection and Ranging) e dados coletados antes da ruptura, em setembro de 2018.

Ao comparar as bases topográficas foi possível estimar o volume e a espessura dos rejeitos depositados. A Figura 12 apresenta as diferenças de alturas mensuradas.

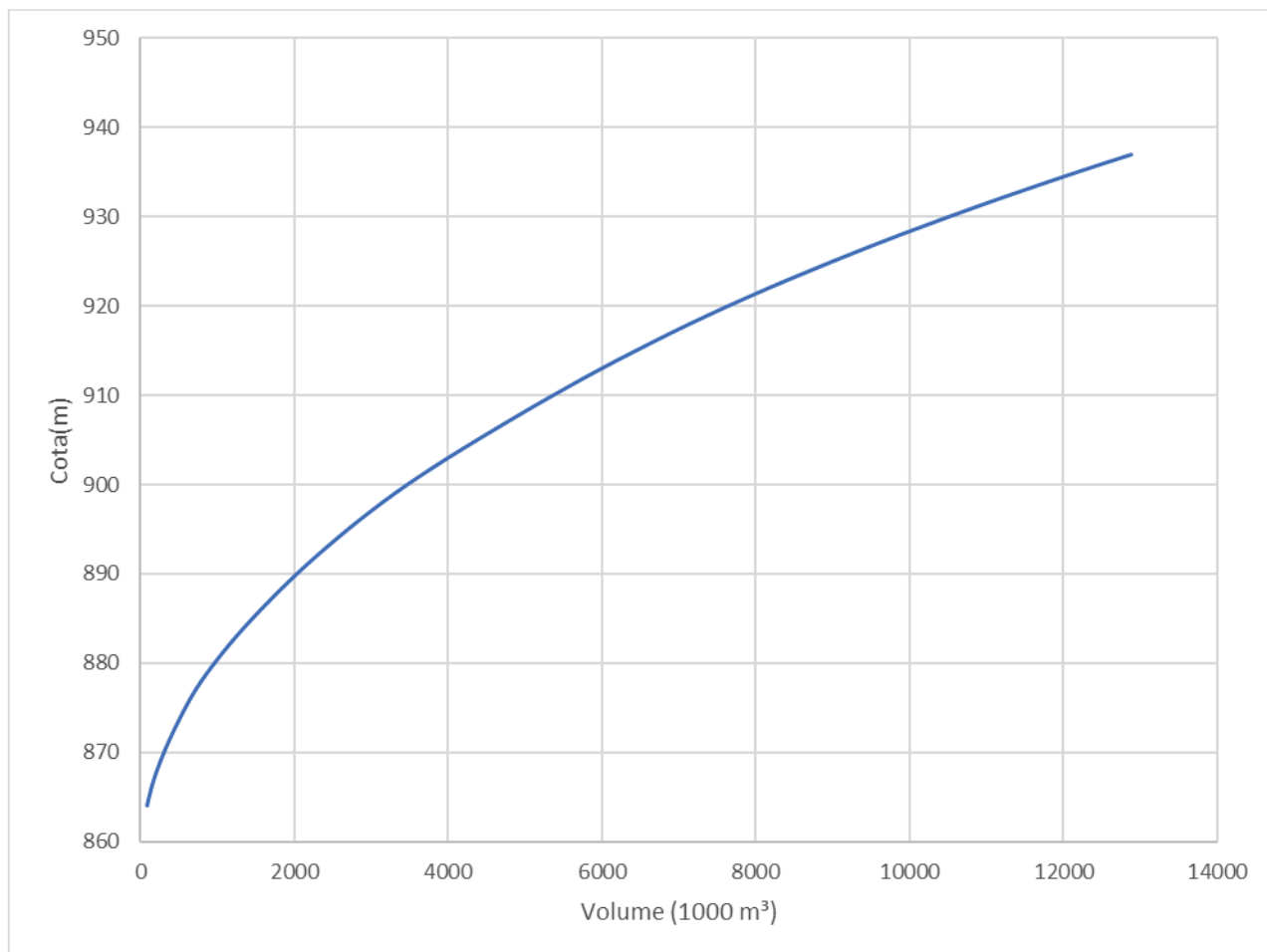
Figura 12 – Diferença de altura entre as topografias originais e pré-rompimento, incluindo o maciço e os rejeitos sob o maciço.



Fonte: Robertson et al., 2019.

A partir da Figura 12 foi estimada a curva cota-volume de todo material suscetível a movimentação para alimentar o modelo HEC-RAS. A Figura 13 apresenta a curva de correlação entre cota e volume do material do reservatório e do maciço.

Figura 13 – Curva cota-volume do reservatório e maciço.



Fonte: Adaptado de Robertson et al., 2019.

#### 3.1.4 Características dos rejeitos armazenados

O material contido na barragem apresentava textura areno-siltosa e o teor total de ferro (hematita, goethita e magnetita) nos rejeitos da barragem era alto (superior a 50%), com um pequeno teor de quartzo, de modo geral inferior a 10%. Assim, devido à alta gravidade específica dos rejeitos, o peso específico do material era de aproximadamente 26 kN/m<sup>3</sup> (ROBERTSON *et al.*, 2019).

Essa mineralogia é significativamente diferente da maioria dos solos naturais que são predominantemente compostos de quartzo (ou seja, minerais à base de sílica). A mineralogia também é significativamente diferente dos solos usados para desenvolver as correlações empíricas tradicionais (ROBERTSON *et al.*, 2019).

Devido as características ferrosas do rejeito, espera-se que as equações de correlação entre concentração volumétrica x tensão de escoamento e concentração volumétrica x viscosidade dinâmica propostas por Ribeiro (2015) e Machado (2017) descrevam de maneira satisfatória os parâmetros do rejeito.

Em campanhas de investigação realizadas durante a operação da barragem, usando amostragem por blocos e tubos, foram realizados ensaios de modo a determinar o índice de vazios do material contido.

Na amostragem em blocos uma área de solo é dividida em seções retangulares ou quadradas, chamadas de blocos indeformados. Cada bloco é geralmente de tamanho uniforme e pode variar dependendo da aplicação e das condições do solo. A amostragem em blocos é útil quando se deseja avaliar a variação horizontal e lateral das propriedades do solo em uma área específica.

Já a amostragem em tubos envolve a perfuração de um solo em uma área específica usando um tubo de amostragem ou uma sonda de solo. A sonda é inserida no solo até a profundidade desejada, e então é retirada, trazendo consigo uma amostra do solo ao longo do tubo. É especialmente útil para coletar amostras de solo em profundidades maiores e para avaliar a estratigrafia do solo, sendo amplamente utilizado em estudos geotécnicos para avaliar a resistência do solo, a capacidade de carga e outras propriedades mecânicas do solo em profundidades consideráveis.

As amostras em bloco apresentaram um índice de vazios (relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos da amostra) *in situ* médio de 1,0. Esse alto valor médio dos índices de vazio medidos a partir da amostragem em bloco suporta a interpretação de que os rejeitos eram fofos, de modo geral. Um índice de vazios de 1,0 mostra que aproximadamente 50% do volume total de rejeitos era composto de espaço vazio. (ROBERTSON *et al.*, 2019) e (LIMA *et al.*, 2020).

Dessa forma, considerando que o rejeito permanecia saturado, a concentração volumétrica do rejeito era de 50%, segundo a classificação quanto ao tipo de escoamento, espera-se um escoamento evidente, porém, lento com

deformações plásticas sem espraiamento sobre superfícies adjacentes (O'BRIEN & JULIEN, 1985).

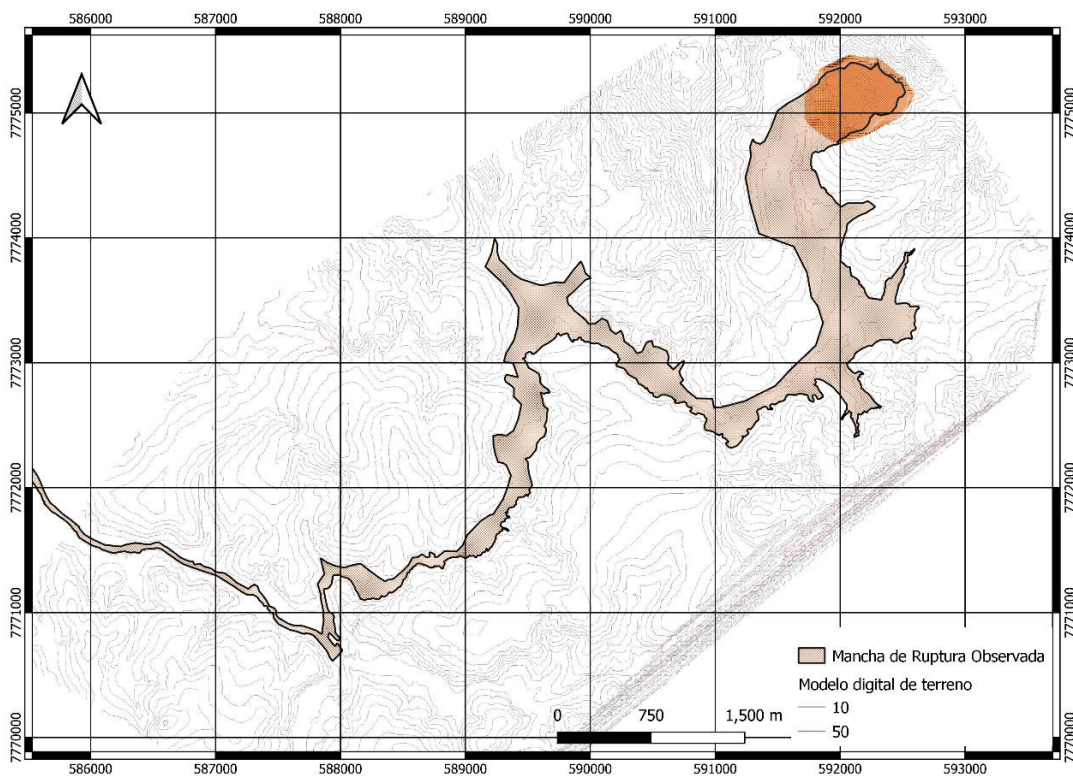
Conforme imagens do circuito de segurança da Vale, amplamente divulgadas pela imprensa, é possível notar a formação de ondas logo após o início da ruptura. Sendo assim, possivelmente a classificação de tipo de escoamento em função do Cv, proposta inicialmente, e amplamente utilizada, se mostrou não aderente ao observado para rejeitos.

### 3.2 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE)

O modelo digital de elevação (MDE) utilizado como base topográfica foi obtido dos arquivos de projeto de exemplo, anexos a instalação do RiverFlow 2D (*example Project*). O modelo possui precisão de 10 metros por pixel e não apresenta depressões ao longo de sua extensão.

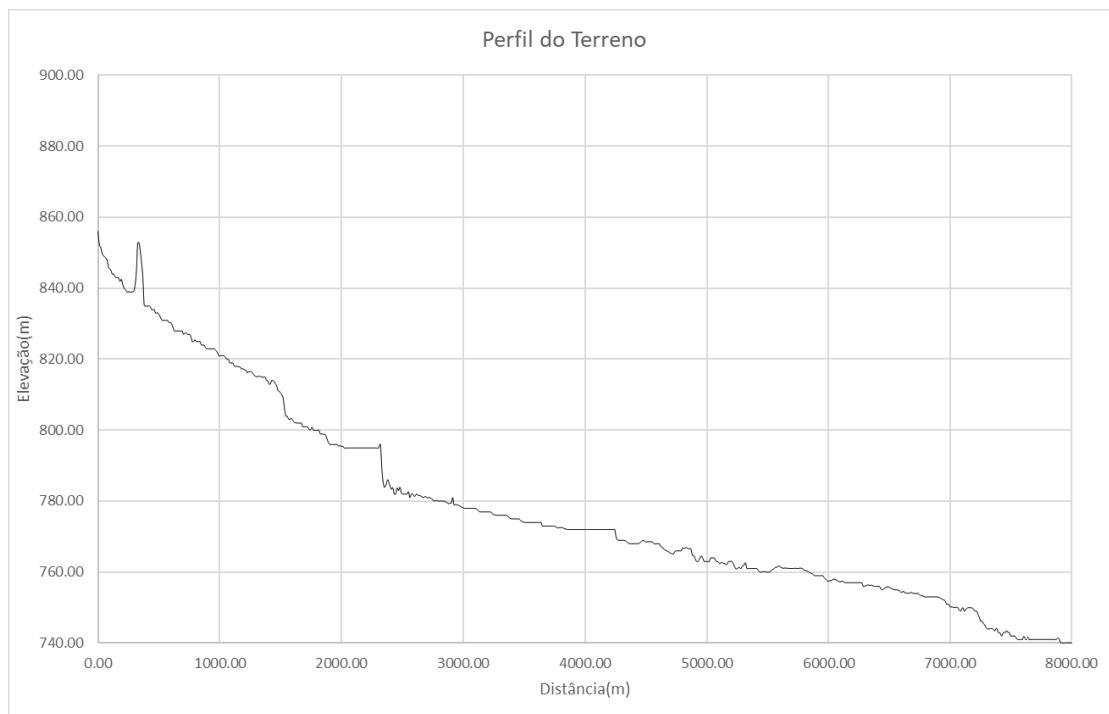
A Figura 14 apresenta o mapa contendo as curvas de nível geradas a partir desse modelo, a Figura 15 apresenta o perfil longitudinal no eixo do talvegue.

Figura 14 - Curvas de nível do MDE (10 metros)



Fonte: O Autor (2024).

Figura 15 - Perfil do terreno ao longo do talvegue de jusante.



Fonte: O Autor (2024).

### 3.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS REOLÓGICOS

Os parâmetros reológicos empregados no modelo foram determinados conforme referências bibliográficas encontradas, das quais destacam-se Garcia e Tribist-Correa (2020), que obtiveram os parâmetros através de retroanálise da ruptura da Barragem I utilizando o software RiverFlow2D.

Adicionalmente, apresenta-se os trabalhos de Ribeiro (2015) e Machado (2017) que realizaram ensaios reológicos em amostras de rejeito de minério de ferro, similar ao contido pela Barragem B1.

Por fim temos os ensaios realizados por Silva (2020), que realizou a caracterização reológica em uma das amostras coletadas após a ruptura da Barragem B1.

Dessa forma, foram realizadas cinco modelagens, cada uma com os parâmetros apresentados por cada autor, considerando fluido newtoniano Água. O intuito é verificar a resposta dos modelos HEC-RAS e RiverFlow 2D sob diferentes parâmetros reológicos, e sua similaridade em relação ao evento observado. Os valores utilizados nas modelagens estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros reológicos utilizados nas modelagens

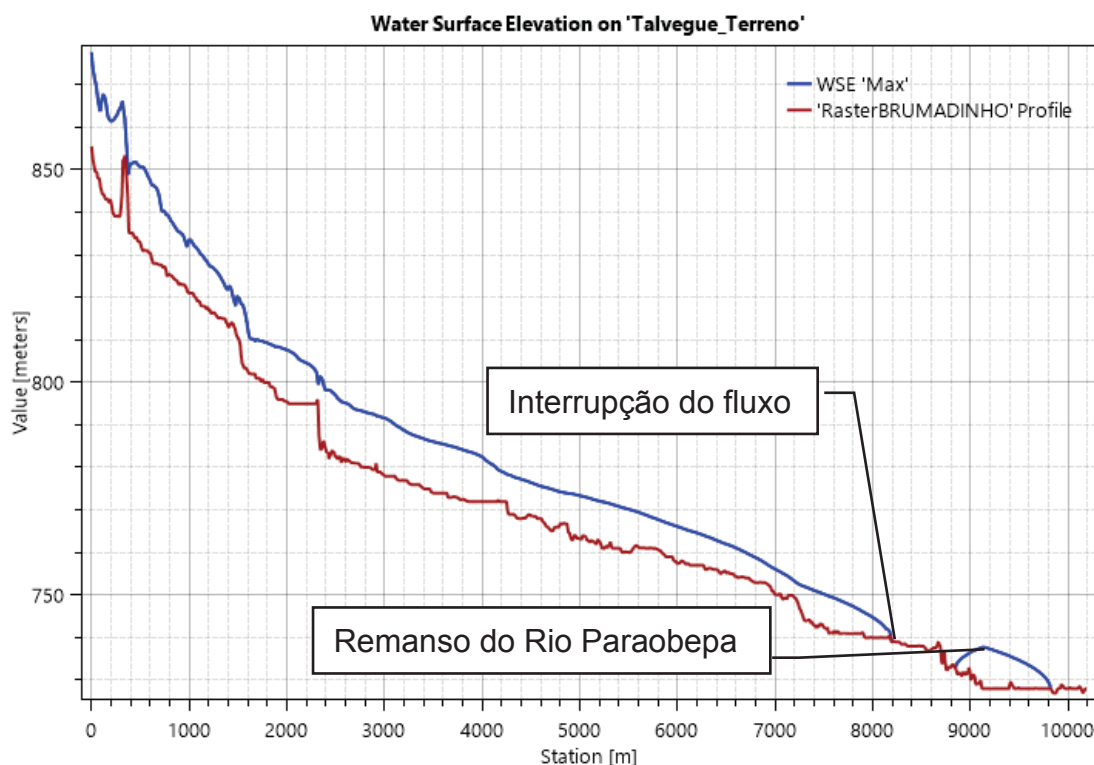
<b>Referência</b>	<b>Concentração volumétrica (%)</b>	<b>Tensão de escoamento limite (Pa)</b>	<b>Viscosidade (Pa.s)</b>
Água (25 °C)	-	0,0	0,000891
Tribist-Correa (2020)	50%	1200	10
Machado (2017) *	50%	33,81	0,14
Ribeiro (2015) *	50%	108,66	0,57
Silva (2020)	40%	6,31	467,40

\*Obtidos através da aplicação da equação de correlação.

Com relação aos parâmetros de Garcia e Tribist-Correa (2020), em simulações prévias realizadas pelo autor, os parâmetros não responderam adequadamente na versão de software avaliada, visto que mancha de ruptura não

atingiu a seção 04 do modelo, portanto, não condizente com a realidade. Dessa forma optou-se por excluir das análises comparativas esse conjunto de parâmetros. A Figura 16 ilustra o perfil do terreno e do escoamento da simulação.

Figura 16 – Nível d'água no talvegue - Parâmetros Garcia e Tribist-Correa (2020).



Fonte: O Autor (2024).

Ao analisarmos a onda em relação ao perfil do terreno, observa-se que o material permanece totalmente depositado ao longo do talvegue. O que pode explicar a situação é o elevado valor da tensão limite de escoamento, que favorece essa deposição do material ao longo da propagação.

O fenômeno pode ser explicado devido a versão do software River-Flow2D utilizada na retroanálise do referido trabalho. Somente a partir da versão 8.0 o software introduziu uma avaliação multicenários, de forma que os parâmetros reológicos podem variar ao longo da mancha de ruptura, podendo descrever diferentes concentrações e variações na mistura água – rejeito.

### 3.4 RESISTÊNCIA SUPERFICIAL AO ESCOAMENTO

O coeficiente de rugosidade de Manning é um parâmetro que descreve a resistência do leito do rio ou canal à passagem de água. Ele é utilizado em modelos hidráulicos para simular a propagação de fluidos em cursos d'água, rios, canais, entre outros. Os valores dos coeficientes de rugosidade de Manning variam dependendo da natureza do leito do canal, da vegetação, do grau de curvatura do canal, da profundidade da água, entre outros fatores.

Os valores típicos de coeficiente de rugosidade de Manning variam de 0,01 para canais revestidos com concreto, até 0,06 para canais naturais com vegetação densa e leito irregular. Para canais retangulares e trapezoidais, o coeficiente de rugosidade de Manning pode ser calculado em função do tipo de material que compõe o leito do canal e das condições de fluxo. Em geral, valores mais elevados de coeficiente de rugosidade de Manning correspondem a leitos de canal mais rugosos e irregulares, o que resulta em maior resistência à passagem da água e menor velocidade de escoamento.

As classes de terreno foram mapeadas com base em imagens de satélite do Google Earth Pro, em data imediatamente anterior a ruptura da barragem, e a cada classe mapeada foi associado um valor de rugosidade obtido dos dados compilados de diversas publicações e apresentados por Baptista e Lara (2016). Os valores de coeficiente de Manning utilizados nesta pesquisa são apresentados na Tabela 5.

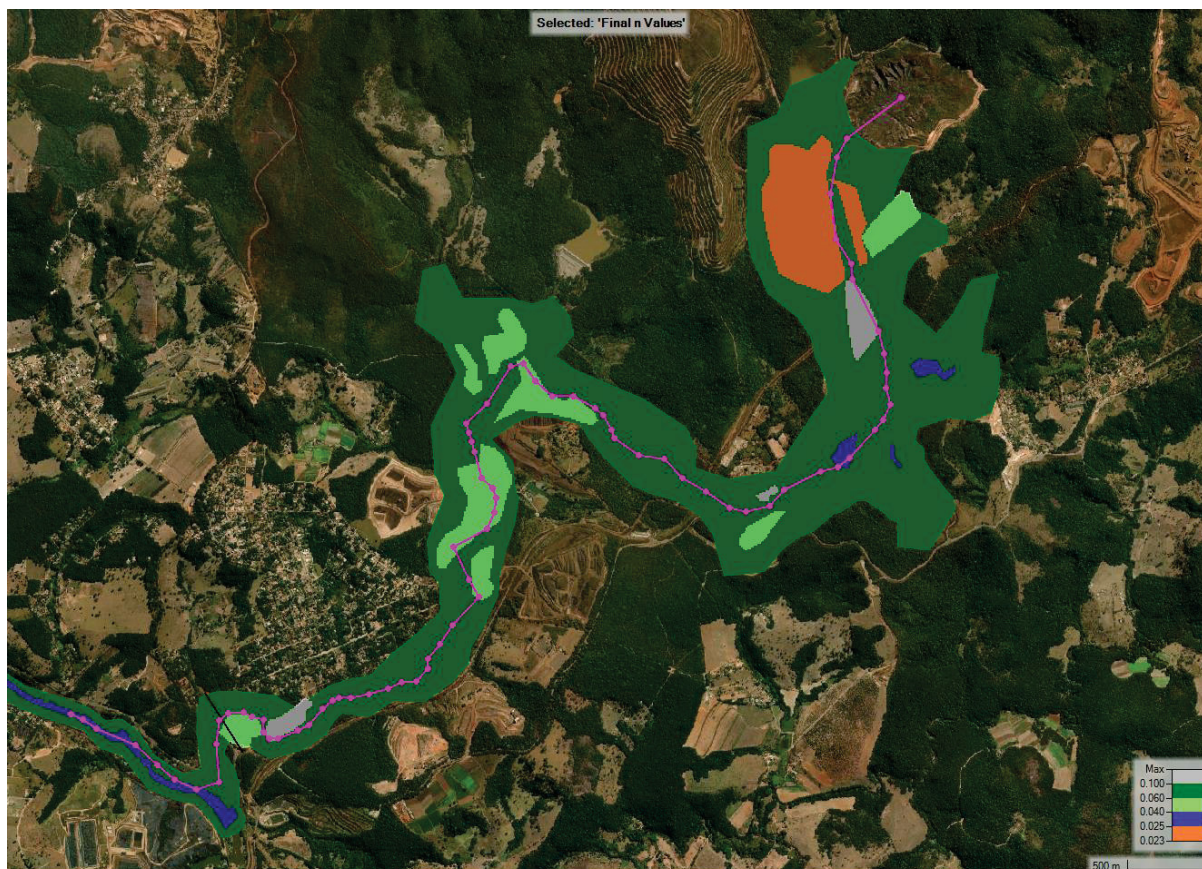
Tabela 5 – Coeficiente de Manning por classe de cobertura

<b>Classe</b>	<b>Manning</b>
Leito de Rios e Lagos	0,025
Área Cultivada	0,040
Área Edificada	0,100
Solo Exposto	0,025
Vegetação Densa	0,060

Fonte: Adaptado de Baptista e Lara (2016).

A Figura 17 apresenta o mapa com as classes de rugosidade utilizadas no estudo.

Figura 17 - Rugosidades adotadas no modelo hidrodinâmico.



Fonte: O Autor (2024).

### 3.5 MODELO HIDRODINÂMICO (HEC-RAS)

A seguir são apresentados os parâmetros de entrada do modelo hidrodinâmico elaborado com o HEC-RAS 6.3.1.

#### 3.5.1 Malha computacional

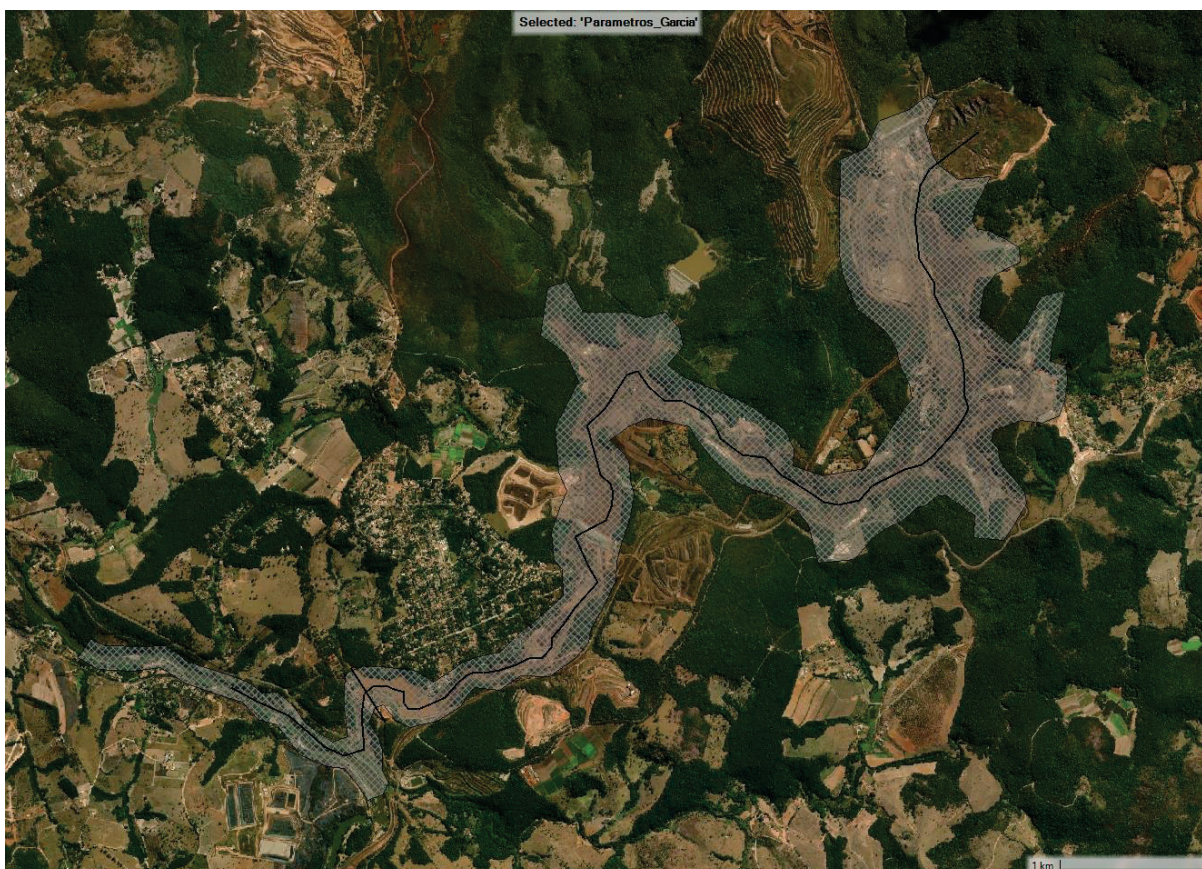
O modelo considera a equação da conservação de massa e a equação da conservação da quantidade de movimento para descrever o comportamento do fluido em um sistema em estudo. Essas equações são discretizadas utilizando o método dos volumes finitos para obter uma solução numérica para cada célula da malha.

Os resultados do modelo incluem a velocidade e a pressão do fluido em cada célula da malha, bem como outras variáveis hidrodinâmicas importantes. Esses

resultados podem ser utilizados para analisar e prever o comportamento do fluido em diferentes condições, tais como em um rio ou em um reservatório.

A malha de 10x10m utilizada neste modelo foi escolhida com base nas características do sistema em estudo e nas resoluções necessárias para obter uma solução precisa; ao todo foram computadas 52544 células. A malha fina permite uma representação mais detalhada do comportamento do fluido em áreas críticas, enquanto a malha grossa permite uma solução mais rápida. A Figura 18 apresenta a malha computacional implementada nesse estudo.

Figura 18 - Malha computacional utilizada do HEC-RAS.

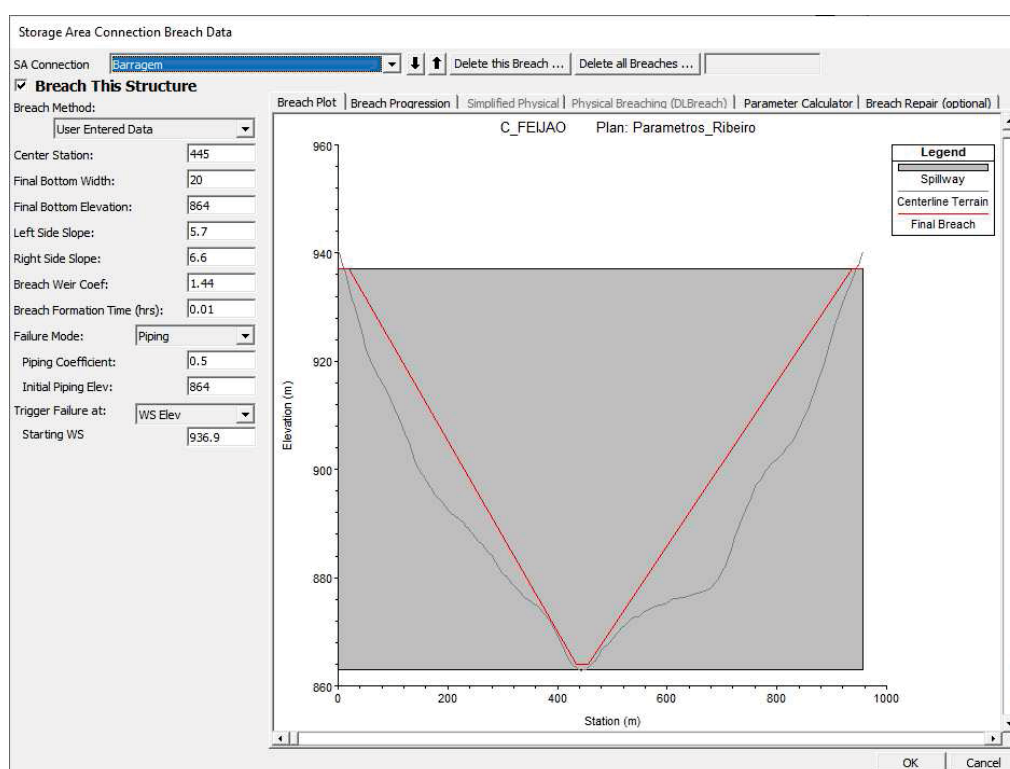


Fonte: O Autor (2024)

### 3.5.2 Condições de contorno

Como condição de contorno de montante foi estabelecida uma brecha com as dimensões de todo vale, com ruptura quase instantânea, o hidrograma foi estabelecido pelo próprio software HEC-RAS. A Figura 19 apresenta a geometria adotada para a brecha.

Figura 19 – Brecha de rompimento da barragem (HEC-RAS).

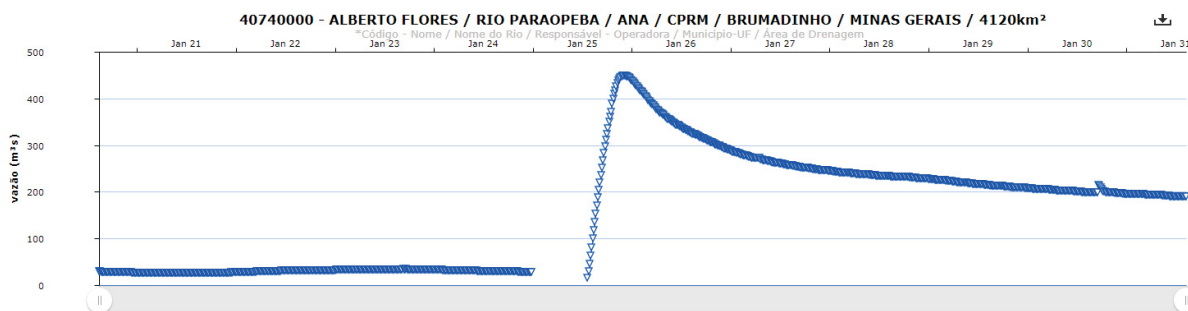


Fonte: O Autor (2024).

Já, como condição de contorno de jusante foi considerada a declividade equivalente do trecho do rio, obtida no MDT de referência, o que conduz a escoamento uniforme nesta seção final.

A vazão no Rio Paraopeba foi aferida com base na estação fluviométrica 4074000, onde a vazão média do rio antes da ruptura era de 28,46m<sup>3</sup>/s.

Figura 20 – Vazão do aferida no Rio Paraopeba



Fonte: ANA (2024).

### 3.5.3 Critério de Courant e intervalo de tempo

O modelo computacional hidrodinâmico desenvolvido utilizou o critério de Courant para garantir a precisão e estabilidade dos cálculos, sendo tempo máximo admitido de 1,0s e mínimo de 0,063s. Esse critério é uma técnica numérica usada para determinar o tamanho máximo de um passo de tempo permitido em um modelo de simulação. Ele é baseado na velocidade máxima do fluido em um determinado ponto da malha e na resolução espacial da malha

### 3.5.4 Efeito de Coriolis

O modelo utilizou a latitude de  $-20,14^\circ$  para considerar o efeito de Coriolis. Esse efeito é uma força aparente que age em objetos em movimento em relação a um referencial inercial em rotação, como a Terra. Essa força age perpendicularmente à direção do movimento e à rotação da Terra, e sua intensidade é proporcional à velocidade do objeto. No presente caso, este efeito é muito reduzido, frente às forças geradas pelo escoamento em si e até poderia ser desprezado, mas a modelagem exige a entrada deste dado para cálculo.

O efeito de Coriolis tem um papel importante em sistemas que envolvem movimentos em grande escala, como a atmosfera e os oceanos. Isso ocorre porque a rotação da Terra é uma força dominante que influencia a direção e a velocidade dos fluidos.

No hemisfério norte, o efeito de Coriolis desvia o movimento para a direita em relação à direção do movimento original, enquanto no hemisfério sul, o desvio ocorre

para a esquerda. Essa diferença resulta em correntes oceânicas e padrões climáticos distintos nos hemisférios norte e sul.

### 3.5.5 Sistema de Equações e modelo reológico

O modelo utiliza o sistema de equações do SWE-ELM (Shallow Water Equation – Eulerian Solver semi-Lagrangian approach), que expressa a conservação do volume e da quantidade de movimento. A equação de continuidade é discretizada usando aproximações de volume finito, enquanto a equação da quantidade de movimento é discretizada de forma variável, dependendo do termo. O método de Crank-Nicholson é utilizado para ponderar a contribuição das variáveis nos passos de tempo  $n$  e  $n+1$ , garantindo maior precisão do modelo.

Para a equação de continuidade, é utilizado um processo que imita a construção do esquema DSW (Solucionador de Equações de Ondas de Difusão), com tratamento semi-implícito das áreas da face. Isso permite a umectação e secagem de várias células em uma única etapa de tempo, mas pode aumentar a complexidade da solução e o número de iterações necessárias.

A velocidade é expressa como uma combinação linear da elevação da superfície da água em células vizinhas e os termos são agrupados de acordo com seus índices espaciais e temporais. Os termos relacionados ao passo de tempo “ $n$ ” são movidos para o lado direito. Como as velocidades são calculadas nas faces da grade, as equações de momento não estão localizadas em uma célula computacional, mas sim em uma face computacional.

As equações discretas são construídas com base em um esquema semi-implícito no qual apenas os termos de aceleração, gradiente de pressão barotrópico e atrito inferior contêm variáveis para as quais a equação é resolvida. Outros termos da equação de momento ainda são calculados com base no método, mas sua contribuição é menor e, portanto, eles são considerados termos explícitos de função forçada e movidos para o lado direito do sistema linearizado.

Como o fluido apresenta características viscosas e turbulentas, o modelo reológico para definição da resistência basal  $\tau_b$  utilizado nos cálculos foi a opção “quadratic”. As equações que descrevem esse modelo estão apresentadas na revisão bibliográfica desse trabalho.

### 3.5.6 Solucionador de Matriz

O modelo adotou o solucionador PARDISO para resolver grandes sistemas lineares esparsos simétricos e não simétricos de equações de forma eficiente em termos de memória e de alta performance. Este solucionador utiliza uma combinação de técnicas paralelas de pivotamento de supernós com aparência esquerda e direita para melhorar o processo de fatoração LDU, sendo uma técnica utilizada na álgebra linear para decompor uma matriz quadrada em três componentes: uma matriz triangular inferior (L), uma matriz diagonal (D) e uma matriz triangular superior (U).

Esse processo é o que torna o algoritmo robusto e fácil de usar em arquiteturas de memória compartilhada e distribuída. No presente caso, a biblioteca de soluções Intel Math Kernel Libraries (MKL) foi adotada juntamente com o solucionador PARDISO.

## 3.6 MODELO HIDRODINÂMICO (RIVERFLOW 2D)

A seguir são apresentados os parâmetros de entrada do modelo hidrodinâmico elaborado com o RiverFlow 2D 7.0 em conjunto com o módulo Mud and Debris.

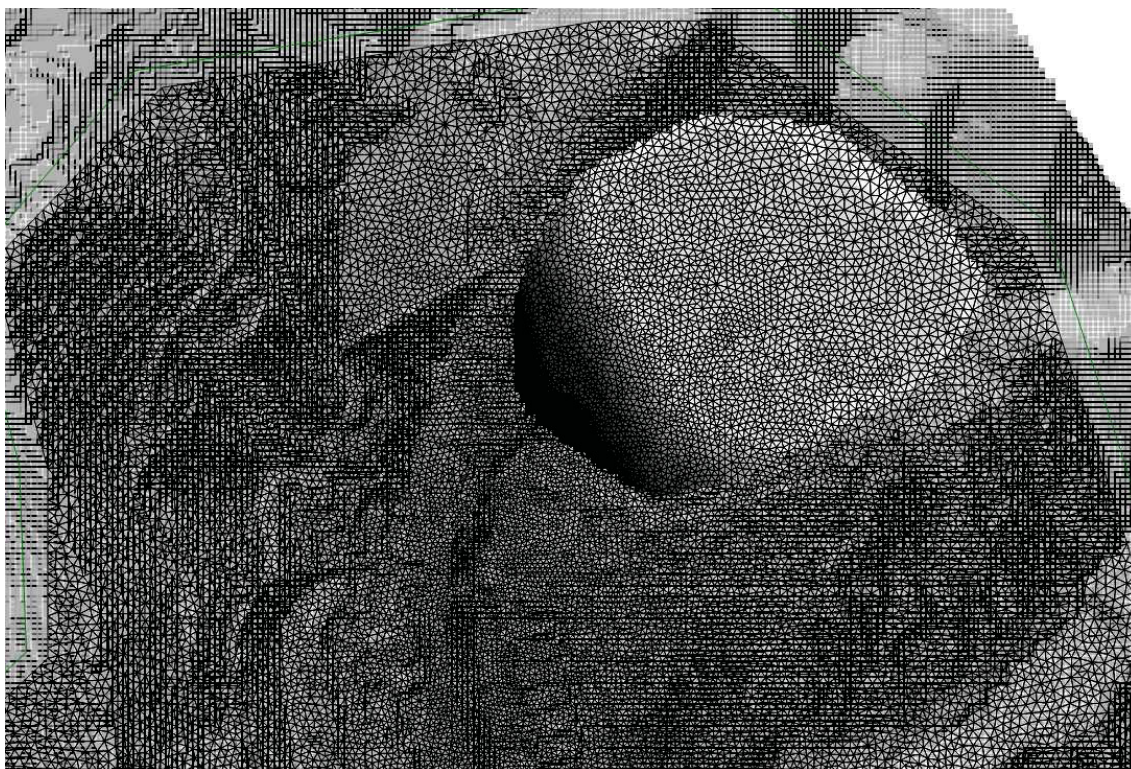
### 3.6.1 Malha computacional

O software RiverFlow 2D, diferentemente do HEC-RAS utiliza uma malha triangular para o processamento do modelo hidrodinâmico.

Foi utilizada uma malha com tamanho de célula variável no modelo, sendo 20m de lado na região mais distante do eixo do talvegue, e com 10m de lado junto ao eixo do talvegue, a Figura 21 apresenta da malha utilizada no modelo, em um destaque próximo a região da barragem. As dimensões da malha estão alinhadas a precisão do modelo digital de elevação utilizado, e com a resolução necessárias para obter uma solução precisa, ao todo foram computadas 198110 células. Assim como no HEC-RAS, a malha fina permite uma representação mais detalhada do

comportamento do fluido em áreas críticas, enquanto a malha grossa permite uma solução mais rápida.

Figura 21 - Malha computacional triangular utilizado no RiverFlow 2D (região da barragem).



Fonte: O Autor (2024).

### 3.6.2 Condições de contorno

As condições de contorno do modelo são essencialmente os parâmetros que modelam o comportamento de um rio ou canal dentro do domínio do modelo. Além da ruptura da barragem, foram introduzidos no modelo como condição de entrada a vazão do Rio Paraobeba, e como condição de saída escoamento livre, onde a linha de energia é coincidente com e a inclinação do leito do rio.

### 3.6.3 Critério de Courant e intervalo de tempo

O modelo computacional hidrodinâmico desenvolvido utilizou o critério de Courant para garantir a precisão e estabilidade dos cálculos, os cálculos foram executados com esse tempo variando de 0,10s a 0,20s. Da mesma forma que no

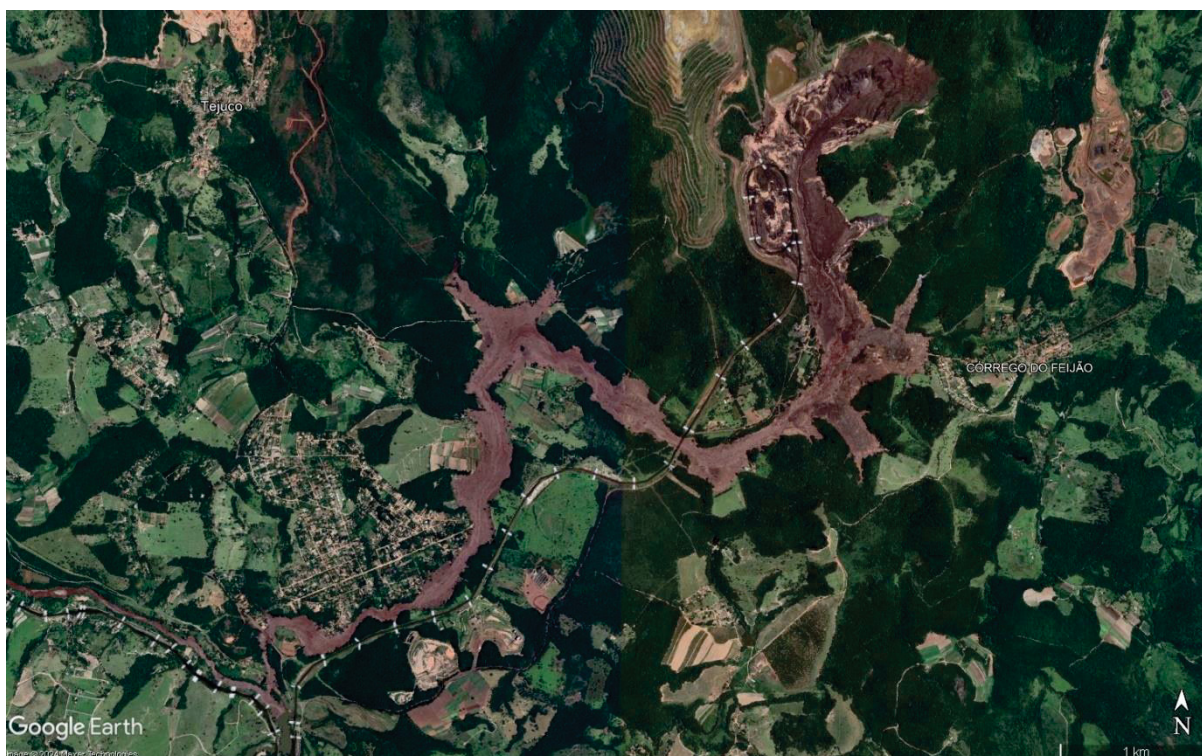
HEC-RAS, esse critério é uma técnica numérica usada para determinar o tamanho máximo de um passo de tempo permitido em um modelo de simulação. Ele é baseado na velocidade máxima do fluido em um determinado ponto da malha e na resolução espacial da malha.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 EVENTO OBSERVADO

A região atingida apresenta uma área 275 hectares ao longo do trajeto de 11 km do talvegue principal da onda de propagação da lama de rejeito. A Figura 19 apresenta a mancha de inundação mapeada do colapso da B1, obtida através das imagens históricas do Google Earth®, a imagem é de fevereiro de 2019. Todas as manchas de ruptura observada utilizadas no trabalho são baseadas nessa figura.

Figura 22 - Região afetada pela ruptura da Barragem I.



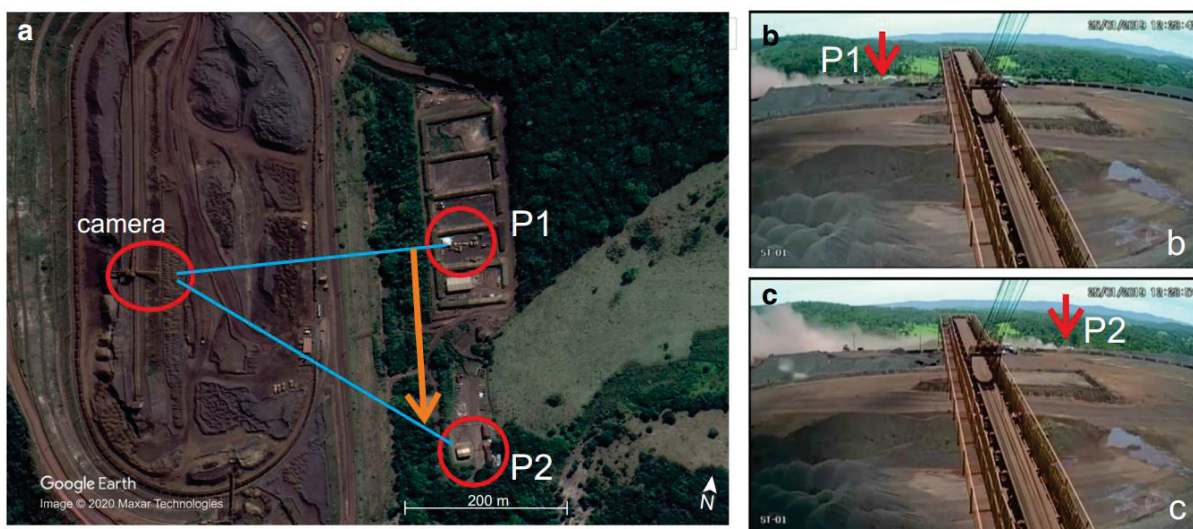
Fonte: O Autor (2024).

O colapso provocou uma onda inicial entre 30 e 40 metros de profundidade (RAGAZZI e ROCHA, 2019) e (ROBERTSON et al., 2019).

As informações sobre a propagação da onda foram obtidas por meio da análise de vídeos gravados, que permitiram determinar as velocidades e a profundidade da onda em pontos específicos ao longo do trajeto. A Figura 23

apresenta os pontos de controle utilizados no cálculo da estimativa das velocidades logo após a ruptura da Barragem B1.

Figura 23 - Estimativa de velocidade no início da propagação – 280 metros em 12 segundos.

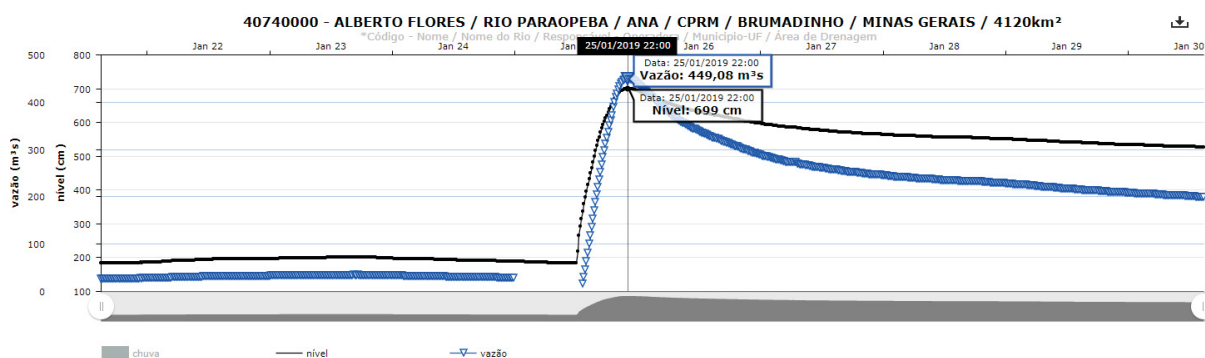


Fonte: LIMA et al., 2020.

Os primeiros 500 metros foram percorridos a velocidades entre 90 e 99 km/h (25 e 27,5 m/s), enquanto no trecho final, desde as proximidades do bairro Parque das Cachoeiras até a confluência com o Rio Paraopeba, as velocidades variaram entre 8 e 18 km/h (2,2 e 5 m/s) (LIMA et al., 2020).

Na região do encontro do Ribeirão Ferro-Carvão com o Rio Paraopeba, aproximadamente 40 minutos após a ruptura da barragem foram observadas sobre-elevações no rio passando de 1,84m para 6,99m (CPRM, 2019). A Figura 24 apresenta a variação no nível e na vazão do Rio Paraopeba na estação fluviométrica 40740000, localizada ligeiramente a montante da foz do Córrego do Feijão (Figura 25).

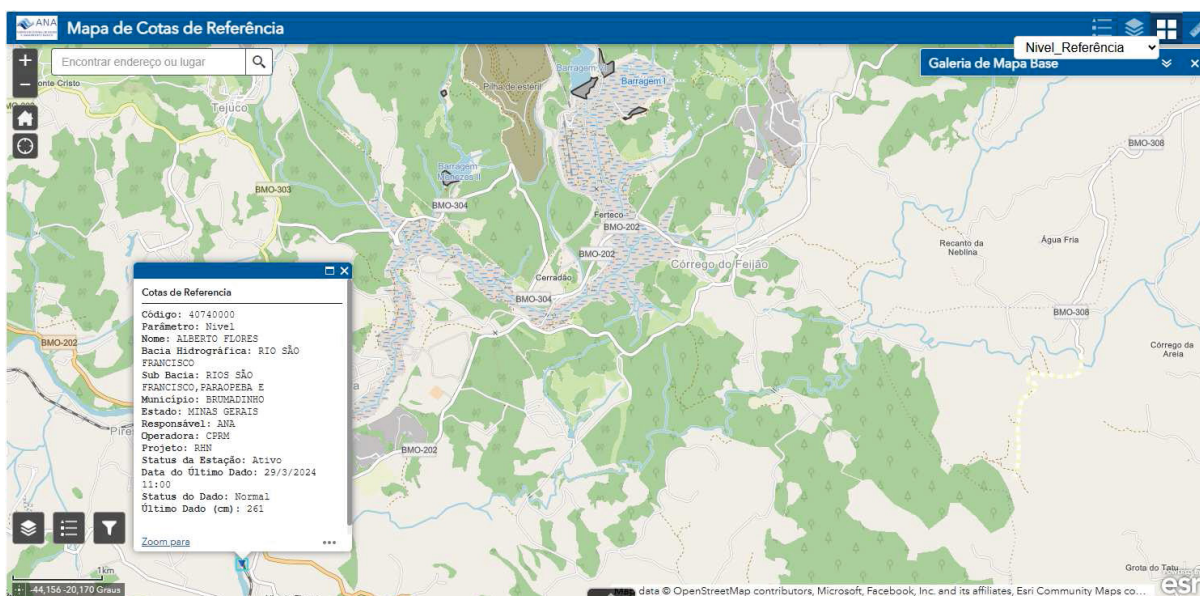
Figura 24 – Estação fluviométrica 40740000



Fonte: ANA (2024).

A vazão aferida pela mesma estação ouve uma alteração de vazão de 28,46 m<sup>3</sup>/s para um pico de 449,08 m<sup>3</sup>/s.

Figura 25 – Localização da estação fluviométrica.



Fonte: ANA (2024).

## 4.2 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

### 4.2.1 Hidrograma de ruptura

O hidrograma de brecha em rupturas de barragem, nos modelos hidráulicos, corresponde ao hidrograma proveniente da mobilização do material contido pelo reservatório; a esse, são incorporados os parâmetros reológicos e geotécnicos do rejeito, necessários para a simulação hidráulica dos fluidos não-Newtonianos.

A determinação do hidrograma de brecha foi realizada pelo software HEC-RAS através da ferramenta de simulação de brecha. A geometria da brecha foi determinada de tal forma que mobilizasse toda a crista da barragem, de forma praticamente instantânea, como foi observado no evento real.

No software RiverFlow 2D a forma de mobilização é realizada através da mobilização completa do volume do reservatório. Operacionalmente o software trabalha com duas superfícies, sendo uma o fundo do reservatório e terreno, e a outra a superfície do volume a ser mobilizado. Dessa forma, para o caso analisado de mobilização total e instantânea do rejeito, não são inseridos parâmetros de ruptura, como geometria e tempo de formação.

O hidrograma de brecha não apresentou mudança na ordem de grandeza dos valores da vazão de pico em relação aos três conjuntos de parâmetros reológicos analisados. A vazão de pico para em cada uma das simulações realizadas pode ser vista na Tabela 6.

Tabela 6 - Vazão de pico do hidrograma de brecha

<b>Parâmetros reológicos</b>	<b>RAS Vazão de pico (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>RF2D Vazão de pico (m<sup>3</sup>/s)</b>
Machado (2017)	122.004,03	139.561,51
Ribeiro (2015)	121.936,48	139.957,28
Silva (2020)	122.071,35	140.161,43
Água	125.776,50	139.417,88

Fonte: O Autor (2024).

Nota-se que pelas simulações realizadas no software RiverFlow 2D os picos de vazão foram cerca de 15% superior aos obtidos nas simulações do HEC-RAS. Os resultados podem ser explicados principalmente pela diferença de cada um dos softwares na mobilização inicial do fluido.

O RiverFlow 2D realiza a liberação do fluxo de forma instantânea através da liberação do volume do barramento. Esse volume é calculado automaticamente através da diferença de duas superfícies, sendo essas a superfície do terreno natural (anterior a construção da barragem), e a superfície do barramento e reservatório finalizado. Teoricamente esse método produzira a melhor resposta em um cenário de liberação instantânea de vazões, similar ao observado em rupturas por liquefação.

Já o HEC-RAS, para simular a ruptura da barragem no próprio ambiente de modelagem, deve ser criada uma brecha pela barragem, essa brecha não pode cruzar a superfície do terreno natural, muito devido a uma limitação do código de programação do que hidráulica ou física. Isso produz uma restrição a passagem inicial de fluxo, o que em teoria, poderia ser um problema na situação de modelagem de ruptura instantânea.

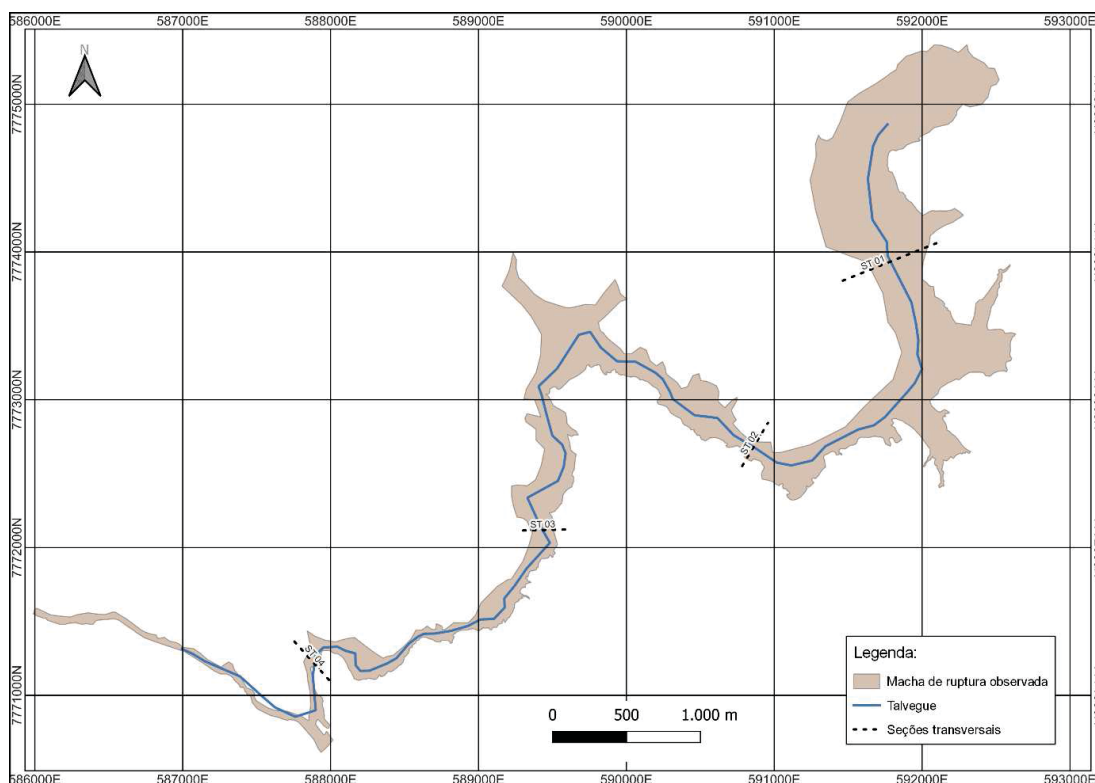
De forma a mitigar os efeitos produzidos pelas diferenças computacionais entre os softwares, o modelo do HEC-RAS foi configurado para que a brecha se

desenvolvesse em apenas 1 centésimo de hora, entretanto, como exposto a forma de ruptura utilizada ainda pode representar uma restrição ao fluxo inicial.

#### 4.2.2 Resultados da modelagem hidráulica

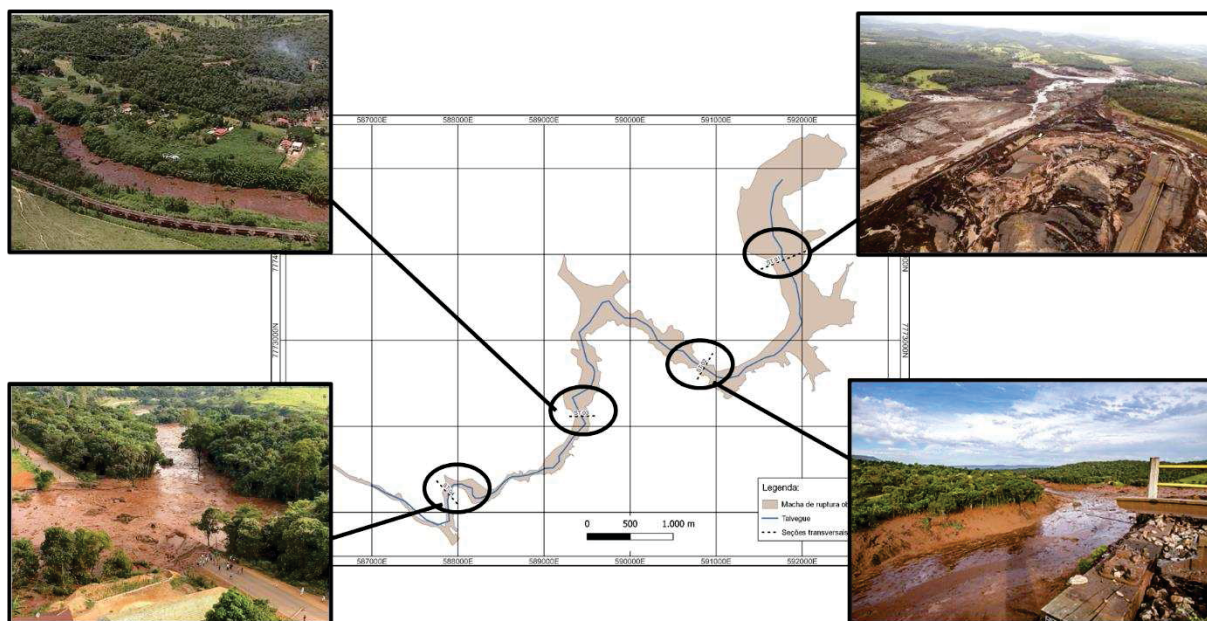
Para as simulações realizadas em ambos os softwares foram inseridas seções transversais ao longo da malha, de forma a obter os hidrogramas em cada simulação realizada. As seções foram inseridas em pontos estratégicos em que foi possível estimar alguma correlação com o evento observado. A Figura 26 apresenta a locação das seções em planta, e a Tabela 7 apresenta a distância da seção em relação ao eixo da barragem.

Figura 26 - Seções Transversais no vale a jusante da barragem.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 27 – Caracterização fotográfica das seções.



Fonte: O Autor (2024).

Tabela 7 – Distância das seções transversais em relação a Barragem

<b>Seção transversal</b>	<b>Distância da barragem (m)</b>
ST 01	1.000
ST 02	3.200
ST 03	6.325
ST 04	8.570

Fonte: O Autor (2024).

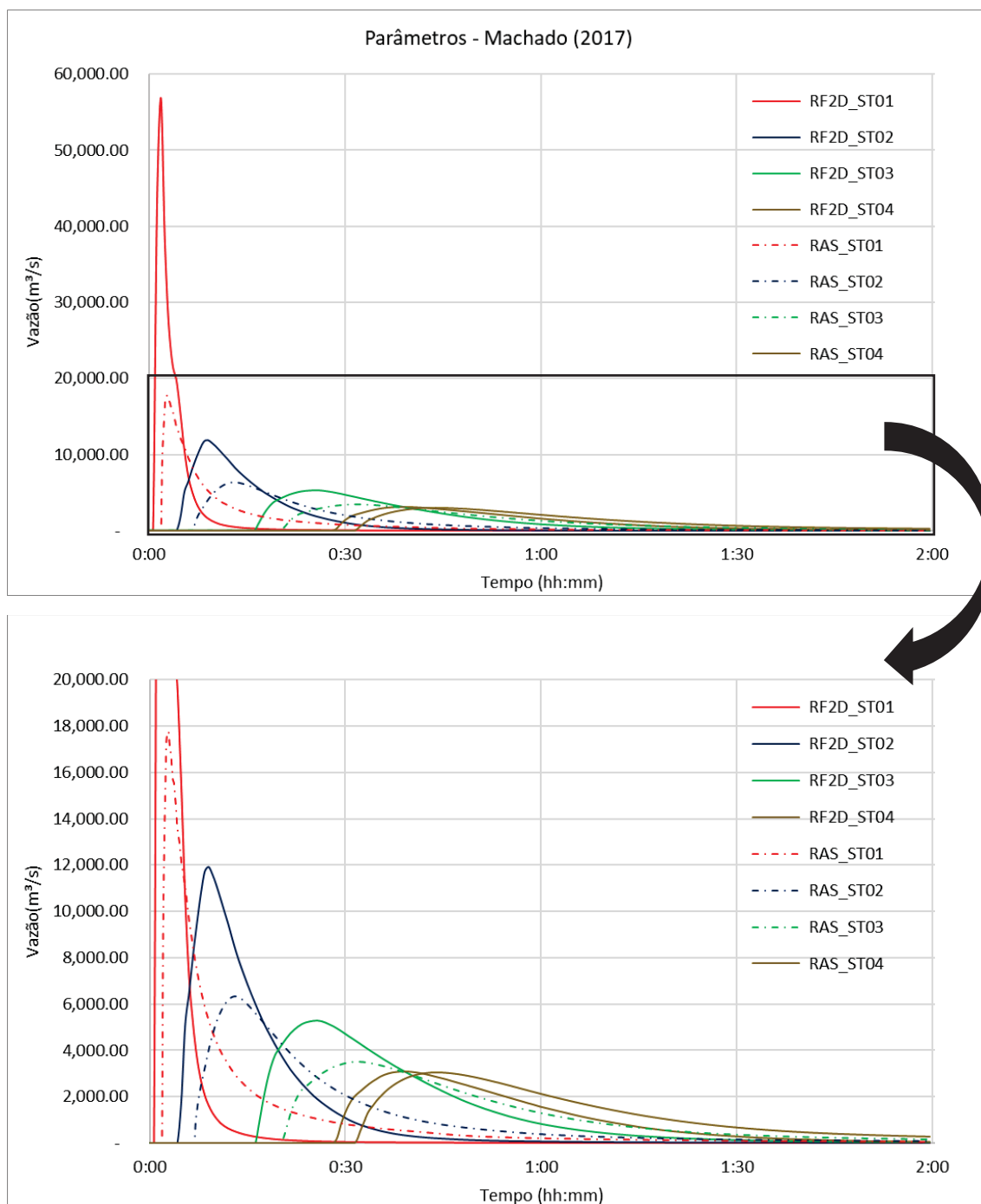
A partir das seções traçadas foram extraídos dos resultados do modelo os parâmetros que se entendem de maior relevância para a tomada de ações emergenciais, como velocidade do fluxo, profundidade e tempo de chegada da onda.

#### 4.2.3 Propagação de vazão

A propagação de vazão de ruptura foram aferidas no modelo nas 4 seções de controle traçadas, a seguir são apresentadas as vazões para os três conjuntos de

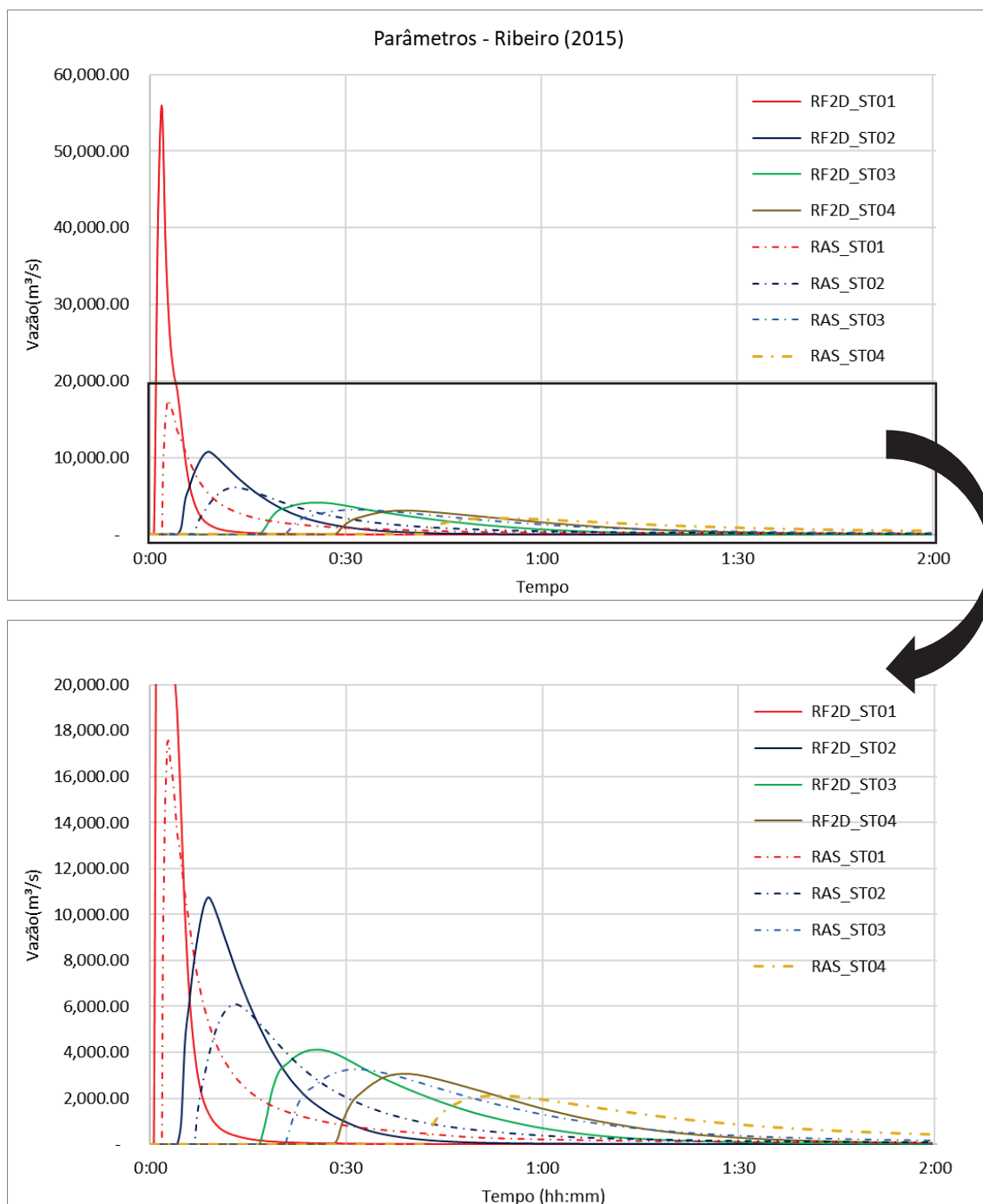
parâmetros reológicos analisados para o modelo de Bingham para a simulação com fluidos não newtonianos. A simulação com fluido newtoniano (água) não possui modelo reológico.

Figura 28 – Propagação de vazão – Parâmetros de Machado (2017) – Bingham.



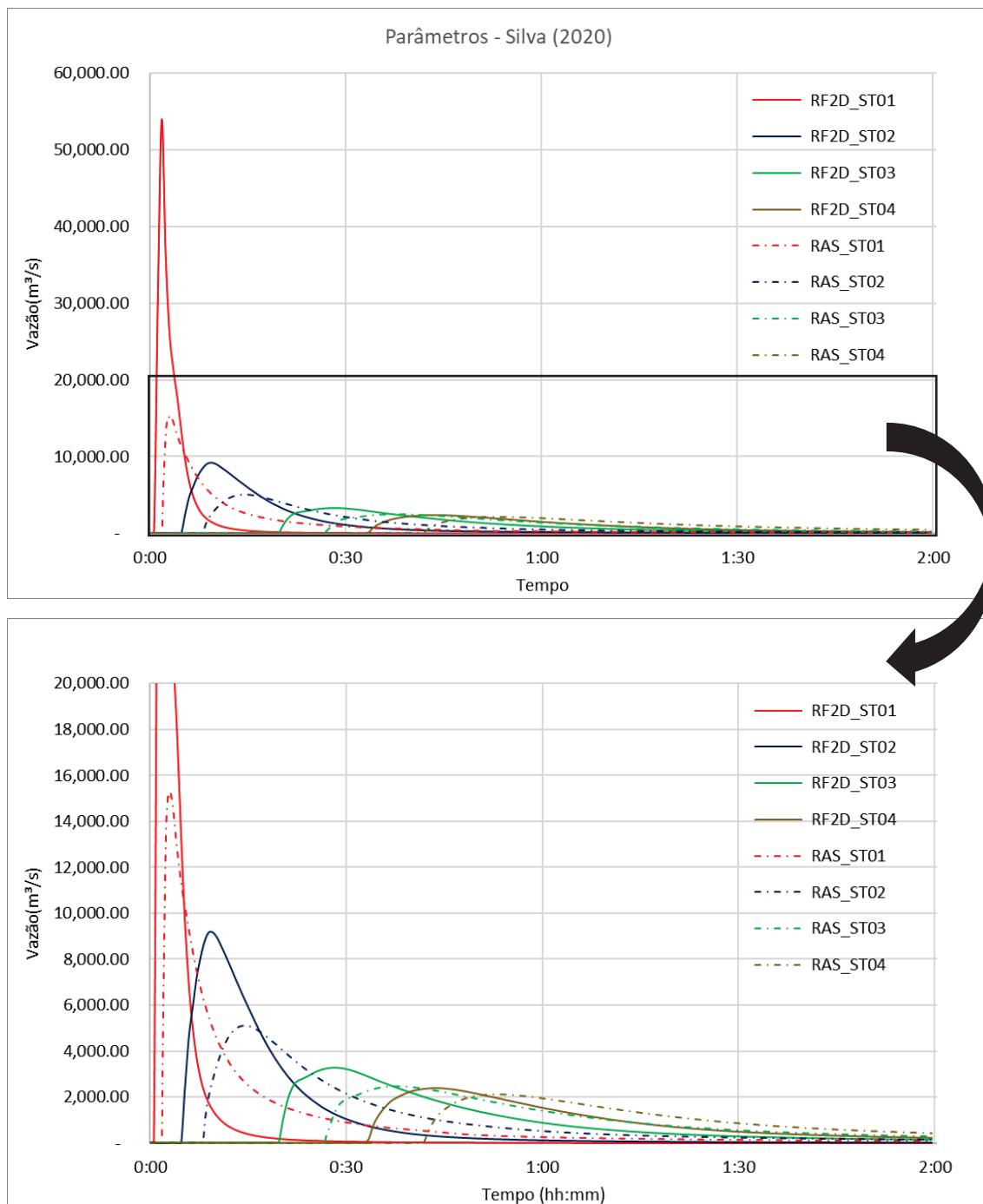
Fonte: O Autor (2024).

Figura 29 – Propagação de Vazão – Parâmetros de Ribeiro (2015) – Bingham.



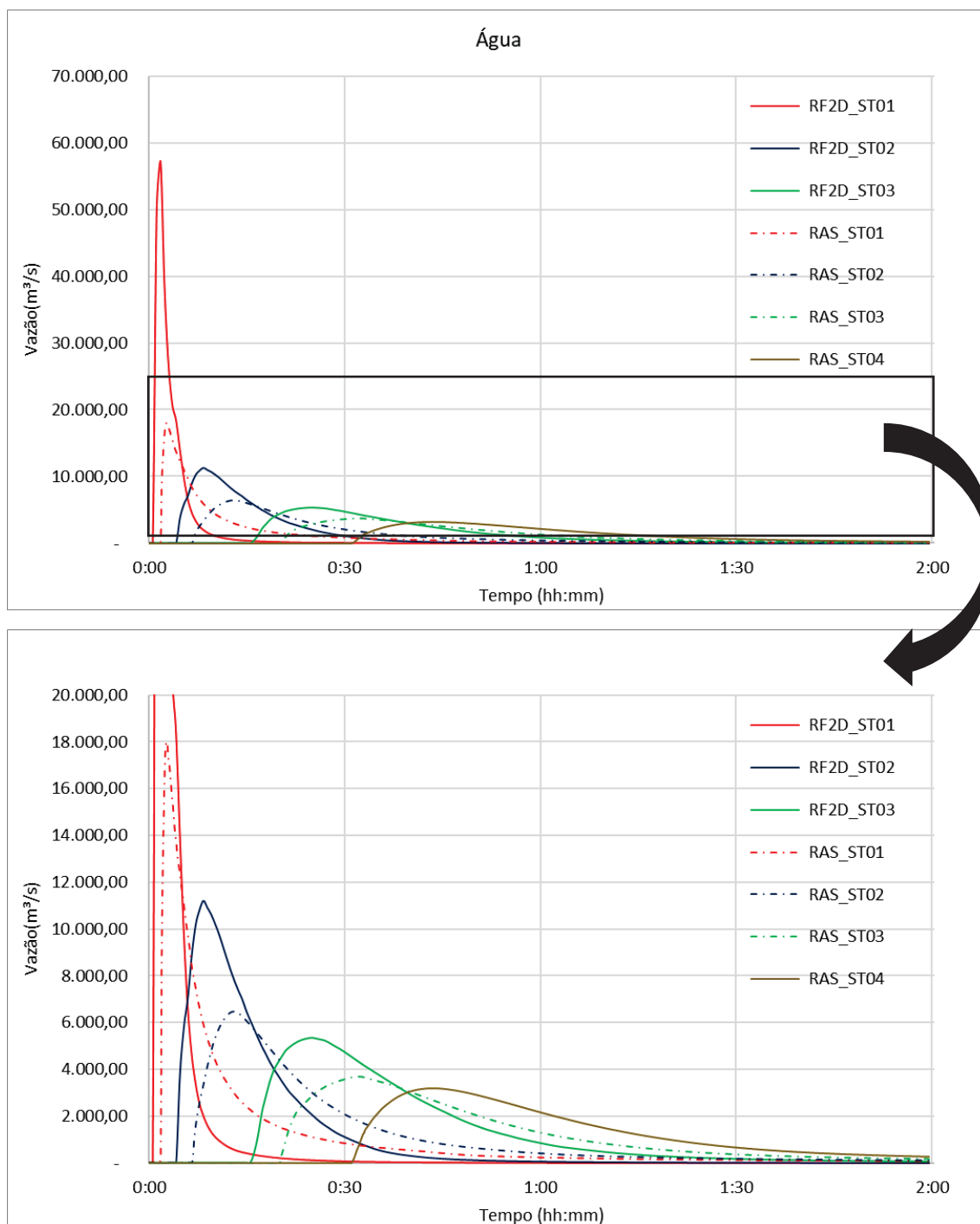
Fonte: O Autor (2024).

Figura 30 – Propagação de vazão – Parâmetros de Silva (2020) – Bingham.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 31 – Propagação de vazão – Fluido Newtoniano (Água).



Fonte: O Autor (2024).

Não houve grandes diferenças na vazão simulada entre os parâmetros avaliados, entretanto observaram-se diferenças significativas entre os modelos hidrodinâmicos do RiverFlow 2D e HEC-RAS. Ou seja, a ordem de grandeza permaneceu constante, independentemente dos parâmetros utilizados. As diferenças foram observadas somente em relação aos modelos hidrodinâmicos.

Conforme explorado anteriormente, a uma distinção na forma de liberação do fluxo inicial entre os dois softwares, resultando em uma maior vazão de pico na liberação do rejeito para a propagação. Essa diferença junto a barragem permaneceu na média em 15%.

Nas demais seções observou-se um aumento dessa diferença, com o RiverFlow 2D apresentando vazões muito mais elevadas, principalmente nas seções mais próximas ao barramento. A Tabela 8 apresenta de forma compilada as diferenças observadas nos picos de vazão em cada seção.

Tabela 8 – Comparativo de vazões nos modelos – Bingham.

Simulações	ST 01	ST 02	ST 03	ST 04
	Q (m <sup>3</sup> /s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Q (m <sup>3</sup> /s)
RF2D - Machado (2017)	56.903,51	11.905,13	5.283,66	4.335,68
RAS - Machado (2017)	17.745,79	6.329,22	3.520,57	3.054,27
<b>Diferença</b>	<b>220,66%</b>	<b>88,10%</b>	<b>50,08%</b>	<b>41,95%</b>
RF2D - Ribeiro (2015)	55.952,96	10.764,63	4.117,96	3.075,58
RAS - Ribeiro (2015)	17.568,94	6.096,41	3.244,55	2.800,72
<b>Diferença</b>	<b>218,48%</b>	<b>76,57%</b>	<b>26,92%</b>	<b>9,81%</b>
RF2D - Silva (2020)	53.962,25	9.177,67	3.295,37	2.384,94
RAS - Silva (2020)	15.238,10	5.092,84	2.473,60	2.113,13
<b>Diferença</b>	<b>254,13%</b>	<b>80,21%</b>	<b>33,22%</b>	<b>12,86%</b>
RF2D - Água	57.169,00	11.200,22	5.334,36	4.355,45
RAS - Água	18.005,50	6.451,11	3.678,41	3.172,07
<b>Diferença</b>	<b>217,51%</b>	<b>73,62%</b>	<b>45,02%</b>	<b>37,31%</b>

Fonte: O Autor (2024).

Observa-se uma grande sensibilidade na vazão em relação aos parâmetros reológicos. Cita-se como exemplo as simulações com os parâmetros de Machado (2017) e Ribeiro (2015), na seção 4 a diferença percentual entre cada uma das simulações salta de 9,81% para 41,95%. A maior diferença entre os dois parâmetros é na tensão limite de escoamento. Dessa forma, conclui-se que o RiverFlow no modelo reológico adotado apresentou uma maior sensibilidade a esse parâmetro.

Quando comparadas a ruptura de uma barragem de água, a vazão aferida na seção 4 não divergiu de forma significativa em relação as simulações considerando o fluido não newtoniano. Dessa forma, sob determinadas circunstâncias e em falta de

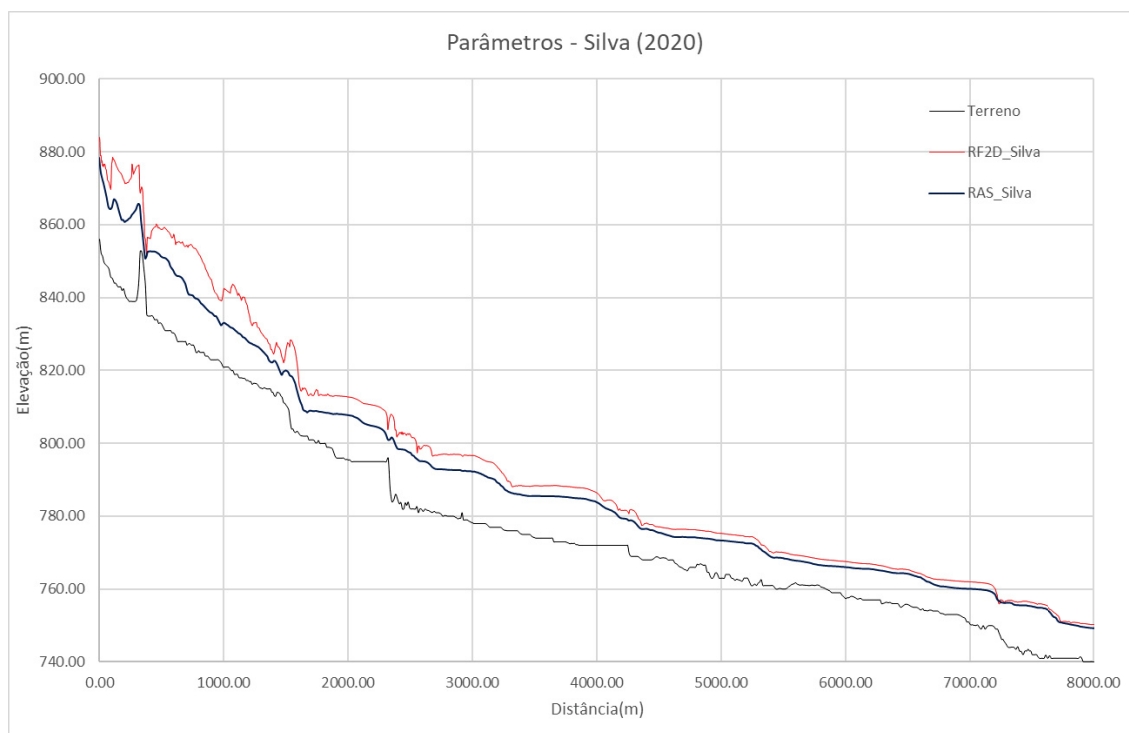
parâmetros reológicos, é possível realizar a simulação de barragens de rejeito considerando o fluido como newtoniano.

Essa menor dissipação do hidrograma observado no RiverFlow 2D, se transfere para os demais resultados obtidos, como mapa de elevação, velocidade, e tempo de chegada. Notadamente todos os resultados obtidos com o RiverFlow 2D podem ser interpretados como mais conservadores, no que diz respeito a proteção a vida, uma vez que os resultados da ruptura foram mais amplos que os observados nas simulações do HEC-RAS e do evento observado.

#### 4.2.4 Elevação do nível d'água.

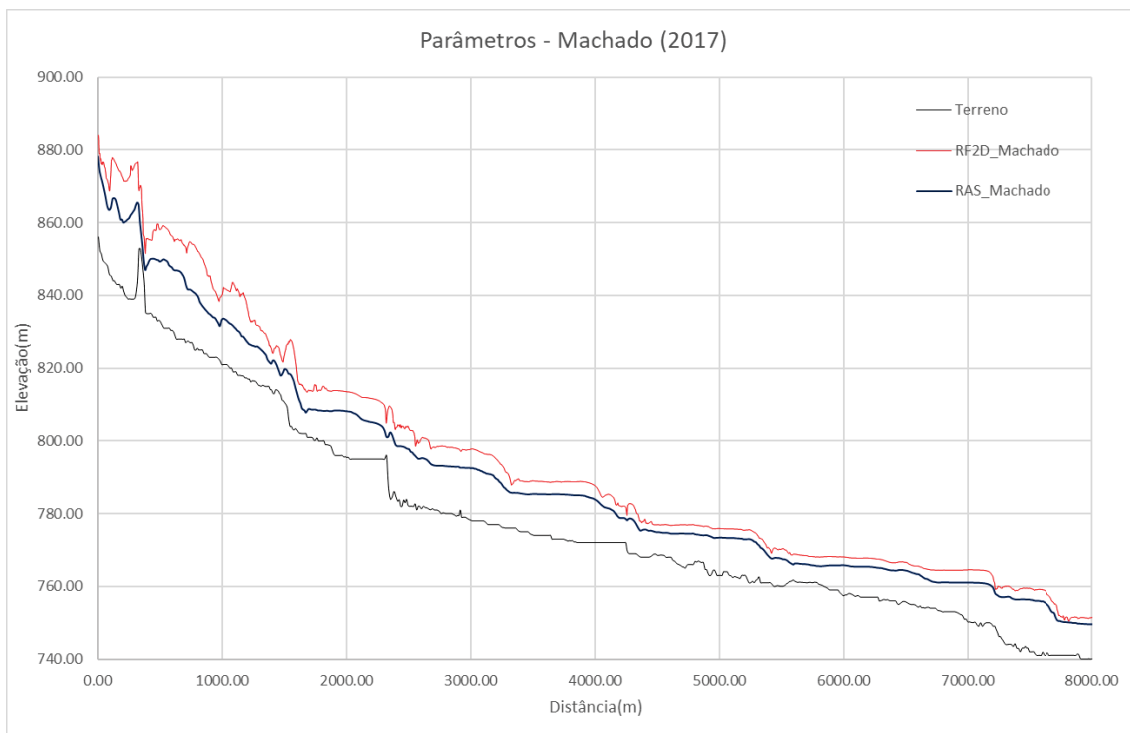
A elevação máxima da inundação ao longo do perfil longitudinal do talvegue está apresentada na Figura 32, Figura 33 e Figura 34, cada qual com os conjuntos de parâmetros reológicos avaliados.

Figura 32 - Elevação do nível d'água – Parâmetros Silva (2020).



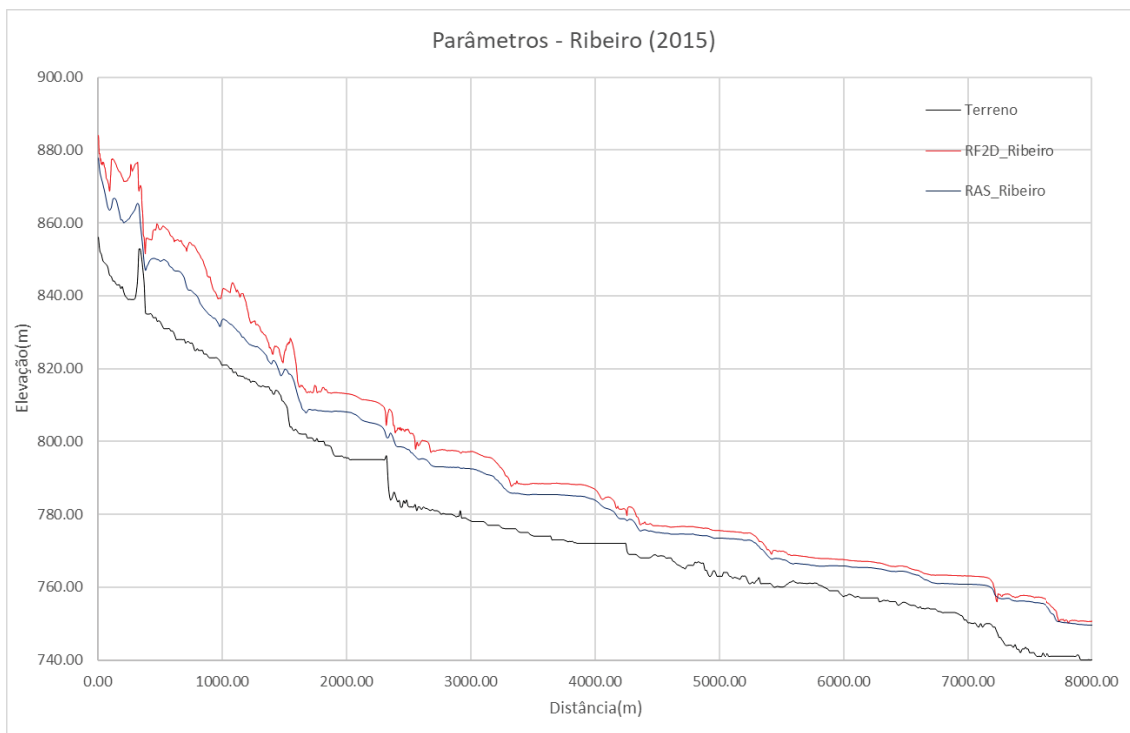
Fonte: O Autor (2024).

Figura 33 - Elevação do nível d'água – Parâmetros Machado (2017).



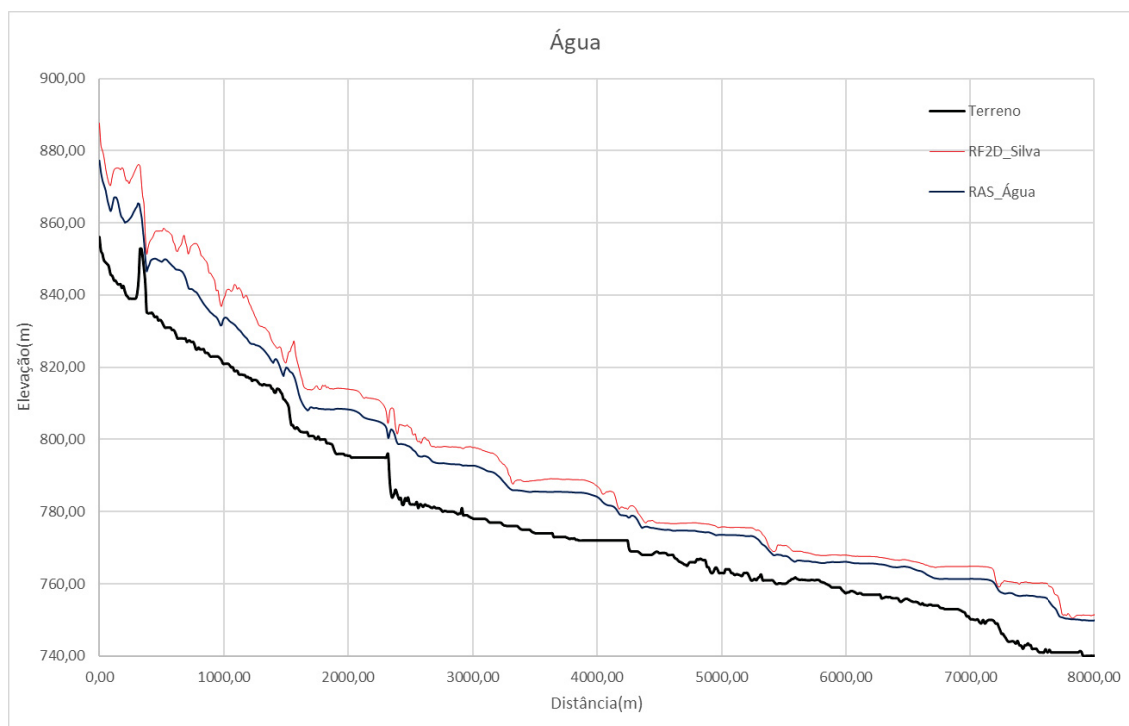
Fonte: O Autor (2024).

Figura 34 - Elevação do nível d'água – Parâmetros Ribeiro (2015).



Fonte: O Autor (2024).

Figura 35 - Elevação do nível d'água – Fluído Newtoniano (Água).

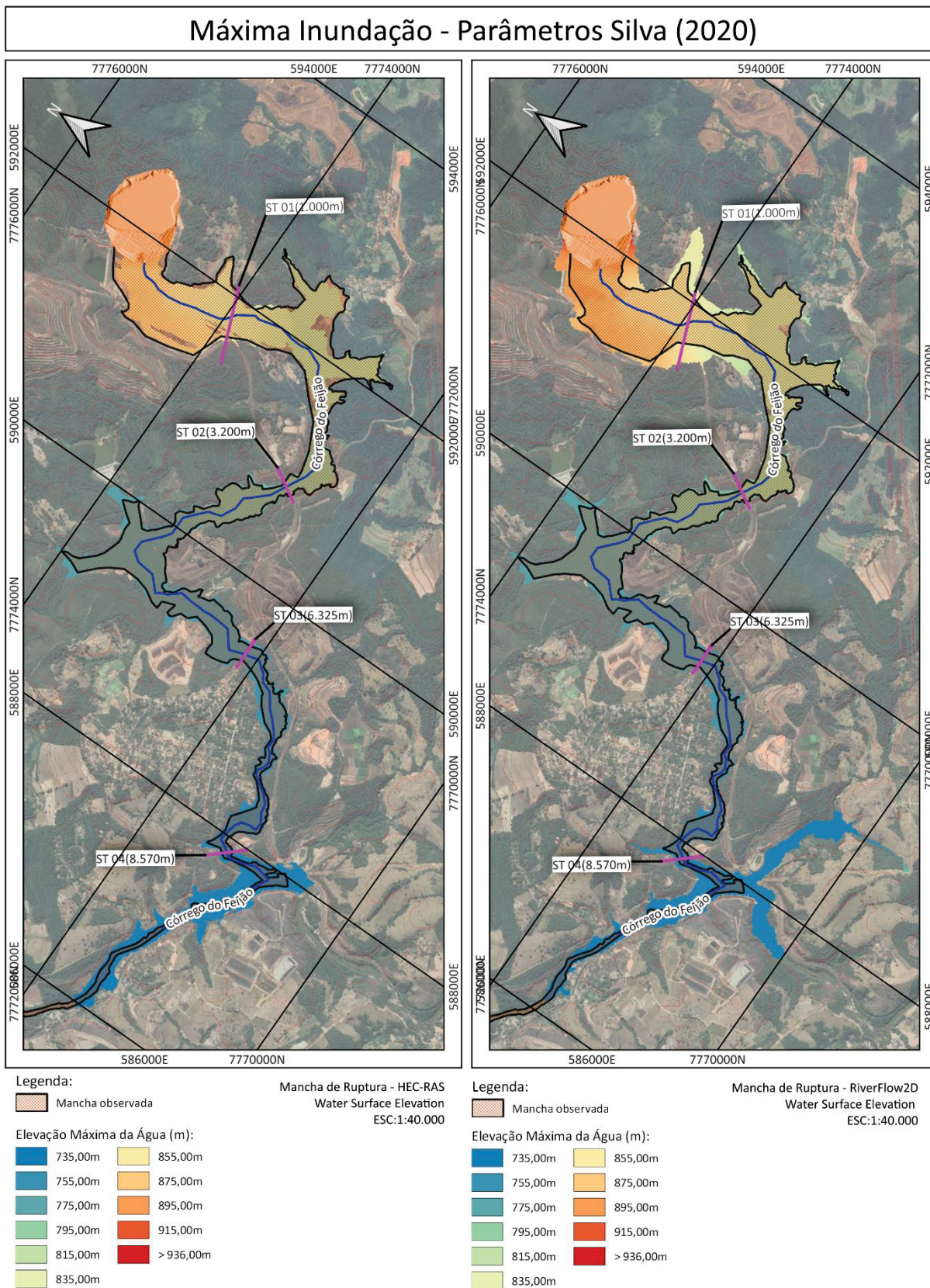


Fonte: O Autor (2024).

Quando avaliamos individualmente cada software, não foram observadas diferenças significativas entre quando analisamos a ruptura sob diferentes parâmetros. O que se observa é uma grande distinção de valores comparativamente entre o RiverFlow 2D e HEC-RAS. Em todas as simulações realizadas a HEC-RAS apresentou uma inundação mais rasa.

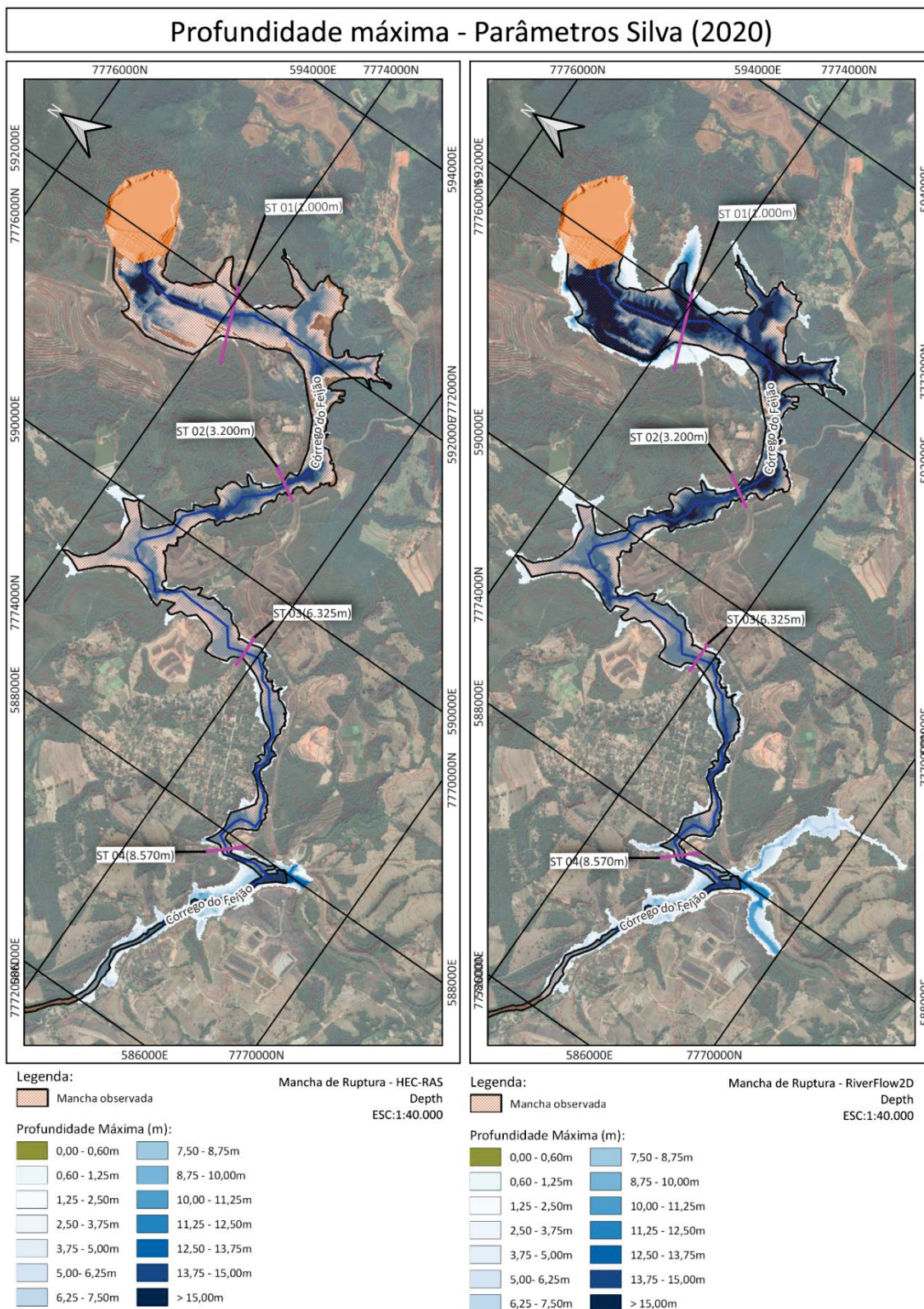
A Figura 36 apresenta a mancha de ruptura com o resultado máxima elevação da inundação, e a Figura 37 apresenta a máxima profundidade, ambas para os parâmetros definidos por Silva (2020), os demais mapas de ruptura estão apresentados nos APÊNCICES.

Figura 36 – Máxima elevação da inundação – Parâmetros de Silva (2020)



Fonte: O Autor (2024).

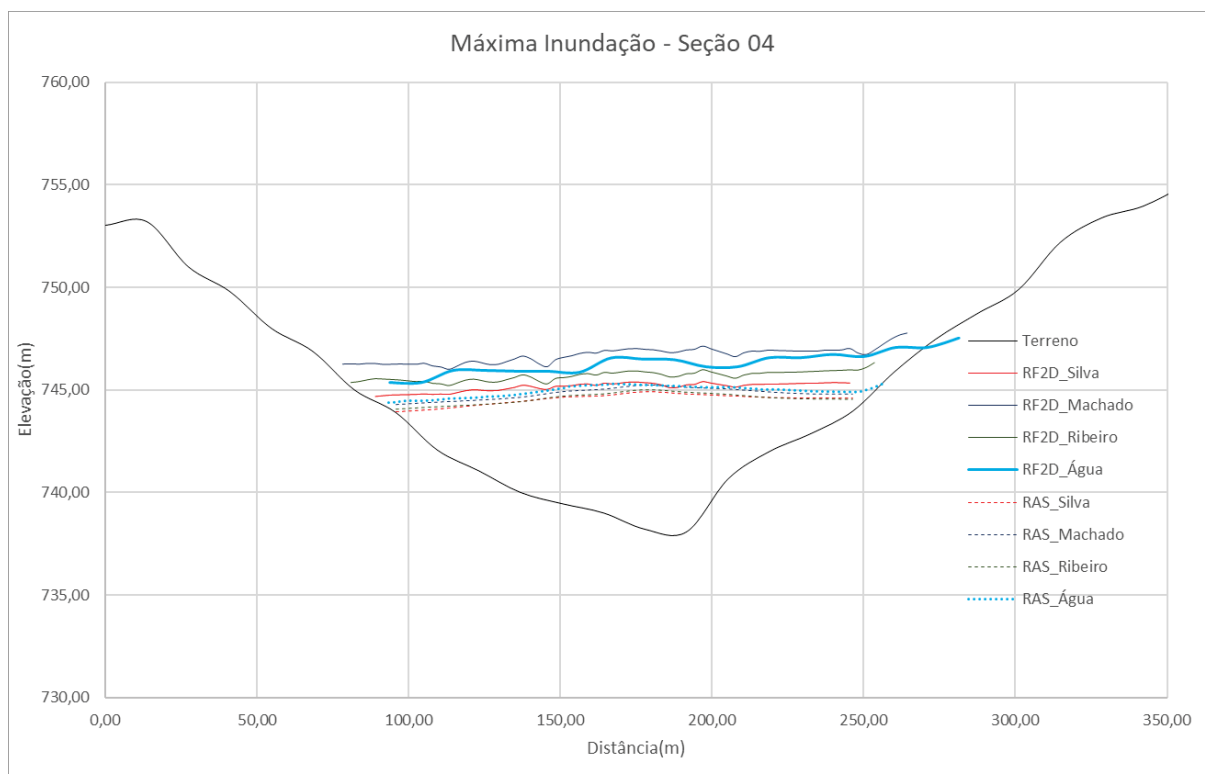
Figura 37 – Máxima Profundidade da inundação – Parâmetros de Silva (2020)



Fonte: O Autor (2024).

Ao compararmos os resultados frente a mancha observada, nota-se uma proximidade muito maior entre o evento observado e o evento simulado no HEC-RAS, a observação é válida para toda a mancha no córrego do feijão.

Figura 38 – Máxima Inundação na Seção 04.



Fonte: O Autor (2024).

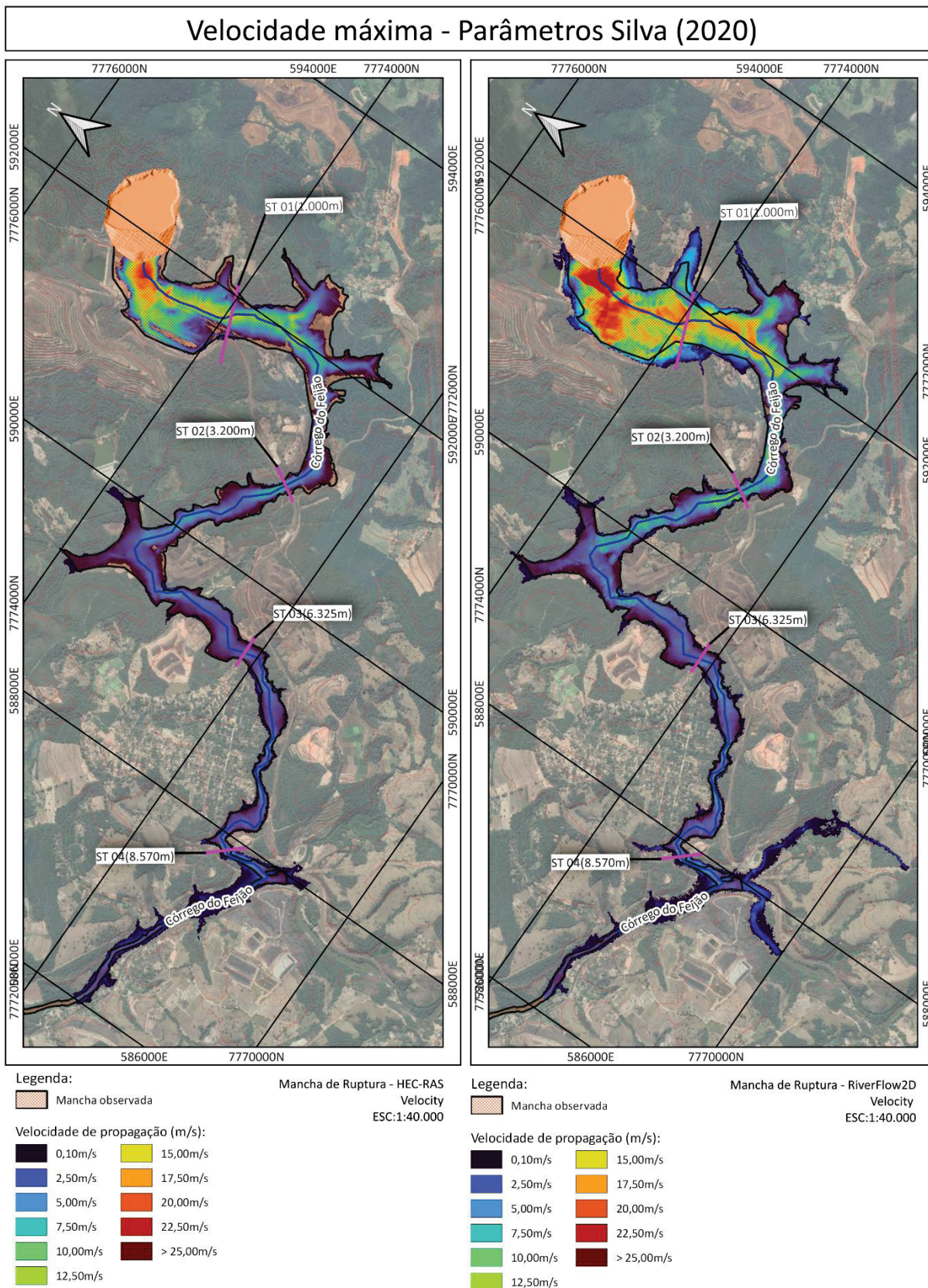
Uma das possíveis causas pode ser a forma de arranjo das equações implementadas em cada um dos softwares em função do formato/tamanho da malha. A malha quadrada do HEC-RAS, associada a duplicidade da malha descrita anteriormente, aparentemente cobre uma maior superfície com o mesmo tamanho da célula.

Para confirmação da hipótese seriam necessárias novas simulações com uma malha mais densa de pontos no software RiverFlow 2D, uma vez que é o software que apresenta uma maior distinção entre o evento simulado e o observado.

#### 4.2.5 Velocidade máxima da inundação

A velocidade máxima da inundação ao longo do domínio da simulação, para os parâmetros definidos por Silva (2020), está apresentada na Figura 39, os demais mapas de ruptura estão apresentados nos APÊNDICES.

Figura 39 – Velocidade máxima – Parâmetros de Silva (2020).



Fonte: O Autor (2024).

Observa-se que a velocidade, principalmente nos instantes iniciais em ambos os modelos, apresentaram aderência ao observado. Em ambas as simulações os resultados indicaram velocidades superiores a 100km/h na propagação.

Na seção 04 onde foram observadas velocidades na ordem de 5m/s, ambos os modelos responderam próximo ao esperado. Destaca-se os parâmetros obtidos por Silva (2020) onde os resultados tanto do RiverFlow 2D como o HEC-RAS foram 5,50m/s e 5,19m/s, respectivamente.

Como é esperado, ao longo do vale essa velocidade é dissipada, em função da rugosidade do terreno, em menor parcela, e em função principalmente das características coesivas e viscosas do fluido/rejeito.

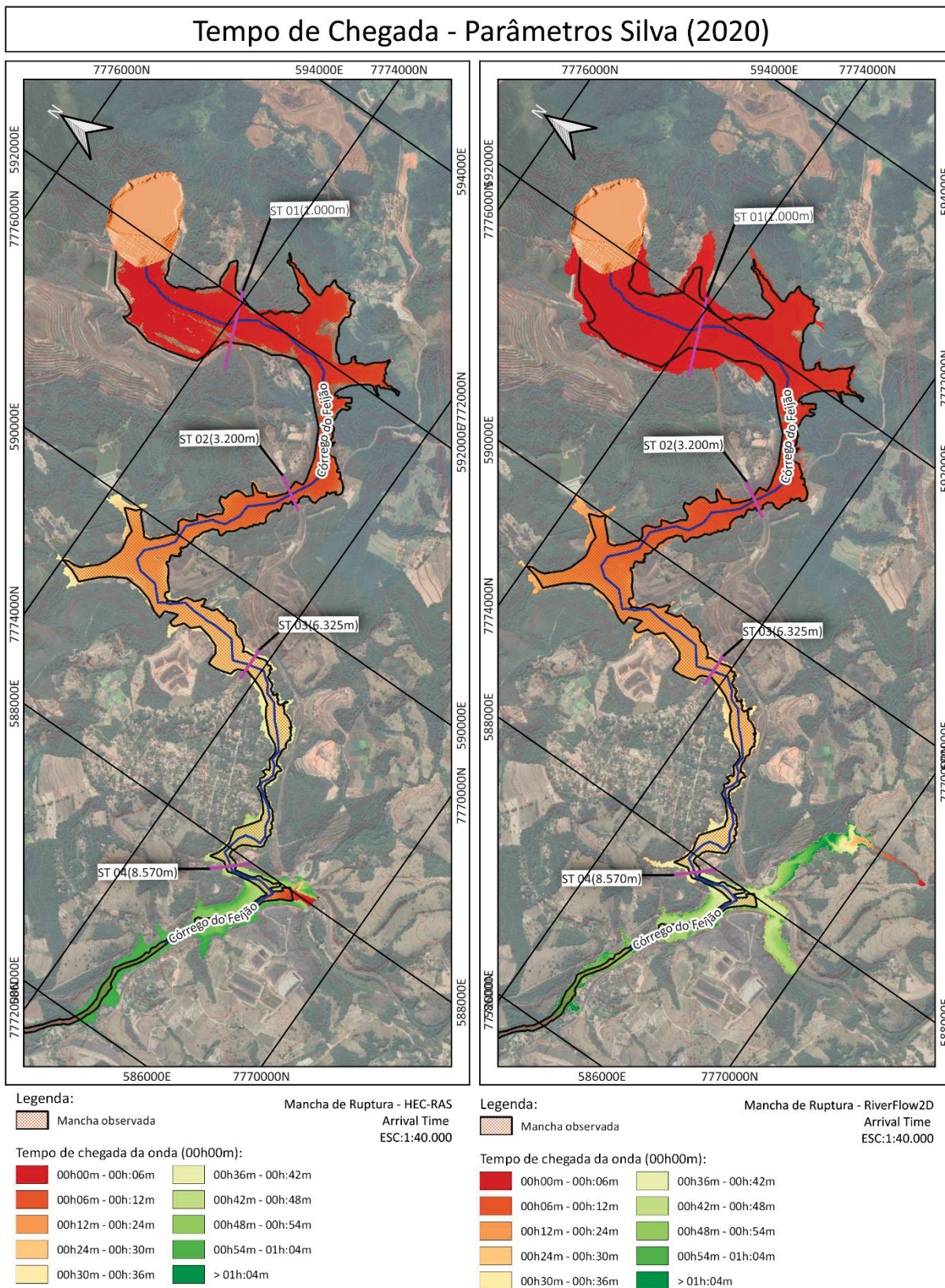
Ao compararmos as velocidades entre os parâmetros simulados, é possível constatar que com os parâmetros reológicos definidos por Silva (2020) a velocidade foi menor que em relação a Machado (2017) e Ribeiro (2015).

Os resultados estão atrelados a elevada viscosidade do material, diferentemente dos demais. Naturalmente fluidos mais viscosos possuem uma maior resistência ao escoamento ao longo da calha.

#### 4.2.6 Tempo de chegada

A velocidade máxima da inundação ao longo do domínio da simulação, para os parâmetros definidos por Silva (2020), está apresentada na Figura 40, os demais mapas de ruptura estão apresentados nos APÊNDICES.

Figura 40 – Tempo de Chegada – Parâmetros de Silva (2020).



Fonte: O Autor (2024).

No tempo de chegada, os resultados mais aderentes ao evento observado são os produzidos pelo software HEC-RAS, principalmente com relação aos parâmetros de Silva (2020) onde o valor foi de aproximadamente 42 min, frente a 45min do evento observado.

#### 4.2.7 Risco hidrodinâmico

A classificação quanto ao risco hidrodinâmico leva em consideração a vulnerabilidade de pessoas e edificações no momento da passagem da cheia, e está relacionado à possibilidade de desestabilização e conseqüente arraste ou afogamento.

Para isso, os resultados obtidos neste estudo são classificados em função do produto máximo dos parâmetros de velocidade e elevação da inundação (risco hidrodinâmico), com o objetivo de auxiliar na análise dos efeitos decorrentes da passagem da onda de ruptura.

Os critérios de classificação quanto ao risco hidrodinâmico são definidos por Viseu (2006), e apresentados sumariamente nas figuras a seguir.

Tabela 9 - Critérios para classificação do perigo de inundações para os seres humanos.

Classificação	Danos	Critério de classificação
Reduzido	Normalmente área segura para pessoas e benfeitorias	<0,5 m <sup>2</sup> /s
Médio	Perigo para idosos e crianças	0,5 m <sup>2</sup> /s – 0,75 m <sup>2</sup> /s
Importante		0,75 m <sup>2</sup> /s – 1,0 m <sup>2</sup> /s
Muito importante	Perigo para todas as pessoas	>1,0 m <sup>2</sup> /s

Fonte: (adaptado de Viseu, 2006).

Tabela 10 - Critérios para classificação do perigo de inundações para as edificações.

<b>Classificação</b>	<b>Danos</b>	<b>Critério de classificação</b>
<b>Reduzido</b>	Edificações com estruturas menos reforçadas estão sujeitas a dano total, e demais edificações estão sujeitas a submersão e danos estruturais	$<3,0 \text{ m}^2/\text{s}$
<b>Médio</b>	Danos estruturais em edifícios e possível dano total	$3,0 \text{ m}^2/\text{s} - 5,0 \text{ m}^2/\text{s}$
<b>Importante</b>		$5,0 \text{ m}^2/\text{s} - 7,0 \text{ m}^2/\text{s}$
<b>Muito importante</b>	Todas as edificações estão sujeitas a dano total	$>7,0 \text{ m}^2/\text{s}$

Fonte: (adaptado de Viseu, 2006).

O Risco hidrodinâmico da inundação obtidos nas simulações, para os parâmetros definidos por Silva (2020), está apresentadas nas figuras Figura 41 os demais mapas de ruptura estão apresentados nos APÊNDICES.



As diferenças notadas no risco hidrodinâmico entre os modelos HEC-RAS e RiverFlow 2D estão mais associadas às diferentes velocidades e profundidades do que à metodologia de cálculo do mapa.

Cabe ressaltar que independentemente do modelo utilizado, toda a região do córrego do Feijão encontrava-se em região de elevado perigo para pessoas e edificações.

Dessa forma, qualquer dos modelos respondeu adequadamente com relação a preservação da vida. A interpretação dos resultados do HEC-RAS, que resultaram numericamente em danos menos severos conduziria as mesmas ações na implantação do PAEBM e por parte das autoridades de proteção a vida em caso de acidentes.

### 4.3 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos, será avaliada a adequabilidade dos modelos elaborados ao propósito de utilização das rupturas na elaboração do PAEBM. Para isso os resultados foram compilados sob algumas grandezas de maior relevância, utilizados na previsão de catástrofes desse tipo. A Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13 apresentam de forma compilada esses resultados das simulações, obtidos com a aplicação do parâmetros reológicos descritos por Machado (2017), Ribeiro (2015) e Silva (2020), respectivamente.

Tabela 11 – Resultados da simulação – Parâmetros de Machado (2017).

<b>Parâmetros de Machado (2017)</b>								
<b>Parâmetros</b>	<b>Seção 01</b>		<b>Seção 02</b>		<b>Seção 03</b>		<b>Seção 04</b>	
	<b>RF2D</b>	<b>RAS</b>	<b>RF2D</b>	<b>RAS</b>	<b>RF2D</b>	<b>RAS</b>	<b>RF2D</b>	<b>RAS</b>
<b>Velocidade máxima (m/s)</b>	20,15	14,35	10,09	8,07	5,25	4,56	7,10	7,03
<b>Tempo de Chegada (hh)</b>	0,03	0,03	0,09	0,11	0,29	0,34	0,46	0,52
<b>Profundidade Máxima (m)</b>	22,13	12,60	17,77	12,45	11,27	9,06	8,83	7,04
<b>Risco Hidrodinâmico (m<sup>2</sup>/s)</b>	250,05	132,28	162,35	99,65	49,93	34,19	56,97	45,33

Fonte: O Autor (2024).

Tabela 12 – Resultados da simulação – Parâmetros de Ribeiro (2015).

<b>Parâmetros de Ribeiro (2015)</b>								
<b>Parâmetros</b>	<b>Seção 01</b>		<b>Seção 02</b>		<b>Seção 03</b>		<b>Seção 04</b>	
	<b>RF2D</b>	<b>RAS</b>	<b>RF2D</b>	<b>RAS</b>	<b>RF2D</b>	<b>RAS</b>	<b>RF2D</b>	<b>RAS</b>
<b>Velocidade máxima (m/s)</b>	19,84	14,27	9,65	7,95	4,79	4,65	6,48	6,78
<b>Tempo de Chegada (hh)</b>	0,03	0,03	0,09	0,12	0,30	0,35	0,49	0,54
<b>Profundidade Máxima (m)</b>	22,46	12,59	16,87	12,27	10,43	8,92	7,73	6,80
<b>Risco Hidrodinâmico (m<sup>2</sup>/s)</b>	247,47	131,37	150,11	97,11	39,16	31,88	46,38	42,33

Fonte: O Autor (2024).

Tabela 13 – Resultados da simulação – Parâmetros de Silva (2020).

Parâmetros de Silva (2020)								
Parâmetros	Seção 01		Seção 02		Seção 03		Seção 04	
	RF2D	RAS	RF2D	RAS	RF2D	RAS	RF2D	RAS
Velocidade máxima (m/s)	19,39	13,11	9,04	7,10	3,98	3,40	5,50	5,19
Tempo de Chegada (hh)	0,03	0,03	0,10	0,14	0,34	0,44	0,57	0,70
Profundidade Máxima (m)	22,64	12,00	16,09	11,99	10,17	8,78	7,20	6,72
Risco Hidrodinâmico (m <sup>2</sup> /s)	241,35	136,65	137,28	85,07	31,99	25,07	37,49	32,26

Fonte: O Autor (2024).

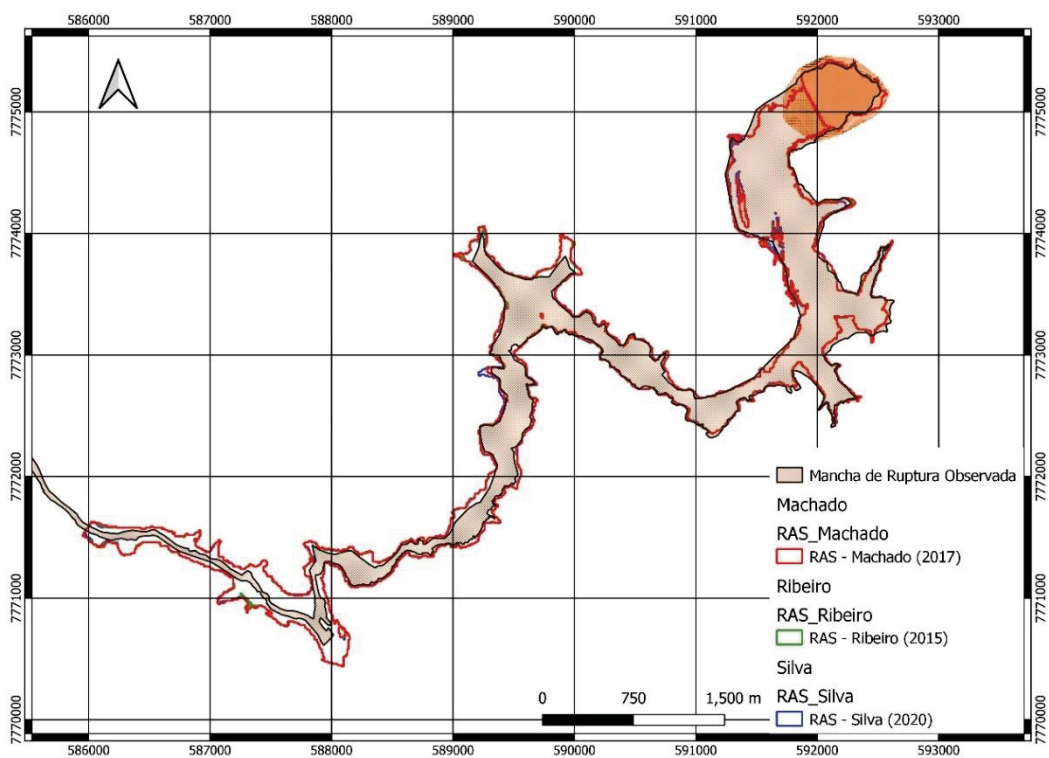
Tabela 14 – Resultados da simulação – Fluido Newtoniano (Água).

Fluido Newtoniano - Água								
Parâmetros	Seção 01		Seção 02		Seção 03		Seção 04	
	RF2D	RAS	RF2D	RAS	RF2D	RAS	RF2D	RAS
Velocidade máxima (m/s)	20,56	14,28	9,17	8,13	4,59	4,61	6,36	6,75
Tempo de Chegada (hh)	0,03	0,03	0,09	0,11	0,28	0,34	0,45	0,52
Profundidade Máxima (m)	18,10	12,15	16,97	12,71	10,57	8,77	8,46	7,13
Risco Hidrodinâmico (m <sup>2</sup> /s)	262,36	128,66	144,33	101,44	41,44	36,41	52,98	46,48

Fonte: O Autor (2024).

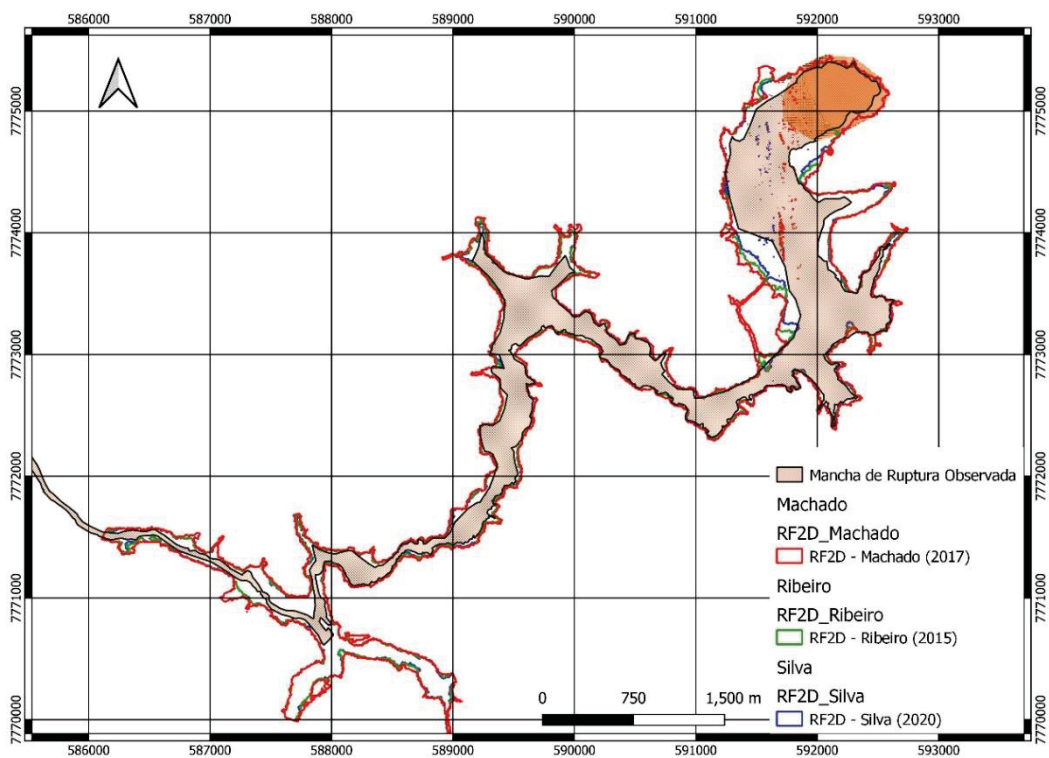
Ao avaliar os resultados, observa-se que a variação dos parâmetros reológicos tem pouco influência na superfície de inundação, quando analisados sob o mesmo software. Alterações mais perceptíveis foram notadas apenas no RiverFlow 2D, que demonstrou uma sensibilidade maior aos parâmetros reológicos. A Figura 42 apresenta as manchas de ruptura das simulações realizadas no HEC RAS, já a Figura 43 as realizadas no RiverFlow 2D.

Figura 42 - Manchas de ruptura – HEC-RAS.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 43. Manchas de ruptura – RiverFlow 2D.



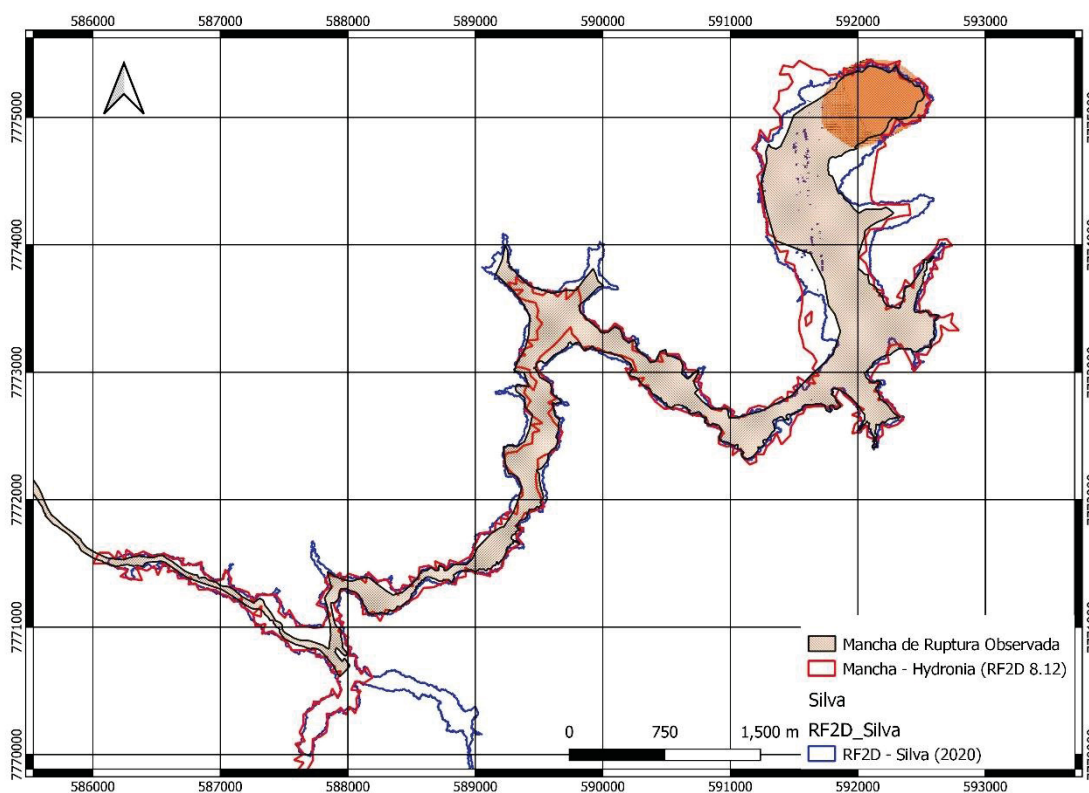
Fonte: O Autor (2024).

Com relação a aderência entre o simulado e o observado, é nítida a maior proximidade entre a mancha observada e os resultados do HEC-RAS. Isso pode ser corroborado ao compararmos as áreas das manchas simuladas com a mancha observada das figuras anteriores.

O RiverFlow 2D apresenta uma tendência de majoração da mancha, principalmente nos instantes iniciais da propagação. Esse comportamento é observado também em versões mais recentes do software.

Em um painel realizado em maio de 2020, pela Hydronia e disponível em seu canal do Youtube, é apresentada a retroanálise da ruptura da barragem B1, os parâmetros dessa análise foram calibrados por Tribst-Correa e Garcia, a Figura 44 apresenta um comparativo dos resultados.

Figura 44 - Comparação de versões do RF2D.



Fonte: O Autor (2024).

A análise da figura anterior permite traçar algumas conclusões a respeito do RiverFlow 2D:

- Mesmo em suas versões mais recentes há uma tendência de majoração da mancha de ruptura no início da propagação;
- A possibilidade de variação na concentração do fluido aproxima seus resultados do observado, essa função é muito útil na avaliação de vales mais longos em comparação ao objeto desse estudo;
- Em até 10km de distância a consideração da variação do fluido não apresentou diferenças significativas em relação a modelagem considerando as propriedades constantes;

A observação dos 10km torna-se interessante quando comparamos confrontada com a resolução ANM Nº 95, de 07 de fevereiro de 2022, onde transcreve-se:

*“... LI - Zona de Autossalvamento (ZAS): trecho do vale à jusante da barragem em que se considera que os avisos de alerta à população são da responsabilidade do empreendedor, por não haver tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em situações de emergência, devendo-se adotar a maior das seguintes distâncias para a sua delimitação: a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a 30 (trinta) minutos ou 10 km (dez quilômetros);”*

Ou seja, dentro da faixa mais crítica relacionada a perda de vidas humanas, e onde não há tempo para resgate por parte das autoridades, ambos os modelos responderam adequadamente, HEC-RAS, RiverFlow 2D 7.0 e versões posteriores.

Quanto as velocidades atingidas, o modelo respondeu adequadamente ao valor da tensão limite de escoamento utilizada em cada modelagem, onde o quão maior é esse parâmetro menor é a velocidade observada.

Com relação as profundidades, os resultados do HEC-RAS se aproximaram bastante do evento observado, principalmente na seção 04, onde os resultados

apresentaram valores entre 6,72m a 7,04m. Os resultados se aproximam bastante do observado na estação fluviométrica a montante da foz do Córrego do Feijão, com um valor observado de 5,15m. Salieta-se que a estação se encontra no remanso causado pela onda de ruptura, e não transversalmente ao sentido principal da calha. Dessa forma espera-se que os resultados sejam ligeiramente inferiores aos auferidos diretamente nas seções do Córrego do Feijão.

Uma análise de sensibilidade quanto a aderência do modelo à realidade foi realizada através da comparação do tempo de chegada da onda simulado em relação ao aferido na seção transversal 04, sendo esse o local onde se tem informações mais confiáveis a respeito.

Tabela 15 – Comparação dos tempos de chegada em relação ao observado (Seção 04).

Parâmetros reológicos	Tempo de chegada observado (hh:mm)	RF2D Tempo de chegada simulado (min)	RAS Tempo de chegada simulado (min)
Machado (2017)	~45,00	27,60	31,20
<u>Diferença</u>		<u>-47,93%</u>	<u>-36,22%</u>
Ribeiro (2015)		29,40	32,40
<u>Diferença</u>		<u>-41,94%</u>	<u>-32,56%</u>
Silva (2020)		34,20	<b>42,00</b>
<u>Diferença</u>		<u>-27,27%</u>	<b><u>-6,90%</u></b>
Água		27,10	31,20
<u>Diferença</u>		<u>-49,64</u>	<u>-36,32%</u>

Fonte: O Autor (2024).

Dos resultados auferidos, a melhor aproximação do tempo de chegada foi a simulação realizada com o HEC-RAS e parâmetros reológicos de Silva (2020). Esse conjunto de parâmetros também foi o que apresentou maior distinção entre os resultados de RiverFlow 2D e HEC-RAS.

Considerando a simulação como um fluido newtoniano ambos os modelos convergiram para tempos ligeiramente inferior que o tempo observado e com relação aos modelos de propagação não newtonianos, e que é natural uma vez que o fluido possui menos resistência ao escoamento. Considerando a determinação do tempo de resposta para a proteção a vida humana em catástrofes dessa monta, e considerando as incertezas em relação a obtenção dos parâmetros reológicos, a simulação considerando o volume como água pode ser considerada conservativa.

Pondera-se que os resultados do painel conduzido pela Hydronia, a versão do RiverFlow 8.12 apresentou resultados bastante similares ao comparados com as versões 7.0 do River Flow e a Versão 6.3.1 do HEC-RAS, tanto no tempo de concentração, como na profundidade quando avaliadas a mesma seção de controle.

## 5 CONCLUSÕES

Baseado no exposto ao decorrer dessa dissertação, este estudo comparativo investigou a eficácia da simulação hidrodinâmica, utilizando os softwares HEC-RAS e RiverFlow 2D com o módulo para propagação de fluidos não newtonianos, no cenário específico da Barragem do Córrego na Mina do Feijão, em Brumadinho/MG. O objetivo foi avaliar como essas ferramentas analisam o comportamento de materiais não newtonianos no cenário de propagação e liberação rápida desse fluido, como uma ruptura de barragem de Rejeitos.

Os resultados obtidos indicaram que a simulação hidrodinâmica de ambos os softwares foi capaz de prever o comportamento do fluxo com coerência em relação aos dados observados, como a velocidade do fluxo, a profundidade da onda, e tempo de chegada dos rejeitos em pontos de controle verificados.

Essa constatação sugere que a simulação hidrodinâmica com o HEC-RAS pode se tornar uma ferramenta importante para a avaliação desse tipo de propagação considerando fluidos não newtonianos, como é o caso dos rejeitos de mineração armazenados em barragens, fornecendo informações relevantes para previsão de cenários em caso de acidentes.

Uma vez que o RiverFlow 2D já é uma ferramenta mais madura e consolidada no mercado, os resultados sugerem que a simulação hidrodinâmica com o HEC-RAS pode se tornar uma ferramenta importante de checagem dos resultados produzidos pelo RiverFlow 2D, considerando também fluidos não newtonianos.

Todavia, é preciso enfatizar que a confiabilidade dos resultados da simulação hidrodinâmica depende de diversos fatores, tais como a qualidade dos dados de entrada, a calibração do modelo e a escolha adequada de parâmetros.

Como evidenciaram as análises realizadas, os parâmetros reológicos podem alterar sensivelmente os resultados das análises, basta comparar os

resultados obtidos por Silva (2020) com os demais, onde os parâmetros conduziram a uma melhor aproximação do evento observado frente ao evento simulado.

Assim, é crucial que esses aspectos sejam criteriosamente considerados para que os resultados da simulação sejam confiáveis e precisos, seja qual for o modelo utilizado.

Em caso de incertezas relacionadas aos parâmetros reológicos, o trabalho evidenciou que relacionado a proteção a vida humana, a simulação considerando o volume armazenado com um fluido newtoniano poderá atender satisfatoriamente, uma vez que produziu resultados mais conservadores que os da simulação com fluidos não newtonianos, conforme apresentado pelo tempo de chegada reduzido nas seções de controle.

Em síntese, os resultados do estudo evidenciam o potencial do HEC-RAS na simulação hidrodinâmica de fluidos não newtonianos como ferramenta relevante para avaliação da segurança de estruturas hidráulicas, com especial enfoque na previsão do comportamento do fluxo em cenários críticos. Contudo, faz-se necessário enfatizar a necessidade de cuidadosa avaliação e calibração do modelo, aliada à complementação por outras ferramentas de análise, para garantir a confiabilidade dos resultados.

Recomenda-se que esta pesquisa seja ampliada com novas versões dos softwares e com uma determinação rigorosa dos parâmetros de calibração das propriedades os rejeitos.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANM. **Resolução nº 95, de 07 de fevereiro de 2022**. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração).

BRASIL. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000.

BAPTISTA, M.; LARA, M. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2016.

BOGER, D. V. **Rheology and the resource industries**. Chemical Engineering Science, v. 64, p. 4525-4536, 2009.

BOGER, D. V. **Rheology of slurries and environmental impacts in the mining industry**. The Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering, v. 4, p. 239- 257, 2013.

BUREAU OF RECLAMATION. **Best practices in dam and levee safety risks analysis**. Washington: USACE/USBR, 2015. p. 1-18. manual técnico.

CASULLI, V. A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. **International Journal for Numerical Methods in Fluids**, v. 60, p. 391- 408, 2008.

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

FERREIRA, F. de O. **Abordagem matemática de roll waves em escoamentos hiperconcentrados com superfície livre**. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira (SP), 2007.

FARIA, F. L. F. *et al.* **Metodologia para obtenção do hidrograma de ruptura de barragens**. Revista Militar de Ciência e Tecnologia, Resende, v. 36, n. 3, p. 31-37, Dezembro. 2019. ISSN 0102-3543.

FEMA. **Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures**. Federal Emergency Management Agency. [S.l.], p. 946. 2013.

GALINDO, M. S. V., **Desenvolvimento de uma metodologia para a avaliação da viscosidade de solos**. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (RJ), 2013.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de Pesquisa**. Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e pelo Curso de Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

HENDERSON, F.M. **Open Channel Flow**. Macmillan Publishing Co., Inc. 866 Third Avenue, New York, 1966.

HYDRONIA LLC. **Dam Break and Tailings Dam Breach Flood Simulations**. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=d26fCRXI1JM>>. Acesso: 29 jun. 2021.

HYDRONIA LLC. **RiverFlow2D: two-dimensional flood and river dynamics model** – reference manual. Pembroke Pines, Florida, 2018.

ICOLD. **Tailing Dams – Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt From Practical Experiences, Bullentin 121**. Published by International Commission on Large Dams, Paris, France, 2001, 146p.

JEYAPALAN, J. K., DUNCAN, J. M., e SEED, H. B. (1982). **Analyses of Flow Failures of Mine Tailings Dams**. Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 109, No. GT2, Feb., 1982, pp. 150-171.

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.

LIMA, R. P. **Avaliação Do Uso De Modelos Digitais De Terreno Nos Estudos De Simulação De Ruptura De Barragens**. UFMG. Belo Horizonte, p. 73. 2020.

MACHADO, N. C. **Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da barragem do fundão com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (MG), 2017.

MACIEL, G. de F.; SANTOS, H. K. dos; FERREIRA, F. de O. **Rheological Analysis of Water Clay Compositions in Order to Investigate Mudflows Developing in Canals**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering; v.31, n. 1, p. 64-74, JAN-MAR 2009.

MELO, D. F. M. de. **Comportamento Reológico de Solos Sujeitos a Corridas de Lama por Liquefação Estática**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo (SP), 2014.

MELO, L. P. R. **Análise comparativa de metodologias de previsão de inundação decorrente da ruptura de barragens de rejeitos: caso hipotético da Barragem Tico-Tico**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2013.

MORGENSTERN, N. R.; VICK, S. G.; VIOTTI, C. B.; WATTS, B. D. **Fundão Tailings Dam Review Panel**. Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam. 2016. 88 p.

MURILLO, J. & GARCÍA-NAVARRO, P. **Weak solutions for partial differential equations with source terms: Application to the shallow water equations**, Journal of Computational Physics 229(11), 4327–4368, 2010b.

MURILLO, J. & GARCÍA-NAVARRO, P. **Wave riemann description of friction terms in unsteady shallow flows: application to water and mud/debris floods**, J. Comput. Phys 231, 1963–2001, 2011.

NAEF, D.; RICKENMANN, D.; RUTSCHMANN, P.; MCARDELL, B. W. **Comparison of flow resistance relations for debris flows using a one-dimensional finite element simulation model**. Natural Hazards and Earth System Sciences. 6, 155-165, 2006.

O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y.; FULLERTON, W. T. (1993). **Two-dimensional water flood and mudflow simulation**. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 119, n. 2, p. 244- 261p.

O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y. **Physical properties and mechanics hyperconcentrated sediment**. Utah State University. Utah, p. 206-279. 1985.

OLIVEIRA FILHO, W.L.; ABRÃO, P. C. **Disposição de rejeitos de Mineração**. In: ZUQUETTE, L. V (org). *Geotecnia Ambiental*. 1. Ed Rio de Janeiro – RJ: Elsevier, 2015.p. 263-306.

RIBEIRO, V. Q. F. **Proposta De Metodologia Para Avaliação Do Efeito De Rupturas De Estruturas De Contenção De Rejeitos**. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2015.

ROCHA, F.F. **Retroanálise da Ruptura da Barragem São Francisco – Mirai, Minas Gerais, Brasil**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte (2015).

ROBERTSON, P. K ; MELO, L ; WILLIAMS, D.J; WILSON, G. W. **Report of the expert panel on the technical causes of the failure of Feijão Dam I**. Painel de especialistas VALE. [S.I.]. 2019.

ROE, P., **Approximate riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes**, *Journal of Computational Physics* 43(2), 357 – 372, 1981.

SILVA, C. F. **Barragens de rejeitos: considerações sobre ruptura utilizando um fluido não newtoniano**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba (PR), 2020.

SOUZA, T. C. **Metodologia de avaliação de liquefação em barragens de rejeito**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2018.

Toro, E. **Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flow**. Wiley, New York, p. 109., 2001.

USACE – U. S. Army Corps of Engineers. **Using HEC-RAS for Dam Break Studies TD-39**. Davis: Hydrologic Engineering Center (HEC), 2014.

USACE. HEC-RAS – **River Analysis System – 2D Modeling User's manual**, Version 6.0 Beta. U.S. Army Corps of Engineers. Davis, p. 283. 2020.

VALETTE, R. *et al.* **Viscoplastic dam-breaks**. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2020.

WISEU, M. T. F. **Segurança dos vales a jusante de barragens: metodologias de apoio à gestão do risco.** Tese (Doutorado) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2006.

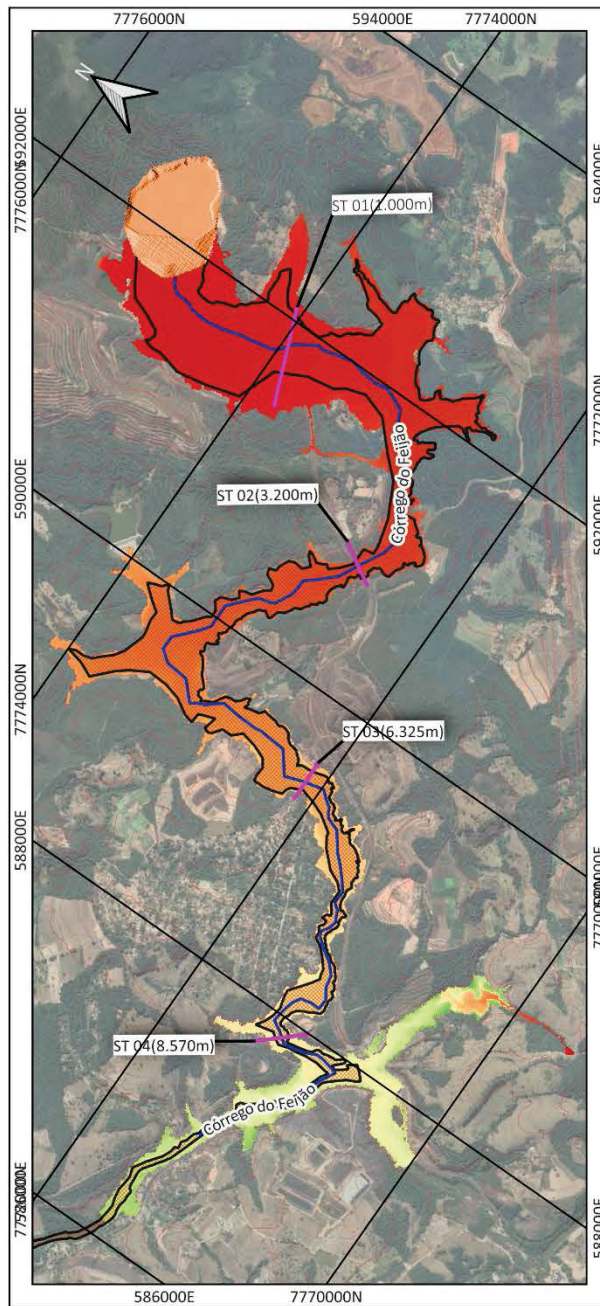
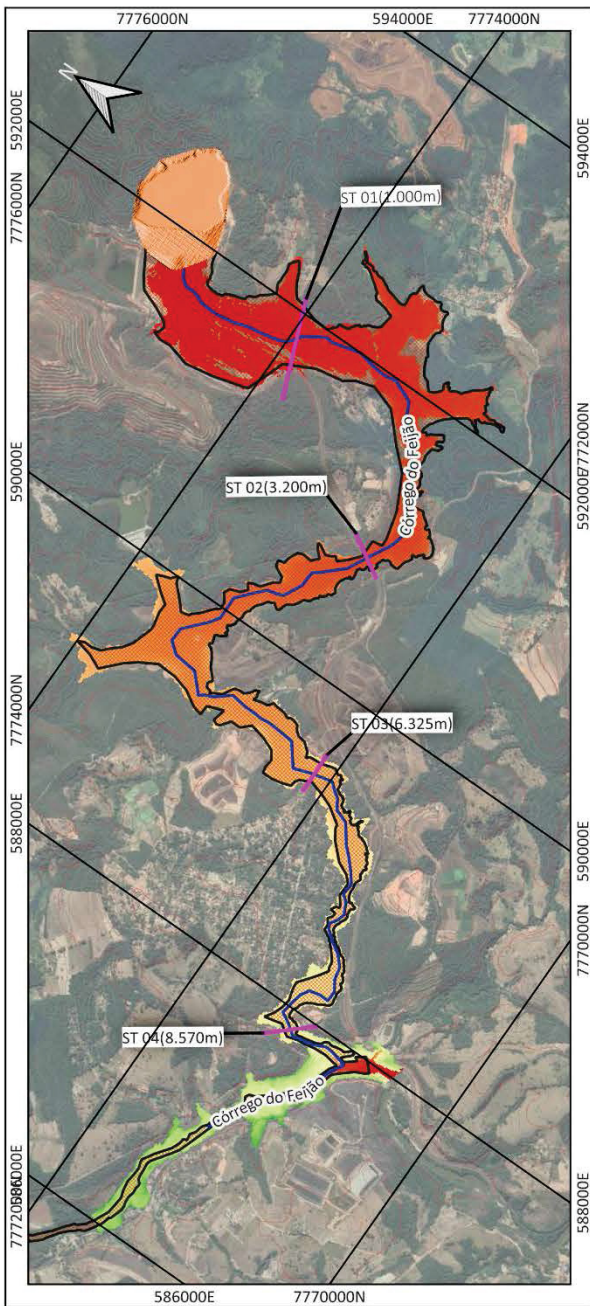
VREUGDENHIL, C. **Numerical methods for shallow water flow.** Water Science and Technology Library. Kluwer Academic Publishers, 1994.

VLIET, T. V. LYKLEMA, H. **Rheology. Fundamental of interface and Colloid Science.** 1. Ed. Amsterdam, the Netherlands: Academic Press, Elsevier, 2005.p 6.1 – 6.88.

VICK, S. G. **Inundation Risk from Tailings Dam Flow Failures.** IX Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. III, Viña del Mar- Chile. 1991.



### Tempo de Chegada - Parâmetros Machado (2017)



**Legenda:**

Mancha de Ruptura - HEC-RAS  
 Arrival Time  
 ESC:1:40.000

Mancha observada

Tempo de chegada da onda (00h00m):

00h00m - 00h:06m	00h36m - 00h:42m
00h06m - 00h:12m	00h42m - 00h:48m
00h12m - 00h:24m	00h48m - 00h:54m
00h24m - 00h:30m	00h54m - 01h:04m
00h30m - 00h:36m	> 01h:04m

**Legenda:**

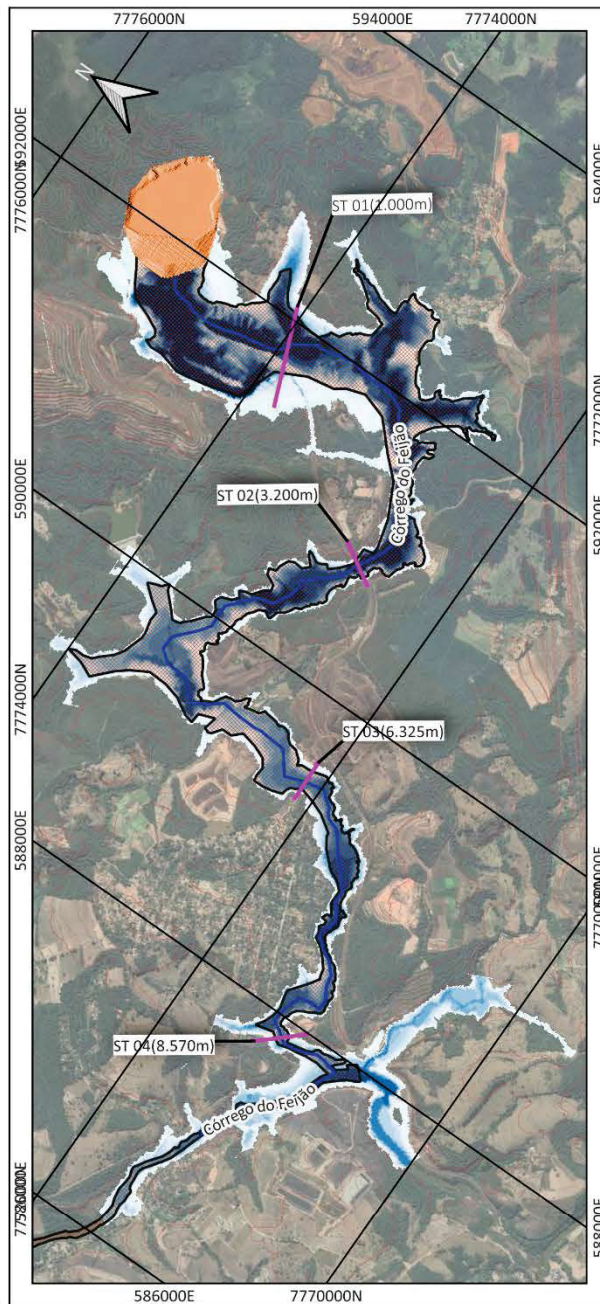
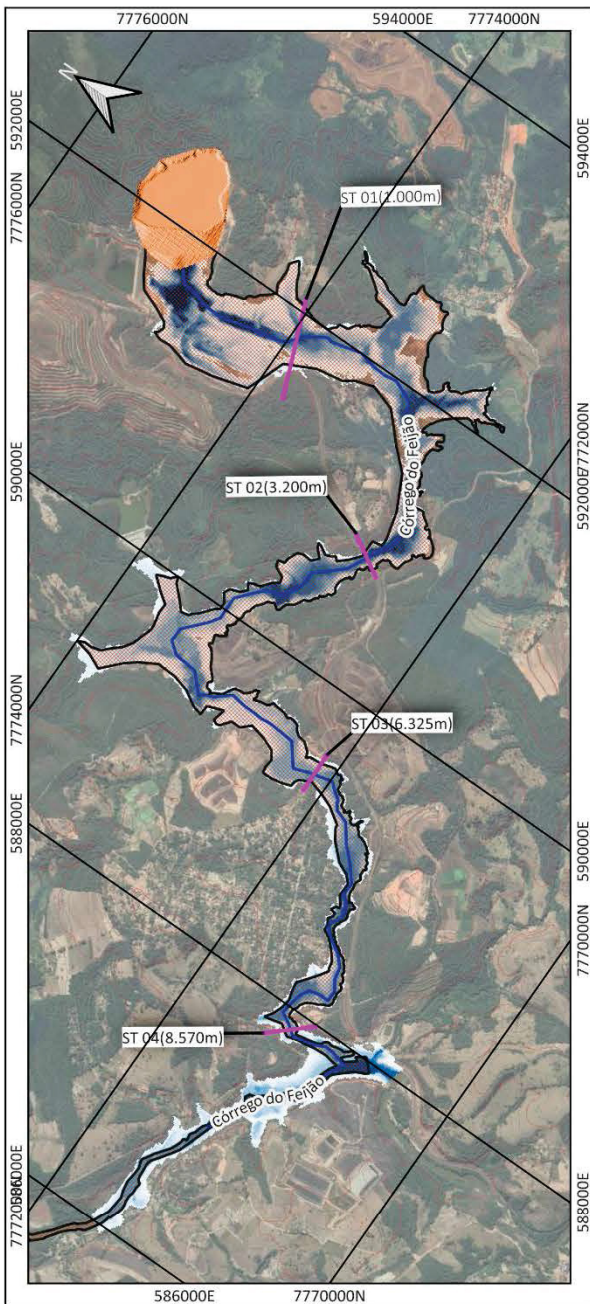
Mancha de Ruptura - RiverFlow2D  
 Arrival Time  
 ESC:1:40.000

Mancha observada

Tempo de chegada da onda (00h00m):

00h00m - 00h:06m	00h36m - 00h:42m
00h06m - 00h:12m	00h42m - 00h:48m
00h12m - 00h:24m	00h48m - 00h:54m
00h24m - 00h:30m	00h54m - 01h:04m
00h30m - 00h:36m	> 01h:04m

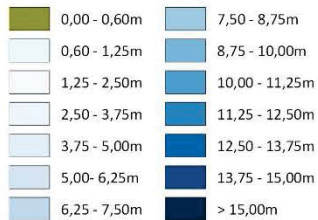
## Profundidade máxima - Parâmetros Machado (2017)



Legenda:

Mancha observada

Profundidade Máxima (m):

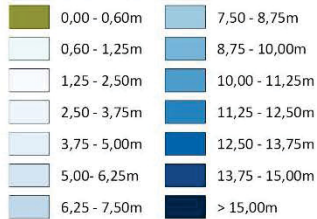


Mancha de Ruptura - HEC-RAS  
Depth  
ESC:1:40.000

Legenda:

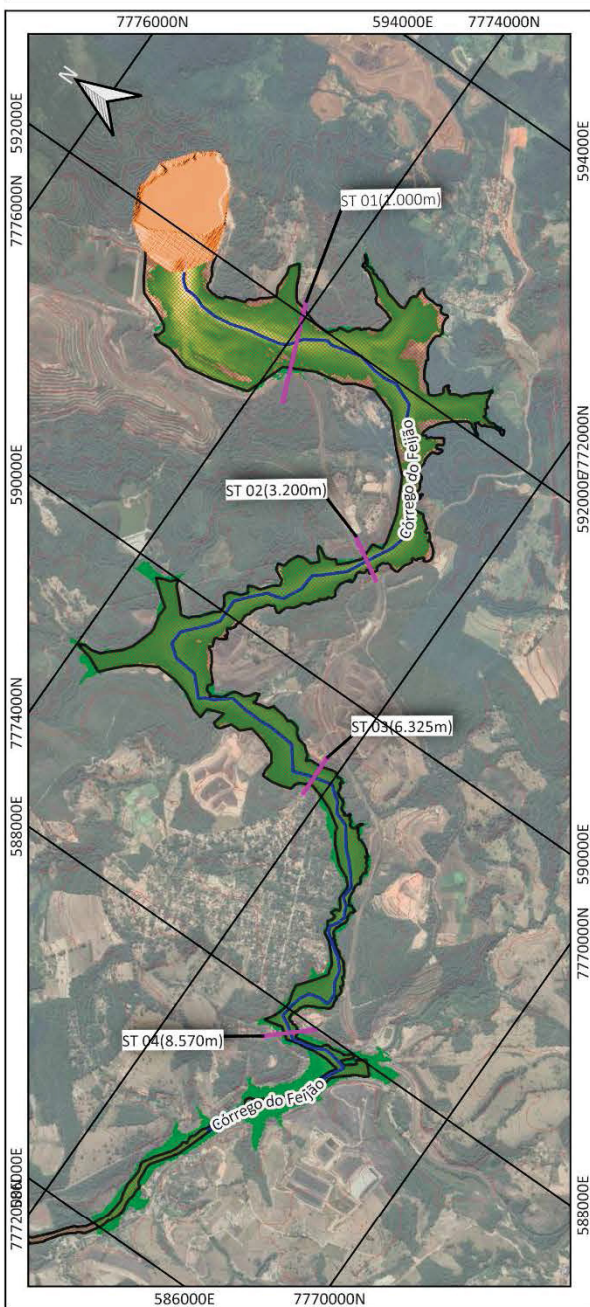
Mancha observada

Profundidade Máxima (m):



Mancha de Ruptura - RiverFlow2D  
Depth  
ESC:1:40.000

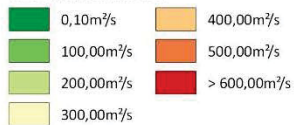
## Risco hidrodinâmico - Parâmetros Machado (2017)



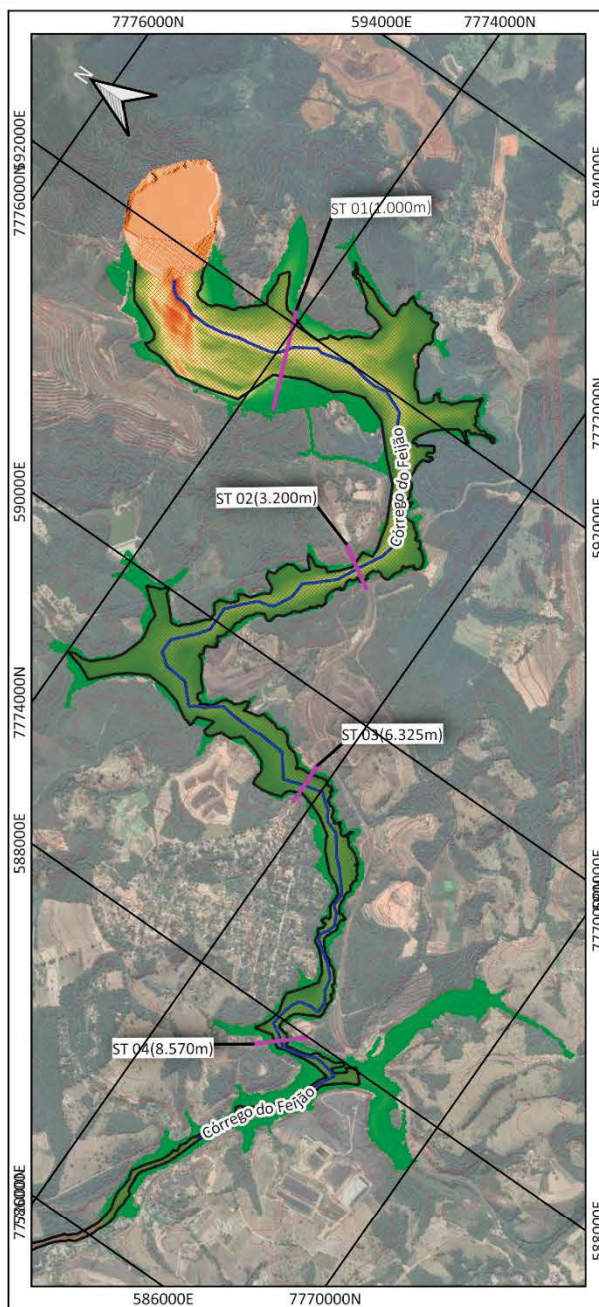
Legenda:

Mancha observada

Risco Hidrodinâmico:



Mancha de Ruptura - HEC-RAS  
Depth x Velocity  
ESC:1:40.000



Legenda:

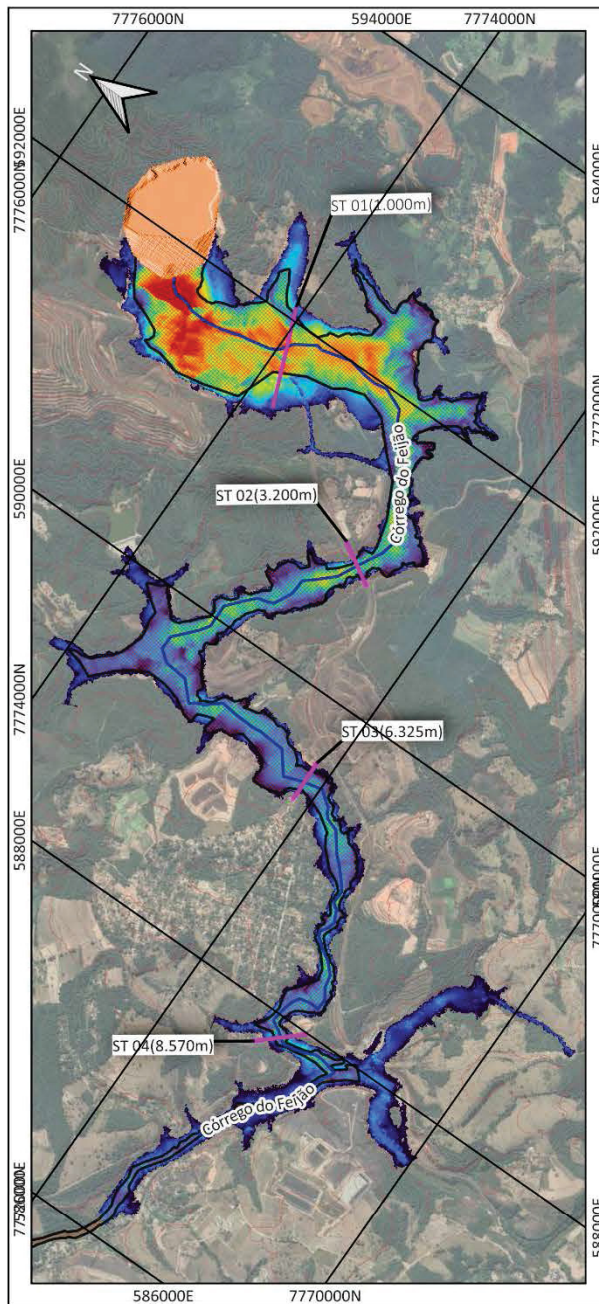
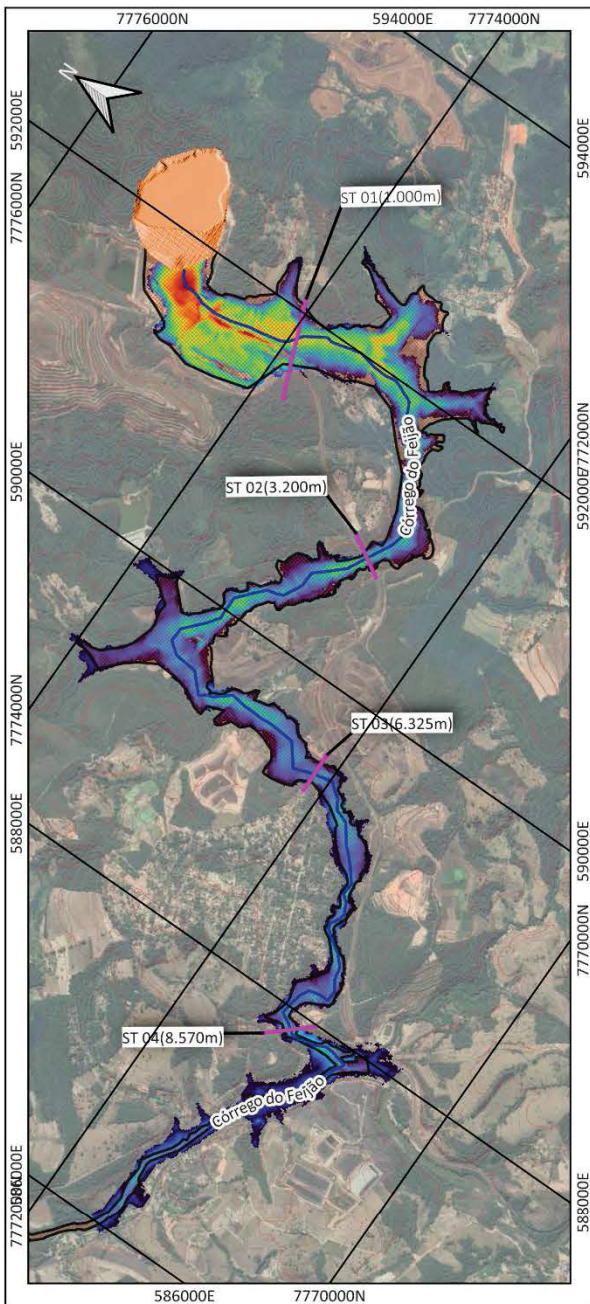
Mancha observada

Risco Hidrodinâmico:



Mancha de Ruptura - RiverFlow2D  
Depth x Velocity  
ESC:1:40.000

### Velocidade máxima - Parâmetros Machado (2017)

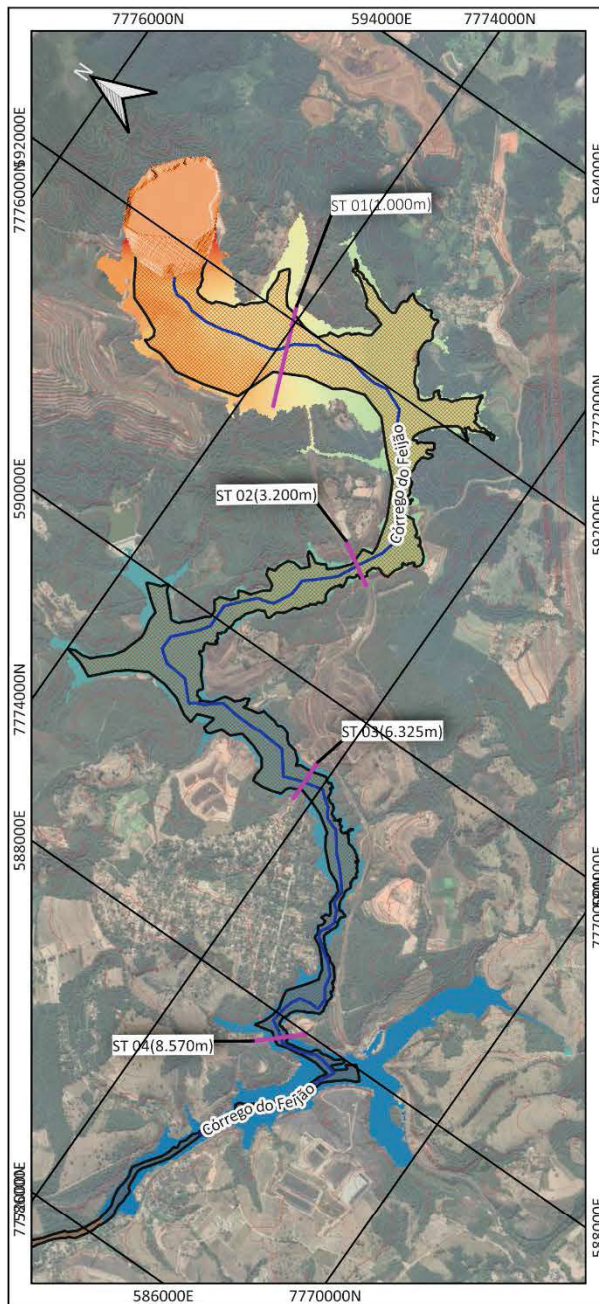
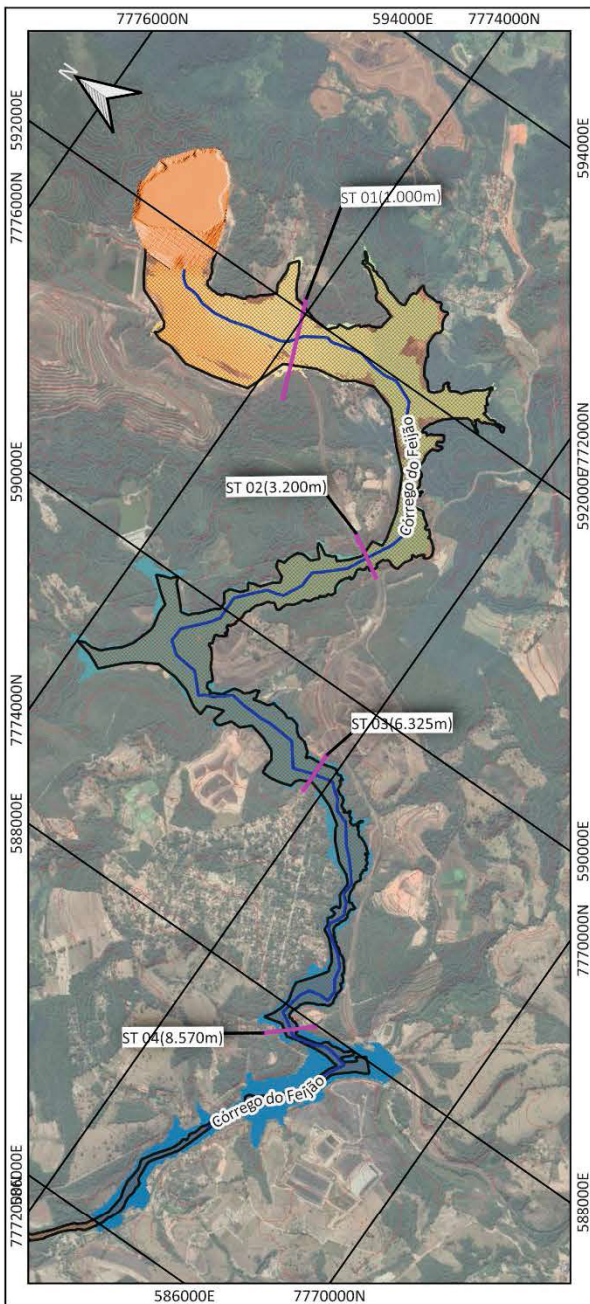


Mancha de Ruptura - HEC-RAS  
Velocity  
ESC:1:40.000



Mancha de Ruptura - RiverFlow2D  
Velocity  
ESC:1:40.000

## Máxima Inundação - Parâmetros Machado (2017)



Legenda:



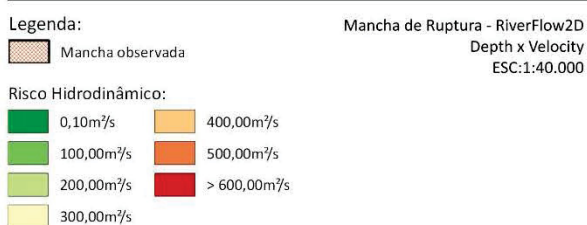
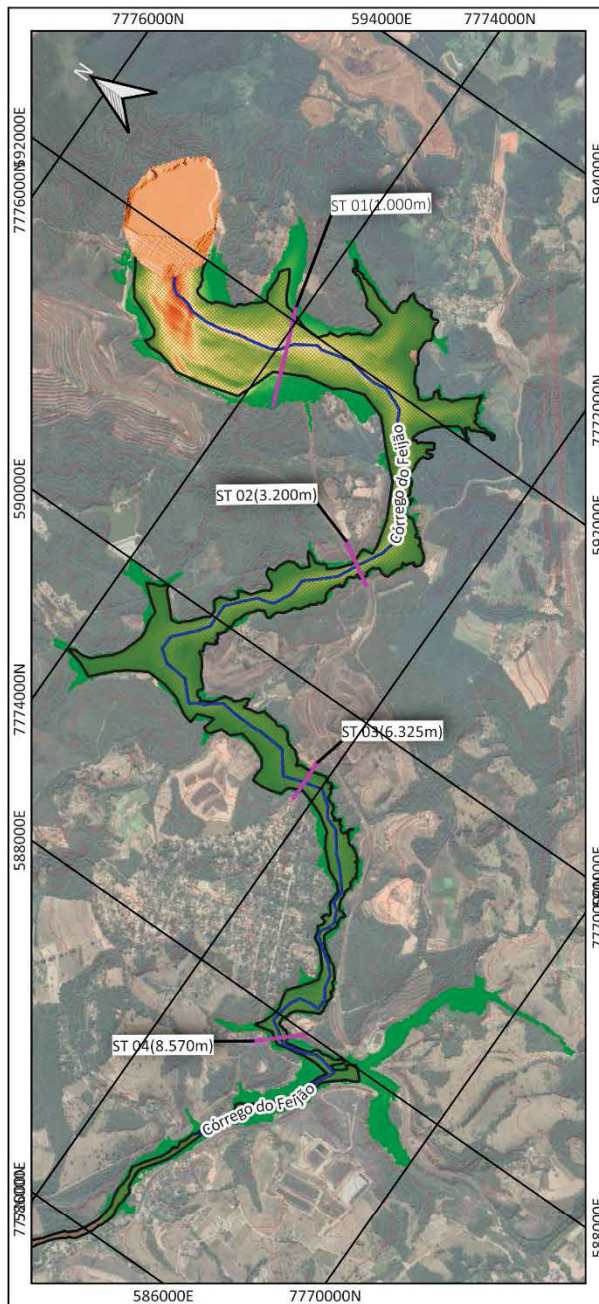
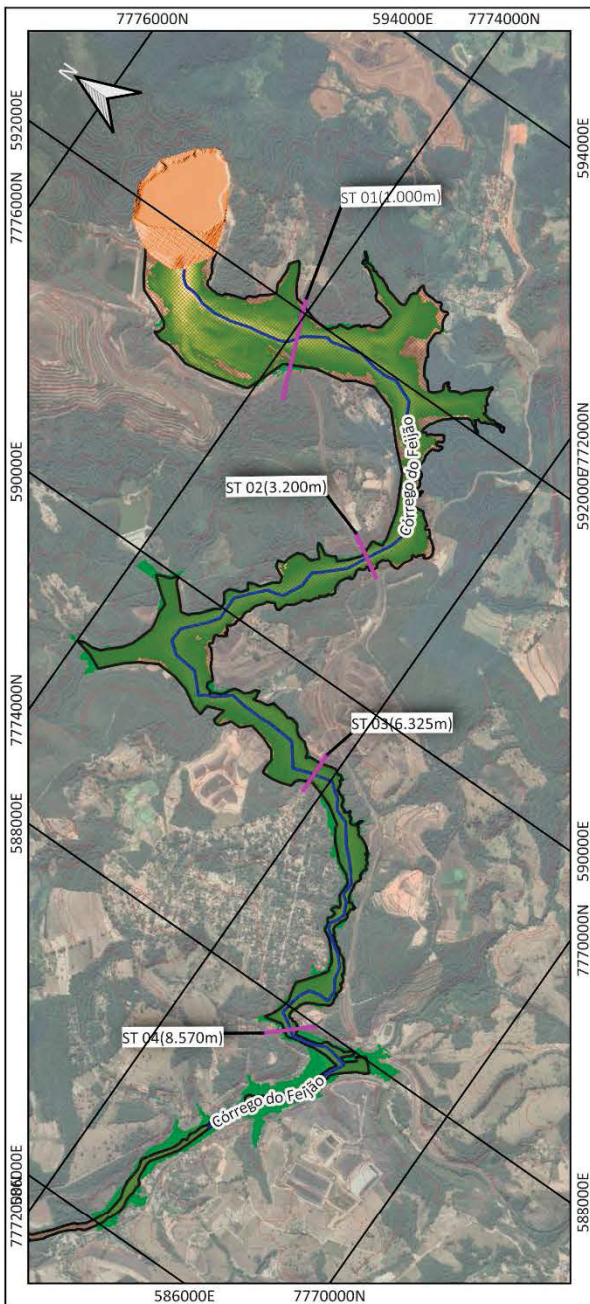
Mancha de Ruptura - HEC-RAS  
Water Surface Elevation  
ESC:1:40.000

Legenda:

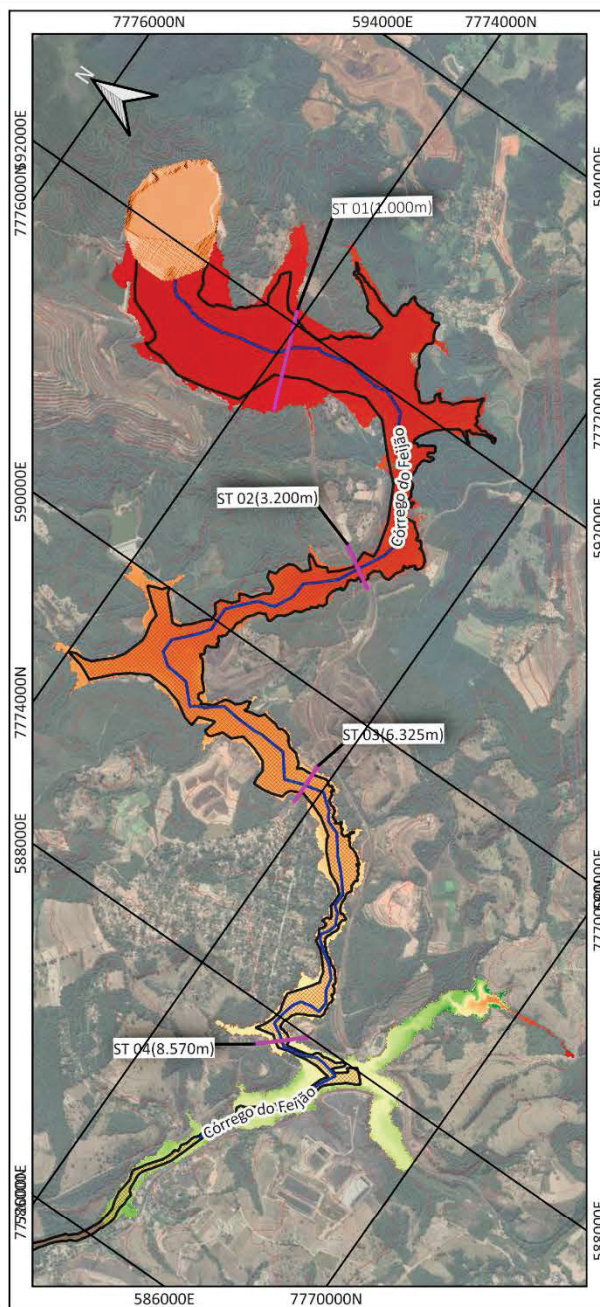
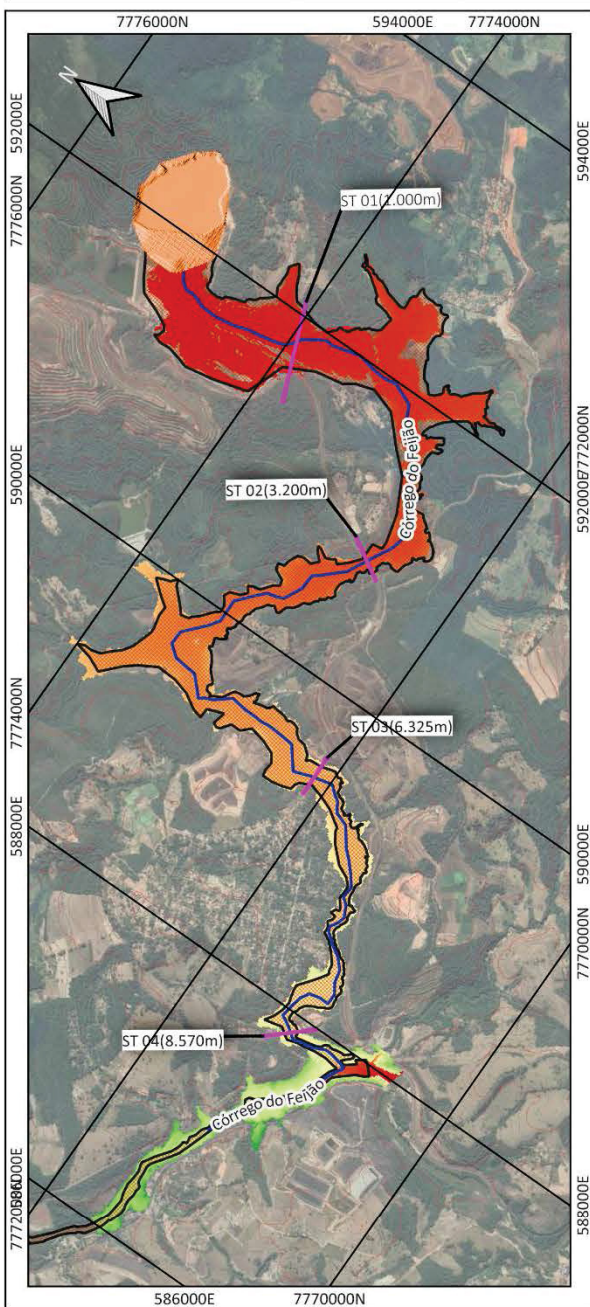


Mancha de Ruptura - RiverFlow2D  
Water Surface Elevation  
ESC:1:40.000

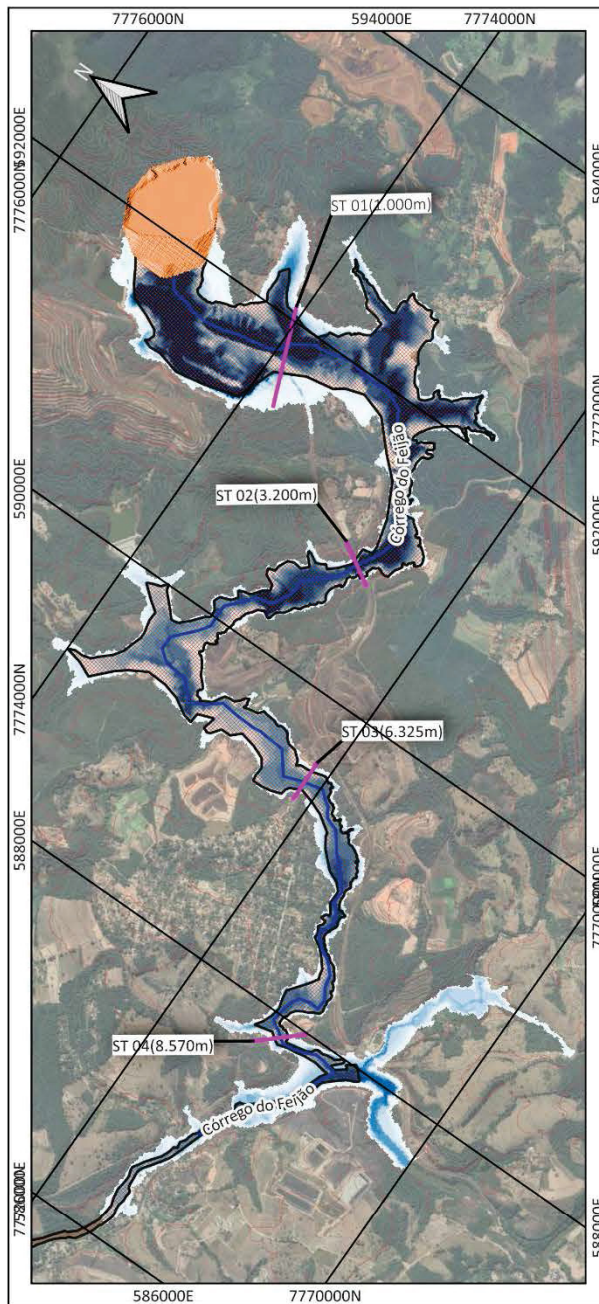
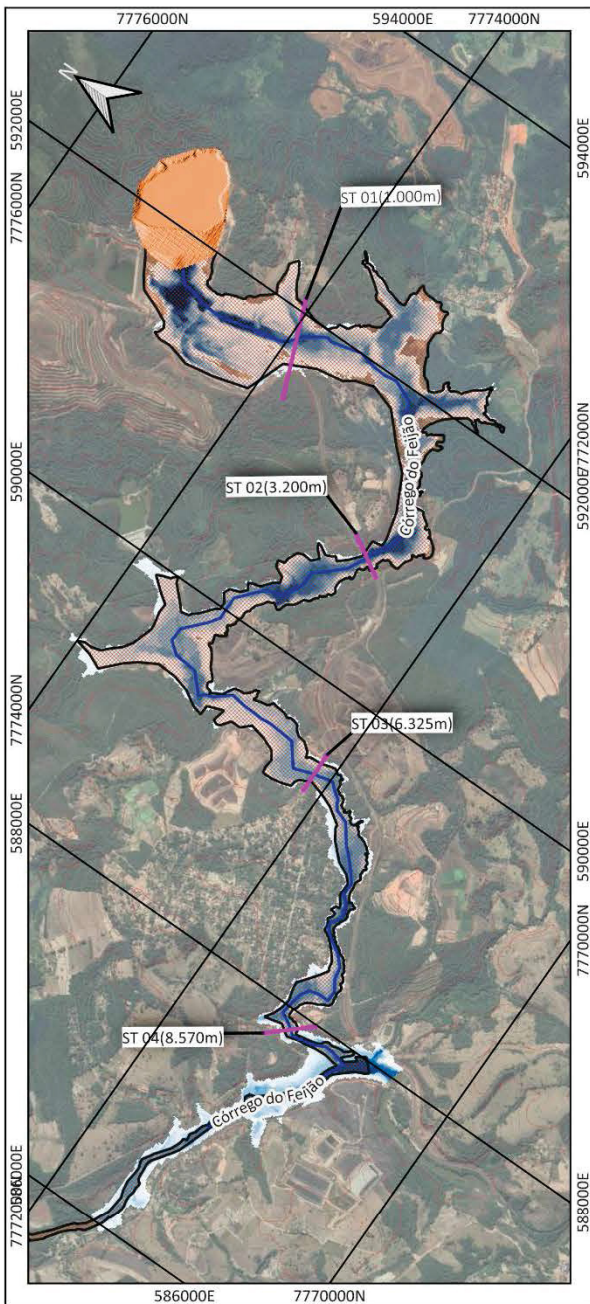
## Risco hidrodinâmico - Parâmetros Ribeiro (2015)



### Tempo de Chegada - Parâmetros Ribeiro (2015)



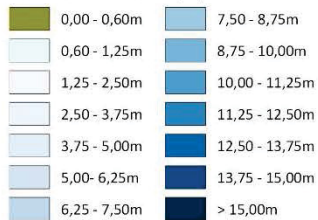
### Profundidade máxima - Parâmetros Ribeiro (2015)



Legenda:

Mancha observada

Profundidade Máxima (m):



Mancha de Ruptura - HEC-RAS

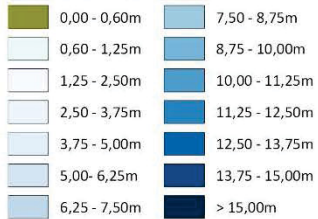
Depth

ESC:1:40.000

Legenda:

Mancha observada

Profundidade Máxima (m):

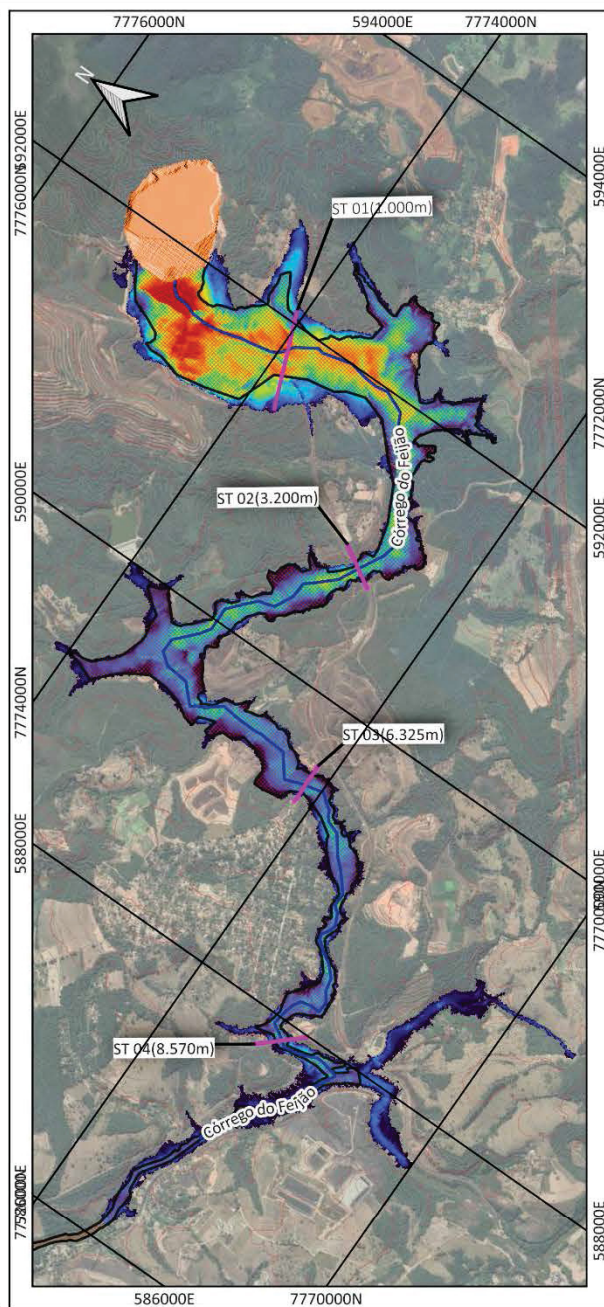
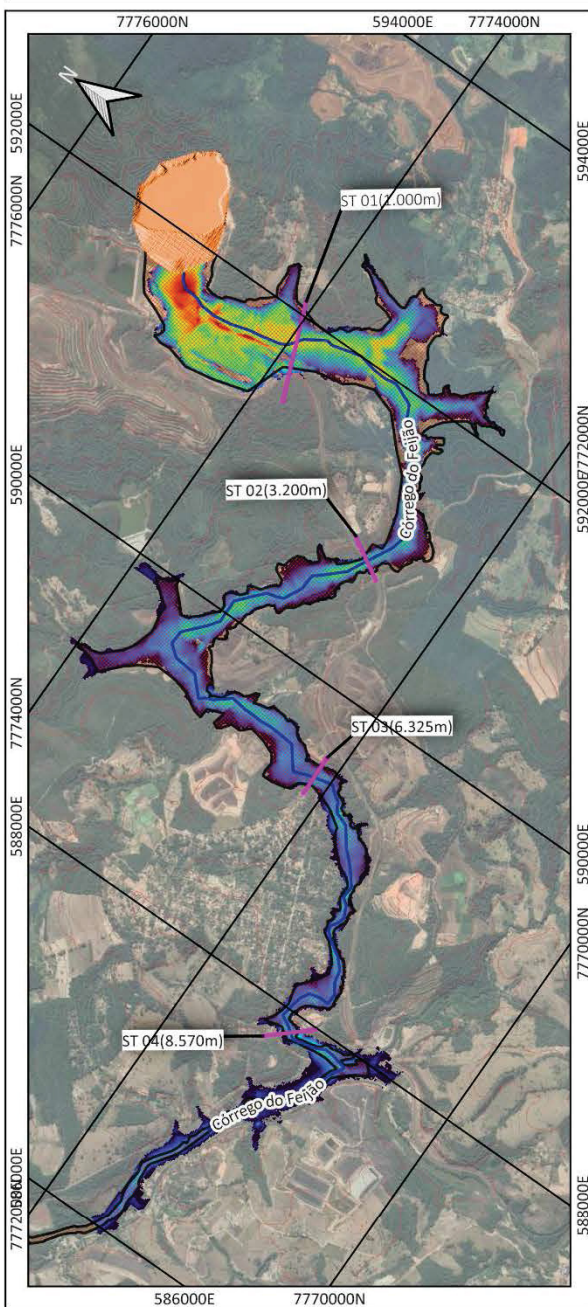


Mancha de Ruptura - RiverFlow2D

Depth

ESC:1:40.000

## Velocidade máxima - Parâmetros Ribeiro (2015)



Legenda:

Mancha observada

Velocidade de propagação (m/s):



Mancha de Ruptura - HEC-RAS  
Velocity  
ESC:1:40.000

Legenda:

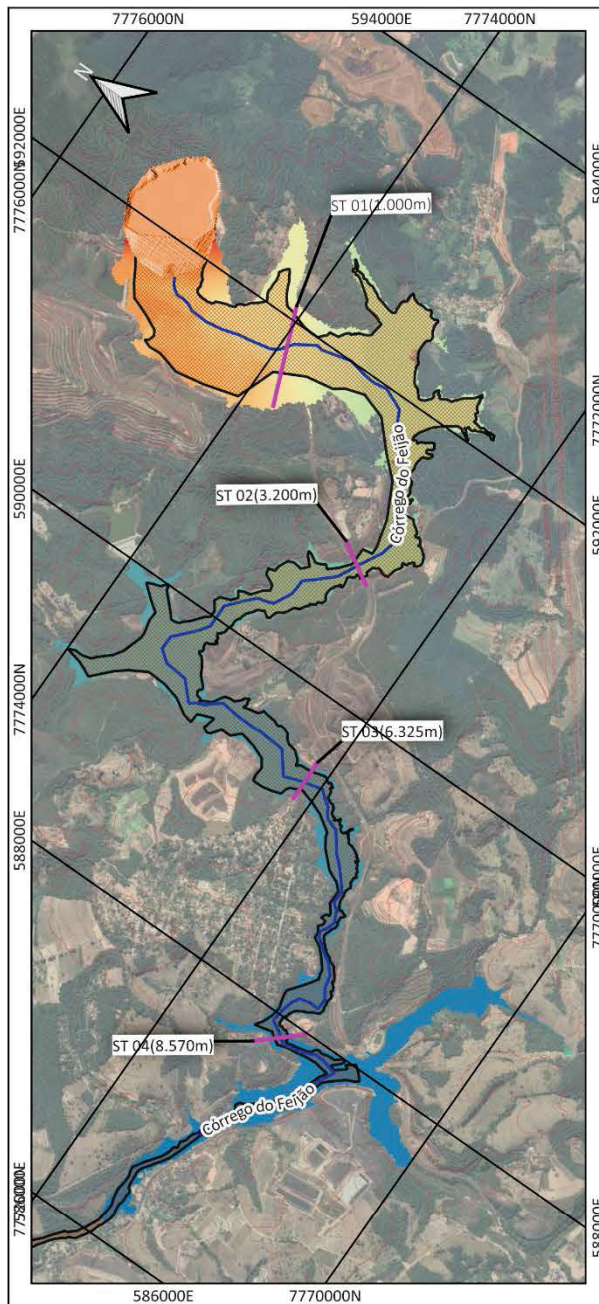
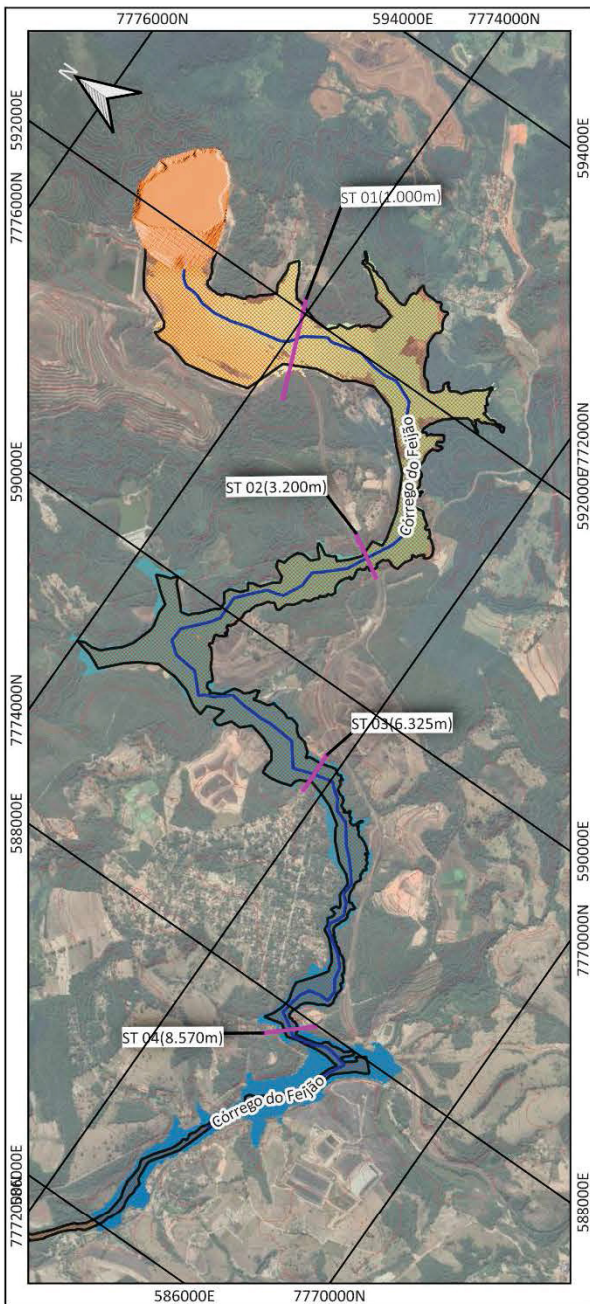
Mancha observada

Velocidade de propagação (m/s):



Mancha de Ruptura - RiverFlow2D  
Velocity  
ESC:1:40.000

## Máxima Inundação - Parâmetros Ribeiro (2015)



Legenda:



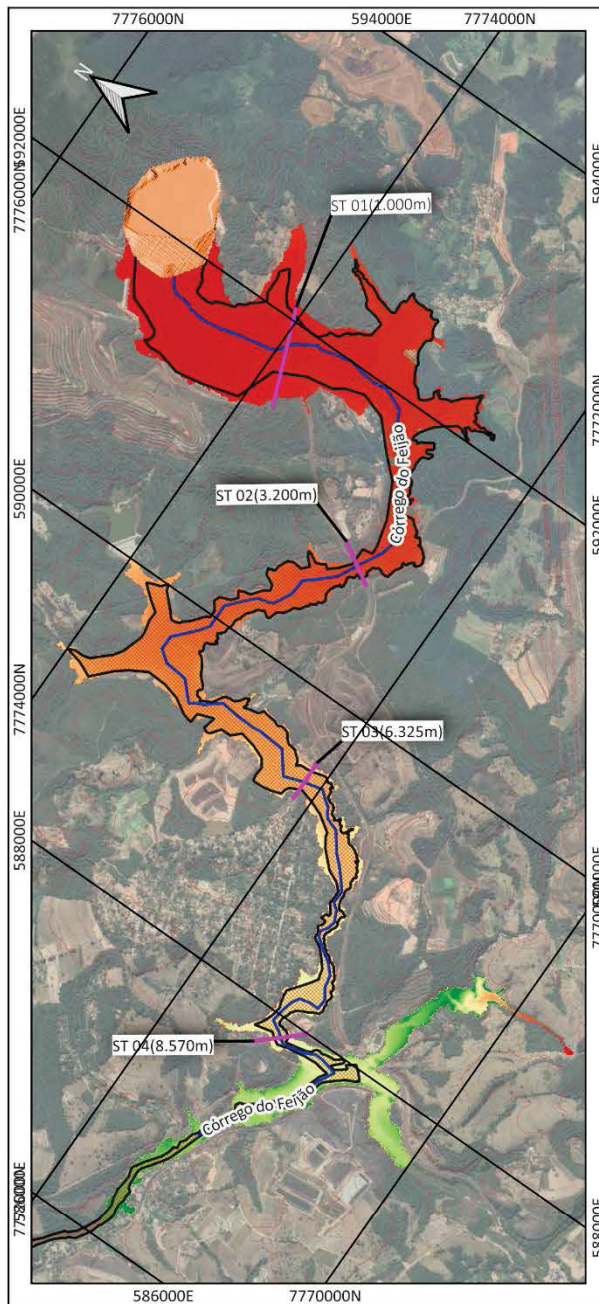
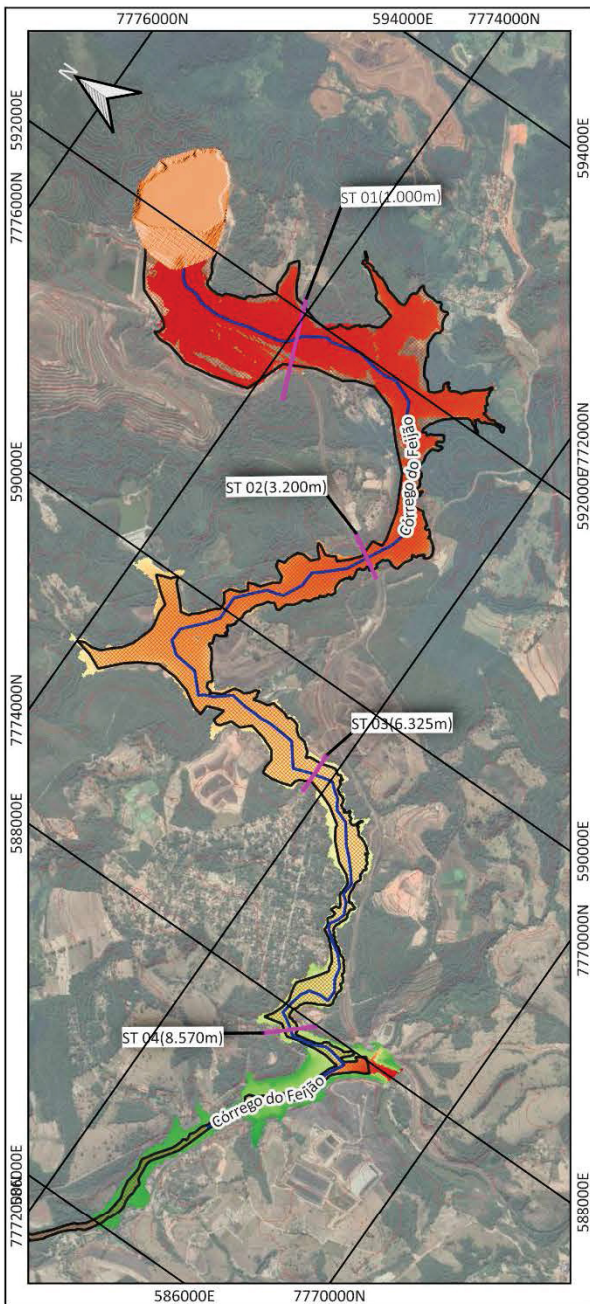
Mancha de Ruptura - HEC-RAS  
Water Surface Elevation  
ESC:1:40.000

Legenda:

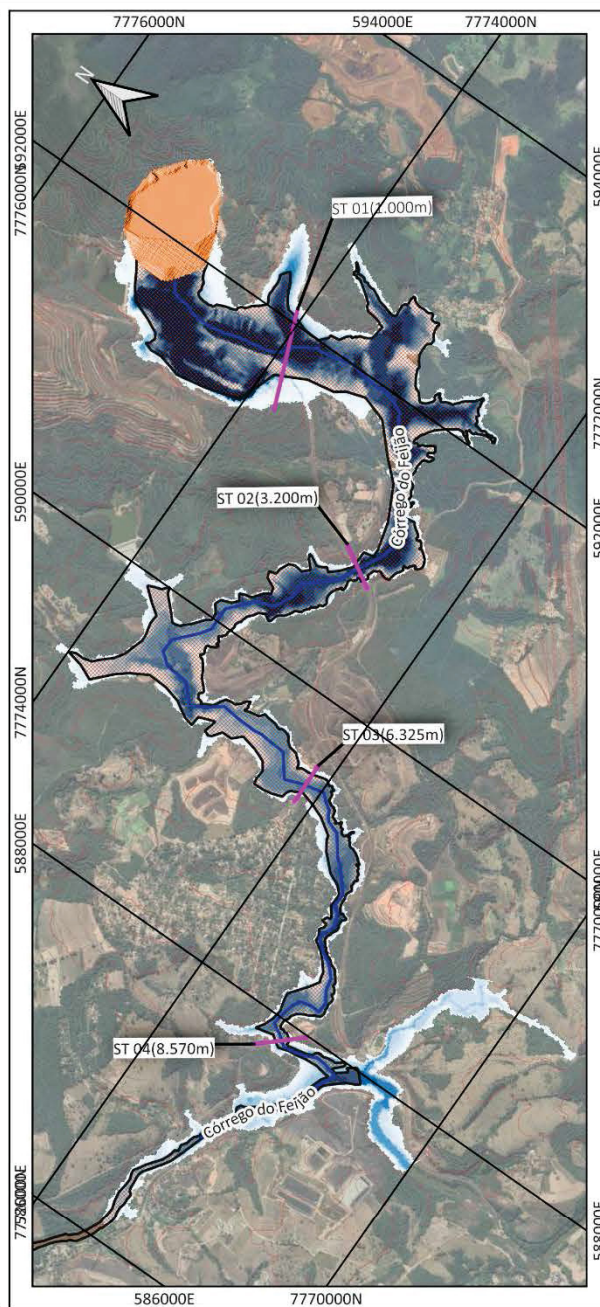
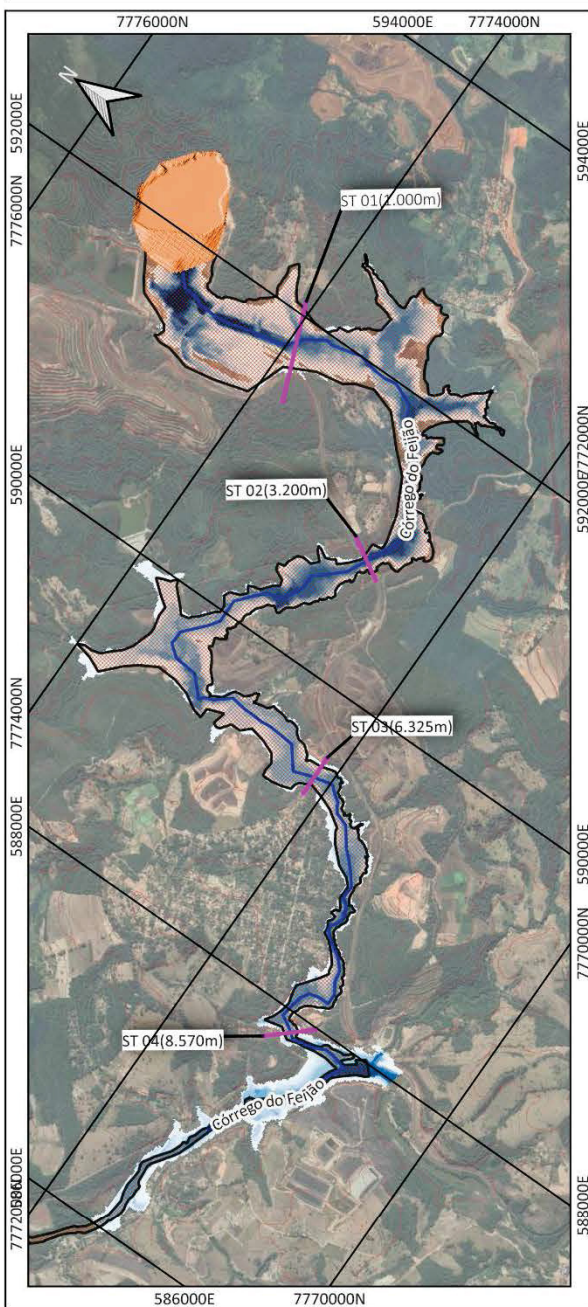


Mancha de Ruptura - RiverFlow2D  
Water Surface Elevation  
ESC:1:40.000

## Tempo de Chegada - Parâmetros Silva (2020)



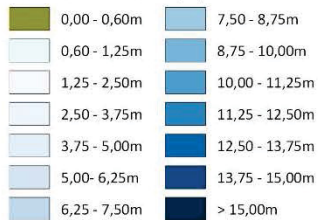
## Profundidade máxima - Parâmetros Silva (2020)



Legenda:

Mancha observada

Profundidade Máxima (m):

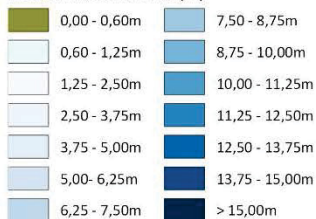


Mancha de Ruptura - HEC-RAS  
Depth  
ESC:1:40.000

Legenda:

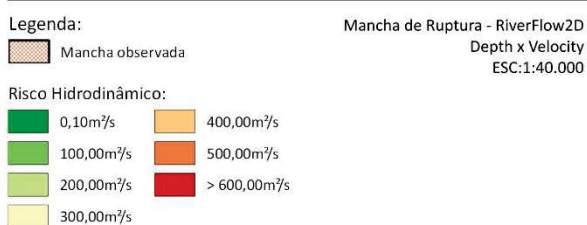
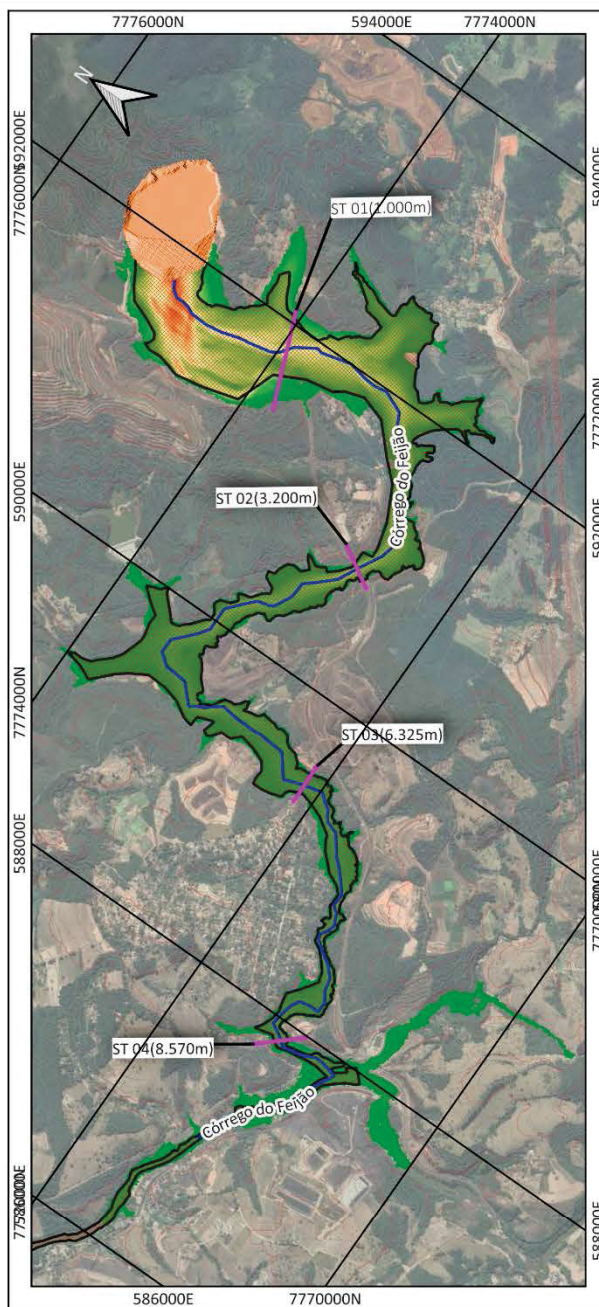
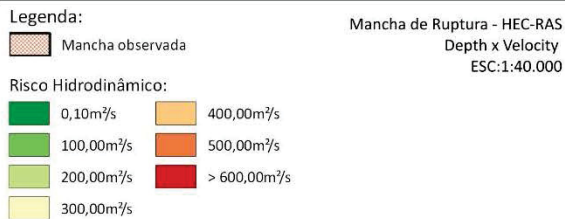
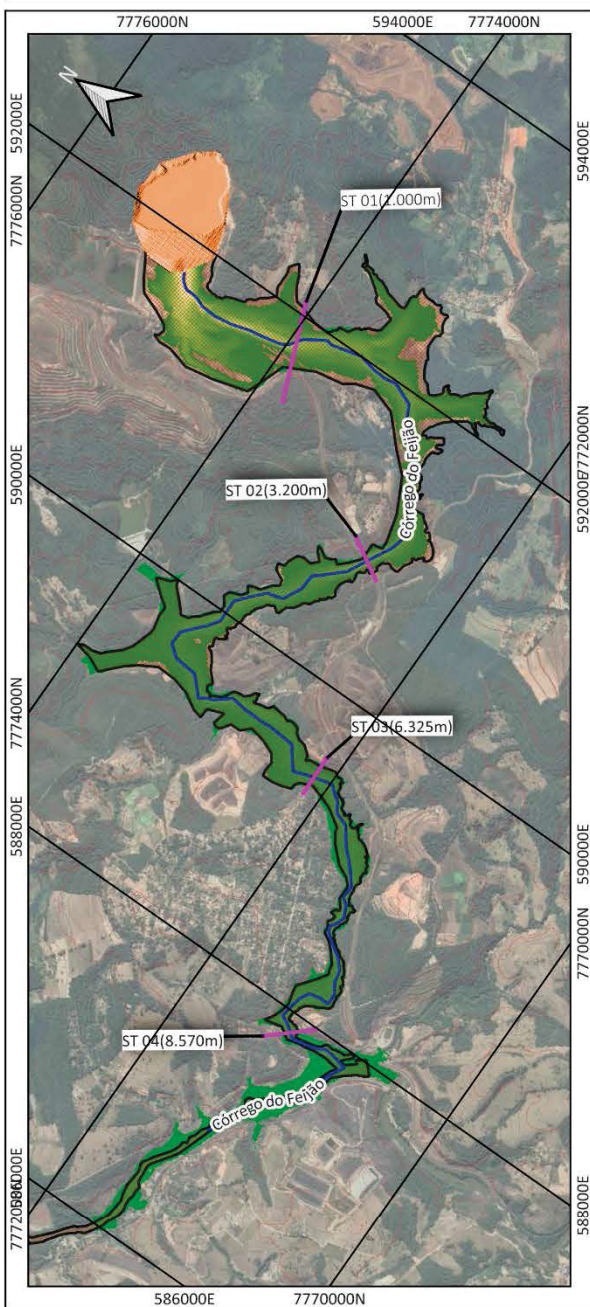
Mancha observada

Profundidade Máxima (m):

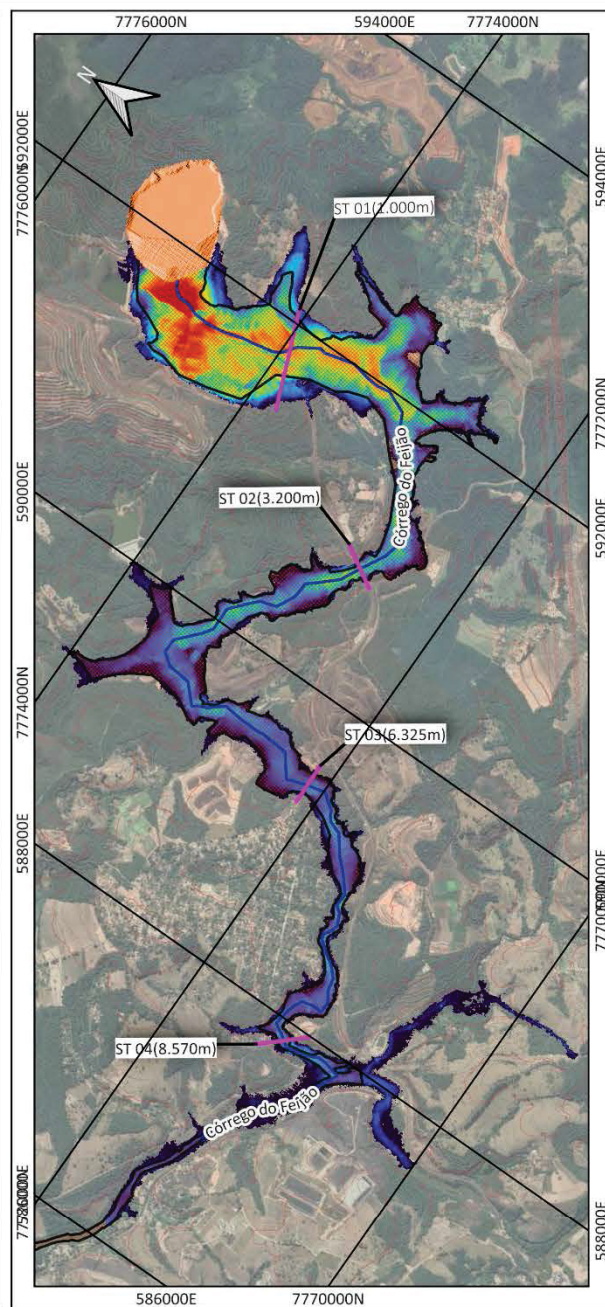
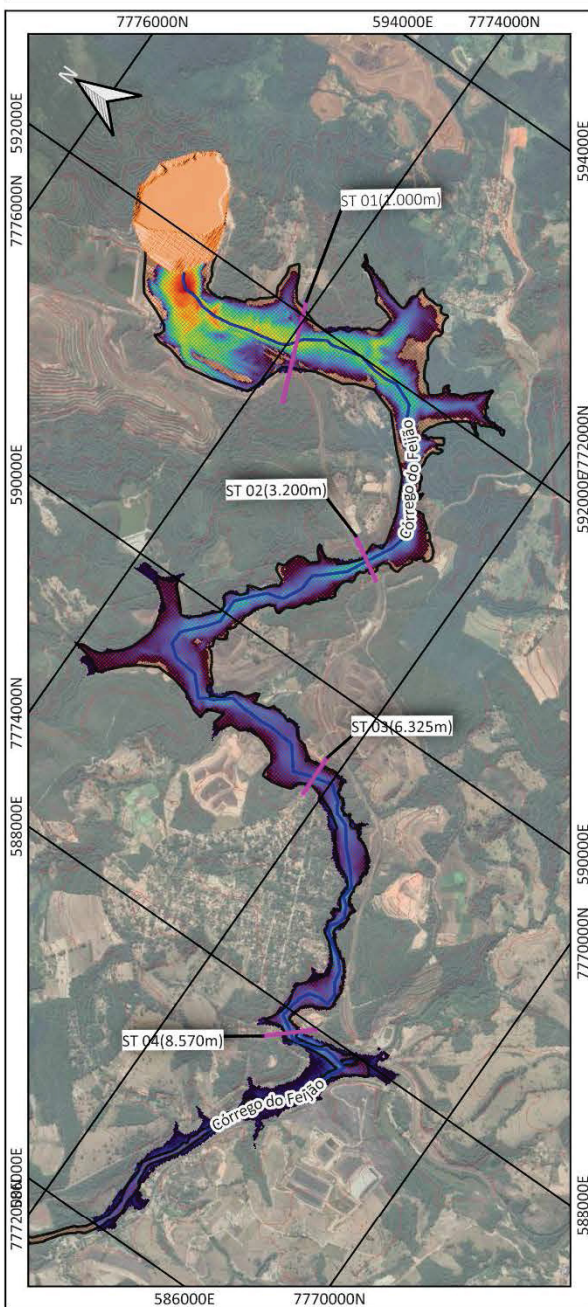


Mancha de Ruptura - RiverFlow2D  
Depth  
ESC:1:40.000

### Risco hidrodinâmico - Parâmetros Silva (2020)



## Velocidade máxima - Parâmetros Silva (2020)

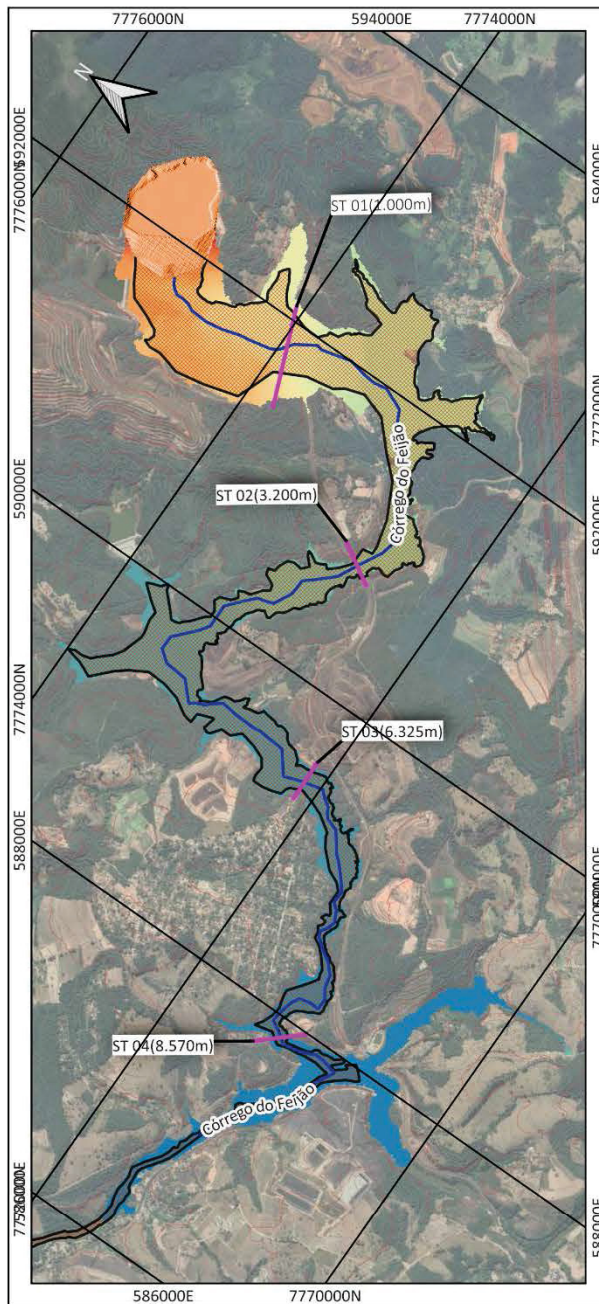
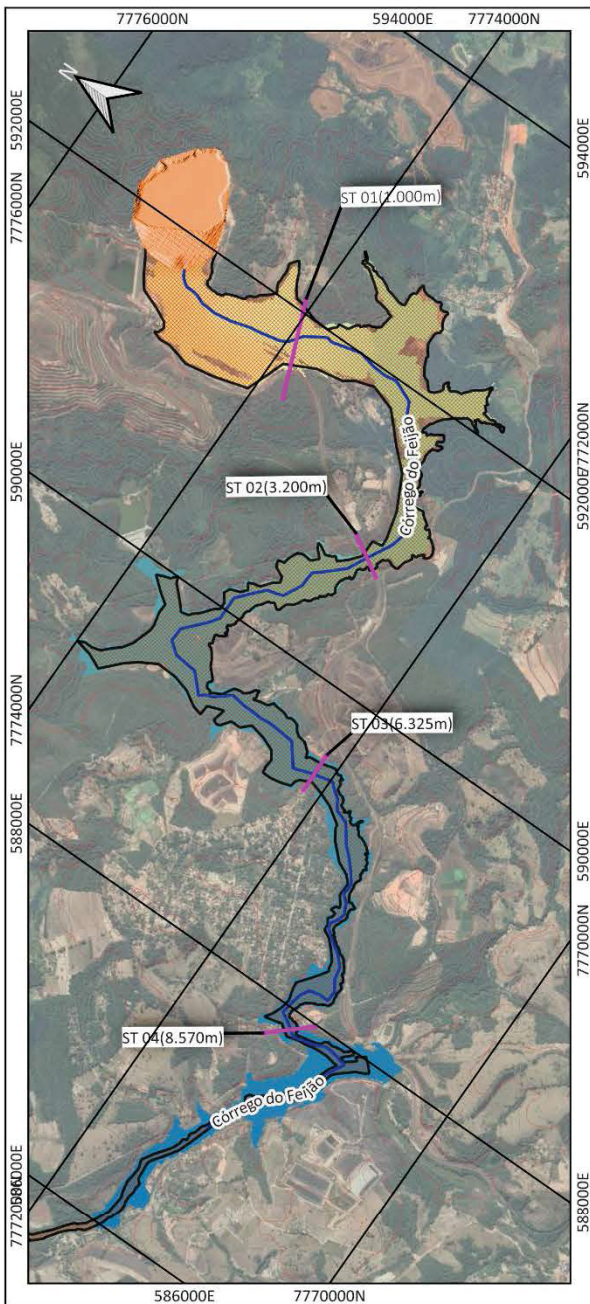


Mancha de Ruptura - HEC-RAS  
Velocity  
ESC:1:40.000



Mancha de Ruptura - RiverFlow2D  
Velocity  
ESC:1:40.000

## Máxima Inundação - Parâmetros Silva (2020)



Legenda:

Mancha observada

Elevação Máxima da Água (m):

735,00m	855,00m
755,00m	875,00m
775,00m	895,00m
795,00m	915,00m
815,00m	> 936,00m
835,00m	

Mancha de Ruptura - HEC-RAS  
Water Surface Elevation  
ESC:1:40.000

Legenda:

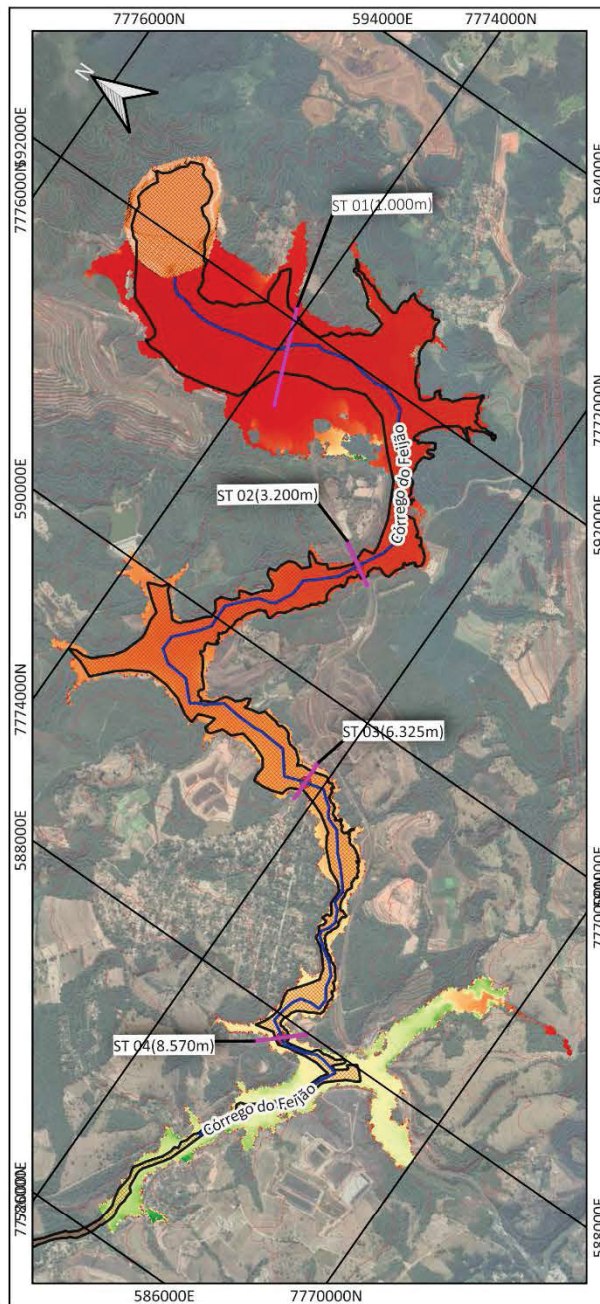
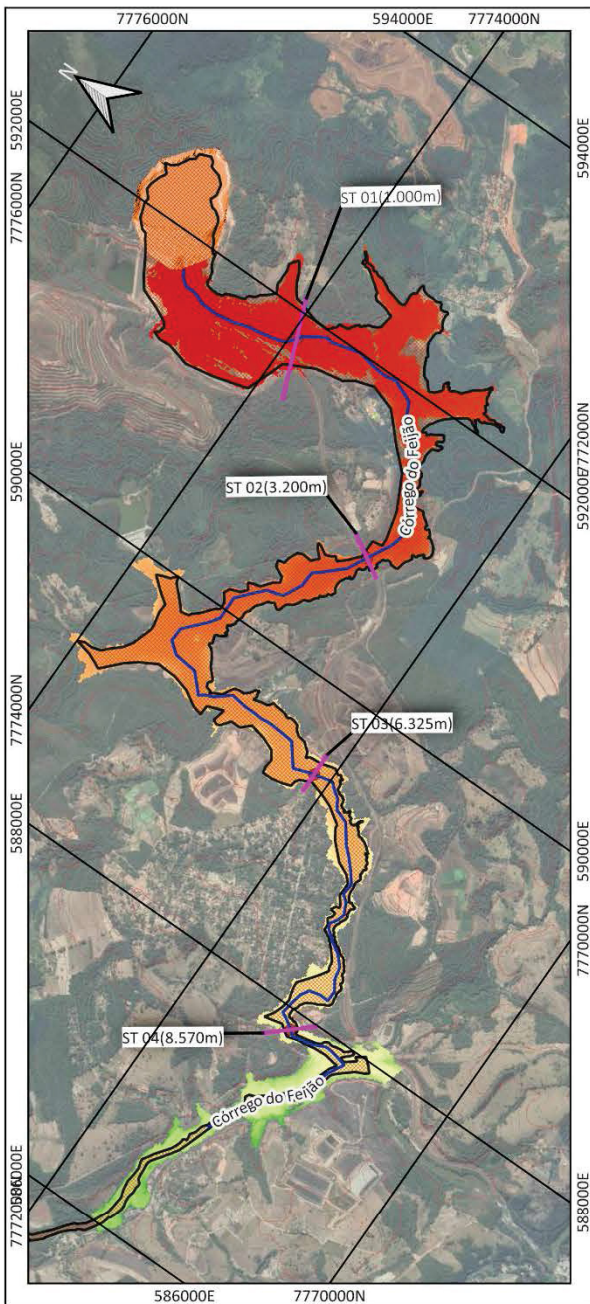
Mancha observada

Elevação Máxima da Água (m):

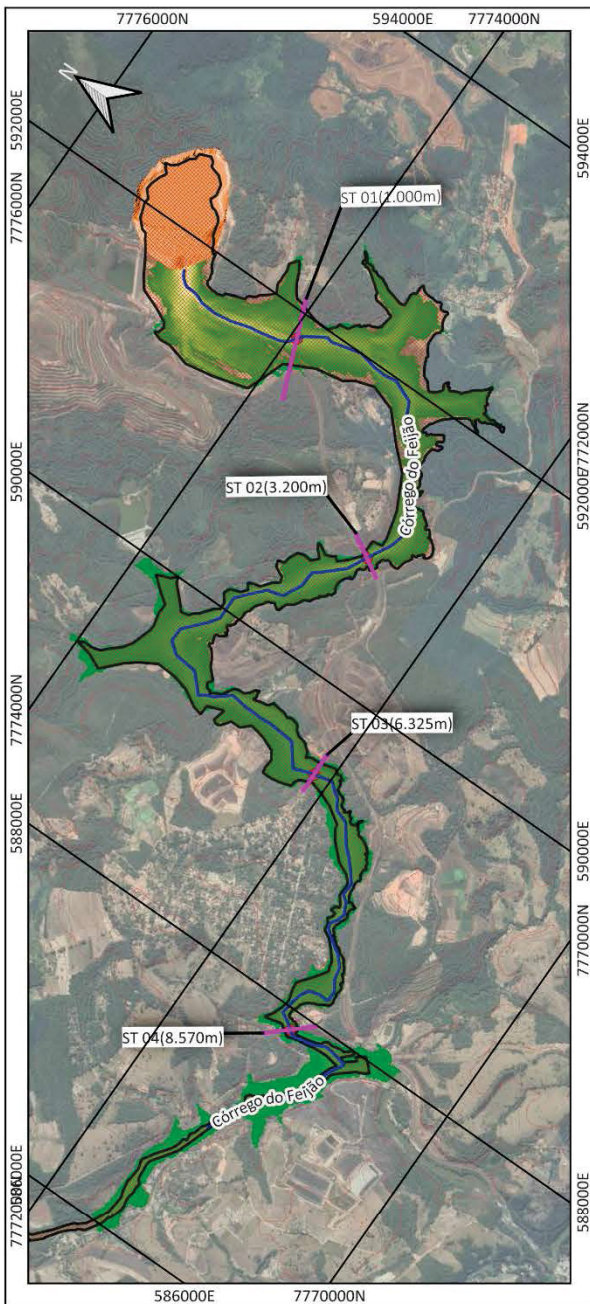
735,00m	855,00m
755,00m	875,00m
775,00m	895,00m
795,00m	915,00m
815,00m	> 936,00m
835,00m	

Mancha de Ruptura - RiverFlow2D  
Water Surface Elevation  
ESC:1:40.000

## Tempo de chegada - Água



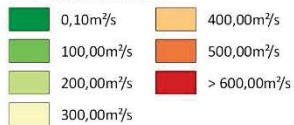
## Risco hidrodinâmico - Água



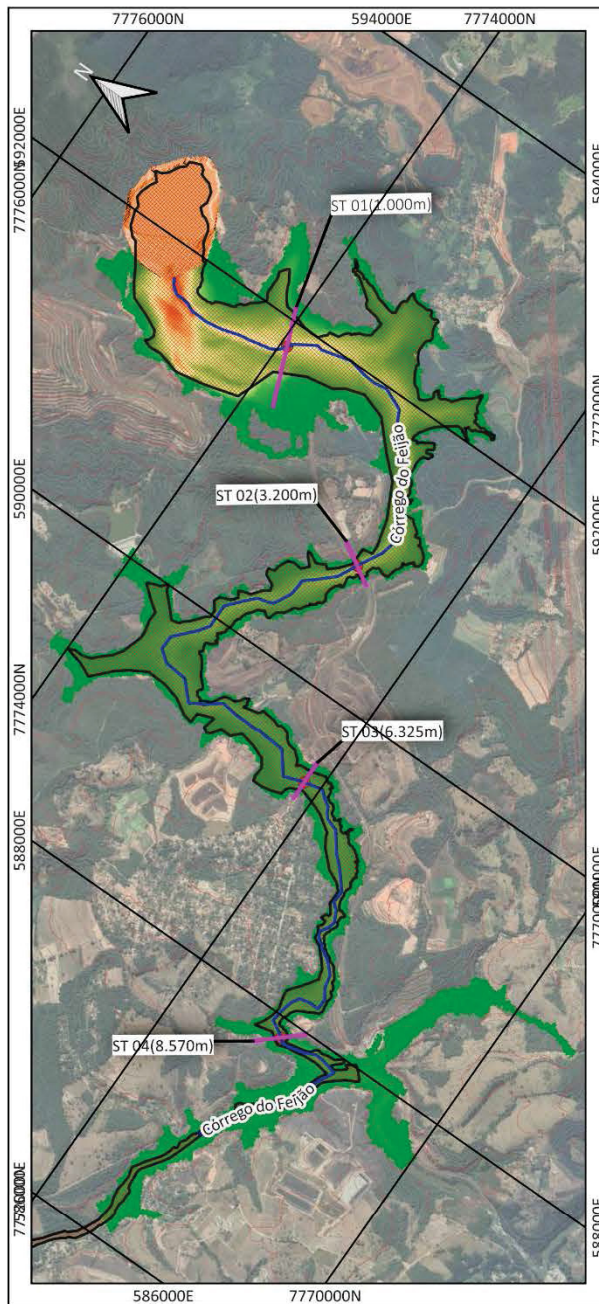
Legenda:

Mancha observada

Risco Hidrodinâmico:



Mancha de Ruptura - HEC-RAS  
Depth\_Velocity  
ESC:1:40.000



Legenda:

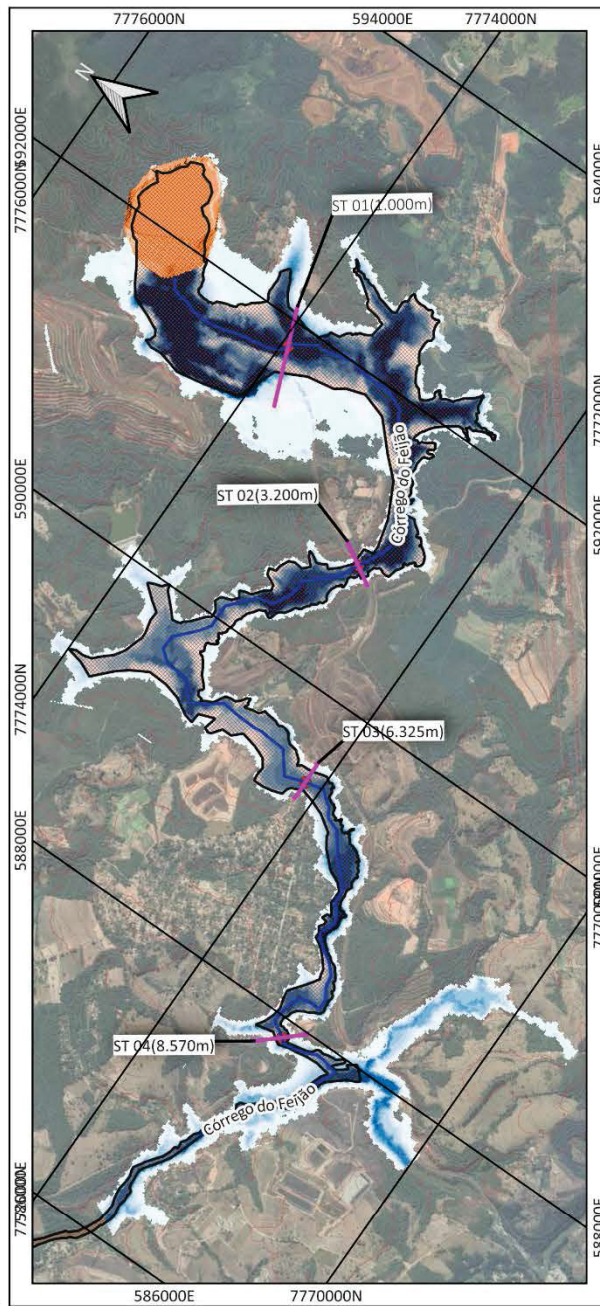
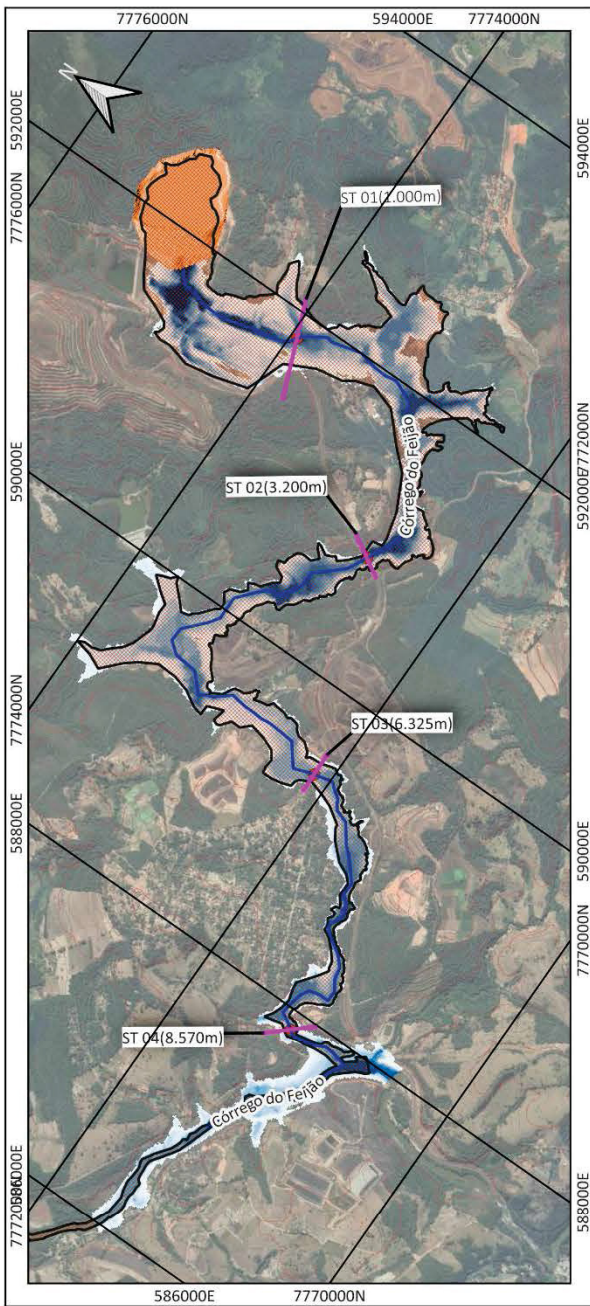
Mancha observada

Risco Hidrodinâmico:



Mancha de Ruptura - RiverFlow2D  
Depth\_Velocity  
ESC:1:40.000

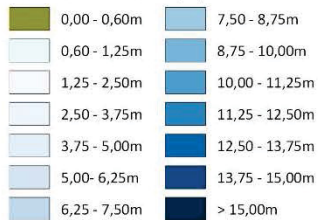
## Profundidade máxima - Água



Legenda:

Mancha observada

Profundidade Máxima (m):

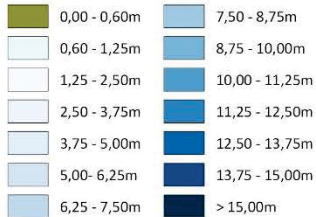


Mancha de Ruptura - HEC-RAS  
Depth  
ESC:1:40.000

Legenda:

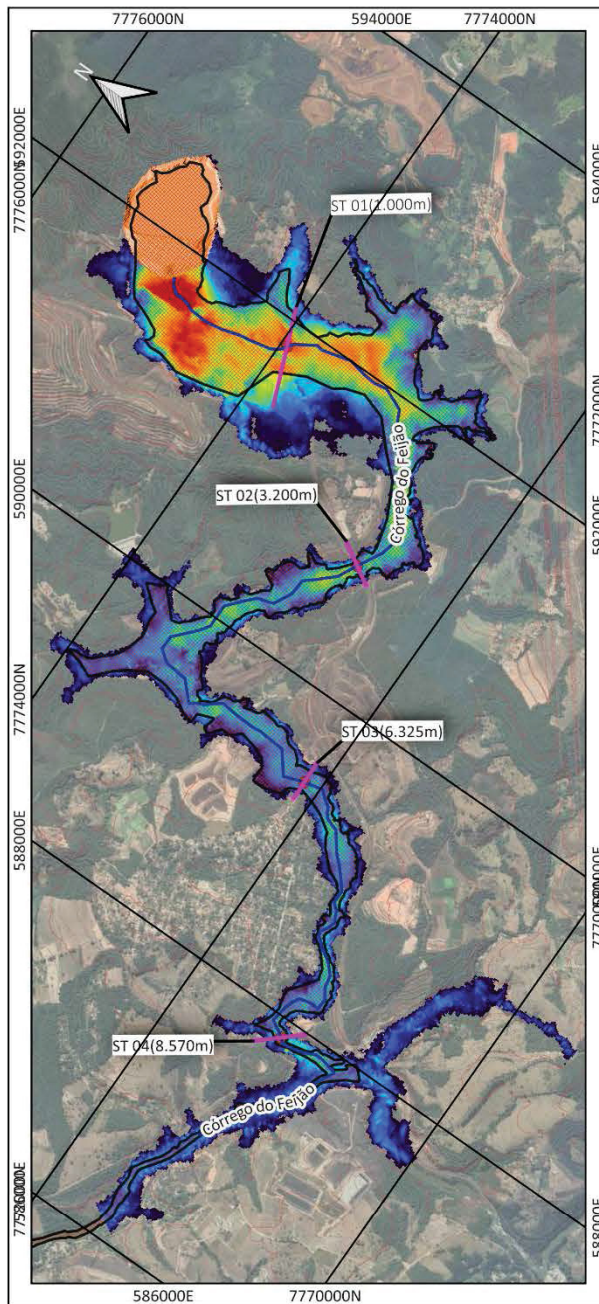
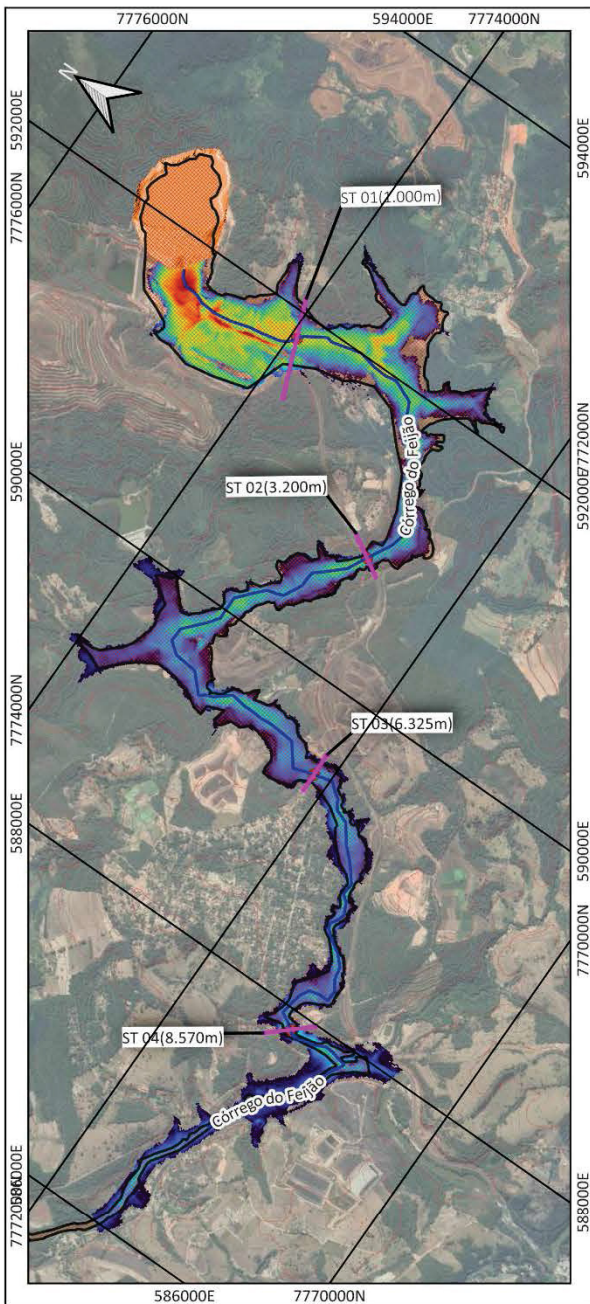
Mancha observada

Profundidade Máxima (m):



Mancha de Ruptura - RiverFlow2D  
Depth  
ESC:1:40.000

## Velocidade máxima - Água



Legenda:

Mancha observada

Velocidade de propagação (m/s):



Mancha de Ruptura - HEC-RAS  
Velocity  
ESC:1:40.000

Legenda:

Mancha observada

Velocidade de propagação (m/s):



Mancha de Ruptura - RiverFlow2D  
Velocity  
ESC:1:40.000

## Máxima Inundação - Água

