

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Malena Lúcia Sousa Freire de Melo

**SENSIBILIDADE A PARÂMETROS REOLÓGICOS NA MODELAGEM DE FLUXO
HIPERCONCENTRADO PROVENIENTE DE RUPTURAS DE BARRAGENS DE
REJEITOS DE MINERAÇÃO**

Belo Horizonte
2022

Malena Lúcia Sousa Freire de Melo

**SENSIBILIDADE A PARÂMETROS REOLÓGICOS NA MODELAGEM DE FLUXO
HIPERCONCENTRADO PROVENIENTE DE RUPTURAS DE BARRAGENS DE
REJEITOS DE MINERAÇÃO**

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

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem Física e Matemática em Hidráulica

Orientador: Julian Cardoso Eleutério

Belo Horizonte
2022

M528s

Melo, Malena Lúcia Sousa Freire de.

Sensibilidade a parâmetros reológicos na modelagem de fluxo hiperconcentrado proveniente de rupturas de barragens de rejeitos de mineração [recurso eletrônico] / Malena Lúcia Sousa Freire de Melo. – 2022.

1 recurso online (132 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Julian Cardoso Eleutério.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 121-132.

Bibliografia: f. 112-120.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Reologia - Teses. 4. Análise de sensibilidade - Teses. 5. Fluídos não-newtonianos - Teses. 6. Modelagem de dados - Teses. 7. Avaliação de riscos - Teses. 8. Barragens de rejeitos - Brumadinho (MG) - Teses. I. Eleutério, Julian Cardoso. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
[ESCOLA DE ENGENHARIA]
COLEGIADO DO CURSO DE GRADUAÇÃO / PÓS-GRADUAÇÃO EM [SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS
HÍDRICOS]

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Sensibilidade A Parâmetros Reológicos Na Modelagem de Fluxo Hiperconcentrado Proveniente de Rupturas de Barragens de Rejeitos de Mineração"

MALENA LÚCIA SOUSA FREIRE DE MELO

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. Julian Cardoso Eleutério

Prof. Luiz Rafael Palmier

Prof. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Profa. Priscilla Macedo Moura

Prof. Julian Cardoso Eleutério

Coordenadora

Orientador

Belo Horizonte, 05 de setembro de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Cauduro Dias de Paiva, Usuário Externo**, em 05/09/2022, às 17:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Julian Cardoso Eleuterio, Servidor(a)**, em 08/09/2022, às 10:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Rafael Palmier, Membro**, em 08/05/2023, às 12:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Priscilla Macedo Moura, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 17/05/2023, às 07:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1731766** e o código CRC **DAB954A2**.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me trazer até aqui e estar sempre ao meu lado.

Aos meus pais, Ana Lúcia e Misac Júnior, por todo amor e apoio. Aos meus irmãos, pela compreensão e preocupação, Marina Lúcia, Mariana Lúcia, e em especial, Gabriel, que me emprestou seu computador para as simulações. À minha afilhada, Melissa, pela paciência diante das minhas ausências. À Klenise de Paula, que me incentivou e me deu muita força nos últimos anos, sempre acreditando em mim.

Agradeço ao meu orientador, professor Julian Eleutério, pela sugestão do tema desta dissertação e por sua avaliação detalhada, que contribuiu grandemente nos aspectos científicos e técnicos deste trabalho. Agradeço ainda por sua compreensão e incentivo nos momentos de dificuldade.

Agradeço especialmente a Rodrigo Perdigão, Vitória Costa, Bruna Melo e Alan Barbosa, meus companheiros de caminhada na UFMG, por todo apoio, parceria e disponibilidade. Ao grupo de pesquisa de inundações, principalmente, Alexandre Silva, por disponibilizar o modelo do estudo de caso do seu trabalho, e André Rocha, por me ensinar a base da modelagem no HEC-RAS. Agradeço à Thamires Bittencourt, pelas conversas sobre a modelagem não-newtoniana no HEC-RAS.

Agradeço ao time HIDROBR, por todo conhecimento técnico compartilhado sobre estudo de inundações, em especial, Sofia Corradi, Mariana Henriques, Guilherme Almeida e Clara Demattos. Agradeço também à Stella Braga, pelos ensinamentos valiosos e pela compreensão nos momentos complicados.

A todos os professores do programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SMARH/UFMG), pelo conhecimento científico ofertado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho e de artigos científicos correlatos ao tema.

RESUMO

O risco de rupturas de barragens de rejeito é relativamente pequeno, mas historicamente tem se mostrado consideravelmente maior que o risco de ruptura de barragens de armazenamento de água. A modelagem de inundações permite o mapeamento dos locais e populações mais vulneráveis para orientar o alerta e evacuação de comunidades potencialmente afetadas. A avaliação da sensibilidade de modelos hidrodinâmicos a parâmetros reológicos visa identificar incertezas nos resultados simulados causadas pela alta variabilidade desses parâmetros, com o propósito de obter mapeamentos mais confiáveis. O novo módulo não-newtoniano do HEC-RAS permite a simulação de escoamento hiperconcentrado e dispõe de quatro modelos reológicos: Bingham, Herschel-Bulkley, Quadratic e Clastic-Grain Flow. Neste estudo busca-se avaliar a influência de parâmetros de reologia de fluidos hiperconcentrados nos resultados da modelagem de inundações decorrentes de rupturas de barragens de rejeitos com o HEC-RAS. Foi utilizada uma abordagem probabilística e desenvolveu-se a automatização das simulações no HEC-RAS por meio de programas em linguagem Python. Os parâmetros reológicos dos modelos de Bingham e Herschel-Bulkley foram definidos como parâmetros de testes e as faixas de valores desses parâmetros foram obtidas com base em revisão de literatura. A amostragem dos parâmetros se deu pelo método Latin Hypercube Sampling (LHS). Foram desenvolvidos dois estudos de caso, sendo o primeiro da barragem fictícia proposta por Zenz e Goldgruber (2013) em estudo promovido pelo ICOLD, onde foi analisado o impacto causado nos resultados. E no segundo, buscou-se a calibração de parâmetros reológicos da modelagem hidrodinâmica a partir de dados de ruptura real. Para tal, foi realizada a modelagem da ruptura da antiga Barragem B1 da Mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho-MG, que rompeu em 2019. Os resultados mostraram que no cenário do modelo de Bingham do estudo de caso do ICOLD, o aumento dos valores de concentração volumétrica de sólidos (C_v) e do parâmetro b da curva de tensão de escoamento causou a redução da área inundada e aumento das profundidades máximas. Já no cenário de Herschel-Bulkley, valores maiores de tensão de escoamento também causaram a redução da área e aumento das profundidades. No que tange os resultados de tempo de chegada para profundidade de 0,3 m e 0,61 m, os valores variaram de forma mais significativa na seção de análise mais a jusante (15 km) da barragem. A variação da área inundada nos cenários do ICOLD se deu no alcance da onda de inundação, apresentando pouca variação na largura da mancha. No cenário do estudo de caso de Brumadinho, a calibração da mancha de inundação simulada a partir da mancha observada na ruptura real foi igual a 85,4% segundo *Fit metric F*. Os tempos de chegada simulados divergiram entre 1 e 3 minutos dos tempos observados nos pontos de interesse. A partir das análises realizadas, infere-se que ainda que outros aspectos da modelagem possam causar influências mais significativas na modelagem, a sensibilidade da modelagem hidrodinâmica aos parâmetros reológicos não pode ser desprezada, uma vez que foram observadas variações significativas em alguns resultados.

Palavras-chave: Fluido não-newtoniano. Barragem de rejeito. Propriedades reológicas. HEC-RAS. Análise de sensibilidade.

ABSTRACT

The risk of failure of tailings dams is relatively small, but historically it has been shown to be considerably higher than the risk of failure of water storage dams. Flood modeling allows the mapping of the most vulnerable locations and populations to guide the alert and evacuation of potentially affected communities. The evaluation of the sensitivity of hydrodynamic models to rheological parameters aims to identify uncertainties in the simulated results caused by the high variability of these parameters, with the purpose of obtaining more reliable mappings. The new non-Newtonian module of HEC RAS allows the simulation of hyperconcentrated flow and has four rheological models: Bingham, Herschel-Bulkley, Quadratic and Clastic-Grain Flow. In this study, we seek to evaluate the influence of hyperconcentrated fluid rheology parameters on the results of modeling floods resulting from tailings dam failures with the HEC-RAS. A probabilistic approach was used and the automation of simulations in HEC-RAS was developed through programs in Python language. The rheological parameters of the Bingham and Herschel-Bulkley models were defined as test parameters and the ranges of values for these parameters were obtained based on a literature review. The parameters were sampled using the Latin Hypercube Sampling (LHS) method. Two case studies were developed, the first of the fictitious dam proposed by Zenz and Goldgruber (2013) in a study promoted by ICOLD, where the impact on the results was analyzed. And in the second, the calibration of rheological parameters of hydrodynamic modeling was sought from real failure data. To this end, a modeling of the rupture of the old B1 dam of Mina do Córrego do Feijão, in Brumadinho-MG, which ruptured in 2019 was carried out. The results showed that in the scenario of the Bingham model of the ICOLD case study, the increase in values of volumetric concentration of solids (C_v) and the b parameter of the yield stress curve caused a reduction in the flooded area and an increase in the maximum depths. In the Herschel-Bulkley scenario, higher values of yield stress also caused a reduction in area and an increase in depths. Regarding the arrival time results for a depth of 0.3 m and 0.61 m, the values varied more significantly in the analysis section further downstream (15 km) of the dam. The variation of the flooded area in the ICOLD scenarios occurred in the range of the flood wave, with little variation in the width of the flood boundary. In the scenario of the Brumadinho case study, the calibration of the simulated flood area from the area observed in the real rupture was equal to 85.4% according to Fit metric F. The simulated arrival times differed between 1 and 3 minutes from the observed times at points of interest. Based on the analyses, it is inferred that although other aspects of the modeling may cause more significant influences on the modeling, the sensitivity of the hydrodynamic modeling to the rheological parameters cannot be neglected, since significant variations were observed in some results.

Keywords: Non-Newtonian fluid. Tailings dam. Rheological properties. HEC-RAS. Sensitivity analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Esquema de classificação dos fluidos quanto à sua deformação e propriedades	18
Figura 3.2 - Reogramas de fluido newtonianos e não-newtonianos com propriedades independentes do tempo de cisalhamento	20
Figura 3.3 - Geometrias de reômetros rotacionais: a) cilindro concêntrico; b) cone-placa; c) placa-placa.	25
Figura 3.4 - Métodos de alteamentos de barragens de rejeito	26
Figura 3.5 - Tecnologias de desaguamento de rejeitos.....	28
Figura 3.6 - Rupturas de barragens de rejeitos no mundo	29
Figura 3.7 - Parâmetros de brecha.....	32
Figura 3.8 - Etapas realizadas em código Python desenvolvido para automatização do HEC-RAS 1D.....	44
Figura 4.1 - Fluxograma metodológico.....	46
Figura 4.2: Rotina computacional realizada pela ferramenta em Python	53
Figura 4.3 - Vista frontal e posterior, respectivamente, da barragem fictícia	54
Figura 4.4 - Vista da seção transversal da barragem hipotética.....	55
Figura 4.5 - Curva cota-volume do reservatório	56
Figura 4.6 - Modelo bidimensional do estudo de caso do ICOLD utilizado nas simulações com o HEC-RAS.....	56
Figura 4.7 - Hidrograma de ruptura utilizado nas simulações	58
Figura 4.8 - Seções de análise dos resultados dos estudos de caso do ICOLD	59
Figura 4.9 - Áreas discretizadas para avaliação da sensibilidade	60
Figura 4.10 - Região atingida pela ruptura da barragem	64
Figura 4.11- Seção transversal da Barragem B1 indicando suas etapas de construção.....	65
Figura 4.12 - Mancha de inundação observada no dia 29 de janeiro de 2019, do rompimento da Barragem B1 em Brumadinho	65
Figura 4.13 - Localização da bacia do Rio Paraopeba e detalhe do Ribeirão Ferro-Carvão.....	66
Figura 4.14 - Hidrograma de ruptura utilizado na modelagem hidrodinâmica	68
Figura 4.15 - Modelo HEC-RAS utilizado nas simulações da Barragem B1	69
Figura 4.16 - Localização no modelo dos pontos de interesse para análise de resultados.....	70
Figura 5.1 - Amostragem de parâmetros do cenário B-ICOLD.....	74
Figura 5.2 - Amostragem de parâmetros do cenário HB-ICOLD	74
Figura 5.3 - Probabilidade de excedência dos tempos de chegada para profundidade de 0,3 m nas seções de análise – B-ICOLD.....	75
Figura 5.4 - Probabilidade de excedência dos tempos de chegada para profundidade de 0,61 m nas seções de análise – B-ICOLD.....	76
Figura 5.5 - Probabilidade de excedência das profundidades máximas nas seções de análise – B-ICOLD	77
Figura 5.6 - Relação entre área inundada e C_v em 1.000 simulações do cenário B-ICOLD	78
Figura 5.7 - Relação entre área inundada e C_{vmax} em 1.000 simulações do cenário B-ICOLD.....	78
Figura 5.8 - Relação entre área inundada e a em 1.000 simulações do cenário B-ICOLD	78
Figura 5.9 - Relação entre área inundada e b em 1.000 simulações do cenário B-ICOLD	79

Figura 5.10 - Relações entre as profundidades máximas médias (Hmed) por célula e os parâmetros Cv e Cvmax, nas áreas de interesse – B-ICOLD	80
Figura 5.11 - Relações entre as profundidades máximas médias por célula e os parâmetros a e b, nas áreas de interesse – B-ICOLD.....	81
Figura 5.12 - Probabilidade de excedência dos tempos de chegada para profundidade de 0,3 m nas seções de análise – HB-ICOLD	83
Figura 5.13 - Probabilidade de excedência dos tempos de chegada para profundidade de 0,61 m nas seções de análise – HB-ICOLD	84
Figura 5.14 - Probabilidade de excedência das profundidades máximas nas seções – HB-ICOLD	85
Figura 5.15 - Relação entre área inundada e Cv em 1.000 simulações do cenário HB-ICOLD	85
Figura 5.16 - Relação entre área inundada e ty em 1.000 simulações do cenário HB-ICOLD	85
Figura 5.17 - Relação entre área inundada e K em 1.000 simulações do cenário HB-ICOLD	86
Figura 5.18 - Relação entre área inundada e n em 1.000 simulações do cenário HB-ICOLD	86
Figura 5.19 - Relações entre as profundidades máximas médias por célula e os parâmetros Cv e ty, nas áreas de interesse – HB-ICOLD	87
Figura 5.20 - Relações entre as profundidades máximas médias por célula e os parâmetros K e n, nas áreas de interesse – HB-ICOLD.....	88
Figura 5.21 - Mapa probabilístico do cenário B-ICOLD.....	91
Figura 5.22 - Mapa probabilístico do cenário HB-ICOLD	92
Figura 5.23 - Amostragem de parâmetros do cenário B-B1	93
Figura 5.24 - Relação entre Cv, μ e ty e áreas inundadas em 1.000 simulações	95
Figura 5.25 - Relação entre Cv, μ e ty e profundidades máximas em 1.000 simulações - Refeitório – ponto C	96
Figura 5.26 - Relação entre Cv, μ e ty e profundidades máximas em 1.000 simulações – Ponte ferroviária – ponto D.....	97
Figura 5.27 - Relação entre Cv, μ e ty e profundidades máximas em 1.000 simulações – Rio Paraopeba – ponto E	98
Figura 5.28 - Mapa de inundação probabilístico das 1.000 simulações do cenário B-B1.....	100
Figura 5.29 - Conjuntos de parâmetros com melhor ajuste <i>Fit metric F</i> à mancha observada da Barragem B1 em Brumadinho-MG	103
Figura 5.30 - Variação de F e áreas simuladas em torno da área da mancha observada.....	104
Figura 5.31 - Probabilidade excedência dos tempos de chegada nos pontos C e D	105
Figura 5.32 - Probabilidade de excedência dos tempos de chegada no ponto E....	105
Figura 5.33 - Mancha de inundação calibrada a partir da área inundada da ruptura da Barragem B1 em Brumadinho-MG	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Principais falhas de barragens de rejeitos no Brasil.....	30
Tabela 4.1 - Intervalos de parâmetros reológicos levantados na literatura (<i>Continua</i>)	49
Tabela 4.2 – Parâmetros de brecha calculados com Froehlich (2016)	57
Tabela 4.3 – Cenários de avaliação da sensibilidade do HEC-RAS a parâmetros de reologia do estudo de caso Zenz e Goldgruber (2013) do ICOLD	61
Tabela 4.4 – Especificações dos modelos e das máquinas usadas nas simulações probabilísticas - ICOLD	63
Tabela 4.5 - Usos do solo e valores de coeficiente de Manning usados no cenário B-B1	68
Tabela 4.6 – Limites de referência para definição de parâmetros reológicos a partir de calibração de mancha de inundação com base em ruptura real	71
Tabela 4.7 - Especificação do modelo e da máquina usada nas simulações probabilísticas – Barragem B1	72
Tabela 5.1 – Melhores ajustes segundo <i>Fit metric F</i> e conjuntos de parâmetros associados	102
Tabela 5.2 – Comparação entre os tempos de chegada observados, de estudos anteriores e da mancha simulada	106

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo Geral	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1	Reologia de fluidos não-newtonianos e rejeitos de mineração	17
3.1.1	Modelos reológicos matemáticos.....	18
3.1.2	Reologia de rejeitos de mineração.....	22
3.1.3	Disposição de rejeitos em barragens.....	25
3.2	Ruptura de barragens de rejeitos	28
3.2.1	Aspectos conceituais	31
3.2.2	Modelagem de escoamento de fluidos não-newtonianos com o HEC-RAS	34
3.3	Sensibilidade da modelagem hidrodinâmica de fluxo hiperconcentrado	38
3.3.1	Abordagens probabilísticas.....	41
3.3.2	Automatização de simulações	44
4	MATERIAL E MÉTODOS	46
4.1	Definição dos parâmetros testes	47
4.2	Faixas de valores de parâmetros reológicos	48
4.3	Automatização das simulações	52
4.4	Estudo de caso: Barragem fictícia de Zenz e Goldgruber (2013) – ICOLD	53
4.4.1	Modelo HEC-RAS do ICOLD para simulações	56
4.4.2	Sensibilidade a partir de abordagem probabilística	58
4.4.3	Cenários probabilísticos para avaliação de sensibilidade	60
4.5	Estudo de caso: Barragem B1 em Brumadinho-MG	63
4.5.1	Modelo HEC-RAS da Barragem B1 para simulações	67
4.5.2	Calibração de mancha de inundação a partir de ruptura real	69
4.5.3	Cenário probabilístico para calibração de parâmetros reológicos.....	70
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
5.1	Sensibilidade na modelagem hidrodinâmica devido a parâmetros reológicos: barragem de Zenz e Goldgruber (2013) – ICOLD	73
5.1.1	Amostragem dos parâmetros dos cenários B-ICOLD e HB-ICOLD	73
5.1.2	Sensibilidade do modelo de Bingham do ICOLD (B-ICOLD).....	74
5.1.3	Sensibilidade do modelo de Herschel-Bulkley do ICOLD (HB-ICOLD).....	83
5.1.4	Mapas probabilísticos dos cenários do ICOLD	89
5.2	Calibração de parâmetros reológicos a partir de estudo de caso real – Barragem B1 em Brumadinho-MG	93
5.2.1	Amostragem dos parâmetros do cenário B-B1	93
5.2.2	Relações entre os parâmetros reológicos e os resultados das simulações	94
5.2.3	Probabilidades de inundação.....	99
5.2.4	Calibração da mancha de inundação a partir da mancha de ruptura ocorrida	102
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	108

REFERÊNCIAS.....	112
APÊNDICE A – Código em linguagem Python para simulações automáticas com o modelo reológico de Bingham	121
APÊNDICE B – Código em linguagem Python para simulações automáticas com o modelo reológico de Herschel-Bulkley.....	126
APÊNDICE C – Manchas de inundação com melhor ajuste segundo Fit Metric F	131

1 INTRODUÇÃO

As barragens como disposição final do rejeito do processo de beneficiamento de minério são geralmente mais utilizadas que outros métodos, devido a vantagens econômicas e técnicas. Os avanços nesse processo possibilitam o refinamento de minérios de baixo teor, o que acarreta o crescimento dos volumes dispostos (PULLUM *et al.*, 2018). Junto a isso, o risco de ruptura de barragens de rejeitos tem se apresentado historicamente 10 vezes superior ao risco associado a barragens de armazenamento de água (DAVIES, 2002).

De acordo com Azam e Li (2010) ocorreram 198 rupturas de barragens de rejeitos no mundo entre 1910 e 1999, o que corresponde a 2,2 rompimentos de barragens por ano. No Brasil, Palú e Julien (2019) avaliaram que entre os anos de 1986 e 2019 foram registrados 12 rompimentos de barragens de rejeitos. Nos últimos anos, dois graves desastres provocaram perdas de vida e danos ambientais e socioeconômicos no Brasil. O rompimento da barragem de Fundão em Mariana (MG) (MORGENSTERN *et al.*, 2016), em 2015, causou a morte de 19 pessoas e danos ambientais, sociais e econômicos ao longo da bacia do Rio Doce. E a ruptura da barragem B1 da Mina do Córrego do Feijão em Brumadinho (MG) (ROBERTSON *et al.*, 2019), em 2019, causou a morte de 270 pessoas, impactos ambientais na bacia do Rio Paraopeba, desabastecimento de áreas a jusante e perdas econômicas significativas. Esses desastres demonstram a relevância de estudos relacionados a inundações causadas pela ruptura dessas estruturas, a fim de mitigar danos associados.

Um dos desafios na modelagem de inundações decorrentes de rupturas de barragens de rejeitos se trata da elevada variabilidade dos parâmetros reológicos. A ciência que estuda o escoamento e a deformação dos fluidos é a reologia (JULIEN, 1995; MEZGER, 2006). Esses parâmetros são obtidos e estudados por meio de ensaios reológicos (O'BRIEN e JULIEN, 1988; FAITLI e GOMBKÖTŐ, 2015; JEONG, 2019), e podem ser utilizados na modelagem de escoamentos hiperconcentrados (JEYAPALAN *et al.*, 1983; PIRULLI *et al.*, 2017; YU *et al.*, 2020). O rejeito é uma combinação de materiais finos e água, e, dependendo das proporções em termos de concentração de sólidos, suas propriedades podem se assemelhar àquelas de fluidos não-newtonianos (hiperconcentrados). Segundo O'Brien e Julien (1985), o termo fluxo hiperconcentrado se refere comumente a fluxos de lama ou fluxos de detritos.

Diversos fatores podem influenciar a variabilidade dos parâmetros reológicos, como a taxa de cisalhamento, a concentração de sólidos, o pH e a temperatura (ZENGONI, 2016). Estudos como de Wang *et al.* (2018) analisaram a influência de parâmetros físicos e geotécnicos nas propriedades reológicas. Diante disso, a análise de incertezas pode ser aplicada, como feito por Contreras *et al.* (2020) que avaliaram a variabilidade dos parâmetros no que tange às incertezas na caracterização reológica. Poucos estudos buscaram identificar incertezas e analisar possíveis sensibilidades na modelagem de escoamento não-newtoniano. Cepeda *et al.* (2013) avaliaram incertezas dos parâmetros de entrada na modelagem de deslizamentos naturais de solo em regiões íngremes, e Iaccarino (2008), dos parâmetros físicos e reológicos na modelagem numérica de escoamento não-newtoniano. Já Zegers *et al.* (2020) realizaram uma análise de sensibilidade da modelagem hidrodinâmica não-newtoniana a parâmetros reológicos de escoamentos naturais de lama.

Modelos hidrodinâmicos permitem simular o escoamento hiperconcentrado, como é o caso do FLO-2D (D'AGOSTINO e TECCA, 2006; WU *et al.*, 2013; ZEGERS *et al.*, 2020), do RIVERFLOW2D (PASCULLI *et al.*, 2021) e do FLDWAV (SALAZAR e GONZÁLEZ, 2021). Recentemente, o HEC-RAS, que é um programa gratuito e usado mundialmente, também passou a integrar a modelagem de escoamento não-newtoniano. Por ser um módulo recente, ainda não foram identificados estudos de sensibilidade do HEC-RAS a parâmetros reológicos em modelagem de escoamento hiperconcentrado. Com o intuito de explorar a aplicabilidade do modelo HEC-RAS para fins práticos relacionados ao mapeamento de inundações com escoamento hiperconcentrado, este estudo busca responder a seguinte questão: De que forma a variabilidade dos parâmetros reológicos impacta nos resultados da modelagem de inundações causadas por ruptura de barragens de rejeitos?

Para responder a essa pergunta, foi analisada a sensibilidade desse programa a parâmetros de entrada dos modelos reológicos de Bingham (1922) e Herschel e Bulkley (1926), que integram a versão atual do HEC-RAS. Esses são os modelos reológicos mais adaptados e frequentemente usados para representar o escoamento de rejeitos de mineração (ZENGONI, 2016; CONTRERAS *et al.*, 2020; SILVA, 2020; LIGIER, 2020). Para tal, foi realizada extensa revisão de literatura técnica e científica para se determinar faixas de valores relacionadas aos diferentes parâmetros e

modelos estudados. Essa abordagem foi realizada em uma barragem fictícia apresentada por Zenz e Goldgruber (2013) em estudo promovido pela *International Commission on Large Dams* (ICOLD). Em complemento, com o objetivo de calibrar os parâmetros reológicos a partir de mancha de inundação observada em uma ruptura real, foi desenvolvido o estudo de caso da ruptura da antiga Barragem B1 em Brumadinho-MG.

Esta dissertação está organizada em seis capítulos e três apêndices, contando com essa introdução. No segundo capítulo são apresentados os objetivos geral e específicos. No terceiro, é apresentada a revisão de literatura que contém o estado da arte e conceitos dos aspectos principais da modelagem hidrodinâmica de escoamentos hiperconcentrados. No quarto capítulo, descreve-se a metodologia utilizada no desenvolvimento e obtenção dos resultados, por meio de abordagem probabilística e automatização das simulações com aplicação nos dois estudos de caso. No quinto, os resultados obtidos são apresentados e discutidos, avaliando a sensibilidade e calibração dos parâmetros reológicos segundo probabilidades e relações entre parâmetros. Por fim, no sexto capítulo são trazidas as principais conclusões sobre este trabalho e recomendações para futuros trabalhos. No Apêndice A é apresentado o código em linguagem Python do estudo de caso do ICOLD e modelo reológico de Bingham, e no Apêndice B, do modelo reológico de Herschel-Bulkley, onde foram variados os parâmetros reológicos de cada modelo. Já no Apêndice C são apresentadas as 10 manchas de inundação com melhor ajuste à mancha de inundação observada na ruptura da Barragem B1 em Brumadinho-MG.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência de parâmetros de reologia de fluidos hiperconcentrados (não-newtonianos) nos resultados de simulação de inundações decorrentes de rupturas de barragens de rejeitos com o programa HEC-RAS 6.1.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- estabelecer faixas de valores relacionados aos parâmetros de reologia para avaliação do impacto da variação desses valores nos resultados da modelagem hidrodinâmica;
- desenvolver ferramenta para automação do processo de variação dos parâmetros reológicos de entrada nas simulações com o HEC-RAS; e
- calibrar parâmetros reológicos a partir de estudo de caso real e cenário probabilístico.

3 REVISÃO DA LITERATURA

A modelagem de ruptura de barragens de rejeitos de mineração permite o mapeamento de inundações e identificação de áreas potencialmente atingidas pela onda de inundação. Fundamentados nesses mapeamentos são desenvolvidos planos de gestão de risco e de mitigação de danos associados.

Nesse sentido, nos próximos itens são apresentados aspectos essenciais da modelagem hidrodinâmica de escoamentos hiperconcentrados, trazendo o estado da arte e conceitos sobre reologia, ruptura de barragens de rejeitos e sensibilidade da modelagem hidrodinâmica, segundo abordagens probabilísticas e com ferramentas de automatização.

3.1 Reologia de fluidos não-newtonianos e rejeitos de mineração

A reologia é a ciência que estuda o escoamento e a deformação da matéria, ou seja, suas mudanças de fluxo e forma (JULIEN, 1995; MEZGER, 2006). A relação dada pela tensão de cisalhamento e uma determinada taxa de deformação ou de cisalhamento de um fluido define graficamente um reograma (JULIEN, 1995).

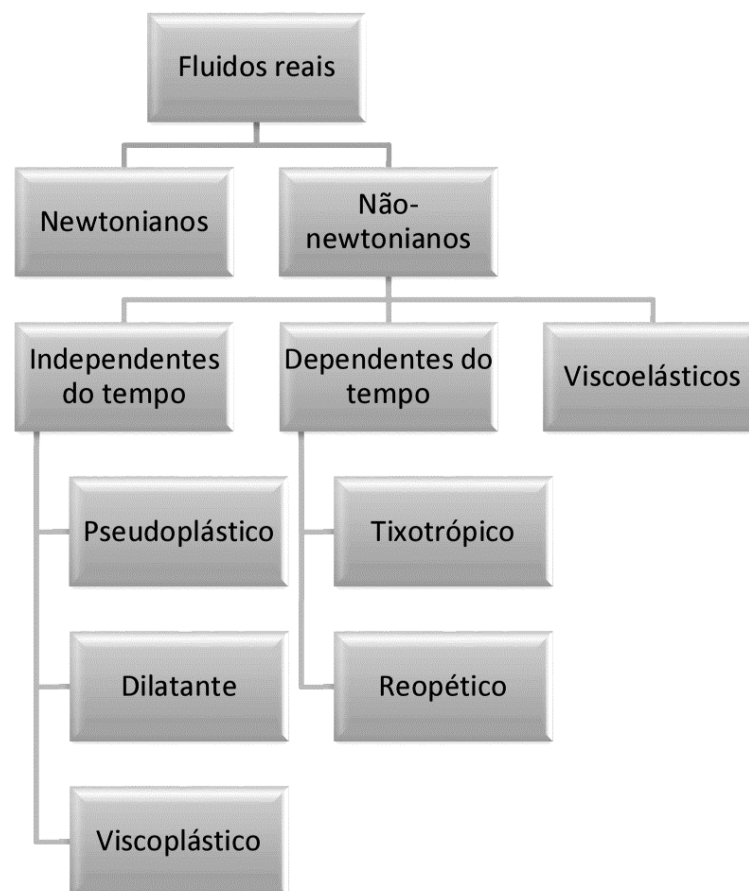
O comportamento do fluido pode ser explicado pelas seguintes propriedades: viscosidade dinâmica, tensão de cisalhamento e taxa de deformação. A propriedade do fluido em movimento que representa a resistência interna do fluido ao fluxo é a viscosidade dinâmica (MEZGER, 2006). Para uma ação de cisalhamento ser realizada é necessária uma força por unidade de área, que consiste na tensão de cisalhamento; já a taxa de deformação representa a velocidade de movimentação entre as camadas do fluido, ou seja, essa propriedade descreve o efeito de cisalhamento sofrido pelo fluido (ZENGENI, 2016).

De acordo com O'Brien e Julien (1985), o termo fluxo hiperconcentrado se refere frequentemente a fluxos de lama ou fluxos de detritos. E esses fluxos podem ser gerados com a ruptura de barragens de rejeitos. O rejeito de mineração é uma combinação de materiais finos e água, e em razão da elevada concentração de sólidos (hiperconcentrado), comumente apresenta propriedades de fluidos não-newtoniano.

3.1.1 Modelos reológicos matemáticos

Observa-se no escoamento newtoniano com regime laminar um aumento linear da tensão de cisalhamento com a taxa de deformação (JULIEN, 1995). No fluxo não-newtoniano, essa relação pode ser linear, mas diferentemente do newtoniano, necessita de uma tensão de cisalhamento para dar início ao escoamento (BINGHAM, 1922). Existem também fluidos não-newtonianos que apresentam relação não linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, ou seja, a viscosidade dinâmica não é dada pela relação linear entre essas propriedades (FERREIRA *et al.*, 2005). Os fluidos não-newtonianos podem ser classificados quanto à relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento, em: viscoelásticos, dependentes do tempo e independentes do tempo (GALINDO, 2013), conforme pode ser observado na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Esquema de classificação dos fluidos quanto à sua deformação e propriedades



Fonte: Mothé (2007) *apud* Galindo (2013)

Os fluidos não-newtonianos viscoelásticos apresentam propriedades de materiais líquidos e sólidos e, após deformação, apresentam recuperação elástica parcial (GALINDO, 2013).

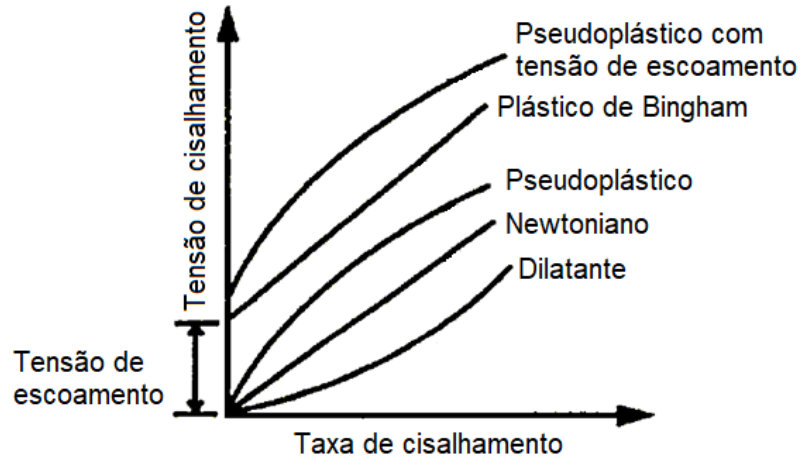
Já os fluidos dependentes do tempo são aqueles cuja viscosidade dinâmica é afetada conforme a tensão ou taxa de cisalhamento e o tempo de aplicação desse cisalhamento (BISCO, 2009). Esses fluidos são classificados ainda em reopéticos, quando há aumento da viscosidade dinâmica durante o cisalhamento, e tixotrópicos, quando o material apresenta redução da viscosidade dinâmica com aplicação de tensão de cisalhamento constante (BISCO, 2009).

De maneira oposta, os fluidos não-newtonianos independentes do tempo não possuem comportamento em que a viscosidade dinâmica seja afetada pelo tempo, mas somente pela tensão de cisalhamento aplicada (GALINDO, 2013). As subclassificações desses fluidos são pseudoplásticos, dilatantes e viscoplásticos (FOX e MCDONALD, 1998; MACHADO, 2002). Esses fluidos podem ainda ser caracterizados segundo a necessidade de uma tensão de cisalhamento para início do escoamento, em fluidos não-newtonianos independentes do tempo sem tensão de escoamento e com tensão de escoamento.

Os fluidos dilatantes e pseudoplásticos não necessitam de tensão de escoamento. Nos fluidos pseudoplásticos o aumento do cisalhamento causa uma redução da viscosidade dinâmica, e nos fluidos dilatantes (comportamento raro) essa viscosidade aumenta (GALINDO, 2013).

Dentre os fluidos não-newtonianos independentes do tempo, os plásticos de Bingham (ou viscoplásticos) se comportam como sólido até que uma tensão limite de cisalhamento seja ultrapassada e assim seja iniciado o escoamento, que exprime relação linear entre a tensão e a taxa de cisalhamento (GALINDO, 2013). Existem ainda os fluidos que manifestam comportamento pseudoplástico após excedida uma tensão de escoamento, que são os fluidos pseudoplásticos com tensão de escoamento (HERSCHEL e BULKLEY, 1926). A Figura 3.2 exhibe os reogramas de fluido newtoniano em comparação a fluidos não-newtonianos independentes do tempo.

Figura 3.2 - Reogramas de fluido newtonianos e não-newtonianos com propriedades independentes do tempo de cisalhamento



Fonte: Adaptado de Kawatra & Bakshi (1996)

Diante dessas relações entre a tensão de cisalhamento e taxa de deformação, existem diversos modelos matemáticos desenvolvidos para representar o comportamento dos fluidos não-newtonianos independentes do tempo. O modelo de Bingham foi desenvolvido em 1922 fundamentado na sua idealização do fenômeno limite de escoamento, onde um valor residual para a tensão de cisalhamento deve ser excedido para que o material escoe. O plástico de Bingham tende a não deformar com a aplicação de pequenas tensões de cisalhamento (FERREIRA, 2007). A tensão de cisalhamento de Bingham é a soma entre tensões de escoamento e viscosas, conforme equações 3.1 e 3.2 (BINGHAM, 1922) a seguir:

$$\tau = \tau_y + \mu_m \frac{dv_x}{dz}, \quad \tau > \tau_y \quad (3.1)$$

$$\frac{dv_x}{dz} = 0, \quad \tau < \tau_y \quad (3.2)$$

Em que: τ é a tensão de cisalhamento; τ_y é a tensão de escoamento ou limite; μ_m é a viscosidade dinâmica da mistura ou viscosidade dinâmica; e dv_x/dz é a taxa de deformação ou gradiente de velocidade.

Os fluidos dilatantes e pseudoplásticos podem ser representados pelo modelo de Ostwald-de-Waele (DE WAELE, 1923; OSTWALD, 1925) ou também conhecido como Power-Law. A Equação 3.3 mostra o modelo de Power-Law, onde m e n são parâmetros de calibração, denominados como coeficiente de consistência e índice de

comportamento do fluido, respectivamente, e $\dot{\gamma}$ é o gradiente de velocidade (CHHABRA e RICHARDSON, 2008). Quando $n < 1$, o fluido é pseudoplástico, $n = 1$, newtoniano, e quando $n > 1$, o fluido possui comportamento dilatante (CHHABRA e RICHARDSON, 2008).

$$\tau = m\dot{\gamma}^n \quad (3.3)$$

Os fluidos pseudoplásticos com tensão de escoamento podem ser representados pelo modelo de Herschel e Bulkley (1926). Esse modelo foi desenvolvido com base nos modelos de Bingham e Power-Law, com o objetivo de incorporar a curva de fluxo não-linear para tensões superiores a τ_y (TARCHA, 2014). Nesse modelo reológico a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação apresentam uma relação não-linear, sendo uma proposta generalizada do fluido plástico de Bingham. Essa relação depende do expoente adimensional n , característico para cada fluido e determinado experimentalmente (FERREIRA, 2007). Esse coeficiente é o mesmo índice de comportamento do modelo de Power Law. Além do índice de comportamento n , o índice de consistência K do modelo de Herschel-Bulkley também é um parâmetro empírico (O'BRIEN e JULIEN, 1988). Essa relação é dada pelas equações 3.4 e 3.5, e indica a soma entre tensões de escoamento e viscosas/turbulentas (HERSCHEL e BULKLEY, 1926; USACE, 2020):

$$\tau = \tau_y + K \left(\frac{dv_x}{dz} \right)^n, \quad \tau > \tau_y \quad (3.4)$$

$$\frac{dv_x}{dz} = 0, \quad \tau < \tau_y \quad (3.5)$$

O'Brien e Julien (1985) também propuseram uma equação geral para fluidos não-newtonianos independentes do tempo com tensão de escoamento. O modelo Quadrático (O'BRIEN e JULIEN, 1985) associa tensões provenientes da coesão entre partículas, da fricção interna entre o fluido e as partículas de sedimento, da turbulência e do impacto inercial entre as partículas (JULIEN, 1995). A tensão de cisalhamento do modelo Quadrático consiste na soma de tensões cisalhantes, viscosas e dispersivas (Equação 3.6) (O'BRIEN e JULIEN, 1985; JULIEN, 1995; USACE, 2020).

$$\tau = \tau_y + \mu_m \frac{dv_x}{dz} + \zeta \left(\frac{dv_x}{dz} \right)^2 \quad (3.6)$$

Em que: ζ é o parâmetro dispersivo-turbulento.

O último termo do modelo Quadrático constitui os efeitos da tensão dispersiva provocada pelo impacto inercial das partículas de sedimentos, junto a tensão dispersiva (JULIEN, 1995). A Equação 3.7 combina a expressão da tensão turbulenta com a tensão dispersiva de Bagnold (1954) (JULIEN, 1995).

$$\zeta = \rho_m l_m^2 + c_{Bd} \rho_s \left[\left(\frac{0,615}{Cv} \right)^{1/3} - 1 \right]^{-2} d_s^2 \quad (3.7)$$

Em que: ρ_m e l_m são, respectivamente, a massa específica e comprimento de mistura do fluido; d_s é o diâmetro da partícula e c_{Bd} é um parâmetro empírico igual a 0,01, definido por Bagnold (1954).

Frequentemente, os modelos reológicos usados para representar o escoamento causado pela ruptura de rejeitos de minério são os modelos de Bingham e Herschel-Bulkley (Bingham generalizado) (ZENGENI, 2016; CONTRERAS *et al.*, 2020; SILVA, 2020; LIGIER, 2020). Resultados experimentais de laboratório de Qian e Wan (1986) *apud* Julien (1995) confirmaram que, sob taxas de deformações observadas em campo, fluidos com altas concentrações de partículas finas se comportam como fluidos plásticos de Bingham.

3.1.2 Reologia de rejeitos de mineração

Segundo Boscov (2008), minério é uma rocha constituída de um ou mais minerais que possui um mineral que pode ser explorado economicamente. Nesse sentido, a mineração é um conjunto de processos, atividades e indústrias que viabilizam a obtenção de minerais (BOSCOV, 2008). Ainda de acordo com Boscov (2008), o processo de obtenção do minério possui as etapas de lavra, que é a retirada da jazida, e beneficiamento, que compreende o tratamento para preparar granulometricamente, concentrar, ou purificar minérios para extração do mineral valioso.

O processo de obtenção do minério mediante a exploração de jazidas retorna, também como subprodutos, os seguintes materiais com baixo valor agregado: os

estéreis, que provêm dos processos de decapeamento de mina, e os rejeitos, que são derivados dos processos de beneficiamento de minério (FERREIRA, 2016). Os processos a serem realizados dependem do tipo e da qualidade do minério, são eles: britagem (fragmentação), moagem (pulverização), peneiramento (classificação) e concentração (por densidade, separação magnética, separação eletrostática, ciclonação, aglomeração, flotação, lavagem, secagem, pirólise, calcinação) (BOSCOV, 2008).

A composição e a concentração de sólidos dos rejeitos variam de acordo com o minério explorado e os processos utilizados no seu beneficiamento. Por exemplo, o rejeito de minério de ferro é composto em sua maioria pelos minerais hematita (principal componente) e quartzo (HUANG *et al.*, 2013); de acordo com Dias (2017), a goetita também constitui os rejeitos desse minério. O tipo de minério, a composição e teor mineral, bem como outras características físicas influenciam no comportamento reológico dos rejeitos (WANG *et al.*, 2018; ZENGENI, 2016; DESRIVIERS *et al.*, 2019).

Em vista disso, os ensaios reológicos são métodos indispensáveis para compreender o comportamento dos rejeitos de mineração. Como enfatizado por Silva (2020), os desastres em Mariana-MG e Brumadinho-MG demonstram quão distintos podem ser os escoamentos de rejeitos causados por rupturas, uma vez que ambas as barragens eram de minério de ferro, estavam localizadas em Minas Gerais e pertenciam ao mesmo grupo econômico.

As propriedades reológicas são determinadas por um conjunto de técnicas experimentais denominado por reometria (NASCIMENTO, 2008). Os instrumentos utilizados nos ensaios reológicos são os viscosímetros e reômetros, sendo este último uma evolução tecnológica do primeiro (NASCIMENTO, 2008). Os viscosímetros determinam a resistência ao escoamento para uma solicitação específica (RIBEIRO, 2015) e, em contrapartida, os reômetros permitem a medição de um amplo intervalo de taxas de cisalhamento e variada faixa de condições (HACKLEY e FERRARIS, 2001).

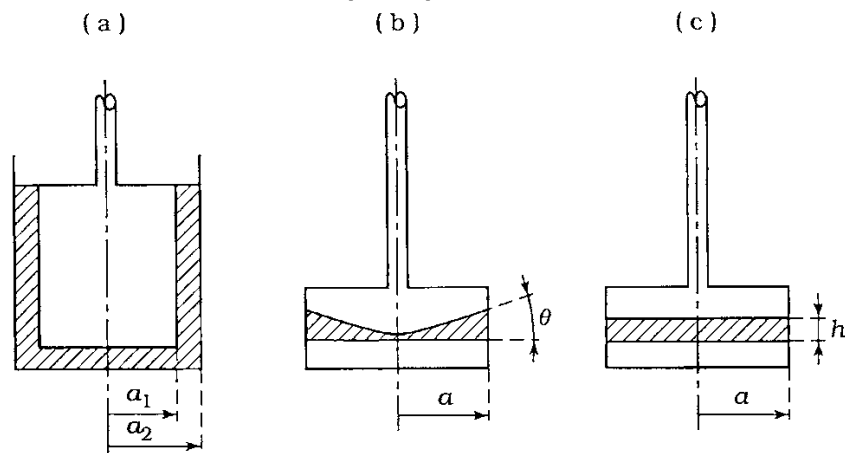
De acordo com Ribeiro (2015), existem três tipos principais de viscosímetros: capilar, rotacional e escoamento de esfera. No viscosímetro capilar, a viscosidade dinâmica é obtida a partir do tempo necessário para um determinado volume do fluido escoar

entre duas marcas existentes em um capilar de vidro, sob sua própria carga hidrostática (HACKLEY e FERRARIS, 2001). Com o viscosímetro rotacional, também chamado de viscosímetro tipo Brookfield, a viscosidade dinâmica é medida a partir de velocidades de rotação fixas, após acionar uma ferramenta de medição (*spindle*) imersa no fluido por meio de uma mola de torção calibrada (HACKLEY e FERRARIS, 2001). Já o viscosímetro de esfera mede a viscosidade dinâmica por meio da velocidade de imersão de uma esfera dentro de um líquido no interior de um tubo vertical de vidro (GALINDO, 2013).

Dentre as diversas geometrias de reômetros existentes, destacam-se os reômetros rotacionais e os reômetros capilares (NASCIMENTO, 2008). O reômetro capilar mede as propriedades reológicas com base no escoamento do fluido dentro de um tubo, com velocidade média constante e queda de pressão conhecida (NGUYEN e BOGER, 1992). Já nos reômetros rotacionais o fluido é cisalhado continuamente entre duas superfícies por um tempo indeterminado, o que permite analisar o comportamento transiente do material e atingir o estado de equilíbrio (RIBEIRO, 2015).

Conforme Ribeiro (2015), os reômetros rotacionais podem realizar os ensaios reológicos de duas formas, com tensão controlada e com taxa de deformação controlada. Os reômetros rotacionais que realizam ensaios com tensão controlada funcionam com a aplicação de um torque constante e medição da rotação resultante (RIBEIRO, 2015). De maneira oposta, com a taxa de deformação controlada, são aplicadas taxas cisalhantes conhecidas e o torque é medido e transformado em tensão de cisalhamento (RIBEIRO, 2015). Segundo Nascimento (2008), os reômetros rotacionais possuem diversas geometrias: palheta coaxial, placas paralelas, cone-placa, cilindro concêntrico. Algumas dessas geometrias são apresentadas na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Geometrias de reômetros rotacionais: a) cilindro concêntrico; b) cone-placa; c) placa-placa.



Fonte: Vliet & Lyklema (2005)

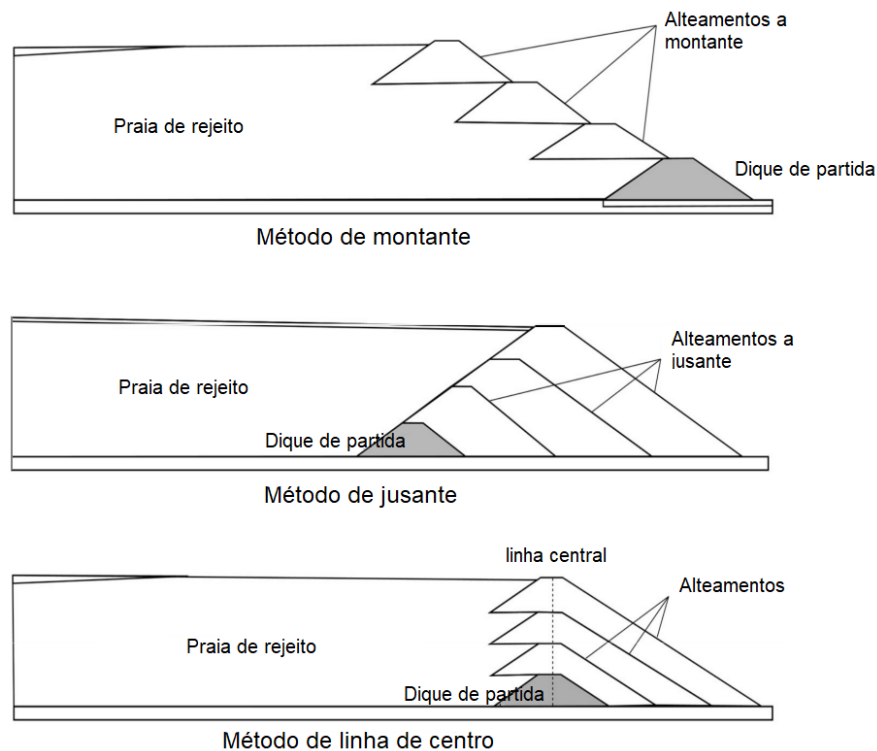
Existem técnicas mais simples para determinação unicamente da tensão de escoamento de fluidos não-newtonianos, como o ensaio de palheta (*vane test*) ou o ensaio do abatimento do tronco de cone (*slump test*) (RIBEIRO, 2015).

3.1.3 Disposição de rejeitos em barragens

De acordo com Chácara (2020), a disposição de rejeitos geralmente é realizada em superfície, na forma de pilhas, barragens e, inclusive, na própria mina (em cava já exaurida). A disposição do rejeito em barragens é um método de descarte considerado mais simples e barato, sendo assim mais comum. Como destacado por Pullum *et al.* (2018), os avanços tecnológicos que viabilizam o refinamento de minérios de baixo teor contribuem para o aumento dos volumes armazenados em barragens.

As barragens são construídas partindo de diques iniciais e são alteadas sucessivamente à medida que são produzidos mais volumes de rejeitos. Existem três métodos de alteamento: de montante, de linha de centro e de jusante (Figura 3.4). O método de alteamento de montante é mais econômico e tecnicamente mais simples de ser realizado, mas propicia mais risco de ruptura, principalmente se os alteamentos forem realizados com o próprio rejeito (mais comum). Isso pois, o estado de saturação e baixos índices de permeabilidade podem favorecer a elevação da linha freática e processos de liquefação (MACHADO, 2017). O processo de liquefação traduz-se como a transformação da fase do material de sólido para líquido, em caso de absorção de eventuais pressões externas (MACHADO, 2017).

Figura 3.4 - Métodos de alteamentos de barragens de rejeito



Fonte: Adaptado de Santos e Oliveira (2021)

Parte significativa dos rejeitos de mineração lançados em barragens consiste em materiais saturados e pouco resistentes devido à condição não drenada (FERREIRA, 2016). A quantidade de água existente no rejeito implica em um material com diferentes condições e comportamentos (CHÁCARA e OLIVEIRA FILHO, 2021). E a forma que o material é disposto impacta no comportamento do rejeito, em termos geomecânicos ou em caso de eventual ruptura, na forma como esse material escoar (SILVA, 2020).

A disposição como polpa diluída em barragens é a forma mais utilizada no Brasil e em países como Austrália, Canadá, Estados Unidos e África do Sul, geralmente o rejeito é disposto de forma mais concentrada (CHÁCARA, 2020). Do ponto de vista ambiental, a retirada da água dos rejeitos reduz a quantidade de água nova para uso no processo, reduz as áreas utilizadas na disposição e reduz ainda os riscos associados a eventuais rupturas (RIBEIRO, 2015). Economicamente, as operações de espessamento, filtração e transporte de rejeitos com concentrações de sólidos maiores inviabilizam o deságue desse material (RIBEIRO, 2015).

Os métodos para disposição de rejeitos estão sendo revisados no mundo todo com a intenção de reduzir a água presente nessas misturas (CHÁCARA e OLIVEIRA FILHO, 2021). O potencial das barragens de rejeitos de fluir ou sofrer deformações excessivas são questões relevantes na compreensão dos riscos associados a essas estruturas (CHÁCARA e OLIVEIRA FILHO, 2021). Dessa forma, o entendimento da reologia desses materiais é imprescindível por ser a ciência que versa sobre esses efeitos. Ainda segundo Chácara e Oliveira Filho (2021), rejeitos espessados ou pastosos geralmente possuem um comportamento viscoplástico não-newtoniano.

Pullum *et al.* (2018) trataram dos resíduos provenientes de processamento mineral, seu transporte e armazenamento. Os autores apresentaram os métodos tradicionais, vantagens e desvantagens, e novos métodos que buscam a redução da água no resíduo, com uso de espessantes para desidratar os rejeitos. Pullum *et al.* (2018) também enfatizam que a redução da água e consequente aumento da viscosidade dinâmica dos rejeitos é buscada como solução ambiental para evitar desastres, a fim de limitar o escoamento desse material em um evento de ruptura. O desafio dessa abordagem, segundo os autores, assim como apontado por Ribeiro (2015), consiste na manutenção da viabilidade do bombeamento do material até a praia de rejeito.

As técnicas de disposição de rejeitos estão em constante progresso, devido a fatores como: ocorrências de rupturas de barragens de rejeitos, aumento das exigências de órgãos ambientais, aumento dos volumes gerados, disponibilidade de água para outorga e escassez de áreas para deposição. De acordo com Ribeiro (2015), os métodos de disposição a seco buscam reduzir as rupturas de barragens e impactos associados.

A redução da água nos rejeitos também tem motivação na carência de água em alguns locais. Novas tecnologias de desaguamento de rejeitos, para recuperação da água devem considerar condições e requisitos para possibilitar o gerenciamento desse recurso (CACCIUTTOLO e VALENZUELA, 2022). Dentre essas técnicas pode-se citar o espessamento de rejeitos, rejeitos em pasta e rejeitos filtrados (Figura 3.5).

Figura 3.5 - Tecnologias de desaguamento de rejeitos



Fonte: Adaptado de Cacciuttolo e Valenzuela (2022)

A técnica de disposição de rejeitos espessados ou de alta concentração usa floculantes para desidratar os rejeitos, separando os sólidos do líquido, onde a água pode ser reciclada para o processo mineral (PULLUM *et al.*, 2018). A técnica de rejeitos em pasta, segundo Cacciuttolo e Valenzuela (2022), possui limitação da capacidade de fabricação do equipamento, e dificuldade no bombeamento de deslocamento positivo do rejeito, que aumenta os custos de operação. Em comparação aos rejeitos espessados, os rejeitos em pasta possuem a vantagem de necessitarem apenas de pequenas barragens (menor área ocupada), devido à tensão de escoamento e à viscosidade mais altas, que permitem maior inclinação do depósito (ângulo de repouso) (CHÁCARA, 2020; CACCIUTTOLO e VALENZUELA, 2022). Já os rejeitos filtrados são armazenados com o transporte, espalhamento e compactação dos rejeitos em uma pilha seca, ao passo que são desidratados (parcialmente saturados) (CARNEIRO e FOURIE, 2018).

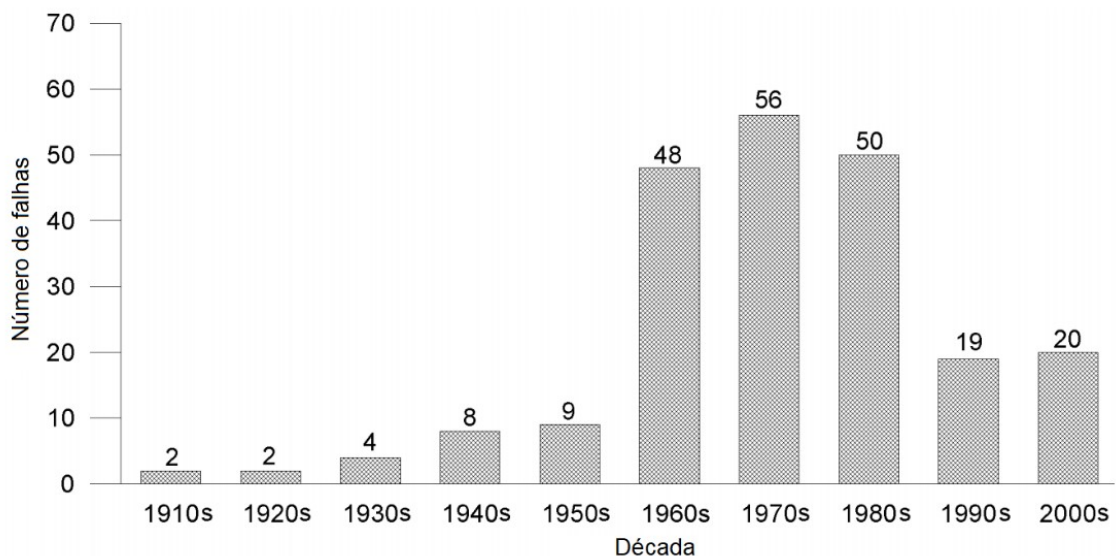
3.2 Ruptura de barragens de rejeitos

Os eventos de ruptura de barragens causam danos gravíssimos devido aos elevados volumes associados, com impactos econômicos severos, impactos ambientais muitas vezes irreversíveis e, em vários casos, perdas de vidas. De acordo com Davies (2002), a ocorrência de ruptura de barragens de rejeitos é 10 vezes maior que a de rupturas

de barragens de retenção de água. Segundo Davies (2002), no período de 1960 a 2001, a probabilidade de falha de barragens de água era inferior a 0,01% (ou 1/10.000) em qualquer um desses anos.

Davies (2002) avaliou, a partir de um banco de dados com 3.500 barragens de rejeitos, que entre 1970 e 2001, ocorreram de dois a cinco grandes incidentes de ruptura por ano, com probabilidades de falha anual de 1/700 e 1/1.750, respectivamente, sendo que em nenhum desses anos houve menos que 2 eventos. De acordo com Azam e Li (2010), foram observados 198 rompimentos de barragens de rejeitos no mundo no período de 1910 a 1999, o que indica uma média de 2,2 rompimentos por ano (Figura 3.6).

Figura 3.6 - Rupturas de barragens de rejeitos no mundo



Fonte: Adaptado de Azam e Li (2010)

A lista de falhas de barragens de rejeitos preparada pelo *World Information Service on Energy Projects* (WISE) e atualizada em 5 de abril de 2022 indica 148 falhas de barragens, desde 1961, indicando uma média de dois casos por ano (WISE, 2022). No entanto, conforme informado em nota, devido à disponibilidade limitada de dados, essa compilação não está completa.

No Brasil, foram registrados 12 rompimentos de barragens de rejeitos no período de 1960 a 2019 (WISE, 2019 *apud* PALÚ e JULIEN, 2019), conforme mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Principais falhas de barragens de rejeitos no Brasil

Barragem	Ano	Altura da barragem (m)	Tipo de minério	Volume armazenado	Rejeito escoado	Distância alcançada pelos rejeitos (km)
Itabirito	1986	30	Ferro	-	100.000 m ³	12
Fernandinho	1986	40	Ferro	-	350.000 m ³	-
Pico São Luis	1986	20	-	-	-	10
Minera Serra Grande	1994	-	Ouro	2,25 Mt	-	-
Rio Verde	2001	-	Ferro	-	600.000 m ³	8
Forquilha	2002	-	-	-	-	-
Cataguases	2003	-	-	-	1.400 Mm ³	200
São Francisco	2006	34	Bauxita	3,7 Mm ³	135.000 m ³	-
São Francisco	2007	34	Bauxita	3,7 Mm ³	3 Mm ³	92
Herculano	2014	-	Ferro	-	-	-
Fundão	2015	120	Minério de ferro	≈ 80 Mm ³	32 Mm ³	670
Brumadinho	2019	86	Minério de ferro	12 Mm ³	-	?

Fonte: Adaptado de WISE (2019) *apud* Palú e Julien (2019)

Dois graves desastres envolvendo barragens de rejeitos nos últimos anos causaram perdas de vidas e danos ambientais e socioeconômicos no Brasil. O rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana-MG (MORGENSTERN *et al.*, 2016), em 2015, causou a morte de 19 pessoas e graves danos ambientais ao longo da bacia do Rio Doce e sua foz. Esse rompimento foi declarado como o pior desastre ambiental da história do Brasil (ADAMO *et al.*, 2020). E em 2019, o rompimento da Barragem B1 da Mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho-MG (ROBERTSON *et al.*, 2019), causou 270 perdas de vida humanas, com ainda quatro pessoas desaparecidas (lista do dia 07/06/2022¹), e impactos ambientais ao longo da bacia do Rio Paraopeba. As perdas econômicas causadas por esses desastres foram significativas, para as empresas e proprietários das estruturas e para a sociedade, afetada direta ou indiretamente (COELHO, 2018). Esses desastres demonstram a relevância de estudos acerca das inundações causadas por rupturas de barragens de rejeitos que possam contribuir com a mitigação de danos associados à propagação da onda de ruptura ao longo do vale a jusante.

¹ http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_brumadinho/Paginas/listas-atualizadas.aspx

3.2.1 Aspectos conceituais

As rupturas de barragens de rejeitos englobam aspectos e fenômenos que, a posteriori, muitos autores e estudos buscam analisar com a intenção de representá-los em estudos de ruptura hipotética. Esses aspectos compõem-se pelos modos de falha, geometria da brecha de ruptura, hidrograma da brecha de ruptura, volume mobilizado, dentre outros.

As rupturas de barragens de terra ou aterro podem ocorrer por falha hidráulica (por exemplo, galgamento), falha de infiltração (*piping*) e falha estrutural (falhas na fundação e talude) (GILDEH *et al.*, 2020). De acordo com Gildeh *et al.* (2020), o modo de falha por liquefação (já descrito no Item 3.1.3) geralmente não está incluído em programas de estimativa de parâmetros de ruptura. O galgamento ou *overtopping* é um modo de falha que ocorre devido à passagem do material contido no reservatório por cima da crista da barragem. O escoamento sobre a estrutura causa a erosão do talude de jusante, iniciando a abertura de uma brecha de ruptura. E a erosão interna ou *piping* ocorre devido à percolação de água, com formação de um “tubo” através da estrutura da barragem (corpo ou fundação). Essa erosão também provoca a abertura de uma brecha de ruptura e liberação do material contido no reservatório. Os modos de falha por galgamento e *piping* são geralmente mais utilizados nos estudos de ruptura (CDA, 2003).

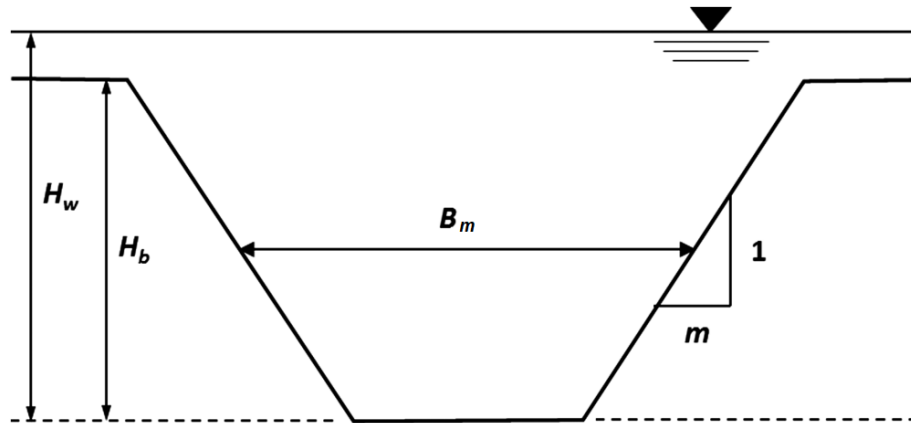
O estudo de rompimento de barragens possui algumas dificuldades na fase de determinação dos parâmetros geométricos e hidráulicos de formação da brecha (CRUZ, 2019). A estimativa dos parâmetros da brecha de rompimento é abordada de duas formas: por abordagem determinística, que produz resultados mais conservadores a partir de parâmetros representativos que têm como base valores empíricos; e por abordagem probabilística, que associa os parâmetros da brecha a uma probabilidade de excedência e resulta em cenários mais prováveis se comparados à primeira abordagem (CRUZ, 2019).

Na abordagem determinística, a previsão de parâmetros de brecha pode ser realizada por equações de regressão, como as propostas por: Macdonald & Langridge-Monopolis (1984), Von Thun & Gillette (1990) e Froehlich (2016). Para definir as equações de regressão adequadas é importante avaliar as características da

barragem e possíveis mecanismos de ruptura, considerando intervalos para os quais foi desenvolvida a equação, a fim de não causar incertezas nos resultados da geometria e tempo de formação da brecha (CRUZ, 2019).

Destaca-se o método de Froehlich (2016), ainda muito utilizado nos estudos de ruptura, que é fundamentado na análise de 111 eventos de rupturas de barragens. A representação dos parâmetros de brecha do modelo paramétrico de Froehlich (2016) é demonstrada na Figura 3.7. Froehlich (2016) propõe as equações 3.8 e 3.9 para cálculo da largura média da brecha (B_m) e tempo de formação (t_f), respectivamente.

Figura 3.7 - Parâmetros de brecha



Fonte: Adaptado de Froehlich (2016)

$$B_m = 0,23k_0V_w^{1/3} \quad (3.8)$$

$$t_f = 60,0 \sqrt{\frac{V_w}{gH_b^2}} \quad (3.9)$$

Em que: H_w é a altura referente ao volume armazenado no reservatório no início da ruptura (m); H_b é a altura final da brecha (m); m é o coeficiente de declividade lateral da brecha (adimensional); k_0 é o coeficiente de ajuste em função do modo de falha, sendo 1,0 (*piping*) e 1,5 (galgamento); e V_w é o volume total do reservatório (água e rejeito) no início da ruptura.

Existem também programas desenvolvidos para formação de brecha e obtenção de hidrograma de ruptura. O modelo BREACH (FREAD, 1988), específico para

modelagem da formação de brecha de rompimento de barragens de terra, correlaciona os parâmetros hidráulicos, morfológicos e geotécnicos. Yang *et al.* (2012) utilizaram o BREACH para avaliação do risco de inundação a jusante causada pelo rompimento de barragem formada por deslizamento de terra. Esse modelo calcula o hidrograma de ruptura, a progressão da brecha de ruptura e determina o pico de vazão durante o rompimento de uma barragem.

Zagonjoli (2007) desenvolveu um modelo de rompimento de barragem para formação de brecha em barragens de aterro chamado de BREADA. O modelo de brecha desenvolvido simula a falha gradual da estrutura devido a galgamento. Para validação do modelo BREADA, Zagonjoli (2007) comparou o hidrograma de rompimento e o pico de vazão obtido no seu modelo para um rompimento real com o modelo BREACH e observou que a forma do hidrograma difere na ascensão mais acentuada no BREACH, o que causaria uma onda mais grave, e no modelo BREADA a ascensão do hidrograma é mais suave, o que causaria uma onda mais lenta, com mais tempo de alerta para população a jusante. Essa diferença entre os resultados dos modelos são exemplos da incerteza que as técnicas atuais de modelagem de rompimento possuem em relação ao tempo, que é o elemento mais importante (ZAGONJOLLI, 2007).

Outro modelo que sintetiza hidrograma de ruptura de água e rejeitos é o EMBREA-MUD, baseado no modelo EMBREA desenvolvido por HR Wallingford. O EMBREA-MUD foi desenvolvido por Mohamed *et al.* (2002) sob nome de HR BREACH e validado com base em eventos históricos de rupturas de barragens. Esse modelo prevê o desenvolvimento de uma brecha de ruptura e hidrograma de ruptura com base em características da barragem sem necessidade de determinar previamente as dimensões da brecha (LUMBROSO *et al.*, 2021).

A abordagem probabilística para definição de parâmetros de brecha e hidrograma de ruptura pode ser realizada por programas como o McBreach, desenvolvido pelo grupo Kleinschmidt Associates. Esse programa é gratuito e seu uso é acoplado ao programa HEC-RAS. O McBreach permite a amostragem aleatória de parâmetros de brecha pelo Método de Monte Carlo, com base em distribuições de probabilidade (SILVA, 2021). A convergência estatística desse modelo é observada pela vazão de pico do

hidrograma de ruptura e, de acordo com Goodell (2019), para tal, o número de realizações deve ser entre 5.000 e 10.000.

Nos casos em que não existam estudos de cheias ou medições de vazão afluentes ao reservatório, pode-se optar pelo uso de hidrogramas sintéticos como condição de contorno de montante (CRUZ, 2019). O hidrograma simplificado de ruptura com decaimento parabólico de Barfield *et al.* (1981) permite representar o rompimento gradual de barragens de terra por erosão (CRUZ, 2019), distribuindo o volume do reservatório ao longo do tempo com base no tempo e vazão de pico calculados previamente.

Outro importante aspecto das rupturas de barragens de rejeitos consiste no volume liberado durante o evento de ruptura, que diferentemente das barragens de água (fluido newtoniano), não pode ser adotado de forma arbitrária como sendo a totalidade do volume (100%). Com base em modelos físicos, Souza Jr. e Texeira (2019) inferiram que o volume mobilizado depende da geometria e da largura média da brecha.

Segundo Clemente *et al.* (2003), a quantidade de rejeitos mobilizados corresponde, em média, de 20 a 40% do volume total de rejeitos contidos no reservatório. O estudo de Rico *et al.* (2008) apontou que cerca de 35% do volume total é escoado, com base em análise de casos históricos e análises de regressões. No entanto, observa-se a ocorrência de valores muito superiores a esses em casos de rupturas recentes, sendo mais adequado muitas vezes aplicar e comparar diversos métodos de definição de volume mobilizado.

3.2.2 Modelagem de escoamento de fluidos não-newtonianos com o HEC-RAS

O modelo HEC-RAS (v.6.1) permite a resolução das equações de conservação de massa (Equação 3.10) e conservação de quantidade de movimento (Equações 3.11 e 3.12) com o modelo de águas rasas, em duas dimensões para a propagação da onda de cheia e mapeamento de variáveis hidráulicas na planície de inundações. As equações são resolvidas pelo método de volumes finitos, segundo combinações de métodos matriciais e aproximações sucessivas, onde as direções de fluxo potenciais correspondem ao plano bidimensional.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial x} + q = 0 \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_t v + f v \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_t v + f u \quad (3.12)$$

Em que: H é a cota da superfície de água; t é o tempo; h é a profundidade do escoamento; u e v são, respectivamente, as componentes da velocidade na direção x e y; q é um sumidouro ou fonte; g é a aceleração da gravidade; v_t é o coeficiente de viscosidade turbulento; c_t é o coeficiente de atrito; e f é o coeficiente de Coriolis.

O modelo bidimensional no HEC-RAS é constituído de uma malha 2D (*grid*) associada ao Modelo Digital de Elevação (MDE). Cada célula do grid recebe informações de rugosidade e de elevação (USACE, 2021). Na simulação com o HEC-RAS 2D, o número de Courant é uma importante condição para estabilidade do modelo. Assim, a definição dos intervalos computacionais deve atender à condição de Courant, sendo c celeridade da onda, Δt o tempo computacional e Δx a distância entre os centros das células da malha 2D (Equação 3.13) (CHADWICK *et al.*, 2017).

$$Cr = c \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (3.13)$$

Modelos reológicos descrevem o escoamento dos fluidos utilizando a mecânica dos fluidos (SILVA, 2020). Os modelos reológicos podem estar acoplados a modelos hidrodinâmicos permitindo a simulação de escoamentos hiperconcentrados (não-newtonianos). Com foco no modelo HEC-RAS, os efeitos não-newtonianos foram incorporados nas equações hidráulicas por meio do fracionamento do termo da declividade da linha de energia (USACE, 2020).

A concepção básica consiste na adição de um termo que contabiliza as perdas internas viscosas e inerciais do fluido não-newtoniano – denominado por declividade de lama e detritos (S_{MD}) – à declividade da linha de energia (S_f), que compreende a perdas por atrito obtidas essencialmente pela equação de Manning, na equação de

conservação de movimento newtoniana no HEC-RAS, conforme equações 3.14 e 3.15 a seguir (USACE, 2020).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f + S_{MD} \right) = 0 \quad (3.14)$$

$$S_{MD} = \frac{\tau_i}{\gamma R} \quad (3.15)$$

Em que: Q é a vazão; t é o tempo; x é a distância na direção do escoamento; g é a aceleração da gravidade; A é a área molhada da seção transversal; z é a profundidade da lâmina d'água; τ_i é uma tensão de cisalhamento interna do fluido que resulta dos modelos reológicos; γ é o peso específico do fluido; e R é o raio hidráulico.

As equações de escoamento bidimensional não-newtoniano do modelo HEC-RAS são as equações de águas rasas (*shallow water equations*) e a equação de onda de difusão. Pelo rigor de cálculo, as simulações de inundações causadas por rompimentos de barragens preferencialmente devem ser realizadas com as equações de águas rasas. O HEC-RAS resolve as equações de águas rasas em duas dimensões para a propagação da onda de cheia de escoamento de fluidos não-newtonianos. A equação de conservação de quantidade movimento usada no modelo HEC-RAS para escoamento bidimensional de fluido não-newtoniano é dada pela Equação 3.16 (HERGARTEN e ROBL, 2015 *apud* USACE, 2020):

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V = -g \cos^2 \varphi \nabla \eta + \frac{1}{h} \nabla \cdot (v_t h \nabla V) - \frac{\tau \cos \psi}{\rho_m R \cos \varphi} \frac{V}{|V|} \quad (3.16)$$

Em que: g é a aceleração da gravidade; v_t é uma viscosidade turbulenta; τ é a tensão basal total, soma da tensão turbulenta (τ_t) e da tensão de lama e detritos (τ_{MD}), que inclui todas as tensões não-newtonianas; ρ_m é a massa específica da mistura água-sólido; R é o raio hidráulico; |V| é a magnitude do vetor velocidade; φ é a inclinação da superfície da água; e ψ é o ângulo de inclinação da direção da velocidade.

A escolha do modelo reológico matemático mais adequado para descrever o escoamento de um fluido não-newtoniano depende das características do escoamento. De acordo com O'Brien e Julien (1985), com base na concentração de sedimentos e no tamanho das partículas é possível classificar a mistura fluido-

sedimento. No entanto, a divisão dos tipos de fluxos hiperconcentrados em classificações estabelece limites artificiais e descontinuidades matemáticas, sendo um tanto arbitrária (USACE, 2020).

O'Brien e Julien (1985) descreveram os tipos de fluxo em função da concentração, volumétrica e mássica, de sedimentos (argilas e areias finas). Com base em diversos experimentos, os tipos de escoamento delineados conforme a concentração volumétrica foram: inundação de água, com concentração volumétrica (C_v) menor que 0,20; inundação de lama, onde $0,20 \leq C_v < 0,45$; fluxos de lama, sendo $0,45 \leq C_v < 0,50$; e deslizamentos de terra, em que $0,50 \leq C_v < 0,90$. Os autores dividiram ainda esses intervalos segundo as características do escoamento, como, por exemplo, a fluidez do escoamento, coesão e sedimentação das partículas.

No modelo HEC-RAS, a classificação utilizada partiu de quatro tipos de escoamentos não-newtonianos: fluxo hiperconcentrado, fluxo de lama e detritos, avalanche de neve e fluxo clástico (USACE, 2020). Segundo Rickenmann (1991), os limiares da classificação de fluxo hiperconcentrado e de lama e detritos dependem da concentração volumétrica, sendo respectivamente, $C_v > 30\%$ e $C_v > 60\%$. Com base na literatura e em experimentos realizados, o modelo HEC-RAS admite a seguinte classificação de fluxo não-newtoniano: (1) fluxo hiperconcentrado, quando $C_v > 5\%$ e existe tensão de escoamento e perdas viscosas; (2) fluxo de lama, quando há turbulência entre partículas; (3) fluxo de detritos, quando o número de Bagnold (N_{BAG}) é maior que 40 e ocorre colisão entre grãos; e (4) fluxo clástico, quando o número de atrito (N_{fri}) é superior a 100 e o processo de perda interna do material é uma matriz rígida (USACE, 2020; GIBSON *et al.*, 2020). O número de Bagnold é definido pela razão entre a tensão inercial do grão e a tensão de cisalhamento viscosa, e o número de atrito é a razão da tensão de atrito entre grãos pela tensão de cisalhamento viscosa (IVERSON, 1997).

Apoiado nessa classificação, o HEC-RAS dispõe de quatro modelos reológicos distintos, sendo recomendados os modelos matemáticos mais adequados para representar o comportamento da mistura sólido-água (USACE, 2020; GIBSON *et al.*, 2020): o modelo de Bingham para o fluxo hiperconcentrado, os modelos O'Brien (Quadratic) e Generalized Herschel-Bulkley para o fluxo de lama e de detritos, e o

modelo Clastic-Grain Flow (modelo geotécnico de Mohr-Coloumb) para o fluxo clástico.

3.3 Sensibilidade da modelagem hidrodinâmica de fluxo hiperconcentrado

A sensibilidade da modelagem hidrodinâmica está relacionada a fatores como incertezas nos valores de coeficiente de Manning, precisão de Modelos Digitais de Elevação (MDE), dentre outros. Diferentemente da modelagem de fluxo newtoniano, adiciona-se na modelagem de fluxo hiperconcentrado as incertezas associadas aos parâmetros de reologia do fluxo.

Estudos recentes buscaram avaliar associações e influências entre as propriedades físicas e reológicas dos rejeitos. Wang *et al.* (2018) analisaram o impacto de características físicas, como o tipo de minério, diâmetro dos sólidos (D25, D50 e D75), concentração volumétrica e a taxa de cisalhamento nas propriedades reológicas de rejeitos de ouro, cobre e ferro. Os autores ajustaram os resultados por meio da função exponencial de Bingham. O equipamento utilizado na determinação dos parâmetros foi um reômetro cilíndrico coaxial. Nesse estudo foi observado o impacto da composição e teor mineral, onde a tensão de escoamento e a viscosidade dinâmica foram maiores para rejeitos de minério de ferro e menores para rejeitos de ouro (WANG *et al.*, 2018). Os autores verificaram ainda que, para uma mesma concentração de sólidos, quanto maior o tamanho da partícula, menores são os valores de viscosidade dinâmica e tensão de escoamento (WANG *et al.*, 2018).

Desriviers *et al.* (2019) também investigaram os efeitos de aspectos físicos, como da composição mineralógica e da distribuição do tamanho da partícula, na reologia de rejeitos de ouro e cobre. Os autores avaliaram que amostras com partículas mais grossas causam a diminuição da tensão de escoamento e, à medida que há acréscimo de fração fina, a tensão de escoamento aumenta (DESRIVIERS *et al.*, 2019).

Essas relações entre aspectos físicos e parâmetros reológicos pode permitir ainda o desenvolvimento de modelos preditivos. Com o uso de regressão, por exemplo Zengeni (2016) obteve curvas reológicas de tensão de escoamento e viscosidade de Bingham com base nas propriedades de densidade de sólidos, distribuição do tamanho das partículas e formas, e concentração de sólidos, para aplicação no

bombeamento de rejeitos de ouro. Zengeni (2016) desenvolveu correlações entre as tensões de escoamento e viscosidades dinâmicas com o modelo de Bingham em função da concentração mássica para aplicação no transporte de rejeitos de ouro por tubulações. O objetivo dessa avaliação foi o de possibilitar a estimativa das propriedades reológicas de fluidos hiperconcentrados com base em propriedades físicas e reológicas da mistura. O autor realizou o ajuste de 30 amostras de rejeitos de ouro de diferentes minas, segundo o modelo de Bingham. As equações ajustadas foram então aplicadas com base em outras seis amostras com o propósito de avaliar os erros das equações de previsão de tensão de escoamento e viscosidade dinâmica.

A caracterização do comportamento de rejeitos e identificação de incertezas relacionadas aos diferentes parâmetros reológicos também é foco de estudos, pois levam a imprecisões na modelagem de inundações. Faitli e Gombkötő (2015) executaram testes reológicos em suspensões finas de materiais industriais: areias, cinzas volantes, perlita, rejeitos e lama vermelha. Os equipamentos viscosímetro rotacional e viscosímetro de tubo foram utilizados nas medições. Foram obtidos valores de viscosidade dinâmica e tensão de escoamento a partir de fluidos com comportamentos newtonianos e plásticos de Bingham com variação da concentração volumétrica. Dentre os materiais estudados, é interessante para este trabalho os valores obtidos da caracterização reológica dos rejeitos de mina de metal base em Gyöngyösoroszi.

Jeong (2019) mediu as tensões de escoamento de rejeitos de mina de pirofilita retirados de depósitos abandonados e potencialmente vulneráveis em Busan, Coreia do Sul. As medições das propriedades reológicas, tensões de cisalhamento e viscosidades dinâmicas foram realizadas com um sistema de medição de esferas adequado para partículas grandes. Os dados medidos foram ajustados segundo os modelos reológicos de Bingham, Bilinear, Bingham Modificado, Hershel-Bulkley e Power Law e, assim, o autor obteve os valores de parâmetros reológicos de cada modelo.

A variabilidade dos parâmetros reológicos foi estudada por Contreras *et al.* (2020), que desenvolveram uma metodologia baseada em estatística de dados medidos para estimar as incertezas na caracterização reológica e a variabilidade dos parâmetros

derivados dos modelos de Bingham e Herschel-Bulkley. Os autores realizaram medições e abordaram erros e incertezas em medições de caracterização reológica de fluidos minerais concentrados. A partir dos dados experimentais, os autores calcularam estatisticamente o quadro de variabilidade das medições com o uso da distribuição de t de Student com intervalos de confiança de 95%. No estudo da variação dos parâmetros de reologia, a contribuição de Contreras *et al.* (2020) se dá na simulação de todas as curvas experimentais possíveis dentro do quadro de variabilidade calculado estatisticamente. Assim, os autores admitiram distribuições estatísticas para cada parâmetro reológico e realizaram a simulação de Monte Carlo para avaliar a variabilidade desses parâmetros.

Ligier (2020) apresentou a implementação de modelos reológicos no modelo hidrodinâmico TELEMAC-2D. A aplicação considerada pelo autor consiste principalmente na modelagem de fluxos de lama, de rompimentos de barragens de rejeitos por meio de liquefação e com concentrações volumétricas acima de 40%. O autor acoplou ao TELEMAC-2D os modelos de Bingham e Herschel-Bulkley e apresentou quatro exemplos de validação e aplicação do modelo hidrodinâmico. Uma das aplicações foi a modelagem do rompimento da barragem de Brumadinho, que foi comparada pelo autor com observações de campo e outras simulações realizadas. Assim, o autor apresenta os parâmetros reológicos utilizados na modelagem da ruptura da antiga barragem de rejeitos de Brumadinho.

Outros autores já desenvolveram estudos semelhantes no passado, como Jeyapalan *et al.* (1983), que realizaram uma série de experimentos reológicos, aplicaram o modelo plástico de Bingham e compararam os resultados das análises com movimentos de fluxos observados em casos reais de rompimentos de barragens. O'Brien e Julien (1988) descreveram as propriedades físicas de fluxos de lamas com C_v entre 0,10 e 0,45, a partir de medições laboratoriais das propriedades reológicas. Mais recente, Machado (2017) executou ensaios reológicos de rejeitos de minério de ferro coletados ao longo do trecho inundado pelo rompimento da barragem de Fundão em Mariana-MG e realizou a retroanálise da ruptura considerando fluido hiperconcentrado no modelo FLO-2D. No mesmo ano, Deng *et al.* (2017) efetuaram uma série de testes reológicos com rejeitos de uma mina de ouro com o objetivo de avaliar o atendimento aos requisitos de bombeamento da mistura.

3.3.1 Abordagens probabilísticas

Análises probabilísticas permitem avaliar as incertezas associadas aos parâmetros reológicos de rejeitos. Dentre os métodos probabilísticos existentes, o Método de Monte Carlo (MMC) é amplamente utilizado para diversos tipos de problemas, em distintas áreas de interesse. O MMC é bastante utilizado também na avaliação da variabilidade dos parâmetros reológicos de fluidos não-newtonianos, bem como na avaliação da propagação das incertezas na modelagem de inundações. Diversos autores utilizaram o MMC para avaliar as incertezas dos parâmetros reológicos de fluidos hiperconcentrados.

Cepeda *et al.* (2013) analisaram o efeito da incerteza de entrada de parâmetros com um quadro probabilístico baseado em uma simulação de Monte Carlo. O foco do estudo foram deslizamentos naturais de solo em regiões íngremes. O modelo hidrodinâmico utilizado foi o MassMov2D (BEGUERÍA *et al.*, 2009). Na equação de conservação de quantidade de movimento, a tensão de cisalhamento é calculada usando um modelo reológico que deve ser fisicamente consistente com um comportamento geral do deslizamento. Esses autores utilizaram os modelos de Bingham e Voellmy, por serem usados para comportamentos de fluidos do tipo coeso. O objetivo principal dos autores foi avaliar o efeito da incerteza associada à variabilidade dos parâmetros reológicos, por meio da aplicação do MMC, na estimativa de escoamento de detritos. Foram atribuídas distribuições para os parâmetros reológicos e as simulações levaram a distribuições de probabilidade para os valores de saída. Para convergência, os autores efetuaram 5.000 realizações. Foram avaliados os resultados de profundidade e velocidades máximas em pontos selecionados na área de interesse.

Kameda e Okamoto (2021) realizaram uma análise unidimensional, com desenvolvimento de código em MATLAB, para resolver numericamente as equações de fluxo de detritos das equações de conservação de massa e quantidade de movimento. O estudo de caso dos autores se trata de um caso real de deslizamento de terra desencadeado por terremoto no Japão. O solo no local do estudo é vulcânico, rico em argila e contém o mineral de argila halloysita. O MMC foi aplicado para variação dos parâmetros reológicos do modelo de Bingham.

laccarino (2008) avaliou as incertezas relacionadas à temperatura e à viscosidade dinâmica na modelagem numérica de escoamento não-newtoniano. O autor considerou a viscosidade dinâmica como uma variável aleatória gaussiana e executou 10.000 realizações com o MMC. O autor concluiu que métodos baseados em amostragem normalmente não são adequados porque podem exigir vários milhares de cálculos completos para construir as estatísticas das saídas das simulações.

De La Rosa *et al.* (2021) estudaram o comportamento de suspensões cimentícias com a equação de Krieger-Dougherty. Essa equação possui parâmetros com significado físico e é uma equação robusta para obter a viscosidade dinâmica. O objetivo desse estudo foi o de transformar a equação de Krieger-Dougherty em um modelo probabilístico paramétrico usando análise Bayesiana para aplicação em pastas de cimento, argamassas autoadensáveis e concretos autoadensáveis. Os autores buscaram também utilizar o modelo desenvolvido para calcular funções densidade de probabilidade que intervêm na equação de Krieger-Dougherty aplicada a essas suspensões cimentícias. Nesse estudo, a viscosidade dinâmica das pastas de cimento foi medida usando um reômetro rotacional com sensor de placa cônica dupla Haake RS50. Os valores medidos foram ajustados para o modelo reológico de Bingham. Os autores utilizaram o software de código aberto OpenBUGS que aplica os métodos probabilísticos MMC e Gibbs Sampling para realizar as simulações. Em cada modelo, um total de 11.000 iterações foram realizadas para obter as amostras das variáveis que podem ser interpretadas como suas funções de densidade, que são os parâmetros dos modelos determinísticos. Na avaliação dos resultados da análise probabilística, De La Rosa *et al.* (2021) observaram que os erros nas previsões de viscosidade dinâmica usando os valores médios das curvas de distribuição (33%) foi menor do que o erro com os valores teóricos (43%), e que o desvio padrão também foi reduzido.

Stowe *et al.* (2020) utilizaram a análise probabilística com a finalidade de obter cenários e condições mais reais para escolha de dutos e bombas para transporte de rejeitos com base na variabilidade dos dados de entrada. Na entrada de dados foram considerados constantes a densidade de sólidos, densidade do líquido e temperatura da pasta. E foram consideradas variáveis: produção de sólidos, concentração mássica de solos e a distribuição de tamanho das partículas. A reologia da pasta nesse estudo

foi considerada independente da distribuição de tamanho das partículas e em função da concentração de sólidos. Foram feitas 5.000 realizações, variando as entradas com o MMC. Assim, os autores comparam os cenários resultantes com cenários típicos e conservadores baseados em casos extremos para escolha dos equipamentos com base em uma avaliação econômica.

Além do MMC, outro modelo que pode ser utilizado para compor a amostragem da análise probabilística é o Latin Hypercube Sampling (LHS) ou amostragem por hipercubo latino. O LHS é um método estatístico que gera uma amostra quase aleatória de valores de parâmetros a partir de uma distribuição multidimensional, que, segundo Zegers *et al.* (2020), provou ser mais eficiente que outros métodos, como, por exemplo, a amostragem de Monte Carlo. Zegers *et al.* (2020) realizaram uma análise de sensibilidade do modelo FLO-2D a parâmetros reológicos de escoamentos naturais de lama. O objetivo dos autores foi avaliar a influência da variação desses parâmetros nos resultados de extensão da inundação, velocidade e profundidade máximas, e volume de sedimentos depositado ao longo da propagação da inundação. O método utilizado por Zegers *et al.* (2020) para realizar a análise de sensibilidade foi a Avaliação Distribuída de Análise de Sensibilidade Local (DELSA), que é um método local-global híbrido. Os autores apresentaram faixas de valores de parâmetros reológicos do modelo de Herschel-Bulkley levantadas a partir de estudos anteriores, com foco em inundações naturais em locais com topografia acentuada e eventos de chuva que causaram carreamento de sedimentos. Nos resultados obtidos por Zegers *et al.* (2020), observou-se que o modelo FLO-2D é sensível principalmente ao parâmetro beta 1 que compõe a curva reológica da viscosidade dinâmica, afetando sobretudo os resultados da profundidade do fluxo simulado.

Hussin (2011) usou um método probabilístico para avaliar o escoamento e as alturas do fluxo de detritos de um fluxo de detritos localizado na Bacia Barcelonnette, nos Alpes do Sul da França. A sensibilidade do modelo RAMMS aos parâmetros de entrada foi avaliada e foram obtidos volumes sedimentados ao longo do vale e distância de propagação a partir de um método probabilístico simples. O modelo RAMMS foi originalmente projetado para avalanches de neve e para modelar escoamento de detritos em ambientes canalizados. O autor avaliou a aplicabilidade do modelo reológico Voellmy incorporado no RAMMS, calibrou parâmetros de entrada

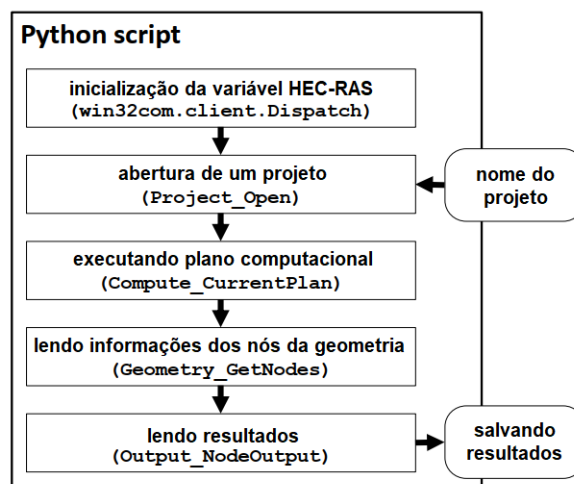
e obteve saídas e alturas de fluxo de detritos com base em eventos anteriores na bacia de estudo. Devido ao tempo limitado o autor executou apenas 53 repetições, com alteração de um parâmetro por vez. Assim, foi possível avaliar as probabilidades de ocorrer determinadas características de escoamento nos pontos de interesse da área de estudo.

3.3.2 Automatização de simulações

Estudos de análises de sensibilidade de modelagem hidrodinâmica, principalmente quando são utilizadas abordagens probabilísticas, demandam tempo computacional devido a repetidos processos e simulações. Em vista disso, a automatização desses processos contribui na otimização do tempo computacional e reduz a demanda operacional. Estudos que desenvolveram ferramentas para automatização de simulações hidrodinâmicas, especificamente para fluidos não-newtonianos, são escassos.

Autores como Dysarz (2018) fizeram uso da linguagem Python para automação do HEC-RAS unidimensional para fins de calibração automática de coeficientes de rugosidade de Manning e variação de dados de entrada relativos a simulação de transporte de sedimentos. As etapas realizadas pelo código desenvolvido por Dysarz (2018) estão apresentadas na Figura 3.8, que consistem na abertura da interface do programa, abertura de um determinado projeto, execução do plano do projeto, leitura da geometria, seguido da leitura e armazenamento dos resultados.

Figura 3.8 - Etapas realizadas em código Python desenvolvido para automatização do HEC-RAS 1D



Fonte: Adaptado de Dysarz (2018)

Chow *et al.* (2018) desenvolveram a retroanálise de um evento de fluxo de detritos de 2005, em Brienz, Suíça, variando valores de parâmetros físicos em 4.000 simulações no FLO-2D. A análise de sensibilidade global aplicada nesse estudo foi realizada de forma semi-automática com implementação de scripts Sikuli² acoplados a um programa executável, fornecido pelos desenvolvedores do FLO-2D (CHOW *et al.*, 2018).

Zhao *et al.* (2021) utilizaram um código Python para controlar blocos de construção (*building blocks*) individuais que abrangem diferentes linguagens de programação para simular automaticamente uma amostragem LHS e realizar a análise de sensibilidade de Sobol' (2001). Esse estudo analisou a sensibilidade de um modelo de deslizamento de terra variando parâmetros de resistência ao fluxo e volume liberado com base em um evento de deslizamento de terra em Piz Cengalo, nos Alpes Suíços (ZHAO *et al.*, 2021).

Zegers *et al.* (2020) fizeram o uso da linguagem Python para automação de análise de sensibilidade com amostragem LHS de variação de parâmetros reológicos para executar o modelo hidrodinâmico FLO-2D.

Outros estudos realizaram procedimentos semelhantes, automatizando simulações com o HEC-RAS em diferentes contextos relacionados a inundações (PAPAIOUNNOU *et al.*, 2017; HAMOUDA, 2018; BEZERRA *et al.*, 2021; DA SILVA *et al.*, 2021).

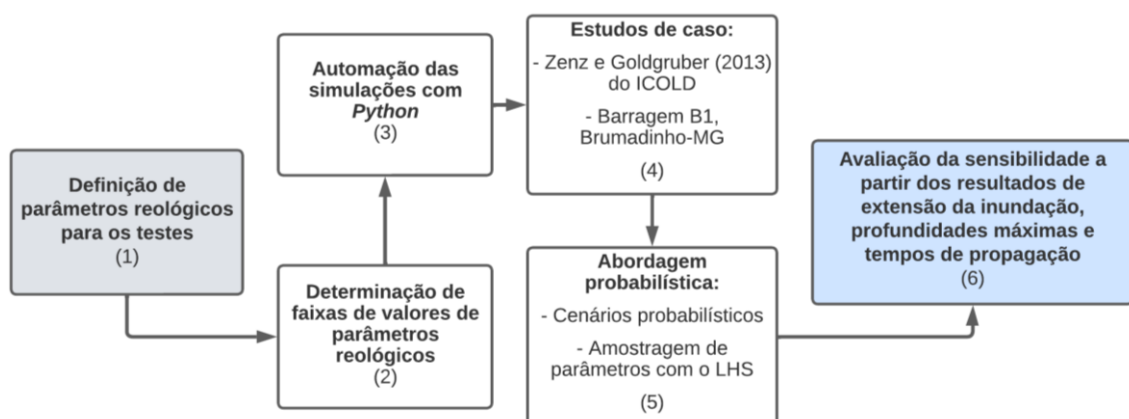
² <http://doc.sikuli.org/>

4 MATERIAL E MÉTODOS

Para avaliar a sensibilidade da modelagem hidrodinâmica a parâmetros reológicos, foram definidos intervalos de parâmetros para variação em abordagem probabilística, de forma automatizada, e os resultados foram armazenados para posterior análise. Para isso, desenvolveram-se dois estudos de caso: um estudo de caso de uma barragem fictícia onde foram avaliados os impactos nas saídas do modelo; e um caso real de ruptura de barragem, a fim de calibrar os parâmetros reológicos com base nos dados observados.

As etapas desenvolvidas neste trabalho consistem em: (1) Definição dos parâmetros reológicos para os testes de sensibilidade segundo parâmetros de entrada das abordagens predefinidas no HEC-RAS; (2) Determinação de faixas de valores de parâmetros reológicos com base na literatura; (3) Automação das simulações por meio da linguagem Python para variação dos parâmetros; (4) Aplicação em estudos de caso, no qual escolheu-se a barragem fictícia de Zenz e Goldgruber (2013) do ICOLD (*International Commission on Large Dams*) e a antiga Barragem B1, em Brumadinho-MG; (5) Uso de abordagem probabilística para avaliar a sensibilidade do modelo à variação de parâmetros reológicos; (5.1) Desenvolvimento de cenários probabilísticos com os modelos reológicos de Bingham e Herschel-Bulkley; (5.2) Realização de amostragem de parâmetros com uso do *Latin Hypercube Sampling* (LHS); (6) Avaliação da sensibilidade causada pela variação dos parâmetros reológicos no HEC-RAS por meio dos resultados de área inundada, profundidades máximas e tempos de propagação da onda de inundação. Essas etapas estão resumidas no fluxograma metodológico a seguir (Figura 4.1) e são detalhadas nos próximos itens.

Figura 4.1 - Fluxograma metodológico



4.1 Definição dos parâmetros testes

Os parâmetros testes foram definidos de acordo com os dados de entrada da modelagem de fluido não-newtoniano no HEC-RAS para os modelos reológicos de Bingham e Herschel-Bulkley, no estudo de caso de Zenz e Goldgruber (2013). Os seguintes parâmetros foram definidos para o modelo de Bingham: concentração volumétrica de sólidos (C_v); concentração volumétrica máxima de sólidos ($C_{v\text{máx}}$); e os coeficientes a e b da curva exponencial da tensão de escoamento. Já para o modelo de Herschel-Bulkley, foram definidos: a tensão de escoamento (τ_y), o índice de consistência (K) e o índice de comportamento (n). Esses parâmetros foram determinados tendo em vista as abordagens predefinidas do HEC-RAS.

Para cálculo da tensão de cisalhamento limite, a abordagem padrão ou predefinida no HEC-RAS (USACE, 2020) é o método exponencial, apresentado por O'Brien e Julien (1988), em função da concentração volumétrica de sólidos (C_v) e dos coeficientes de calibração a e b (Equação 4.1).

$$\tau_y = ae^{bC_v} \quad (4.1)$$

No cálculo da viscosidade dinâmica, a abordagem predefinida no HEC-RAS é o método Maron e Pierce (1956 *apud* USACE, 2020), calculada com base na proporção entre a concentração volumétrica de sólidos (C_v) e concentração volumétrica de sólidos máxima ($C_{v\text{máx}}$) (Equação 4.2).

$$\mu_r = \frac{\mu_m}{\mu_w} = \left(1 - \frac{C_v}{C_{v\text{máx}}}\right) \quad (4.2)$$

Em que: μ_r é a viscosidade dinâmica relativa; μ_m é a viscosidade dinâmica da mistura; e μ_w é a viscosidade dinâmica da água, com valor predefinido no HEC-RAS de 0,001307 Pa.s (VERNARD E STREET, 1975 *apud* USACE, 2020) para temperatura de 10°C.

Na versão 6.1 do HEC-RAS, o valor de C_v do fluido não-newtoniano é fixo e inserido pelo usuário (USACE, 2020). Dessa forma, ao ser utilizada a abordagem de curva exponencial que utiliza os parâmetros C_v , a e b para cálculo da tensão de escoamento, e Maron e Pierce que utiliza C_v e $C_{v\text{máx}}$ para cálculo da viscosidade dinâmica, a relação entre esses parâmetros e o C_v fixo vai retornar, igualmente,

valores de tensão escoamento (τ_y) e de viscosidade dinâmica (μ) fixos do modelo de Bingham.

Para o modelo Herschel-Bulkley, além dos parâmetros índice de consistência (K) e índice de comportamento (n), definiu-se a tensão de escoamento (τ_y). Nesse caso, não foi utilizada a abordagem predefinida da curva exponencial, ou seja, os parâmetros de calibração a e b, uma vez que esses parâmetros são geralmente ajustados com base na tensão de escoamento (τ_y) do modelo de Bingham. Assim, foram usados valores de tensão de escoamento (τ_y) de Herschel-Bulkley obtidos a partir de estudos anteriores.

Para o estudo de caso da Barragem B1 em Brumadinho-MG, o modelo reológico adotado foi o modelo de Bingham, uma vez que essa barragem armazenava rejeitos de minério de ferro. Conforme exposto anteriormente, o estudo de Qian e Wan (1986) *apud* Julien (1995) aponta que fluidos com altas concentrações de partículas finas se comportam segundo o modelo de Bingham. Os estudos de Ligier (2020), Lumbroso *et al.* (2021) e Gibson *et al.* (2022) também adotaram o modelo reológico de Bingham para representar o escoamento causado pela ruptura da Barragem B1.

Dessa forma, os parâmetros testes do modelo de Bingham foram definidos como a concentração volumétrica de sólidos (C_v), a tensão de escoamento (τ_y) e a viscosidade dinâmica (μ). Esses parâmetros foram escolhidos diante da observação dos dados disponíveis na literatura acerca desse desastre.

4.2 Faixas de valores de parâmetros reológicos

As faixas de valores dos parâmetros para testes de sensibilidades (Tabela 4.1) foram determinadas com base nos estudos de Bagnold (1954), Fitton e Seddon (2011), Faitli e Gombkötő (2015), Ribeiro (2015), Zengeni (2016), Machado (2017), Wang *et al.* (2018), Gitari *et al.* (2018), Robertson *et al.* (2019), Jeong (2019), Mahmood e Elektorowicz (2020), Contreras *et al.* (2020), Ligier (2020), Lumbroso *et al.* (2021) e Gibson *et al.* (2022). Os rejeitos estudados por esses autores foram de carvão, cobre, ferro, lítio, metal base, níquel, ouro, pirofilita, urânio, zinco, e ainda materiais sintéticos e teóricos.

Tabela 4.1 - Intervalos de parâmetros reológicos levantados na literatura (*Continua*)

Parâmetro	Valores	Unidades	Referência	Rejeitos	Ensaio / Método	Modelo reológico / equação ajustada
Concentração volumétrica de sólidos (Cv)	21,21 - 35,78	%	Fitton e Seddon (2011)	Carvão	n.a.	n.a.
	27,98 - 46,65		Fitton e Seddon (2011)	Cobre		
	36,50 - 38,62		Fitton e Seddon (2011)	Ouro		
	36,34 - 44,62		Fitton e Seddon (2011)	Lítio		
	11,09 - 19,66		Fitton e Seddon (2011)	Níquel		
	25,48 - 31,25		Fitton e Seddon (2011)	Urânio		
	11,82 - 50,11		Fitton e Seddon (2011)	Zinco		
	18,0 - 52,5		Faitli e Gombkötő (2015)	Metal base		
	21,8 - 55,3		Ribeiro (2015)	Ferro		
	32,5 - 65,0		Ribeiro (2015)	Ferro		
	9,3 - 48,4		Zengeni (2016)	Ouro		
	34,75 - 57,14		Machado (2017)	Ferro		
	58		Robertson <i>et al.</i> (2019)	Ferro		
47	Ligier (2020)	Ferro				
23	Gibson <i>et al.</i> (2022)	Ferro				
Concentração volumétrica máxima teórica de sólidos (Cv _{máx})	61,5	%	Bagnold (1954)	-	-	n.a.
	53		Faitli e Gombkötő (2015)	Metal base	-	
	49,0 - 62,0*		Gitari <i>et al.</i> (2018)	Cobre	Wooster <i>et al.</i> (2008)**	
	59,9 - 76,5*		Mahmood e Elektorowicz (2020)	Ferro	Wooster <i>et al.</i> (2008)**	
	57,3 - 68,0*		Mahmood e Elektorowicz (2020)	Ouro	Wooster <i>et al.</i> (2008)**	
Viscosidade dinâmica (μ)	0,03 - 0,49	Pa.s	Faitli e Gombkötő (2015)	Metal base	Viscosímetro	Bingham
	0,15 - 2,69		Ribeiro (2015)	Ferro	Viscosímetro	Bingham
	0,002 - 0,311		Zengeni (2016)	Ouro	Viscosímetro	Bingham
	0,0071 - 0,4457		Machado (2017)	Ferro	Reômetro	Quadrática
	1,09 - 1,46		Jeong (2019)	Pirofilita	Reômetro	Bingham
	50		Ligier (2020)	Ferro	Calibração	Bingham
	30,0 - 100,0		Lumbroso <i>et al.</i> (2021)	Ferro	Calibração	Full Bingham

Tabela 4.1 - Intervalos de parâmetros reológicos levantados na literatura (*Continuação*)

Parâmetro	Valores	Unidades	Referência	Rejeitos	Ensaio / Método	Modelo reológico / equação ajustada
Tensão de escoamento (τ_y)	2,122 - 48,535	Pa	Fitton e Seddon (2011)	Carvão	Viscosímetro	Herschel-Bulkley
	0,641 - 93,50		Fitton e Seddon (2011)	Cobre	Viscosímetro	Herschel-Bulkley
	0,6 - 1,5		Fitton e Seddon (2011)	Ouro	Viscosímetro	Herschel-Bulkley
	1,048 - 11,165		Fitton e Seddon (2011)	Lítio	Viscosímetro	Herschel-Bulkley
	1,564 - 37,110		Fitton e Seddon (2011)	Níquel	Viscosímetro	Herschel-Bulkley
	2,769 - 9,411		Fitton e Seddon (2011)	Urânio	Viscosímetro	Herschel-Bulkley
	0,652 - 100,260		Fitton e Seddon (2011)	Zinco	Viscosímetro	Herschel-Bulkley
	26,0 - 638,0		Faitli e Gombkötő (2015)	Metal base	Viscosímetro	Bingham
	19,36 - 602,82		Ribeiro (2015)	Ferro	Viscosímetro	Bingham
	59,59 - 2.396,53**		Ribeiro (2015)	Ferro	Teste de slump	Bingham
	0,5 - 181,0		Zengeni (2016)	Ouro	Viscosímetro	Bingham
	0,085 - 118,0		Machado (2017)	Ferro	Reômetro	Quadrática
	12,0 - 23,0		Jeong (2019)	Pirofilita	Reômetro	Herschel-Bulkley
	9,7 - 251,9		Contreras <i>et al.</i> (2020)	Sintético	Reômetro	Herschel-Bulkley
	100,0 - 1.000,0		Ligier (2020)	Ferro	Calibração	Bingham
750,0 - 1.000,0	Lumbroso <i>et al.</i> (2021)	Ferro	Calibração	Full Bingham		
a	1	Pa	Faitli e Gombkötő (2015)	Metal base	Viscosímetro	Exponencial
	2,1381		Ribeiro (2015)	Ferro	Viscosímetro	
	0,0065		Ribeiro (2015)	Ferro	Teste de slump	
	0,08		Gibson <i>et al.</i> (2022)	Ferro	Calibração	
	1,00E-07		Machado (2017)	Ferro	Reômetro	
	~0,04 - 3,40		Wang <i>et al.</i> (2018)	Cobre	Reômetro	
	~0,40 - 3,45		Wang <i>et al.</i> (2018)	Ferro	Reômetro	

Tabela 4.1 - Intervalos de parâmetros reológicos levantados na literatura (*Continuação*)

Parâmetro	Valores	Unidades	Referência	Rejeitos	Ensaio / Método	Modelo reológico / equação ajustada
b	12,2 9,0874 20,47 40 39,278 ~1,2 – 5,0 ~1,2 – 5,5	-	Faitli e Gombkötő (2015) Ribeiro (2015) Ribeiro (2015) Gibson <i>et al.</i> (2022) Machado (2017) Wang <i>et al.</i> (2018) Wang <i>et al.</i> (2018)	Metal base Ferro Ferro Ferro Ferro Cobre Ferro	Viscosímetro Viscosímetro Teste de slump Calibração Reômetro Reômetro Reômetro	Exponencial
Índice de consistência (K)	0,034 – 6,409 0,008 – 130,0 0,108 – 0,221 0,222 – 1,515 0,154 – 2,001 0,065 – 0,097 0,428 – 14,720 0,69 – 1,96	Pa.s ⁿ	Fitton e Seddon (2011) Fitton e Seddon (2011) Fitton e Seddon (2011) Fitton e Seddon (2011) Fitton e Seddon (2011) Fitton e Seddon (2011) Fitton e Seddon (2011) Jeong (2019)	Carvão Cobre Ouro Lítio Níquel Urânio Zinco Pirofilita	Viscosímetro Viscosímetro Viscosímetro Viscosímetro Viscosímetro Viscosímetro Viscosímetro Reômetro	Herschel-Bulkley
Índice de comportamento (n)	0,4 – 1,0 0,192 – 1,347 0,705 – 0,744 0,766 – 1,020 0,450 – 0,602 0,742 – 0,913 0,306 – 0,577 0,84 – 1,14 0,50 – 1,50	-	Fitton e Seddon (2011) Fitton e Seddon (2011) Fitton e Seddon (2011) Fitton e Seddon (2011) Fitton e Seddon (2011) Fitton e Seddon (2011) Fitton e Seddon (2011) Jeong (2019) Ligier (2020)	Carvão Cobre Ouro Lítio Níquel Urânio Zinco Pirofilita Teórico	Viscosímetro Viscosímetro Viscosímetro Viscosímetro Viscosímetro Viscosímetro Viscosímetro Reômetro Calibração	Herschel-Bulkley

* Valores obtidos com base na porosidade do rejeito

** Propõe a equação: $C_{vm\acute{a}x} = 1 - pm'$, para estimar a concentração máxima teórica com base na porosidade do leito (pm')

***Cv de 65% no Teste de slump

n.a.: não aplicável

4.3 Automatização das simulações

Para realização das diversas simulações dos cenários definidos, para avaliação da sensibilidade da modelagem hidrodinâmica e para calibração de mancha simulada a partir de uma mancha de inundação observada, foi realizada a automatização dos processos. A automação das simulações no HEC-RAS é possível via HEC-RASController, que faz parte da interface de programação do modelo e consiste em uma coleção de sub-rotinas e funções do Visual Basic (GOODEL, 2014). O HEC-RASController pode ser utilizado com Visual Basic for Applications (VBA), mas segundo Dysarz (2018), essa linguagem de programação possui uso limitado ainda que muito útil, e assim outras linguagens como MATLAB e Python estão sendo implementadas no uso do HEC-RASController.

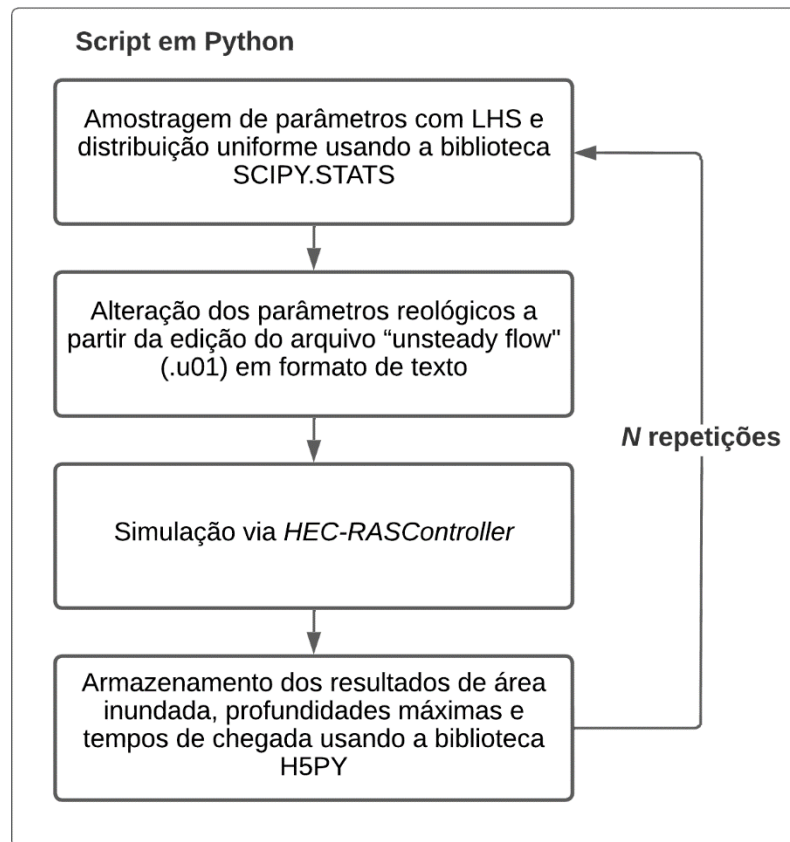
A rotina computacional (Figura 4.2) da ferramenta desenvolvida (algoritmos no Apêndice A e Apêndice B) parte da amostragem gerada para o parâmetro a ser variado com o LHS e distribuição de probabilidade associada com uso da biblioteca SCYPY.STATS no Python. O arquivo do "unsteady flow data" (extensão .u01) armazena dados de entrada, dentre os quais estão os parâmetros reológicos, e pode ser alterado como um arquivo de texto. Após a alteração do conjunto de parâmetros, as simulações são realizadas via funções do HEC-RASController, com abertura e execução do projeto com os parâmetros já alterados.

Após finalizadas as simulações, os resultados de área inundada, profundidades máximas e tempos de chegada para profundidade de 1 e 2 pés em cada célula do modelo 2D são armazenados com o uso da biblioteca H5PY em arquivos HDF, que possibilitam organizar e armazenar grandes quantidades de dados numéricos (como os dados matriciais). Um shapefile da envoltória de inundação é gerado ao final de cada simulação a partir do qual foram obtidas as áreas inundadas, com o algoritmo em Python. Já as profundidades máximas e tempos de chegada foram obtidas a partir do arquivo do "unsteady flow analysis" (extensão .p01) do HEC-RAS que contém os resultados em cada célula do modelo.

Os erros de volumes ao final de cada simulação com o HEC-RAS também foram armazenados com o propósito de avaliar possíveis instabilidades nas simulações que possam impactar nos resultados e logo, serem desconsideradas. Com esses

resultados é possível avaliar a sensibilidade, observando os impactos causados nos resultados pela variação dos parâmetros reológicos.

Figura 4.2: Rotina computacional realizada pela ferramenta em Python



Os mapas probabilísticos foram elaborados a partir da manipulação dos dados de saída de profundidades máximas, transformando esses resultados em dados binários: atribuindo o valor um para células inundadas e o valor zero para células não-inundadas (PAPAIOUNNOU *et al.*, 2017; BEZERRA *et al.*, 2021). As probabilidades de inundação de cada célula do modelo foram calculadas a partir da Equação 3.13 apresentada por Bezerra *et al.* (2021).

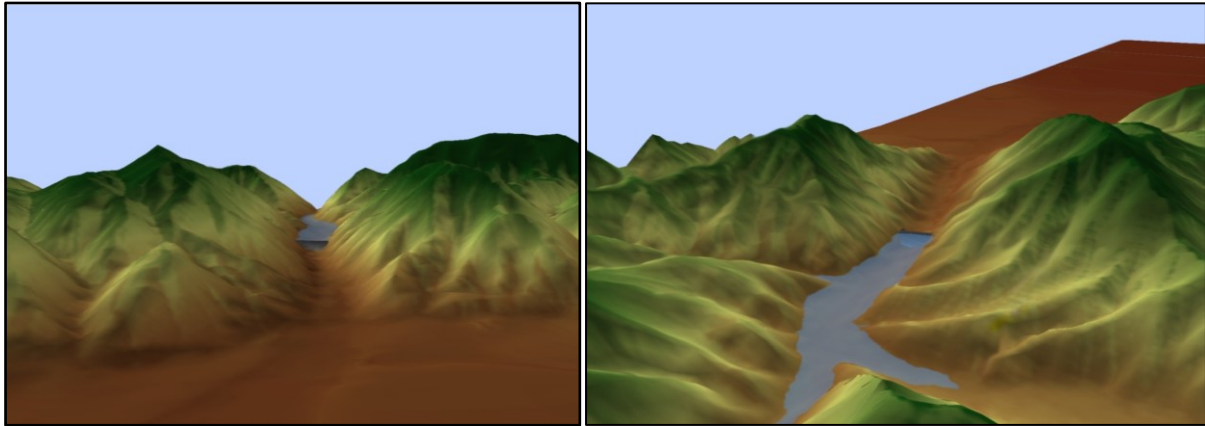
$$P_{inundacao} = \frac{N^{\circ} \text{ CENÁRIOS COM CÉLULA INUNDADA}}{N^{\circ} \text{ TOTAL DE CENÁRIOS SIMULADOS}} \quad (4.3)$$

4.4 Estudo de caso: Barragem fictícia de Zenz e Goldgruber (2013) – ICOLD

O estudo de caso do ICOLD se trata de uma barragem hipotética apresentada por Zenz e Goldgruber (2013), que foi idealizada como uma barragem de água, mas que para este estudo será admitida como uma barragem de rejeitos. Essa barragem é fictícia e está implantada em um ambiente virtual, tendo sido amplamente testada em um estudo promovido pelo ICOLD (International Commission on Large Dams) e

apresentado no 12º International Benchmark Workshop sobre análises numéricas de barragens. A vista frontal e posterior dessa barragem é mostrada na Figura 4.3.

Figura 4.3 - Vista frontal e posterior, respectivamente, da barragem fictícia

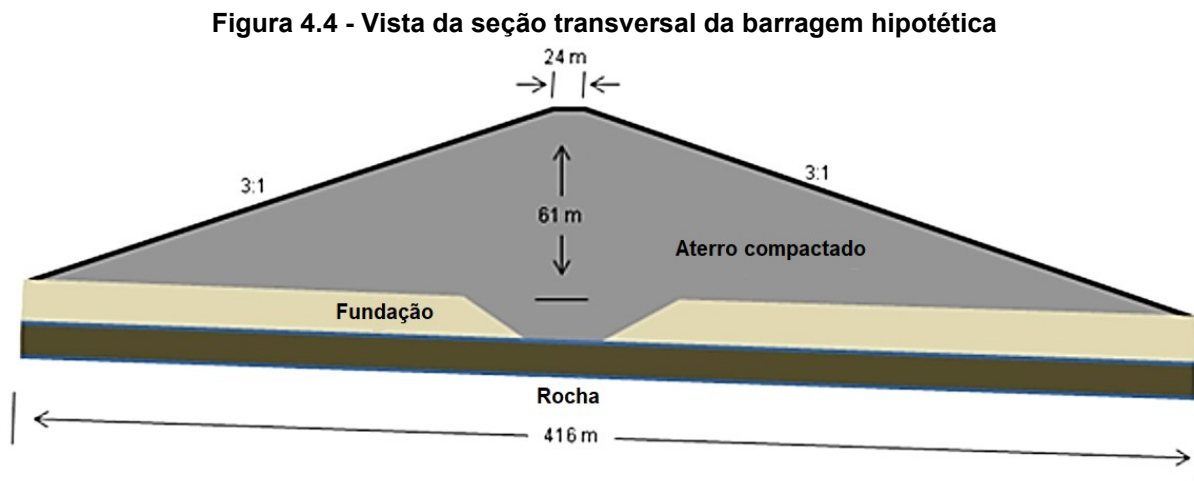


Fonte: Zenz e Goldgruber (2013)

Neste contexto, foram publicados oito estudos realizados para avaliação de riscos relacionados à ruptura dessa barragem sob diferentes metodologias, estudos compilados por Zenz e Goldgruber (2013). Dentre os estudos realizados para esse estudo de caso, foram selecionados pelo ICOLD oito estudos para avaliação de riscos. Em Zenz e Goldgruber (2013) estão publicados os estudos: Davison *et al.* (de sigla HRW), que utilizaram o modelo fisicamente baseado EMBREA na análise de sensibilidade variando coeficientes de erodibilidade; Altinakar *et al.* (MUST), que fizeram uso do modelo paramétrico de Froehlich (1995) e análise probabilística variando o tempo de formação de brecha e largura de fundo; Mancusi *et al.* (MANC) que desenvolveram cenários comparativos de diferentes métodos e aplicaram o modelo Molinaro (1986) fisicamente baseado; Saberi *et al.* (SAB) empregaram o BREACH (modelo fisicamente baseado) em cenários comparativos entre diferentes métodos; McVan *et al.* (MCV) utilizaram Froehlich (1995) em cenário extremo de remoção instantânea da barragem; Thames e Kalyanpu (TK) realizaram análise de sensibilidade de parâmetros de brecha obtidos por diferentes modelos empíricos e também aplicaram Froehlich (1995); Willians e Buchanan (MMC) realizaram análise semelhante a anterior; e Peter (P2017) utilizou o BASEbreach (modelo fisicamente baseado) em análise probabilística com abordagem Baysiana. A comparação entre os resultados apresentados neste trabalho e esses estudos não é possível diante da diferença de fluido simulado.

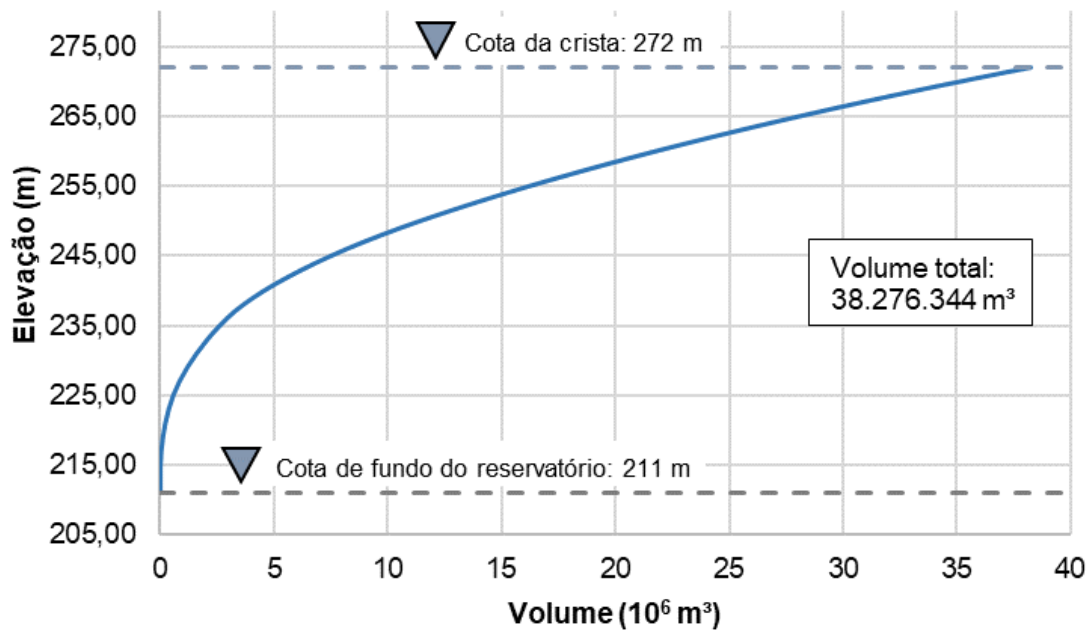
Mais recentemente, outros estudos utilizaram o estudo de caso de Zenz e Goldgruber (2013). Silva (2021) estudou as incertezas relativas aos parâmetros de brecha de ruptura e ajustou distribuições de probabilidade às amostras para quantificar essas incertezas, empregando o Método de Monte Carlo. Silva (2021) avaliou as incertezas na estimativa da vazão de pico dos hidrogramas de ruptura. Os dados deste estudo de caso, assim como o Modelo Digital de Elevação (MDT) e uso e cobertura do solo, foram disponibilizados por Silva (2021) para aplicação no presente trabalho. Em continuidade à análise apresentada por Silva (2021), Bezerra (2022) propôs avaliar o impacto das incertezas dos parâmetros de brecha de ruptura e dos valores de coeficiente de Manning na modelagem hidrodinâmica, com aplicação também no estudo de caso da barragem de Zenz e Goldgruber (2013).

A barragem (Figura 4.4) possui 61 m (El. 272) de altura, comprimento de crista de 360 m e reservatório com capacidade de $38 \times 10^6 \text{ m}^3$, e está localizada em terreno virtual montanhoso, com vale a jusante bastante encaixado nos seus primeiros 3,6 km, e aberto a partir de então, onde estão localizados uma área urbana e um lago, até cerca de 17,6 km. A curva cota-volume do reservatório da barragem é apresentada na Figura 4.5.



Fonte: Adaptado de Zenz e Goldgruber (2013)

Figura 4.5 - Curva cota-volume do reservatório

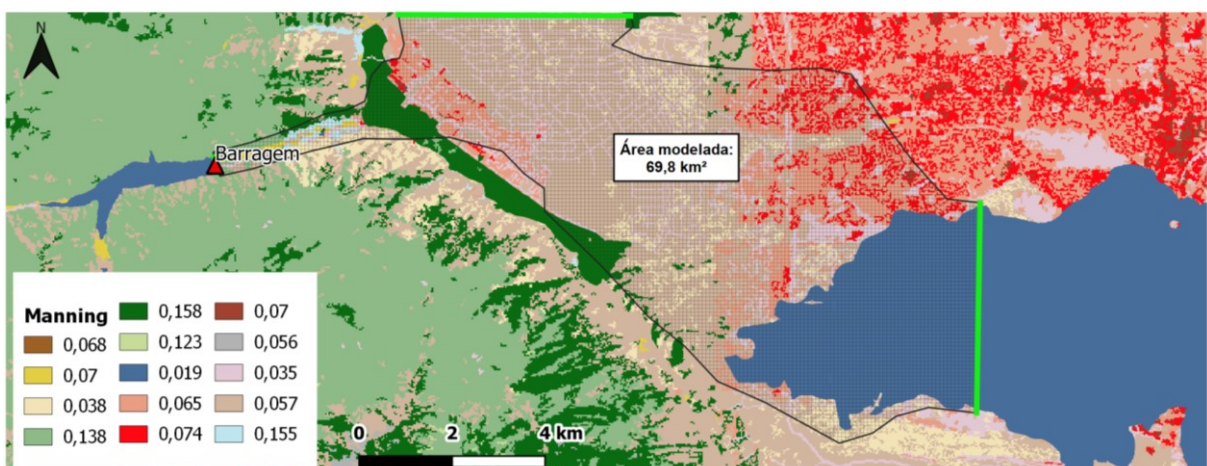


Fonte: Adaptado de Zenz e Goldgruber (2013)

4.4.1 Modelo HEC-RAS do ICOLD para simulações

O MDT utilizado possui resolução horizontal de 9,5 metros. A classificação do uso e cobertura do solo e atribuição de valores de coeficiente de rugosidade de Manning associados se baseia em 14 tipologias (Figura 4.6): águas abertas (0,019), áreas desenvolvidas de espaços abertos intensidade baixa (0,065), intensidade média (0,074) e intensidade alta (0,07), terra estéril (0,056), floresta decidual (0,138), floresta perene (0,158), floresta mista (0,123), arbustos (0,057), grama (0,038), pastagem (0,07), terras cultiváveis (0,068) e terras alagáveis com arbustos (0,155).

Figura 4.6 - Modelo bidimensional do estudo de caso do ICOLD utilizado nas simulações com o HEC-RAS



A área de abrangência do modelo desenvolvido no HEC-RAS é de 69,8 km² (Figura 4.6). A malha computacional foi definida por células de 50 x 50 m, com refinamento de 40 x 40 m no talvegue a jusante no vale encaixado, e células de 100 x 100 m na área do lago. As condições de contorno de jusante foram definidas como profundidade normal e se localizam em dois trechos, com declividade de 0,005 para o talvegue e 0,0001 para o lago a jusante. O tempo computacional é de um segundo e atende à condição de Courant, com valor máximo sendo a unidade. Foram utilizadas as equações de águas rasas, *shallow water equations* (SWE), para realização das simulações.

O hidrograma de ruptura utilizado foi obtido por meio do modelo paramétrico de Froehlich (2016), uma vez que é amplamente aplicado e que o objeto desse estudo se refere ao escoamento dos rejeitos após a ruptura, ou seja, sem avaliar questões sobre brecha e volume mobilizado. As equações propostas por Froehlich (2016) partiram da análise de 111 eventos de ruptura de barragens para definição de parâmetros de formação de brecha de ruptura. O modo de falha foi adotado como sendo o galgamento da estrutura e a altura da brecha sendo a própria altura da barragem. Os parâmetros calculados podem ser observados na Tabela 4.2.

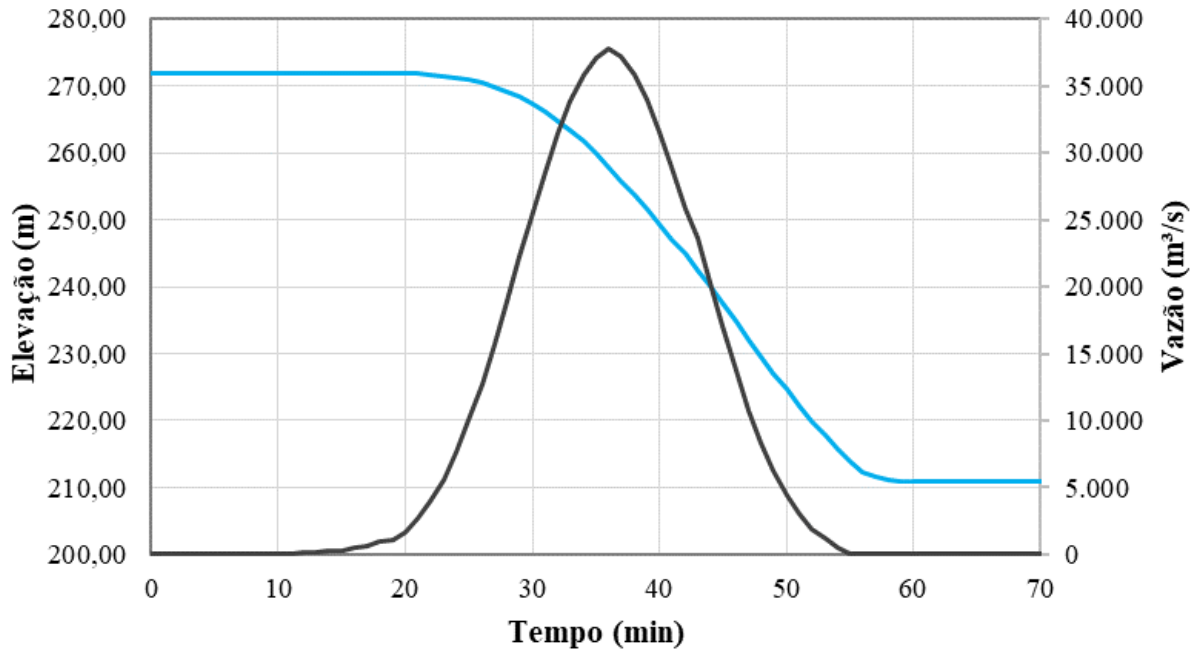
Tabela 4.2 – Parâmetros de brecha calculados com Froehlich (2016)

Parâmetros	Dados	Froehlich (2016)	Equação / Observação
Modo de falha		Galgamento	$k_0 = 1,0$ (<i>piping</i>)* $k_0 = 1,5$ (galgamento)
Volume total (Vw) (1.000 m ³)	38.276,34		
Largura média da brecha (Bm) (m)		116,27	$B_m = 0,23k_0V_w^{1/3}$
Largura mínima da brecha (m)		55,27	
Elevação da crista da barragem (m)	272,00		
Elevação do pé do maciço (m)	211,00		
Elevação do fundo da brecha (m)	211,00		
Altura da barragem (m)	61,0		
Altura da brecha (Hb) (m)	61,0		
Tempo de formação da brecha (h)		0,54	$t_f = 60,0 \sqrt{\frac{V_w}{gH_b^2}}$
Inclinação lateral esquerda (H:1V)		1,0	
Inclinação lateral direita (H:1V)		1,0	
Modo de progressão		Curva "S" Senoidal	

* k_0 é o coeficiente de ajuste em função do modo de falha

Após o cálculo dos parâmetros, estes foram inseridos no HEC-RAS para obtenção do hidrograma de ruptura causado pela abertura de brecha e esvaziamento do reservatório (Figura 4.7), que resultou em uma vazão de pico de 37.826,19 m³/s.

Figura 4.7 - Hidrograma de ruptura utilizado nas simulações



4.4.2 Sensibilidade a partir de abordagem probabilística

As simulações probabilísticas foram desenvolvidas neste trabalho para identificar a sensibilidade associada aos parâmetros reológicos no que tange sua variabilidade e influência nos resultados simulados. Como já mencionado, alguns autores apresentaram análises probabilísticas com foco nessas incertezas (CONTRERAS *et al.*, 2020; CEPEDA *et al.*, 2013; IACCARINO, 2008; STOWE *et al.*, 2020; ZEGERS *et al.*, 2020).

Para desenvolvê-las, foi utilizado o método de amostragem *Latin Hypercube Sampling* (LHS), proposto inicialmente por McKay *et al.* (1979). O LHS é um método estatístico que gera uma amostra quase aleatória de valores de parâmetros a partir de uma distribuição multidimensional. No LHS, cada conjunto de uma variável é dividido em intervalos iguais e é obtido um valor para cada estrato (MCKAY *et al.*, 1979). Se for admitido que essas variáveis são independentes, os conjuntos de amostras são combinados entre si de forma aleatória formando uma amostra multidimensional (MCKAY *et al.*, 1979).

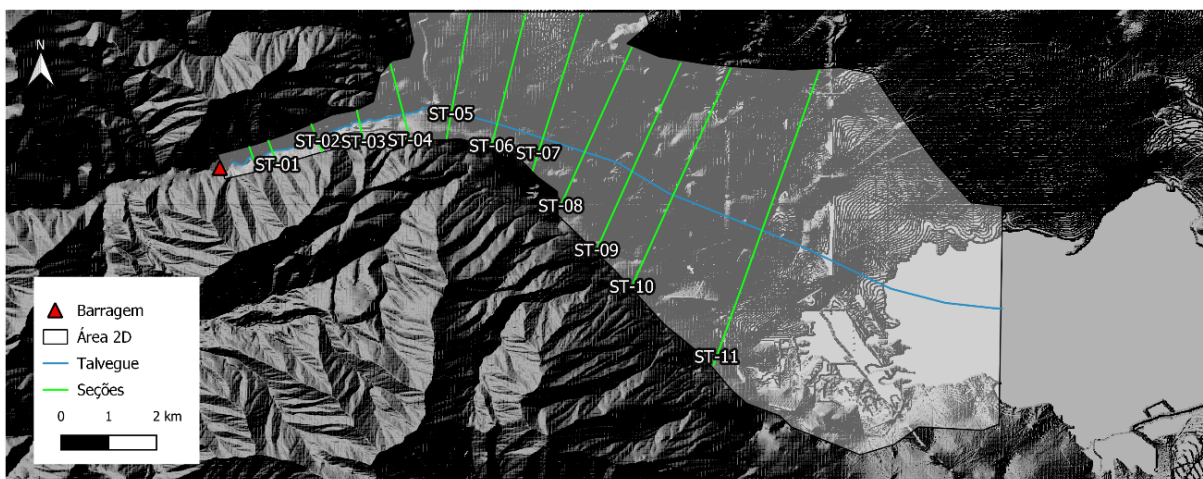
O LHS provou ser mais eficiente com relação à convergência de valores que outros métodos, como por exemplo, a amostragem de Monte Carlo, onde o esforço

computacional pode ser reduzido para mais que 50% (OLSSON *et al.*, 2003). Dessa forma, é possível utilizar um conjunto de amostras mais reduzido usando o método de amostragem do LHS.

Para obter um conjunto de amostras gerado pelo LHS é necessária a adoção de uma distribuição de probabilidade para cada parâmetro a ser variado. Alguns estudos avaliaram as distribuições de melhor ajuste às variações dos valores dos parâmetros reológicos. A viscosidade dinâmica (μ), segundo Iaccarino (2008) e, mais recentemente, De La Rosa *et al.* (2021), segue uma distribuição normal. A distribuição de probabilidade da concentração volumétrica de sólidos (C_v) de rejeitos foi avaliada segundo dados medidos em comparação à distribuição normal, por Pirouz *et al.* (2017). Contreras *et al.* (2020) obtiveram distribuições estatísticas normal, lognormal, gama e beta a partir de parâmetros reológicos. Devido à escassez de estudos e robustez dos dados utilizados nesses ajustes de distribuição de probabilidade, adotou-se a distribuição uniforme para variação de todos os parâmetros reológicos deste estudo de caso. Na análise de sensibilidade realizada por Zegers *et al.* (2020), os autores também adotaram a distribuição uniforme para variação dos parâmetros de reologia de escoamentos naturais de lama.

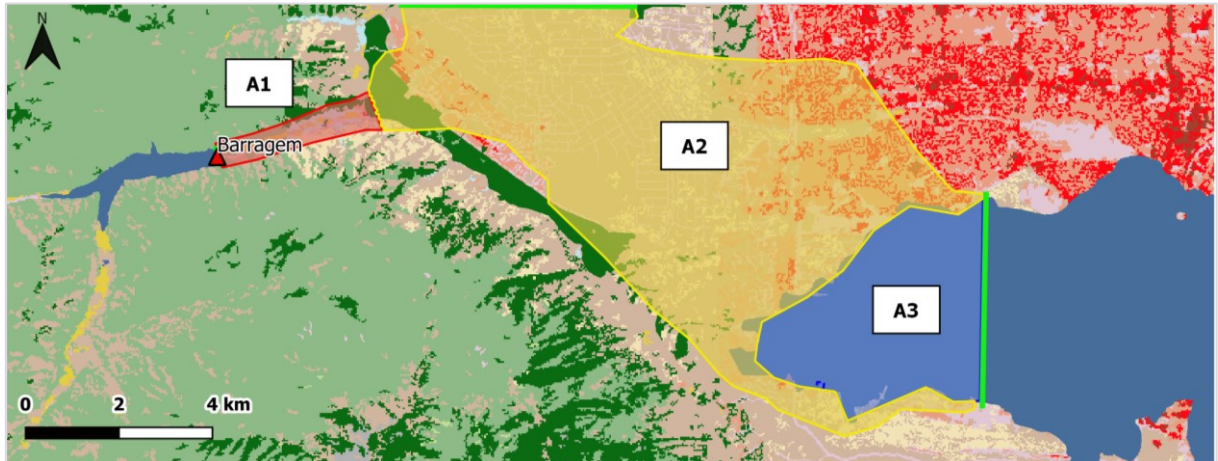
A avaliação da sensibilidade foi realizada segundo os resultados obtidos em 12 seções inseridas no modelo. Os resultados avaliados foram as profundidades máximas e tempos de chegada nas seções. O critério para o tempo de chegada adotado foi de chegada na profundidade de 1 (0,3 m) e 2 pés (0,61 m) (FEMA, 2013). Na Figura 4.8 são apresentadas as seções de análise, da seção ST-00 a ST-11, distanciadas em 1 km até a seção ST-10, e entre ST-10 e ST-11, 2 km.

Figura 4.8 - Seções de análise dos resultados dos estudos de caso do ICOLD



Para avaliação da sensibilidade, a malha computacional foi discretizada ainda em três áreas: vale imediatamente a jusante da barragem (A1), que consiste em um vale encaixado; planície de inundação localizada após o trecho montanhoso (A2); e região plana (A3) representada pelo lago na saída do modelo (Figura 4.9).

Figura 4.9 - Áreas discretizadas para avaliação da sensibilidade



Com base em Zegers *et al.* (2020), os resultados de profundidades máximas nas células da malha computacional para as áreas de interesse (A1, A2 e A3) foram avaliados a partir da Equação 4.4:

$$H_{med} = \sum_{j=0}^{Nwc} H_{max}(j) / Nwc \quad (4.4)$$

Em que: j é o índice da célula; Nwc é o número total de células inundadas ($h > 0$); e H_{max} é a profundidade máxima do escoamento.

As áreas inundadas foram analisadas nos cenários do ICOLD a partir do mapeamento gerado pelo próprio HEC-RAS, conforme elucidado no Item 4.3.

4.4.3 Cenários probabilísticos para avaliação de sensibilidade

A abordagem probabilística do estudo de caso de Zenz e Goldgruber (2013) foi realizada com base em cenários construídos a partir dos intervalos de valores levantados na literatura, que foram apresentados no Item 4.2. Os cenários probabilísticos são apresentados na Tabela 4.3, onde o cenário é denominado com a primeira parte sendo o modelo reológico utilizado, de Bingham (B) ou Herschel-Bulkley (HB), e a segunda, o estudo de caso (ICOLD).

Tabela 4.3 – Cenários de avaliação da sensibilidade do HEC-RAS a parâmetros de reologia do estudo de caso Zenz e Goldgruber (2013) do ICOLD

Cenário	Parâmetros variados	Faixas de valores da literatura	Intervalo adotado	Modelo reológico	Número de simulações
B-ICOLD	Cv (%)	9,3 - 65,0	20,0 - 60,0	Bingham	1.000
	Cvmáx (%)	49,9 - 76,5	49,0 - 61,5		
	a (Pa)	0,0000001 - 3,45	0,067 - 3,450		
	b	1,2 - 40,0	1,2 - 10,359		
HB-ICOLD	Cv (%)	9,3 - 65,0	Herschel-Bulkley	1.000	
	τ_y (Pa)	0,6 - 251,9			
	K (Pa.s ⁿ)	0,008 – 130,0			
	n	0,192 - 1,5			

A amostragem aleatória dos parâmetros com o LHS foi feita de forma independente, considerando o objetivo de analisar a sensibilidade do HEC-RAS aos parâmetros dentro dos seus intervalos de variabilidade. Foi definido o uso de 1.000 conjuntos de parâmetros para as simulações de cada cenário, uma vez que a amostragem aleatória realizada pelo LHS permite o uso de um número reduzido de amostras, em comparação ao método de Monte Carlo (OLSSON *et al.*, 2003).

No cenário B-ICOLD foram variados os parâmetros definidos no Item 4.1 (Cv, Cvmáx, a e b), do modelo de Bingham. A adoção de uma amostragem aleatória independente entre esses parâmetros de Bingham se justifica também pela limitação do HEC-RAS que utiliza um valor de Cv fixo, e logo, retorna valores fixos de tensão de escoamento (τ_y) e viscosidade dinâmica (μ), nas abordagens em que o Cv é utilizado para cálculo desses parâmetros. Além disso, a fim de evitar que as combinações entre os parâmetros retornem valores sem sentido físico, as faixas de valores e associações entre os parâmetros foram ajustadas para resultarem em valores de τ_y e μ compreendidos nos intervalos levantados na literatura, equivalente ao realizado por Zegers *et al.* (2020).

Ainda que tenham sido obtidos valores de concentração volumétrica sólidos (Cv) de estudos anteriores, optou-se por utilizar um intervalo que abrangesse as classificações de tipos de escoamento de O'Brien e Julien (1985) e Rickenmann (1991). Essas classificações são amplamente consideradas em estudos de escoamento hiperconcentrado, com intervalo de 20 a 50% de concentração volumétrica de sólidos (Cv) de O'Brien e Julien (1985) para inundações e fluxos de lama, e de 30 a 60%, de Rickenmann (1991) para fluxo hiperconcentrado. Dessa

forma, o intervalo adotado neste trabalho, foi de 20 a 60% para valores de concentração volumétrica de sólidos (C_v) para fluxo hiperconcentrado.

Com relação ao parâmetro concentração volumétrica máxima ($C_{v\text{máx}}$), o intervalo adotado considerou como máximo o valor de 61,5% relativo ao valor apresentado por Bagnold (1954). Esse valor está predefinido no HEC-RAS (USACE, 2020) e uma vez que já é maior que o valor máximo do intervalo adotado para concentração volumétrica de sólidos (C_v de 60%) foi definido como o valor máximo do intervalo de $C_{v\text{máx}}$.

Como já antecipado, os valores de C_v e $C_{v\text{máx}}$ foram sorteados de forma independente, junto aos parâmetros a e b do cenário B-ICOLD. Posteriormente, os valores da amostra de $C_{v\text{máx}}$ foram reordenados a fim de que dentro de um mesmo conjunto de parâmetros, o valor de $C_{v\text{máx}}$ seja sempre maior que o valor de C_v . Outro critério na combinação entre esses parâmetros foi para atender também aos limites de viscosidade dinâmica (μ) observados na literatura, de μ mínima igual a 0,002 Pa.s (Zengeni, 2016) e μ máxima de 100,0 Pa.s (Lumbroso *et al.*, 2021). De maneira sintética, a amostra de $C_{v\text{máx}}$ foi reordenada em função da amostra de C_v , de forma que a relação entre os parâmetros atendesse a dois critérios: $C_{v\text{máx}} > C_v$; e relação entre $C_{v\text{máx}}$ e C_v no cálculo de μ com o método de Maron e Pierce (1956 *apud* USACE, 2020) (Item 4.1) retornando valores dentro do intervalo de 0,002 – 100,0 Pa.s.

Já os valores de a e b da curva da tensão de escoamento tiveram seus intervalos ajustados para que a combinação entre os parâmetros retornasse valores dentro do intervalo de 0,085 Pa (Machado, 2017) a 1.726,33 Pa (Ribeiro, 2015). O valor de 2.396,53 Pa apresentado na Tabela 4.1 como valor máximo do estudo de Ribeiro (2015) é relativo a um C_v de 65% no Teste de slump. Em concordância ao intervalo de 20 a 60% de C_v adotado neste estudo, considerou-se o valor de 1.726,33 Pa como valor máximo de τ_y , também obtido por Ribeiro (2015) no Teste de slump relativo a C_v de 60%.

Segundo definição apontada no Item 4.1, os parâmetros variados no cenário HB-ICOLD foram C_v , τ_y , K e n . Neste cenário foram mantidos os intervalos observados na revisão de literatura realizada (Tabela 4.1), visto que os parâmetros K e n são parâmetros de calibração do modelo de Herschel-Bulkley e não possuem relação direta que permita avaliar ou limitar seus intervalos. O intervalo de concentração volumétrica de sólidos (C_v) foi mantido de 20 a 60%.

Da mesma forma, o intervalo de valores de τ_y do modelo de Herschel-Bulkley permaneceu igual ao observado nos estudos anteriores. Embora possuam o mesmo nome, as tensões de escoamento do modelo de Bingham e de Herschel-Bulkley possuem diferentes valores para um mesmo fluido. Sendo assim, o intervalo de tensão de escoamento adotado considera apenas os valores ajustados segundo modelo de Herschel-Bulkley.

Um resumo das especificações computacionais de interesse para simulações probabilísticas é apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Especificações dos modelos e das máquinas usadas nas simulações probabilísticas - ICOLD

Especificação	B-ICOLD	HB-ICOLD
Área do modelo	69,8 km ²	
Resolução da malha 2D	40 m na linha central do talvegue no vale encaixado 100 m no lago a jusante 50 m para o restante do modelo	
Número de células do modelo	21.148	
Equacionamento	Equação de Águas Rasas (<i>Shallow Water Equations</i>)	
Janela de tempo de simulação	20 h	
Número máximo de iterações computacionais	20	
Intervalo computacional	Ajustável com base em Courant: máximo = 1,0; mínimo = 0,45 1,0 - 16,0 s	
Máquina utilizada	Processador AMD Ryzen 7 3700X, 8-Core, velocidade processamento de 3,6GHz (4,4GHz Turbo), memória RAM 16 GB DDR4 e SSD M.2 4 GB/s	Processador AMD Ryzen 3 3200G, 4-Core, velocidade processamento de 3,6 GHz, memória RAM 8 GB DDR4 e SSD Sata 6 GB/s
Tempo médio por simulação	3,233 min/simulação	5,284 min/simulação

4.5 Estudo de caso: Barragem B1 em Brumadinho-MG

Neste estudo de caso foi desenvolvida a modelagem do rompimento da Barragem B1 da Mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho-MG, que rompeu no dia 25 de janeiro de 2019 (Figura 4.10), a fim de avaliar os intervalos de valores levantados neste trabalho e calibrar esses parâmetros a partir das informações levantadas sobre esse desastre.

Figura 4.10 - Região atingida pela ruptura da barragem

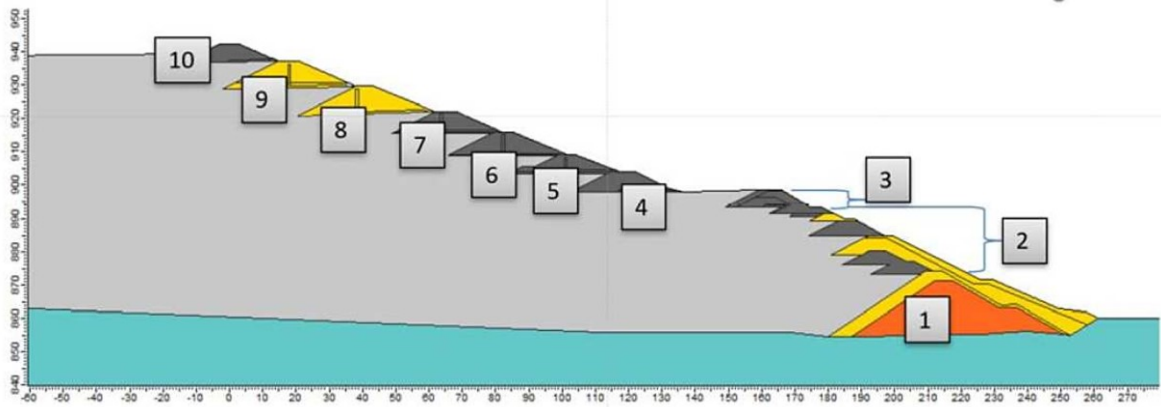


Fonte: Felipe Werneck, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) – 01/02/2019

A Barragem B1 era uma barragem de rejeitos de minério de ferro, de 86 metros de altura (El. 942 m) e 700 m de comprimento de crista (ROBERTSON *et al.*, 2019). De acordo com a Vale (2019), essa barragem estava inativa e com processo de descomissionamento em andamento. Ainda segundo a Vale (2019), a Barragem B1 em Brumadinho foi construída pelo método de alteamento a montante, em 1976, pela Ferteco Mineração e em 2001 passou a ser propriedade da Vale S.A.

O material do dique inicial da Barragem B1 era de terra, com 18 metros de altura e El. 874 m, e os alteamentos a montante construídos foram todos com rejeito (Figura 4.11), chegando até a El. 942 m em 2008, segundo Relatório de Auditoria da Controladoria-Geral do Estado de Minas Gerais (2019), onde consta o histórico da construção.

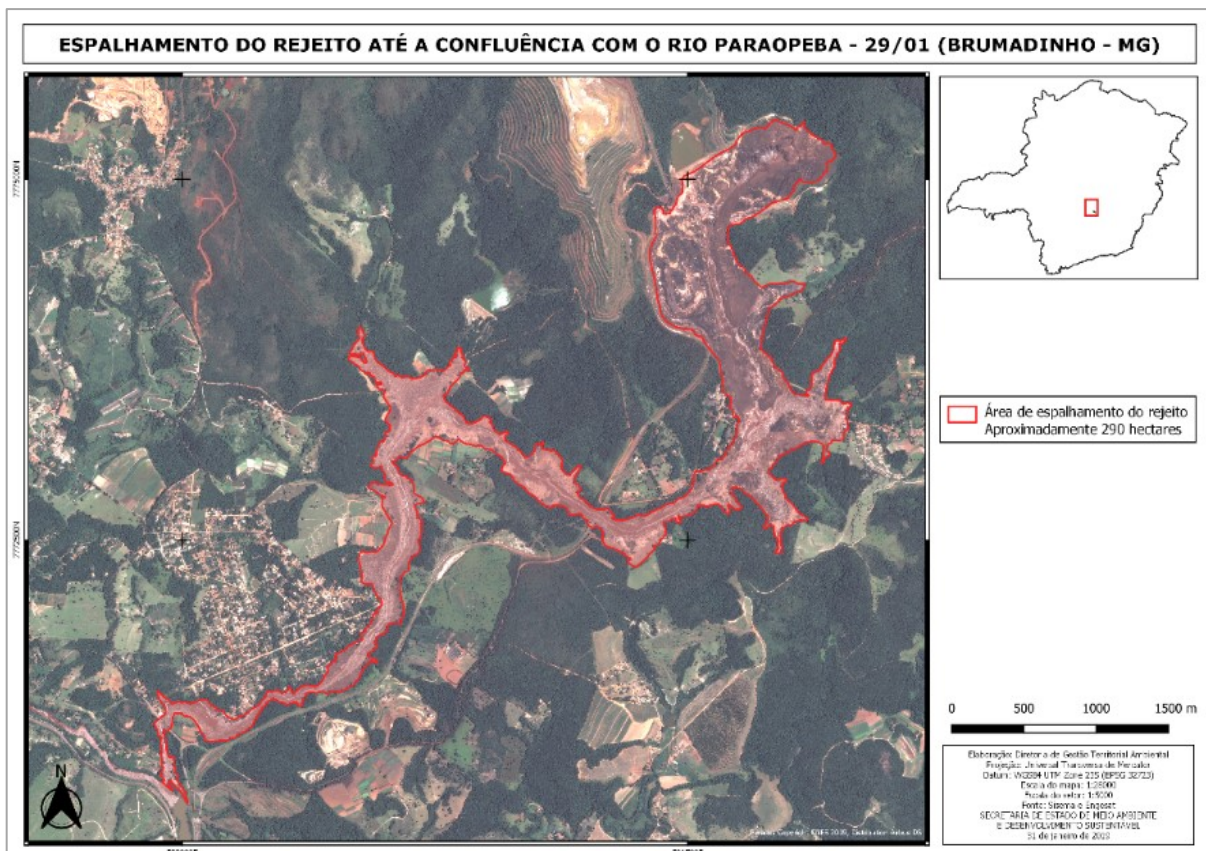
Figura 4.11- Seção transversal da Barragem B1 indicando suas etapas de construção



Fonte: Revisão Periódica de Segurança - TÜV SÜD (2018) *apud* Robertson *et al.* (2019)

No momento do rompimento, o reservatório da Barragem B1 dispunha de um volume de 11,7 milhões de m³ de rejeitos que ocupavam uma área de 249,5 mil m² (VALE, 2019). Segundo Robertson *et al.* (2019), o rejeito de minério de ferro continha hematita, goetita e magnetita. A Figura 4.12 mostra o espalhamento dos rejeitos no local atingido pelo rompimento da Barragem B1 em Brumadinho (MG).

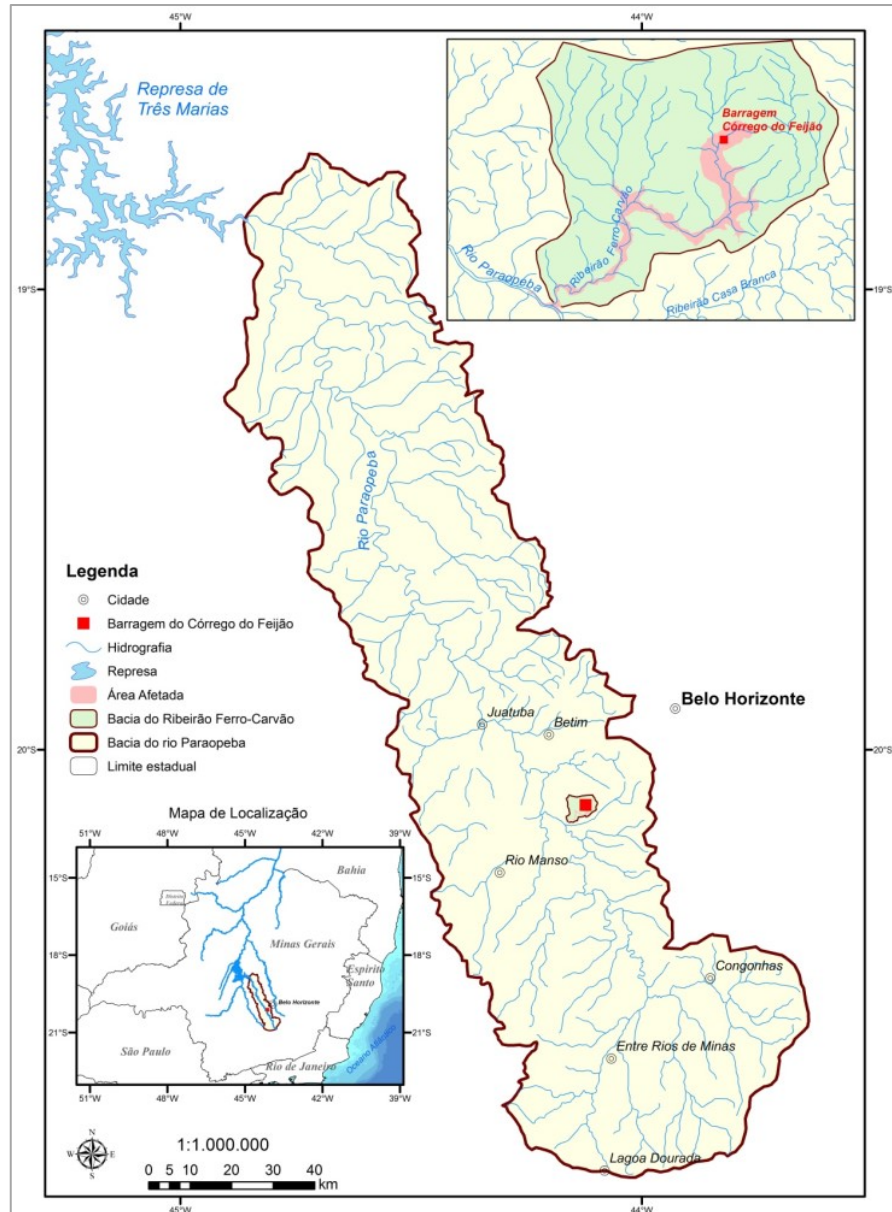
Figura 4.12 - Mancha de inundação observada no dia 29 de janeiro de 2019, do rompimento da Barragem B1 em Brumadinho



Fonte: Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – 31/01/2019.

A barragem estava localizada no ribeirão Ferro-Carvão (Córrego do Feijão), afluente do Rio Paraopeba que é um dos mais importantes tributários do Rio São Francisco. O rio Paraopeba possui uma área de drenagem de 13.640 km² e o Ribeirão Ferro Carvão, seu afluente pela margem direita, possui área de drenagem de 32,8 km² (CPRM, 2019). As bacias do Rio Paraopeba e do Ribeirão Ferro-Carvão podem ser observadas na Figura 4.13.

Figura 4.13 - Localização da bacia do Rio Paraopeba e detalhe do Ribeirão Ferro-Carvão



Fonte: CPRM (2019)

No que tange às ocupações no local, a jusante da Barragem B1 encontravam-se a área administrativa e o refeitório da VALE, a pousada Fazenda Nova Estância, o bairro Parque da Cachoeira e mais adiante o município de Brumadinho (COSTA, 2019).

A ruptura da Barragem B1 ocorreu no horário do almoço, devido a isso a maioria das 270 mortes ocorreu no refeitório dos trabalhadores da VALE (RAMAN e LIU, 2019; POLIGNANO e LEMOS, 2020). Dessa forma, o rompimento dessa barragem configura-se como um dos maiores crimes ambientais e de acidente de trabalho do Brasil (POLIGNANO e LEMOS, 2020). Somado às perdas de vida, outros impactos sociais foram provocados pela ruptura, com a destruição de estruturas públicas e privadas, perda de patrimônio imaterial e material, e alterações no estado de saúde física e mental da população (POLIGNANO e LEMOS, 2020).

Segundo o IBAMA, o material propagado na bacia do Rio Paraopeba causou a destruição de 133,27 ha de vegetação nativa de Mata Atlântica e 70,65 ha de áreas de proteção permanente (APP) (POLIGNANO e LEMOS, 2020). No que tange ao abastecimento público de água, de acordo com Polignano e Lemos (2020), a bacia hidrográfica do Rio Paraopeba é responsável pelo abastecimento de cerca de 53% da população metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), sendo assim, a contaminação das águas é um dos maiores impactos ambientais causados por esse desastre.

Esse desastre ocasionou também perdas econômicas significativas, tanto para as empresas responsáveis pelas infraestruturas quanto para a sociedade de forma geral (COELHO, 2018). Em fevereiro de 2021, a VALE assinou junto ao governo de Minas Gerais um acordo de reparação do desastre de Brumadinho de R\$ 37,68 bilhões com vigência de 10 anos³.

4.5.1 Modelo HEC-RAS da Barragem B1 para simulações

Para o modelo hidráulico deste estudo de caso, desenvolvido no HEC-RAS, a cobertura e ocupação do solo foi delimitada com base em imagem de satélite anterior ao desastre e os valores de coeficiente de Manning adotados foram os mesmos do estudo de Lumbroso *et al.* (2021) (Tabela 4.5).

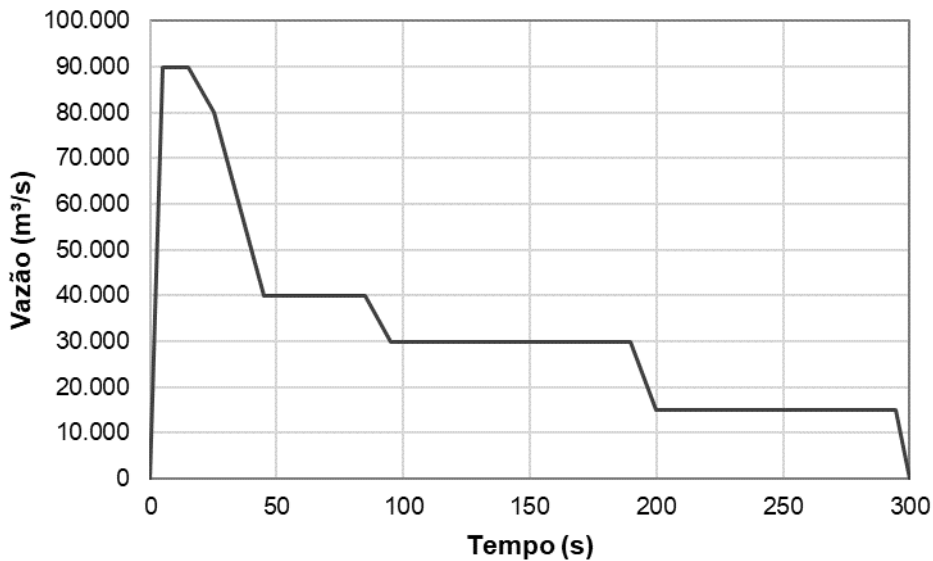
³ <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2021/02/04/vale-assina-acordo-bilionario-de-r-3768-bilhoes-para-reparar-danos-causados-em-brumadinho.ghtml>

Tabela 4.5 - Usos do solo e valores de coeficiente de Manning usados no cenário B-B1

Tipo de uso do solo	Valores de coeficiente de rugosidade de Manning
Vegetação densa	0,167
Vegetação esparsa	0,063
Solo exposto	0,031
Área urbanizada	0,25

Fonte: Adaptado de Lumbroso *et al.* (2021)

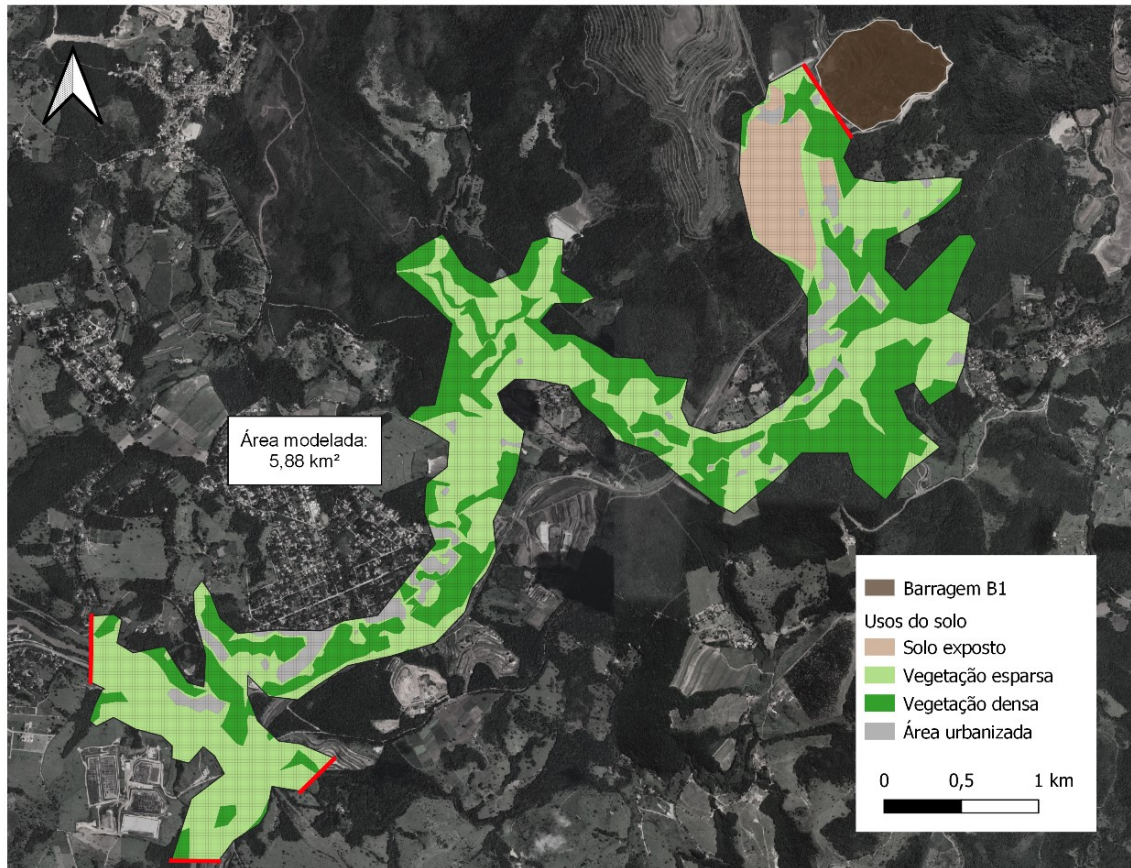
Como condição de contorno de montante foi adotado o hidrograma de ruptura de Lumbroso *et al.* (2021) com vazão de pico de 90.000 m³/s, no qual o volume é liberado em cinco minutos (Figura 4.14). Esse hidrograma de ruptura foi sintetizado por esses autores por meio do programa EMBREA-MUD. Como condição de contorno de jusante, na confluência com o Rio Paraopeba, adotou-se a profundidade normal. O tempo computacional é de 1 segundo, e segue a condição de Courant.

Figura 4.14 - Hidrograma de ruptura utilizado na modelagem hidrodinâmica

Fonte: Adaptado de Lumbroso *et al.* (2021)

O modelo hidráulico (Figura 4.15) construído para modelagem no HEC-RAS possui topografia de precisão disponibilizada pela VALE com resolução de 1 m. A malha computacional traçada possui célula de 20 x 20 m, com refinamento no talvegue de 15 m.

Figura 4.15 - Modelo HEC-RAS utilizado nas simulações da Barragem B1



4.5.2 Calibração de mancha de inundação a partir de ruptura real

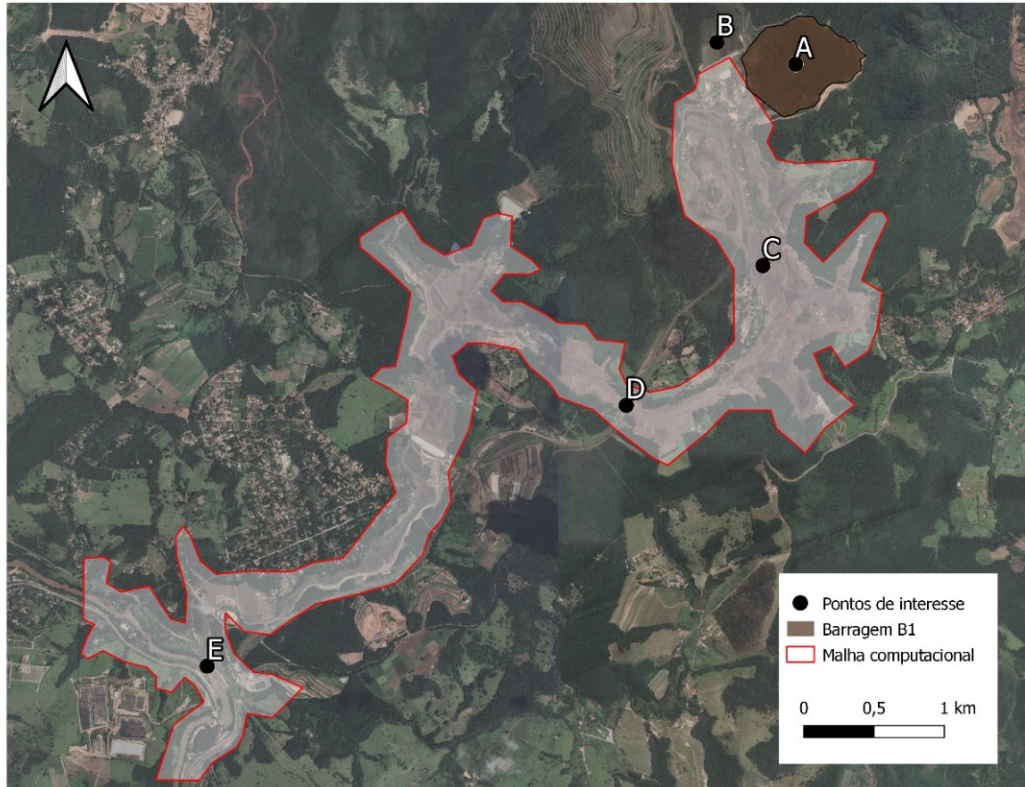
A calibração da mancha de inundação a partir da variação dos parâmetros reológicos teve como objetivo principal a aproximação entre a envoltória de inundação simulada e a observada na ruptura real. A mancha da ruptura ocorrida foi disponibilizada pelo IBGE⁴ com os limites dos rejeitos no dia 29 de janeiro de 2019.

Os tempos de chegada da onda de ruptura também auxiliaram na calibração dos parâmetros de reologia. Os tempos de chegada considerados foram levantados por Ligier (2020) e estimados para três pontos: refeitório (C), ponte ferroviária (D) e Rio Paraopeba (E). Esses tempos foram comparados também a estudos anteriores que modelaram essa ruptura, de Lumbroso *et al.* (2021) e Gibson *et al.* (2022). Assim, foram avaliadas as profundidades máximas e tempos de chegada nesses locais, adotando a mesma identificação utilizada por Lumbroso *et al.* (2021) para os pontos

⁴ <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/23808-novos-dados-geoespaciais-mostram-area-atingida-pelo-rompimento-da-barragem>

de interesse (Figura 4.16): o refeitório (ponto C) está localizado a 1,4 km do eixo da barragem, a ponte ferroviária (ponto D), a 3,4 km, e a confluência com o Rio Paraopeba (ponto E), a 9,2 km.

Figura 4.16 - Localização no modelo dos pontos de interesse para análise de resultados



A é antiga Barragem B1; B é a Barragem VI; C é o antigo refeitório da mina; D é uma ponte ferroviária que desabou após a ruptura; E é a confluência com o Rio Paraopeba

Para calibração da mancha de inundação, foi utilizada a Equação 4.5 que avalia a envoltória máxima de inundação com o índice *Fit metric F* (BATES e DE ROO, 2000; FLEISCHMANN *et al.*, 2019). Nessa equação, A se refere à mancha observada, e B, à mancha simulada (HEC-RAS), sendo este um índice que relaciona apenas as áreas de inundação. A métrica F varia de 0 a 100%, sendo 100% correspondente ao máximo de acerto da área inundada.

$$F = \frac{100\% \cdot (A \cap B)}{A \cup B} \quad (4.5)$$

4.5.3 Cenário probabilístico para calibração de parâmetros reológicos

Neste estudo de caso real, da antiga Barragem B1 em Brumadinho-MG, o cenário das simulações foi definido com base nos valores e faixas dos estudos de Ribeiro (2015), Zengeni (2016), Machado (2017), Robertson *et al.* (2019), Ligier (2020), Lumbroso *et al.* (2021) e Gibson *et al.* (2022). Esses autores fizeram ensaios reológicos com

rejeitos de minério de ferro, ou ainda, consideraram o comportamento desses rejeitos ao escoar na realização de modelagens hidrodinâmicas. Os parâmetros variados definidos no Item 4.1 foram C_v , μ e τ_y .

Dentre esses estudos, Ligier (2020), Gibson *et al.* (2022) e Lumbroso *et al.* (2021) realizaram a modelagem de ruptura da antiga Barragem B1, sendo este último usado como referência pelos outros dois. O intervalo de C_v foi adotado com o mesmo critério dos cenários de B-ICOLD e HB-ICOLD, considerando os estudos de O'Brien e Julien (1985) e Rickenmann (1991).

Dessa forma, o cenário probabilístico considerou as faixas de valores observadas na literatura para rejeitos de minério de ferro (Tabela 4.1). Levando em conta esses intervalos, foram realizados testes iniciais de forma determinística, a fim de realizar uma calibração inicial dos parâmetros. O cenário é denominado pelo modelo de Bingham (B) e estudo de caso da Barragem B1 (B1). A partir desses intervalos também foram sorteados com o LHS, 1.000 conjuntos de parâmetros, onde estes parâmetros foram variados de forma independente entre si. Neste estudo de caso também foi adotada a distribuição uniforme para a amostragem aleatória de cada parâmetro, assim como adotado no estudo de caso do ICOLD (Item 4.4.2). As simulações foram realizadas com base no cenário apresentado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Limites de referência para definição de parâmetros reológicos a partir de calibração de mancha de inundação com base em ruptura real

Cenário	Parâmetros variados	Faixas de valores da literatura	Intervalo adotado	Resultados a serem comparados	Modelo reológico	Número de simulações
B-B1	C_v (%)	21,8 - 60,0	20 - 60	área inundada e tempos de chegada	Bingham	1.000
	μ (Pa.s)	0,0071 - 100,0	30 - 100			
	τ_y (Pa)	0,085 - 1.726,33	250 - 1.726,33			

Um resumo, para cada cenário, das especificações computacionais de interesse para simulações probabilísticas, é apresentado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Especificação do modelo e da máquina usada nas simulações probabilísticas – Barragem B1

Especificação	B-B1
Área do modelo	5,88 km ²
Resolução da malha 2D	15 m nos talwegues modelados 15 m no maciço da Barragem VI 20 m para o restante do modelo
Número de células do modelo	14.624
Equacionamento	Equação de Águas Rasas (<i>Shallow Water Equations</i>)
Janela de tempo de simulação	5 h
Número máximo de iterações computacionais	20
Intervalo computacional	Ajustável com base em Courant: máximo = 1,0; mínimo = 0,45 1,0 - 64,0 s
Máquina utilizada	Processador AMD Ryzen 3 3200G, 4-Core, velocidade processamento de 3,6 GHz, memória RAM 8 GB DDR4 e SSD Sata 6 GB/s
Tempo médio por simulação	4,8 min/simulação

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de sensibilidade da modelagem hidrodinâmica de escoamento hiperconcentrado a parâmetros reológicos e da calibração de parâmetros reológicos, apoiada em dados observados, são apresentados a seguir.

5.1 Sensibilidade na modelagem hidrodinâmica devido a parâmetros reológicos: barragem de Zenz e Goldgruber (2013) – ICOLD

A avaliação da sensibilidade da modelagem partiu da amostragem definida pelo LHS para os cenários B-ICOLD e HB-ICOLD e apresentada no item seguinte. A sensibilidade do modelo hidrodinâmico observada em cada cenário é apresentada conforme resultados obtidos nas seções e áreas de interesse do domínio modelado. Apresentam-se também os mapas probabilísticos, que indicam as probabilidades de inundação das células nos cenários simulados.

5.1.1 Amostragem dos parâmetros dos cenários B-ICOLD e HB-ICOLD

As simulações realizadas para os estudos de caso partiram da definição do espaço amostral. A Figura 5.1 e Figura 5.2 apresentam os conjuntos de parâmetros LHS utilizados nas 1.000 simulações de cada cenário, B-ICOLD e HB-ICOLD, respectivamente, do estudo de caso de Zenz e Goldgruber (2013).

Os pontos definidos cobrem de maneira uniforme todo espaço amostral, admitindo um número reduzido de amostras. Nestes cenários o espaço multidimensional apresentado é de quatro dimensões, uma vez que em cada cenário são variados quatro parâmetros simultaneamente. Dessa forma, além dos eixos que representam três parâmetros, inclui-se uma escala de cor para representar o quarto parâmetro.

Figura 5.1 - Amostragem de parâmetros do cenário B-ICOLD

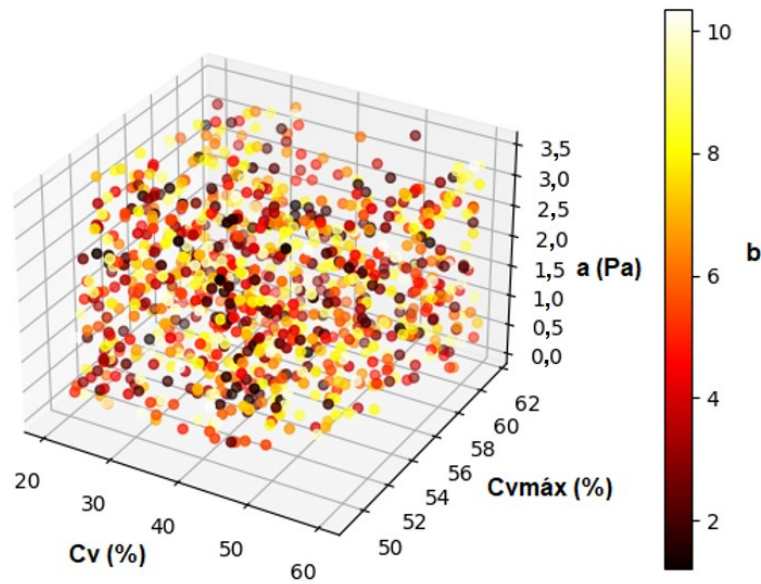
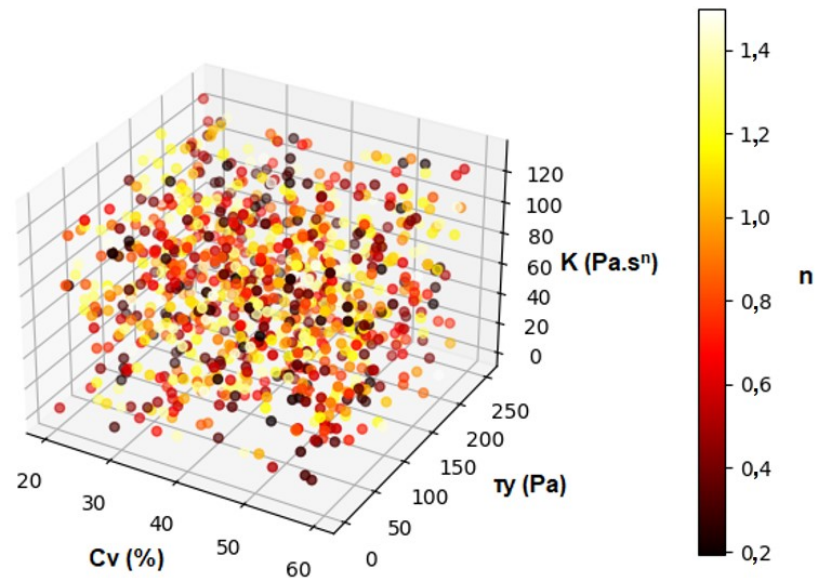


Figura 5.2 - Amostragem de parâmetros do cenário HB-ICOLD



5.1.2 Sensibilidade do modelo de Bingham do ICOLD (B-ICOLD)

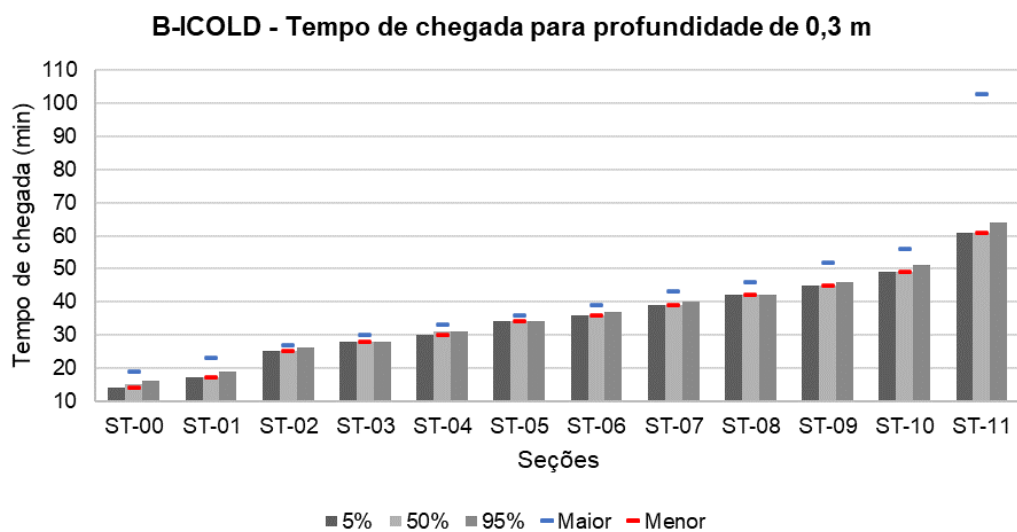
Nas 1.000 simulações do cenário B-ICOLD, os erros de volume foram armazenados ao final de cada simulação, com erros entre 0,002 e 0,05%, sendo considerados erros extremamente baixos a muito baixos (USACE, 2021). Dessa forma, todas as simulações foram mantidas na análise dos resultados.

Inicialmente, avaliou-se a variação de profundidades máximas e tempos de chegada nas seções de análise do modelo (Figura 4.8). As profundidades máximas também

foram avaliadas nas células do modelo em cada área de interesse (Figura 4.9) por meio da profundidade máxima média (Hmed).

Os resultados de tempos de chegada da onda de inundação na profundidade de 0,3 m nas seções analisadas são ilustrados na Figura 5.3. Esses resultados foram obtidos avaliando a probabilidade de excedência dos tempos de chegada simulados nas 1.000 simulações realizadas. Em complemento, foram avaliadas as máximas variações, ou seja, os valores máximos e mínimos obtidos nas simulações para cada seção.

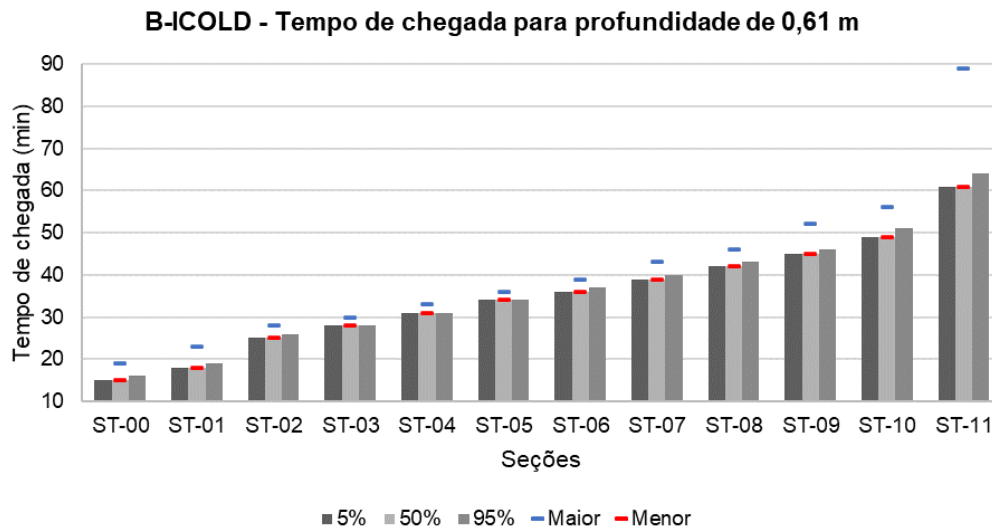
Figura 5.3 - Probabilidade de excedência dos tempos de chegada para profundidade de 0,3 m nas seções de análise – B-ICOLD



A maior variação (40,8%) (em relação ao valor máximo obtido) ocorreu na última seção do modelo (ST-11), onde o tempo de chegada da onda para a profundidade de 0,3 m variou entre 61 e 103 minutos. Já a menor variação ocorreu na seção ST-05, entre 34 e 36 minutos, igual 5,6%, sendo essa seção localizada na transição entre o vale encaixado e a planície de inundação no terreno.

Na Figura 5.4, os resultados de tempos de chegada para a profundidade de 0,61 m também apresentaram a maior variação dos valores na seção ST-11 (31,5%), mas com a diminuição do intervalo de variação, entre 61 e 89 minutos. Neste cenário é possível observar a influência do limiar adotado para o tempo de chegada, uma vez que o limiar de 0,61 m não foi atingido, por exemplo, na simulação correspondente ao resultado anteriormente apresentado (na seção ST-11 com limiar de 0,3 m), que foi igual a 103 minutos. A menor variação também ocorreu na seção ST-05, igual a 5,6%.

Figura 5.4 - Probabilidade de excedência dos tempos de chegada para profundidade de 0,61 m nas seções de análise – B-ICOLD



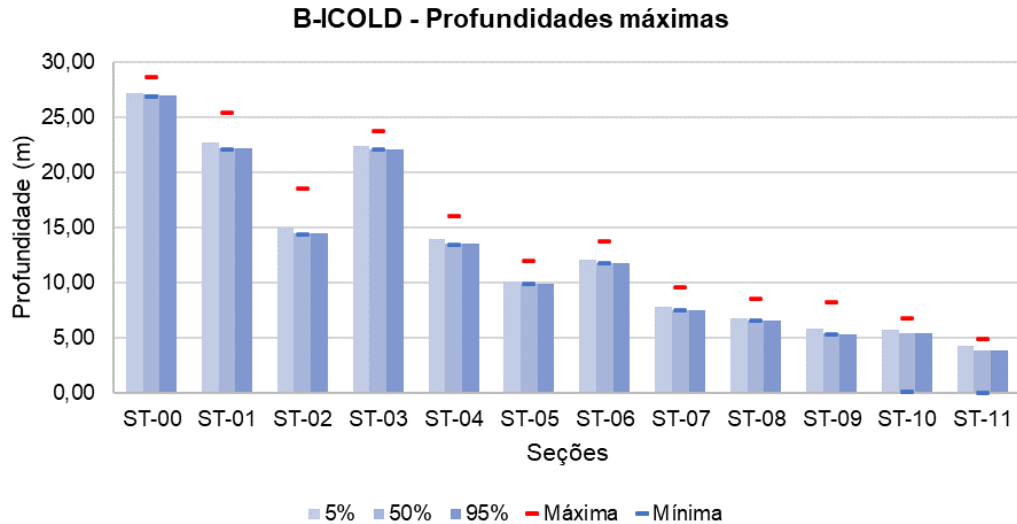
De forma geral, os tempos de chegada apresentaram uma variação de 2 a 7 minutos nas simulações realizadas, exceto na última seção. Já avaliando os resultados nas seções em termos de probabilidade de excedência, entre os tempos de chegada para a profundidade de 0,3 m e 0,61 m há uma diferença mínima (Figura 5.3 e Figura 5.4).

Os resultados obtidos indicam que para esse estudo de caso, aspectos como o volume propagado, declividades do terreno, coeficiente de rugosidade, dentro outros, podem influenciar mais os resultados de tempo de chegada do que a variação dos parâmetros reológicos. Observa-se que a variação dos parâmetros reológicos impactou mais significativamente nos tempos de chegada na seção mais a jusante (ST-11), a cerca de 15 km da barragem. Dessa forma, avaliar a sensibilidade da modelagem a parâmetros reológicos com relação a tempos de chegada, bem como o limiar adotado, pode ser mais relevante à medida que as áreas de interesse estão mais distantes da barragem estudada.

Entre as seções ST-00 e ST-09, as profundidades máximas nas seções sofreram variação de 1,7 m (ST-00) a 4,1 m (ST-02) com as alterações dos parâmetros reológicos. Nas últimas seções, as profundidades máximas obtidas sofreram maior variação, variando entre 0,14 m e 6,84 m, e 0,04 m e 4,93 m, nas seções ST-10 e ST-11, respectivamente. Essa variação pode estar relacionada à parada do volume a montante causada pela variação dos parâmetros de reologia. As probabilidades de

excedência de profundidades máximas em cada seção para as 1.000 simulações realizadas são apresentadas na Figura 5.5.

Figura 5.5 - Probabilidade de excedência das profundidades máximas nas seções de análise – B-ICOLD



A diferença observada nas profundidades máximas nas seções foi mínima com relação às probabilidades de excedência (Figura 5.5). Isso pode estar relacionado à avaliação da profundidade máxima ao longo de toda a seção, o que não representaria bem o que ocorre na área bidimensional modelada. Por essa razão, as profundidades também foram avaliadas nas células do modelo por meio da profundidade máxima média (Hmed) em cada área de interesse.

A partir dos resultados obtidos para as saídas de resultados de área inundada e profundidade máxima média por célula (Hmed) (Equação 4.4), observou-se a relação direta entre cada saída e cada parâmetro variado neste cenário. Da Figura 5.6 à Figura 5.9 apresenta-se graficamente como os resultados de área variam com a alteração dos parâmetros de reologia, sendo possível avaliar se ocorre uma relação direta entre um par de parâmetros (saída e entrada).

Figura 5.6 - Relação entre área inundada e Cv em 1.000 simulações do cenário B-ICOLD

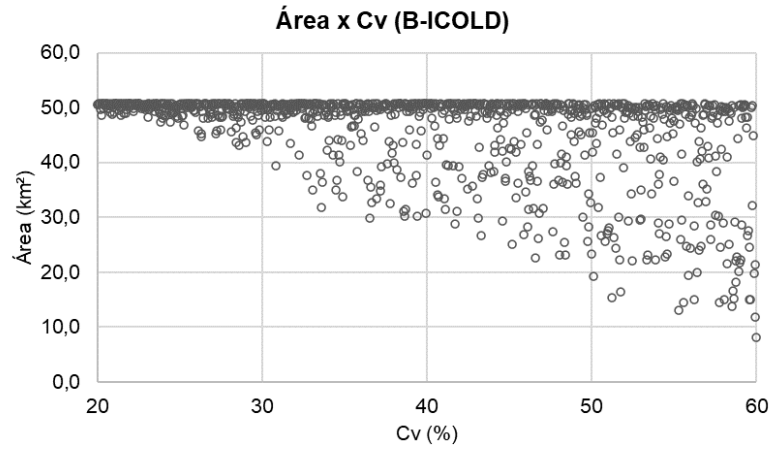


Figura 5.7 - Relação entre área inundada e Cvmax em 1.000 simulações do cenário B-ICOLD

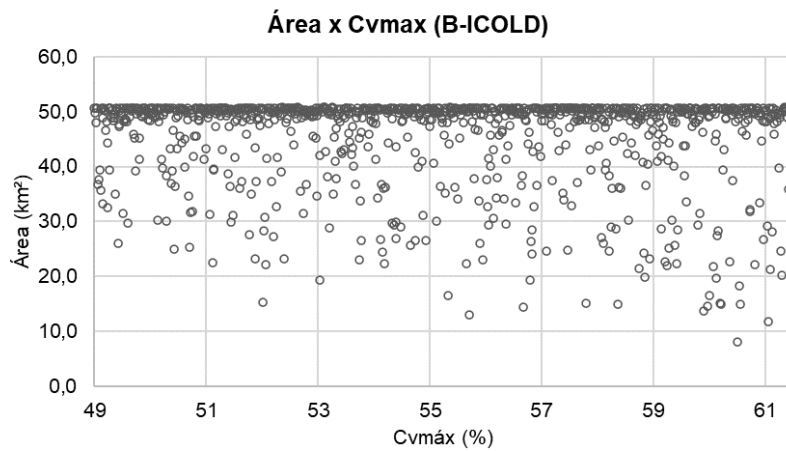


Figura 5.8 - Relação entre área inundada e a em 1.000 simulações do cenário B-ICOLD

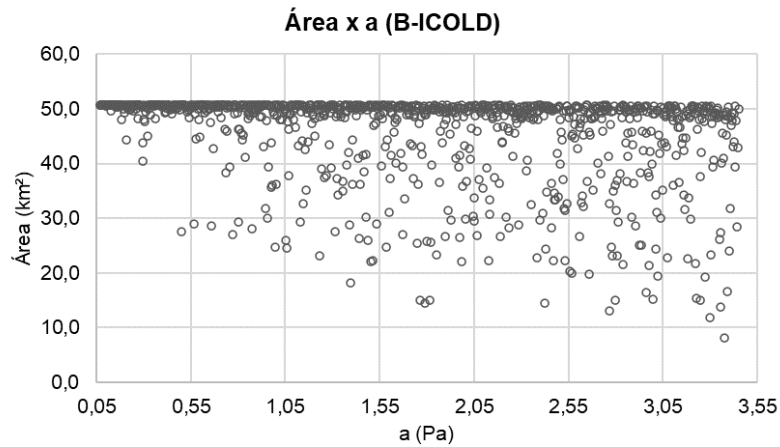
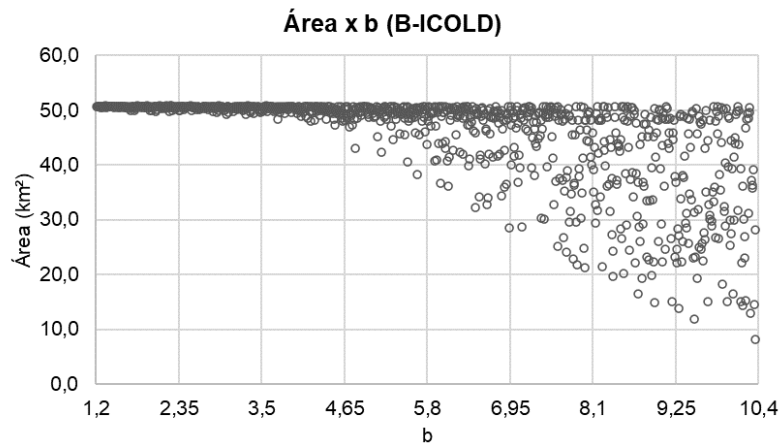


Figura 5.9 - Relação entre área inundada e b em 1.000 simulações do cenário B-ICOLD



No cenário de B- ICOLD, a área máxima obtida foi de 50,8 km² e a menor, 8,1 km². Observa-se (da Figura 5.6 à Figura 5.9) que a maioria das simulações retornaram valores semelhantes ao valor máximo. Cerca de 68% das simulações resultaram em áreas inundadas próximas em até 5% da área máxima obtida (entre 48,2 km² e 50,8 km²), apontando que diferentes conjuntos de parâmetros reológicos resultaram em valores semelhantes de área inundada. Observa-se que esse limiar máximo de área inundada se refere a uma possível limitação do modelo, devido ao terreno, à rugosidade, ao volume escoado, ou ainda aos diferentes conjuntos de parâmetros reológicos, que não permitem a inundação de áreas maiores do que esse limiar.

Nos pares de relações com a área inundada, os quatro parâmetros, C_v , C_{vmax} , a e b (da Figura 5.6 à Figura 5.9) indicaram uma tendência, em que o aumento desses valores de entrada causa uma redução da área inundada. Essa influência foi mais perceptível entre a área inundada e os valores de b da curva da tensão de escoamento (Figura 5.9), da qual esse parâmetro é expoente, bem como com a variação do C_v . Dessa forma, parte das simulações que retornaram áreas inundadas menores estão relacionadas ao aumento dos parâmetros b e C_v .

As relações entre H_{med} e cada parâmetro (Figura 5.10 e Figura 5.11) foram obtidas para cada área de interesse (Figura 4.9): vale imediatamente a jusante da barragem (A1); planície de inundação localizada após o trecho montanhoso (A2); e região do lago (A3).

Figura 5.10 - Relações entre as profundidades máximas médias (Hmed) por célula e os parâmetros Cv e Cvmax, nas áreas de interesse – B-ICOLD

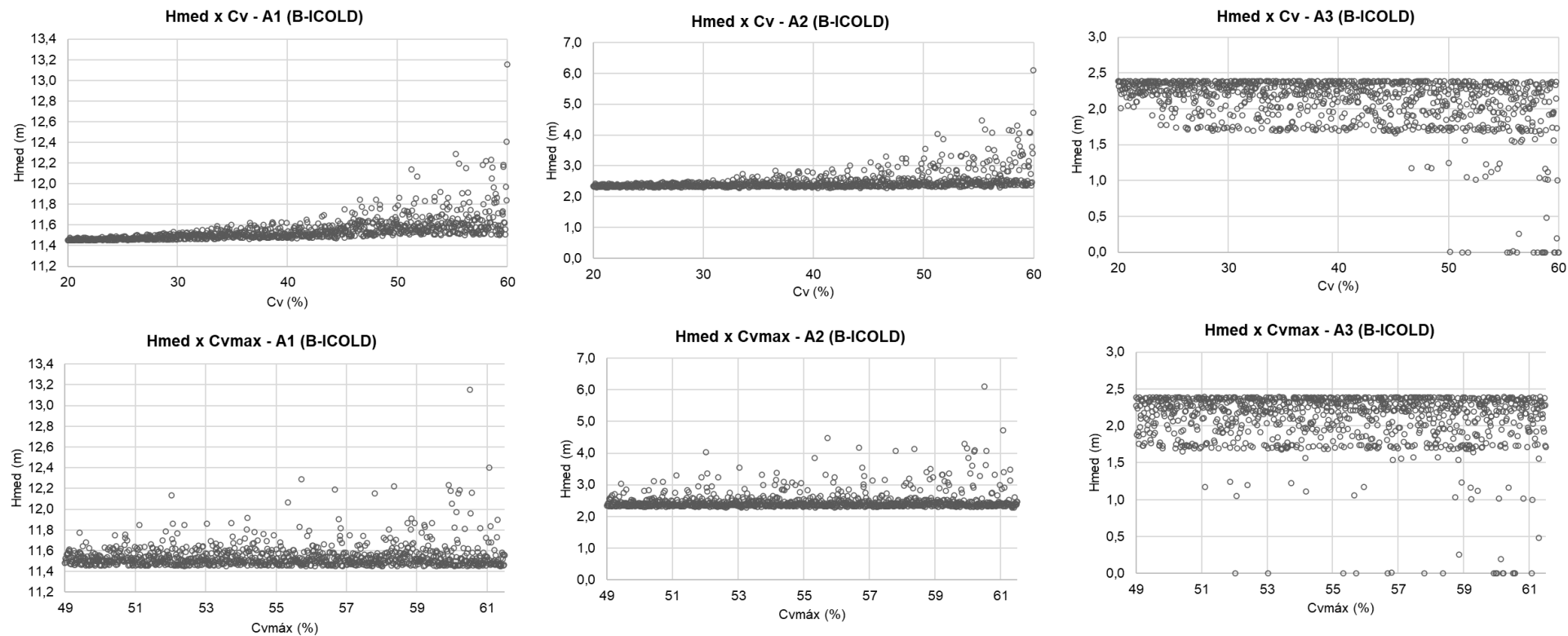
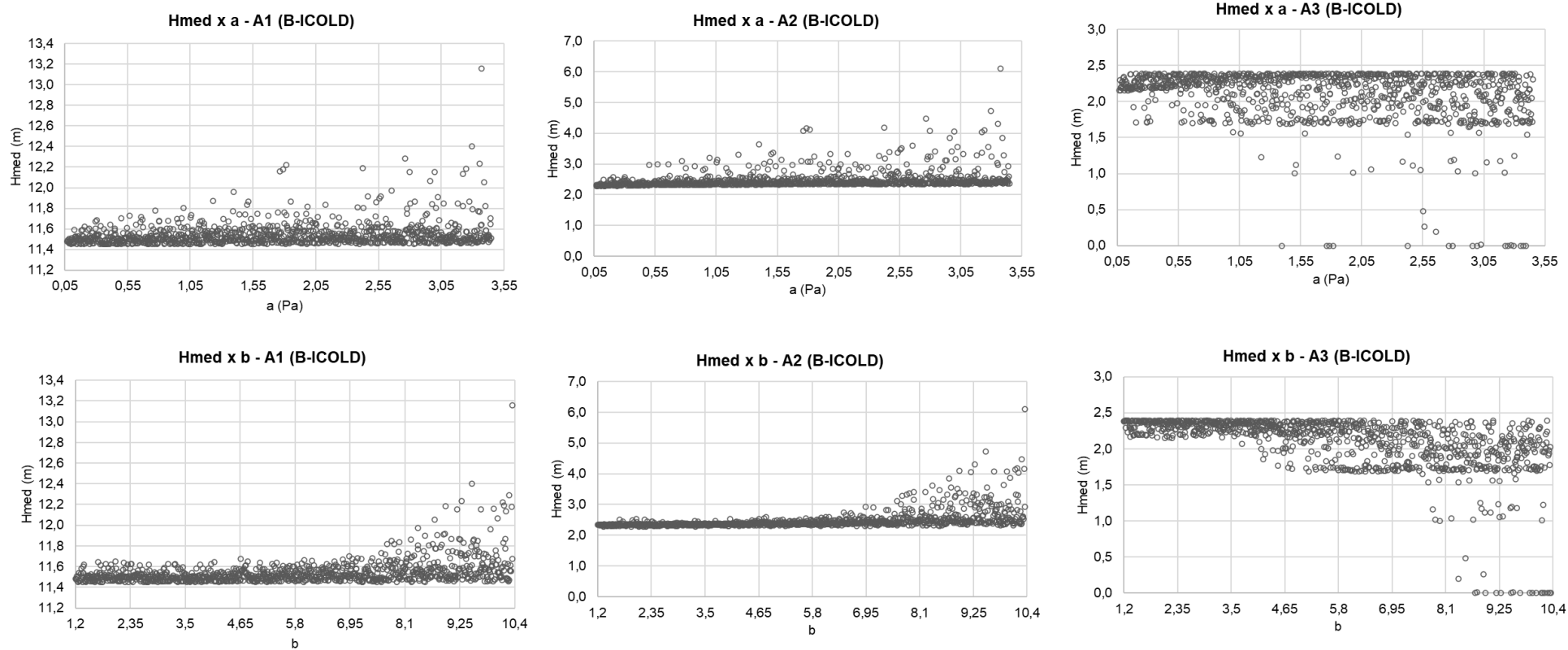


Figura 5.11 - Relações entre as profundidades máximas médias por célula e os parâmetros a e b , nas áreas de interesse – B-ICOLD



Na Figura 5.10, é possível observar que na região A1, as profundidades atingidas foram maiores em razão da topografia de vale encaixado nesse trecho imediatamente a jusante da barragem, com profundidades máximas médias nas células entre 11,45 m e 13,16 m. Essa profundidade foi reduzida nas regiões A2 e A3, por conta do espalhamento do fluido não-newtoniano na planície de inundação. Na área A2, as profundidades máximas médias variaram de 2,27 m a 6,11 m, e na área A3, de 0 a 2,39 m. Nas regiões A1 e A2, percebe-se um leve aumento das profundidades quando o C_v aumenta, e na região A3 não é possível inferir nenhuma relação graficamente. Ainda na Figura 5.10, não é possível observar uma relação entre H_{med} e C_{vmax} nas áreas de interesse.

Na Figura 5.11, não se mostra evidente uma relação direta entre H_{med} e a . E entre H_{med} e b , verifica-se que nas regiões A1 e A2 para valores maiores de b , a partir de 6,95, aproximadamente, os valores de H_{med} foram maiores.

Analisando as regiões de interesse, percebe-se um limiar de profundidade máxima média na região A1, sendo que nas 1.000 simulações realizadas não ocorreram valores menores que 11,45 m neste cenário. Na região A1, 98,6% das simulações retornaram valores próximos em até 5% do limiar mínimo (entre 11,45 m e 12,02 m). Ou seja, nesse trecho a variação dos parâmetros reológicos não impacta de forma significativa os resultados de profundidade máxima, ainda que o aumento dos parâmetros C_v e b esteja relacionado ao aumento da profundidade máxima média nessa região para algumas simulações.

Um limiar também foi observado na região A2, com valor mínimo de 2,3 m, onde 56,4% das simulações retornaram resultados de profundidade máxima média próximos desse limiar. Nessa região, a variação dos parâmetros reológicos causa maior influência nos resultados de profundidade máxima, onde o aumento associado dos parâmetros C_v e b , causa o aumento das profundidades simuladas. Em contrapartida, na região A3, o limiar observado se refere ao valor máximo de 2,4 m, onde 64,3% dos valores de H_{med} ficaram próximos (5%) desse limiar. Essa limitação nos resultados de profundidade máxima média pode estar associada a condição de contorno de jusante no lago.

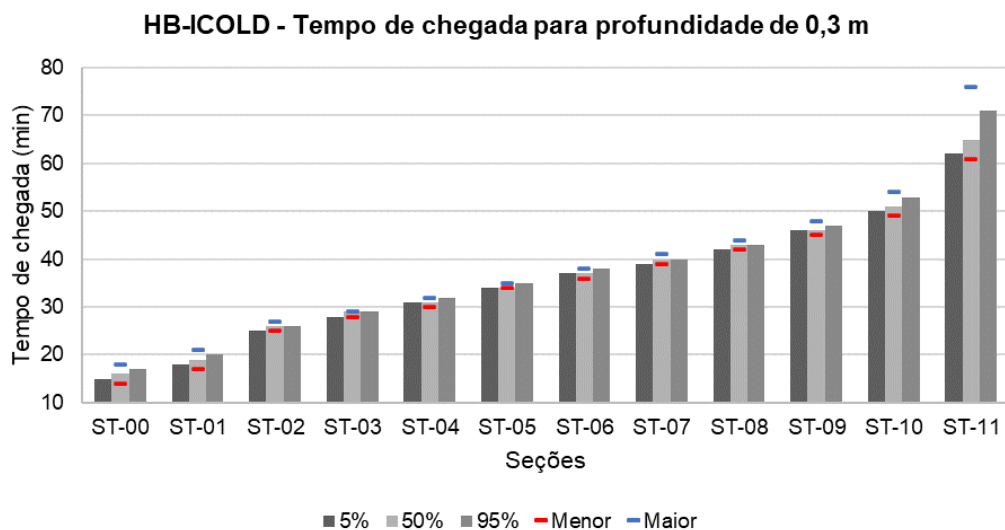
Neste cenário, os parâmetros C_v e b causaram maior impacto nos resultados de área inundada e profundidade máxima média.

5.1.3 Sensibilidade do modelo de Herschel-Bulkley do ICOLD (HB-ICOLD)

Precedentemente à análise de resultados, avaliaram-se os erros de volume armazenados ao final de cada uma das 1.000 simulações do cenário HB-ICOLD. Os erros de volume limitaram-se a uma faixa de 0,004 a 0,03%, que também indica erros aceitáveis e logo, todas as simulações foram mantidas na análise dos resultados.

A variação causada nos resultados de profundidades máximas e tempos de chegada nas seções de análise do modelo (Figura 4.8) foi analisada a partir da alteração dos parâmetros reológicos. Os resultados de tempos de chegada da onda de inundação na profundidade de 0,3 m nas seções analisadas são mostrados na Figura 5.12. Para tal, avaliou-se a probabilidade de excedência dos tempos de chegada simulados nas 1.000 simulações realizadas e os valores máximos e mínimos, em cada seção.

Figura 5.12 - Probabilidade de excedência dos tempos de chegada para profundidade de 0,3 m nas seções de análise – HB-ICOLD

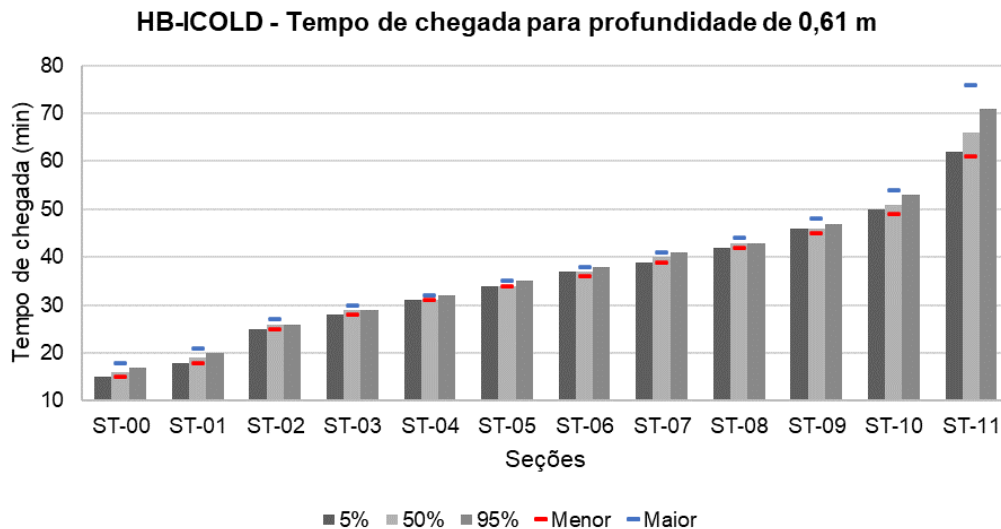


Neste cenário, a maior variação (22,2%) (em relação ao valor máximo obtido) ocorreu na seção imediatamente a jusante do barramento (ST-00), a 0,8 km, onde o tempo de chegada da onda para a profundidade de 0,3 m variou entre 14 e 18 minutos. Em valores absolutos, a maior variação foi de 15 minutos, na seção ST-11. Já a menor variação ocorreu na seção ST-05, de 2,9%, sendo essa seção localizada na transição entre o vale encaixado e a planície de inundação no terreno, semelhante ao ocorrido no cenário B-ICOLD.

Nos resultados de tempos de chegada para a profundidade de 0,61 m (Figura 5.13), a maior variação dos valores ocorreu na seção ST-11 (19,7%), com intervalo de

variação entre 61 e 76 minutos. A menor variação do tempo de chegada também ocorreu na seção ST-05 (2,9%).

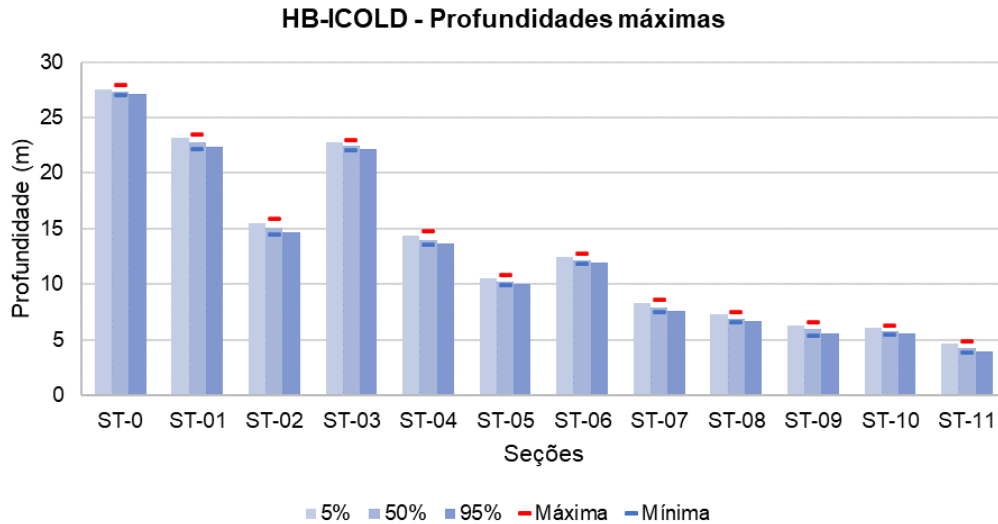
Figura 5.13 - Probabilidade de excedência dos tempos de chegada para profundidade de 0,61 m nas seções de análise – HB-ICOLD



De modo geral, os tempos de chegada variaram entre 1 e 5 minutos nas simulações, com exceção da última seção que teve variação de 15 minutos (Figura 5.12 e Figura 5.13). No que tange a probabilidade de excedência dos tempos de chegada para a profundidade de 0,3 m e 0,61 m, a avaliação desse resultado foi mais importante na última seção, ST-11, a 15 km do eixo da barragem, pois apresentou maior variação entre as probabilidades apresentadas. Similar ao cenário anterior (B-ICOLD), as alterações nos parâmetros reológicos causaram maior variação nos tempos de chegada na seção mais a jusante (ST-11) do modelo.

As probabilidades de excedência de profundidades máximas em cada seção para as 1.000 simulações realizadas são apresentadas na Figura 5.14. As profundidades máximas obtidas nas seções de análise sofreram maior variação na seção ST-11, variando entre 3,87 m e 4,91 m. A menor variação de profundidade observada ocorreu na seção ST-00 (3,3%), de 27,0 a 27,9 m. No geral, a variação das profundidades máximas nas seções foi pequena, variando entre 0,8 m e 1,5 m, a partir das alterações nos parâmetros reológicos. Em comparação ao cenário B-ICOLD, observou-se menor influência da variação dos parâmetros reológicos nos resultados de profundidade máxima nas seções no cenário HB-ICOLD.

Figura 5.14 - Probabilidade de excedência das profundidades máximas nas seções – HB-ICOLD



De forma semelhante ao apresentado no cenário anterior, também se observou a relação direta entre as saídas e os parâmetros de entrada variados neste cenário, com os resultados obtidos de áreas inundadas e H_{med} (Equação 4.4). Da Figura 5.15 à Figura 5.18 apresenta-se graficamente como os resultados de área variam com a alteração dos parâmetros de reologia.

Figura 5.15 - Relação entre área inundada e C_v em 1.000 simulações do cenário HB-ICOLD

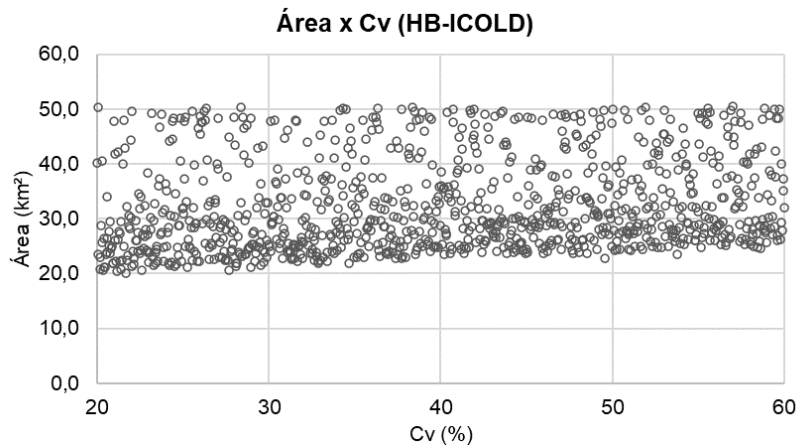


Figura 5.16 - Relação entre área inundada e τ_y em 1.000 simulações do cenário HB-ICOLD

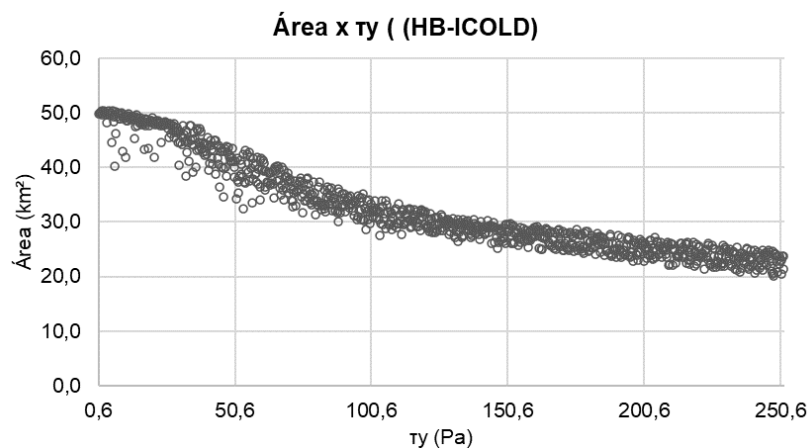


Figura 5.17 - Relação entre área inundada e K em 1.000 simulações do cenário HB-ICOLD

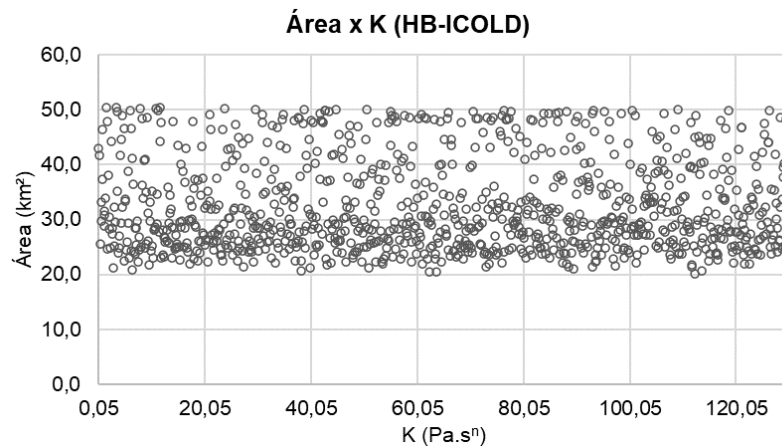
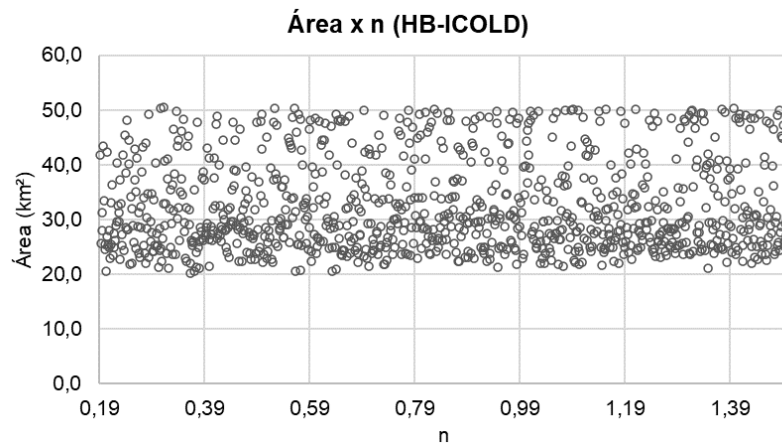


Figura 5.18 - Relação entre área inundada e n em 1.000 simulações do cenário HB-ICOLD



Graficamente (Figura 5.15 à Figura 5.18), é explícita apenas a relação entre a tensão de escoamento (τ_y) e a área inundada, onde o aumento da tensão causa a redução da área (Figura 5.16). Para os outros parâmetros, as simulações apresentaram um comportamento bem distribuído, de variação da área entre 20,10 km² e 50,42 km² entre os intervalos dos parâmetros. As relações entre Hmed e cada parâmetro são apresentados na Figura 5.19 e na Figura 5.20.

Figura 5.19 - Relações entre as profundidades máximas médias por célula e os parâmetros C_v e τ_y , nas áreas de interesse – HB-ICOLD

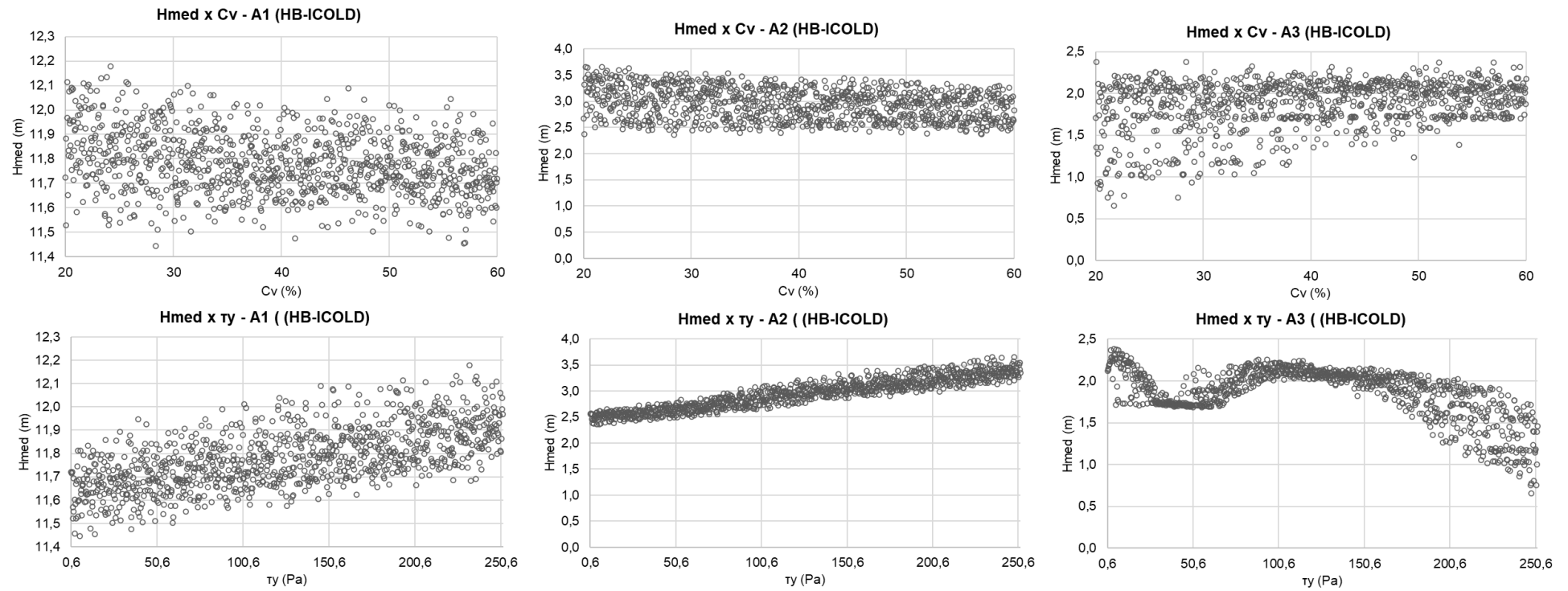
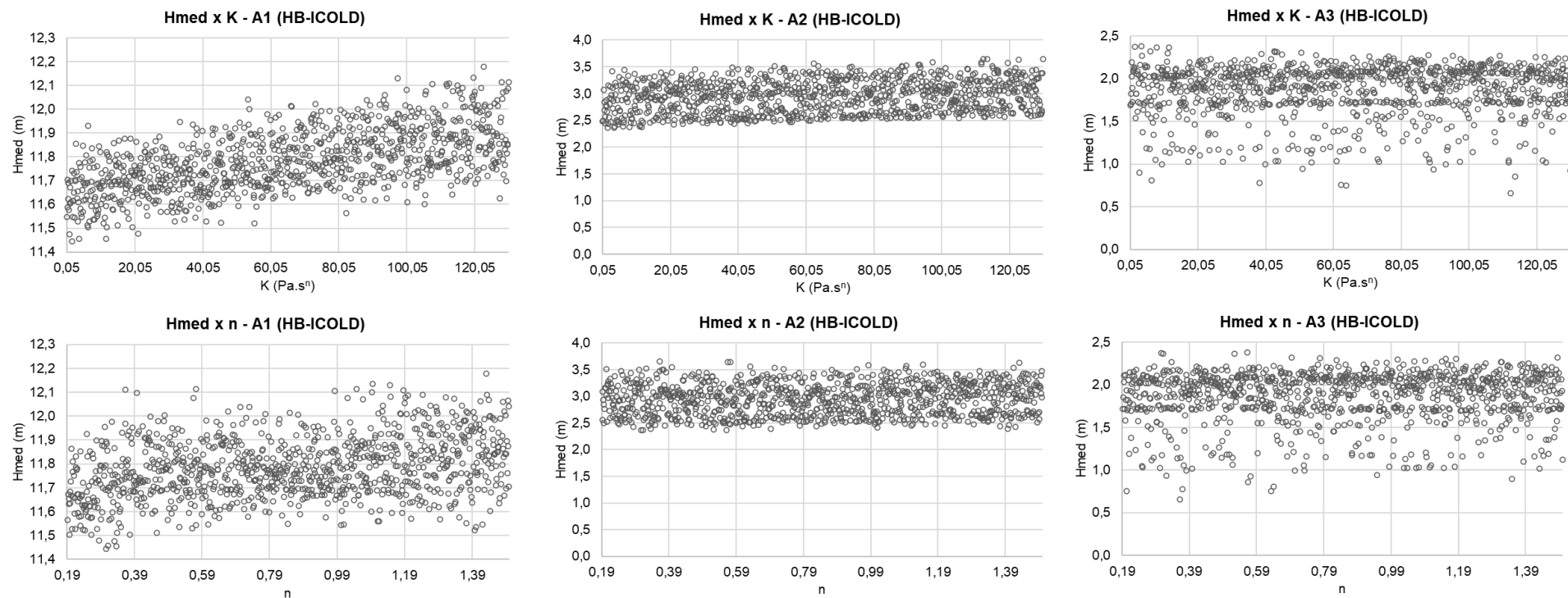


Figura 5.20 - Relações entre as profundidades máximas médias por célula e os parâmetros K e n, nas áreas de interesse – HB-ICOLD



Na região A1 (Figura 5.19), as profundidades máximas médias resultantes variaram entre 11,44 m e 12,18 m. Nas áreas de interesse A2 e A3, a profundidade foi reduzida ao escoar pela planície de inundação, variando entre 2,36 m e 3,65 m, e 0,65 m e 2,38 m, respectivamente. Dessa forma, as alterações nos parâmetros reológicos causaram maior impacto neste resultado no trecho mais a jusante do modelo simulado (A3).

Na Figura 5.19, observa-se uma pequena redução dos valores de H_{med} com o aumento de C_v nas regiões A1 e A2. Ainda nessas regiões, o aumento de τ_y causa o aumento de H_{med} , sendo que na região A2 essa relação é bem evidente, sendo uma relação linear. Na região plana A3, o aumento dos valores de τ_y , para algumas faixas de tensão de escoamento, leva à redução de H_{med} , o que pode ser explicado pela parada do escoamento a montante dessa região por efeito de tensões de cisalhamento mais altas. Na faixa de valores entre 50 Pa e 100 Pa, aproximadamente, ocorre o aumento da profundidade máxima média nessa região, uma vez que a relação entre esses parâmetros na região A3 é não-linear.

A Figura 5.20 demonstra uma relação sutil na região A1, dos parâmetros K e n , causando aumento do H_{med} . Essa relação não é visível graficamente nas outras regiões (A2 e A3), onde os pares se relacionam de forma distribuída nos intervalos de valores. Pela formulação do modelo de Herschel-Bulkley, esperava-se um efeito mais evidente desses parâmetros nos resultados, logo, os intervalos de parâmetros podem ter evidenciado o impacto da tensão de escoamento (τ_y) nos resultados. Portanto, neste cenário o parâmetro τ_y causou efeito mais perceptível nos resultados de área inundada e profundidade máxima média.

5.1.4 Mapas probabilísticos dos cenários do ICOLD

Com base na Equação 3.13 foram elaborados os mapas probabilísticos dos cenários B-ICOLD (Figura 5.21) e HB-ICOLD (Figura 5.22). Esses mapas permitem a visualização do impacto causado pela variação dos parâmetros reológicos nas manchas simuladas.

As probabilidades de inundação dos cenários B-ICOLD e HB-ICOLD indicam que no trecho de vale encaixado, imediatamente a jusante da barragem (A1), predominantemente todas as células nessa região foram inundadas em 100% das simulações. Isso revela que, em termos de área atingida, a variação dos parâmetros reológicos tem pouca influência na envoltória de inundação nesse trecho.

Outra semelhança observada em ambos os cenários, se trata da pouca variação da área inundada nas extremidades laterais da mancha, na planície de inundação (A2). O espriamento do fluido não-newtoniano nessa região, no que concerne a área inundada, ocorreu de forma muito semelhante em todas as 1.000 simulações de cada cenário, majoritariamente com probabilidade de inundação entre 90 e 100%. Ou seja, a variação dos parâmetros reológicos também não impactou de forma significativa a área da mancha na região A2 (mas impactou nas profundidades máximas, como mostrado anteriormente), o que pode indicar que a magnitude do volume propagado, o relevo e a distância até o maciço sejam fatores que propiciem a ocorrência de contornos muito semelhantes da mancha nessa área (A2).

A influência da variação dos parâmetros reológicos na área da mancha se dá principalmente na extensão da mancha nos cenários B-ICOLD (Figura 5.21) e HB-ICOLD (Figura 5.22), ou seja, no alcance da onda de inundação a jusante. Dentro dos intervalos de valores dos parâmetros simulados, o HB-ICOLD apresentou maior variação na área inundada no alcance da mancha, onde apenas de 10 a 20% das simulações realizadas atingiu a saída do modelo, e nas demais o material ficou retido a montante. No cenário de B-ICOLD, entre 70 e 80% das simulações, a mancha de inundação se estendeu até o final do trecho modelado. Em outros termos, o alcance da mancha de inundação variou entre 12,6 km (mancha de probabilidade de 100%) a 17,6 km (final do modelo) no cenário de B-ICOLD, isto é, a variação dos parâmetros reológicos causou uma redução de até 5 km no alcance da mancha. No cenário de HB-ICOLD, essa redução da extensão da mancha foi de cerca de 5,5 km.

Essa diferença apresentada entre os cenários de modelos reológicos diferentes (Bingham e Herschel-Bulkley), não pode ser avaliada de forma direta já que os parâmetros e intervalos de valores dos parâmetros não são correspondentes. Essa comparação direta da sensibilidade dos modelos reológicos poderia ser observada para um mesmo conjunto de dados medidos em ensaios de um mesmo tipo de rejeito, ajustando cada modelo reológico. Dito isso, ao avaliar a parametrização de cada modelo reológico, sendo o modelo de Bingham linear e o modelo de Herschel-Bulkley não-linear, a variação dos parâmetros K e n (modelo de Herschel-Bulkley) teoricamente causaria maior variação da tensão de cisalhamento, e consequentemente, mais impacto na área inundada.

Figura 5.21 - Mapa probabilístico do cenário B-ICOLD

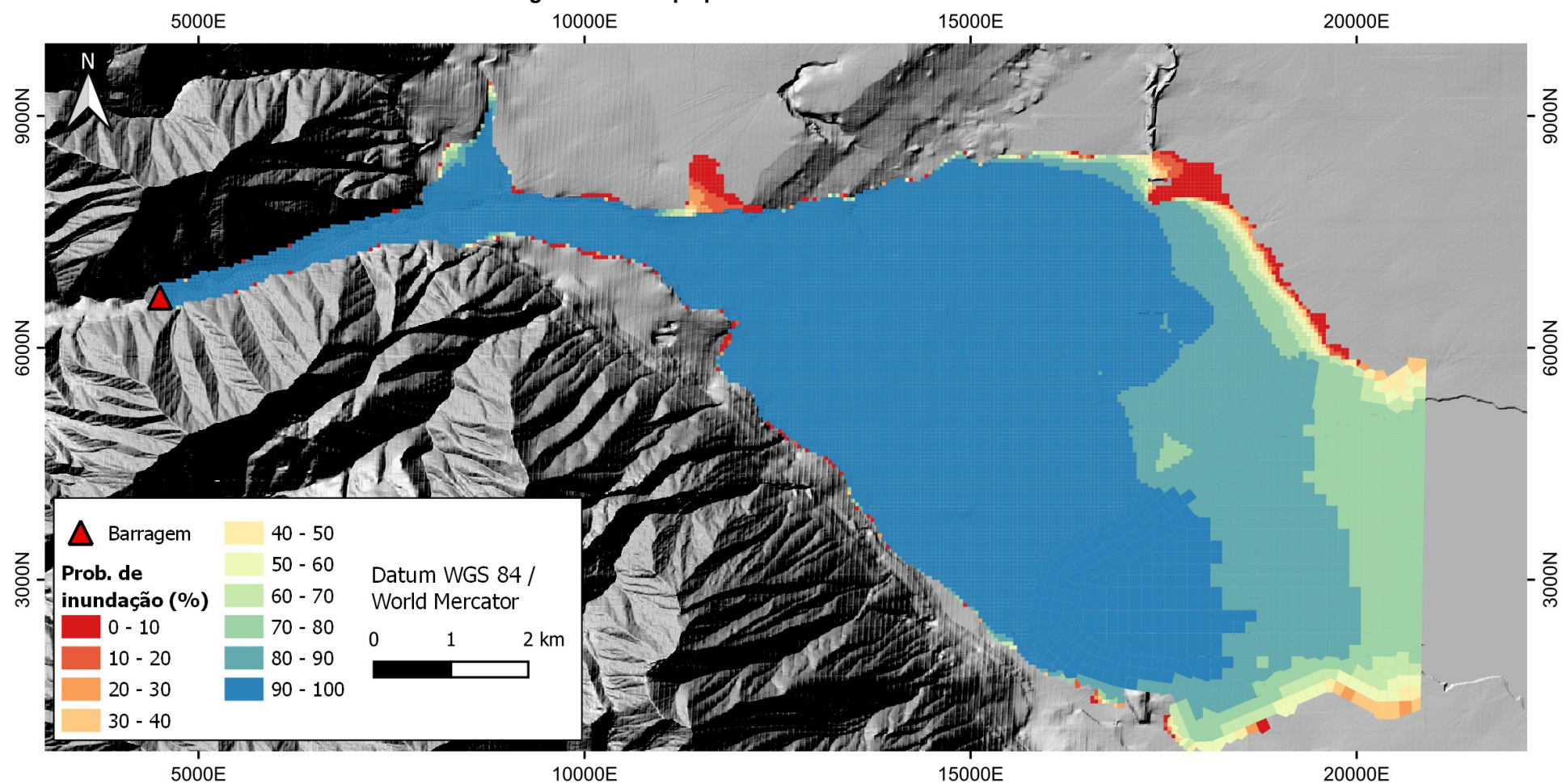
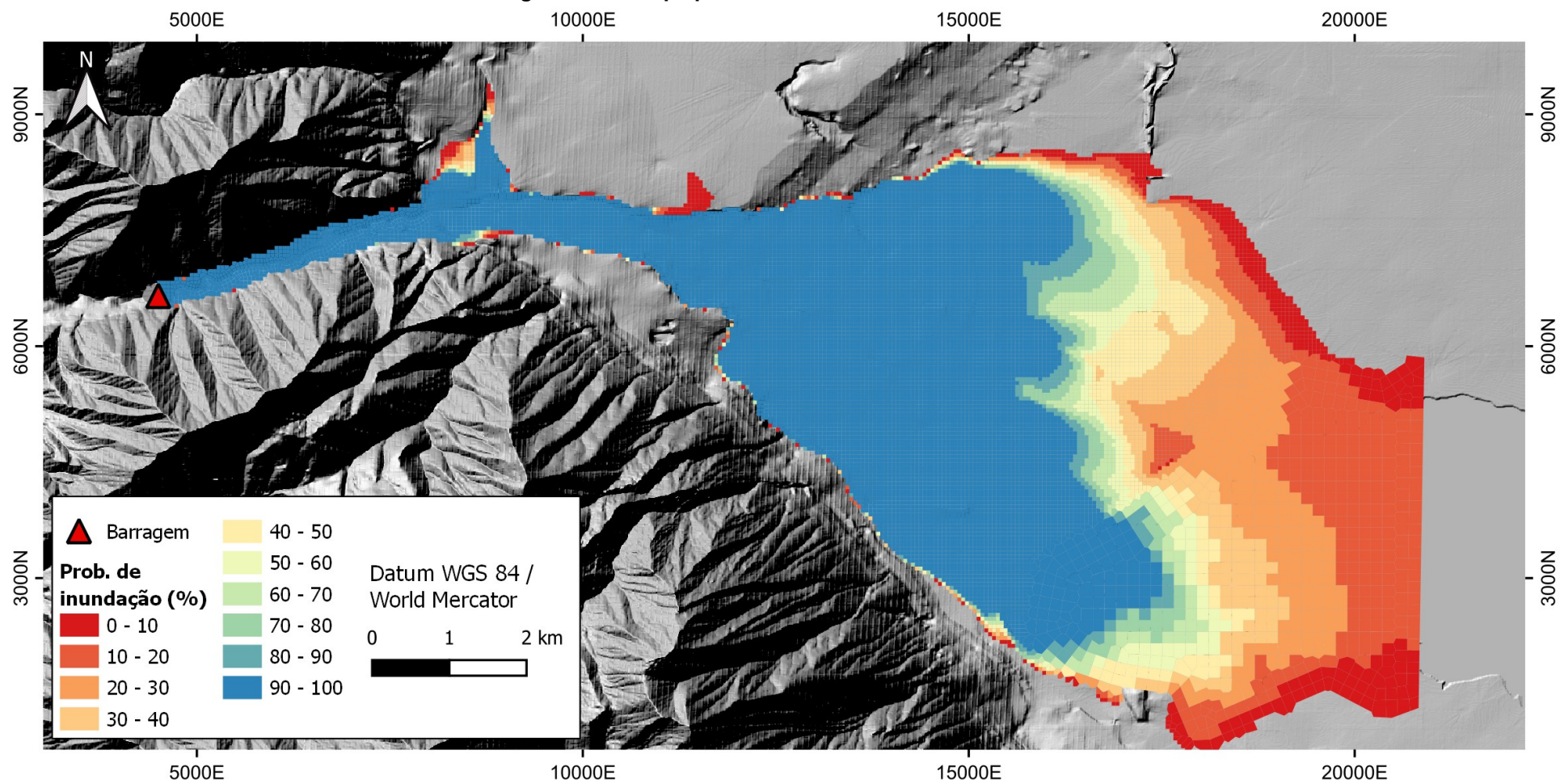


Figura 5.22 - Mapa probabilístico do cenário HB-ICOLD



5.2 Calibração de parâmetros reológicos a partir de estudo de caso real – Barragem B1 em Brumadinho-MG

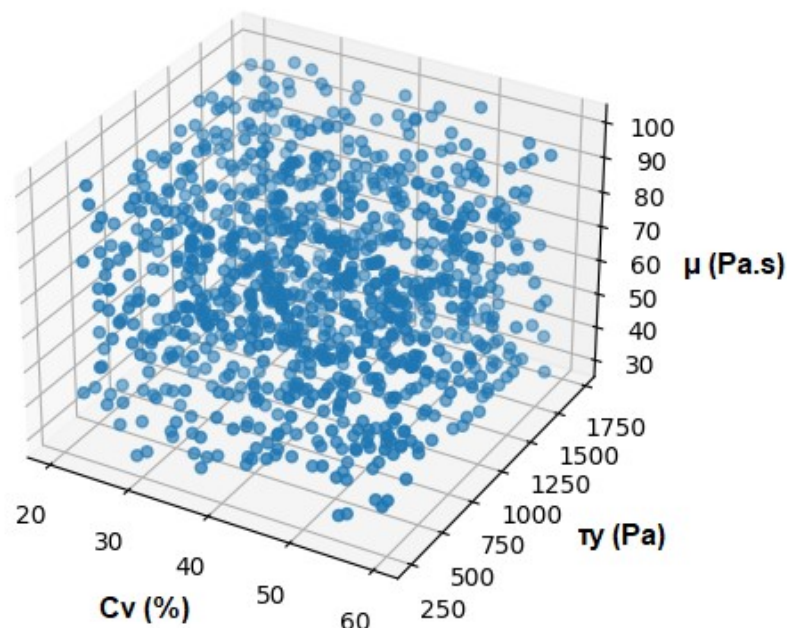
A calibração da mancha de inundação simulada no cenário B-B1 à mancha observada no desastre de Brumadinho é apresentada no item seguinte. Apresentam-se a amostragem utilizada, as relações entre os parâmetros reológicos, e as probabilidades de inundação em comparação a mancha observada. Por fim, apresenta-se a metodologia utilizada para calibração da mancha e validação com base nos tempos de chegada observados na ruptura real.

5.2.1 Amostragem dos parâmetros do cenário B-B1

Os conjuntos de parâmetros para este cenário foram obtidos também com o método LHS e distribuição uniforme para a amostragem aleatória dos parâmetros. A Figura 5.23 apresenta os conjuntos de parâmetros utilizados nas 1.000 simulações.

Como se observa na Figura 5.23, o espaço das amostras dos parâmetros é contemplado uniformemente, representando bem os intervalos de variação dos parâmetros. Neste cenário o espaço multidimensional apresentado é de três dimensões, uma vez que em cada simulação são variados três parâmetros simultaneamente. Dessa forma, cada eixo representa um parâmetro e os pontos indicam o ponto no espaço de amostragem dos parâmetros.

Figura 5.23 - Amostragem de parâmetros do cenário B-B1



5.2.2 Relações entre os parâmetros reológicos e os resultados das simulações

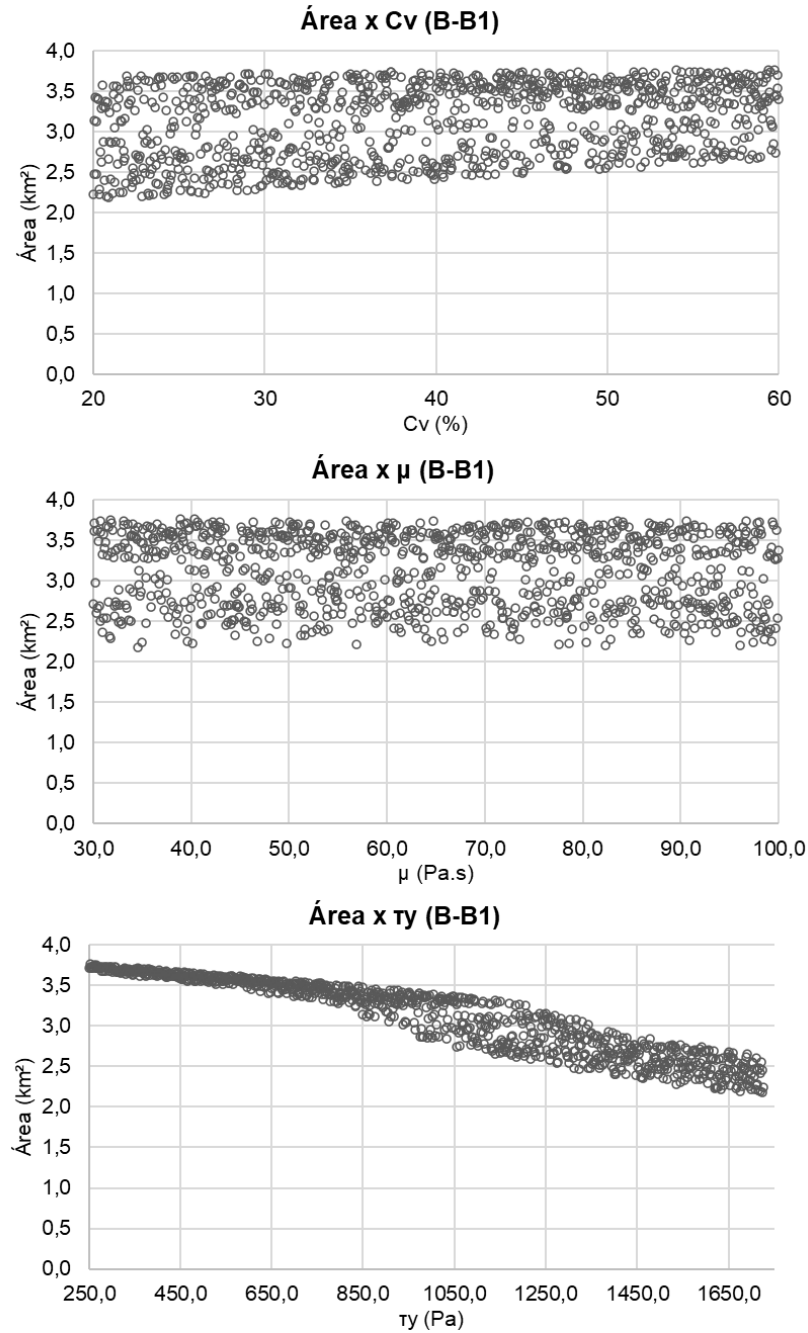
As simulações do estudo de caso da antiga Barragem B1 da Mina do Córrego do Feijão em Brumadinho-MG foram realizadas alterando os conjuntos de parâmetros do cenário B-B1, em um total de 1.000 simulações. Os erros de volume contabilizados pelo HEC-RAS ao final de cada simulação foram armazenados, e nas 1.000 simulações a faixa de erro foi de 0,0002% a 0,008%, apresentando boa convergência dos cálculos e assim, nenhuma simulação foi descartada na análise dos resultados.

Embora os parâmetros tenham sido variados simultaneamente, é possível observar graficamente a relação entre pares de variáveis (um parâmetro de entrada e uma variável de saída) a fim de avaliar o impacto causado pela variação dos parâmetros nos resultados do modelo. A Figura 5.24 apresenta as relações entre os parâmetros reológicos variados no cenário B-B1 (C_v , μ e τ_y) e as áreas simuladas.

Neste cenário (B-B1), as áreas inundadas simuladas foram obtidas a partir do somatório das áreas das células inundadas, diferentemente dos cenários B-ICOLD e HB-ICOLD em que as áreas foram armazenadas a partir do arquivo shapefile gerado ao final das simulações. Esse processo foi adotado por este ser um cenário de calibração com base na área inundada, onde essa calibração foi realizada a partir das células inundadas do modelo. Os valores de área inundada obtidos variaram entre 2,18 km² e 4,37 km².

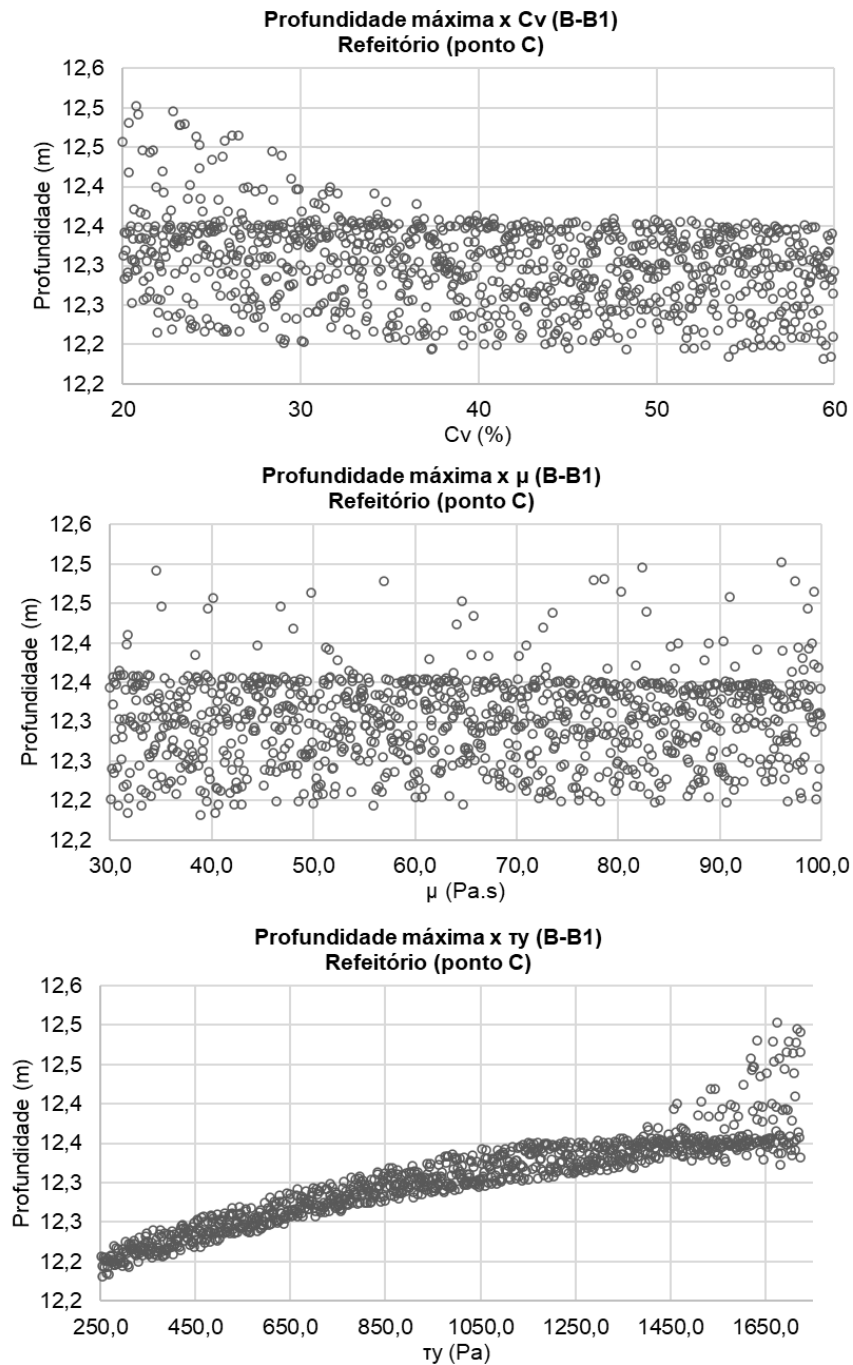
Como enfatizado por Gibson *et al.* (2022), a inserção dos parâmetros de tensão de escoamento (τ_y) e viscosidade dinâmica (μ) como valores inseridos pelo usuário, fazem com que o modelo HEC-RAS não seja sensível ao parâmetro C_v , já que ele não é utilizado para cálculo desses parâmetros. Dessa forma, observa-se (Figura 5.24) que os valores de C_v simulados (em conjunto aos outros parâmetros) retornaram áreas inundadas de forma distribuída ao longo do intervalo adotado. Esse comportamento também é visualizado na relação entre as áreas inundadas e as viscosidades dinâmicas variadas (μ). Já entre os parâmetros de tensão de escoamento (τ_y) variados e as áreas inundadas obtidas, percebe-se que a redução da área inundada está diretamente relacionada ao aumento das tensões de escoamento (τ_y). A relação entre essas variáveis é linear.

Figura 5.24 - Relação entre C_v , μ e τ_y e áreas inundadas em 1.000 simulações



As profundidades máximas também foram plotadas em associação aos parâmetros variados neste cenário, para cada ponto de interesse (Figura 4.16): refeitório (ponto C) (Figura 5.25), ponte ferroviária (ponto D) (Figura 5.26) e Rio Paraopeba (ponto E) (Figura 5.27).

Figura 5.25 - Relação entre C_v , μ e τ_y e profundidades máximas em 1.000 simulações - Refeitório – ponto C



No refeitório, ponto C de análise, as profundidades pouco variaram (entre 12,2 m e 12,5 m) nas 1.000 simulações realizadas, devido à proximidade (1,4 km) deste ponto ao maciço da barragem, e logo, ao hidrograma de ruptura propagado no modelo. Verifica-se, em semelhança aos resultados de área inundada, que as profundidades máximas resultantes estão distribuídas ao longo dos intervalos dos parâmetros C_v e μ . Algumas simulações, indicaram que valores menores de C_v retornaram profundidades maiores no ponto C. As profundidades máximas em comparação aos valores de viscosidade dinâmica variados estão distribuídas ao longo do intervalo dos

valores. Por último, novamente observa-se que a tensão de escoamento (τ_y) está diretamente relacionada à variação das profundidades obtidas, onde maiores valores desse parâmetro causaram profundidades maiores no local do refeitório (ponto C). Isso pode indicar uma retenção de material nos primeiros quilômetros das simulações, causada pelos altos valores de tensão de escoamento. Os resultados de profundidades máximas em associação aos parâmetros reológicos variados na ponte ferroviária (ponto D) (Figura 5.26) e no Rio Paraopeba (ponto E) (Figura 5.27) são mostrados a seguir.

Figura 5.26 - Relação entre C_v , μ e τ_y e profundidades máximas em 1.000 simulações – Ponte ferroviária – ponto D

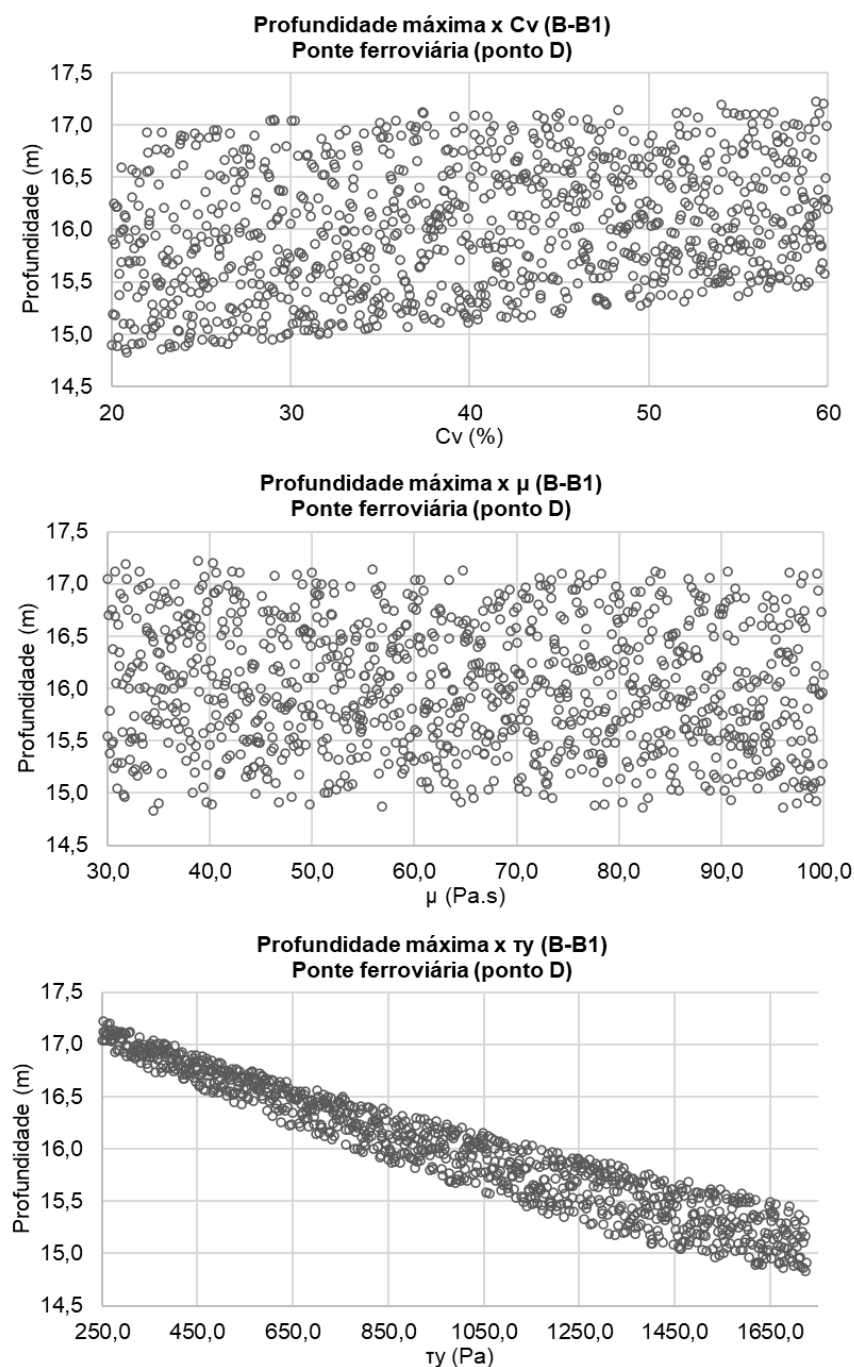
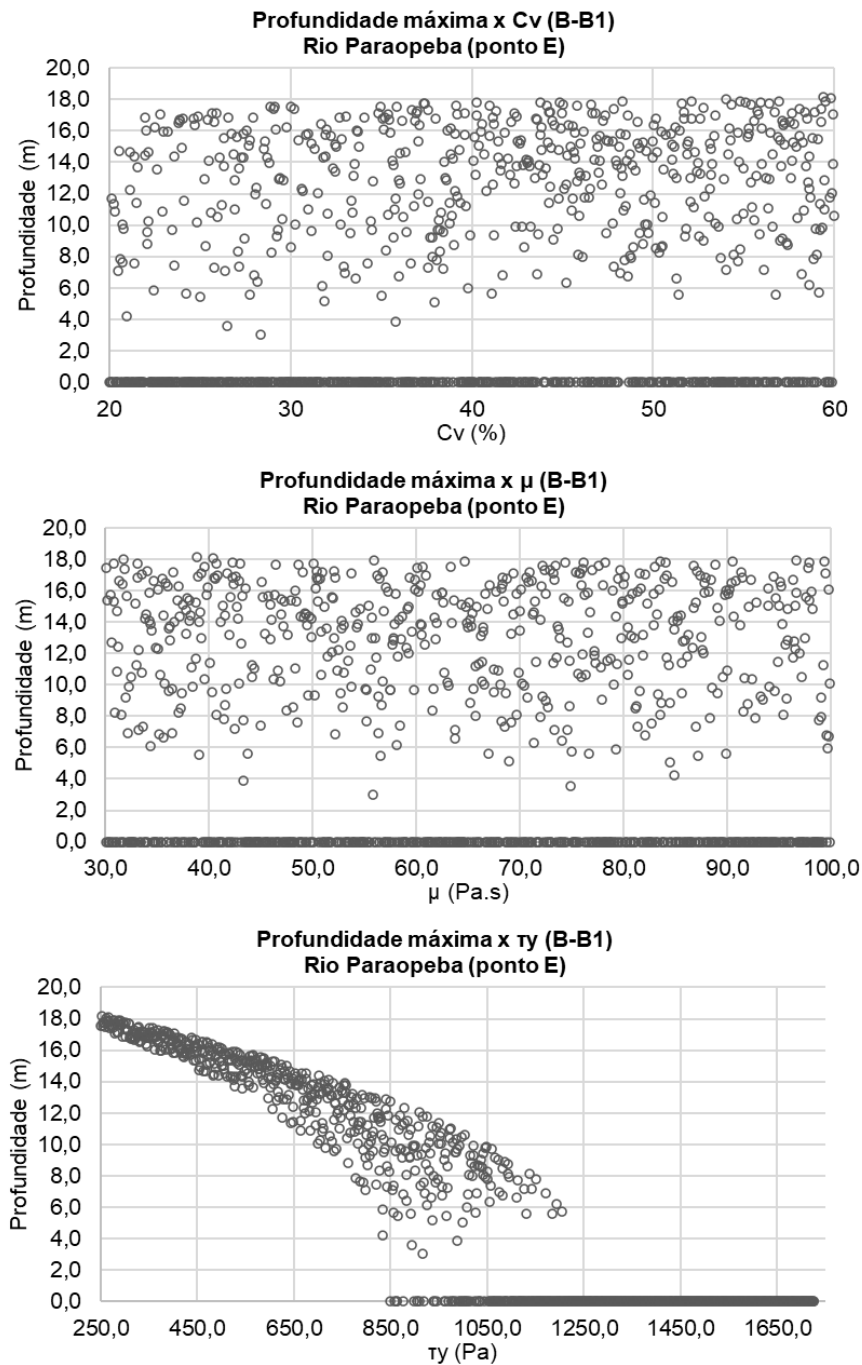


Figura 5.27 - Relação entre C_v , μ e τ_y e profundidades máximas em 1.000 simulações – Rio Paraopeba – ponto E



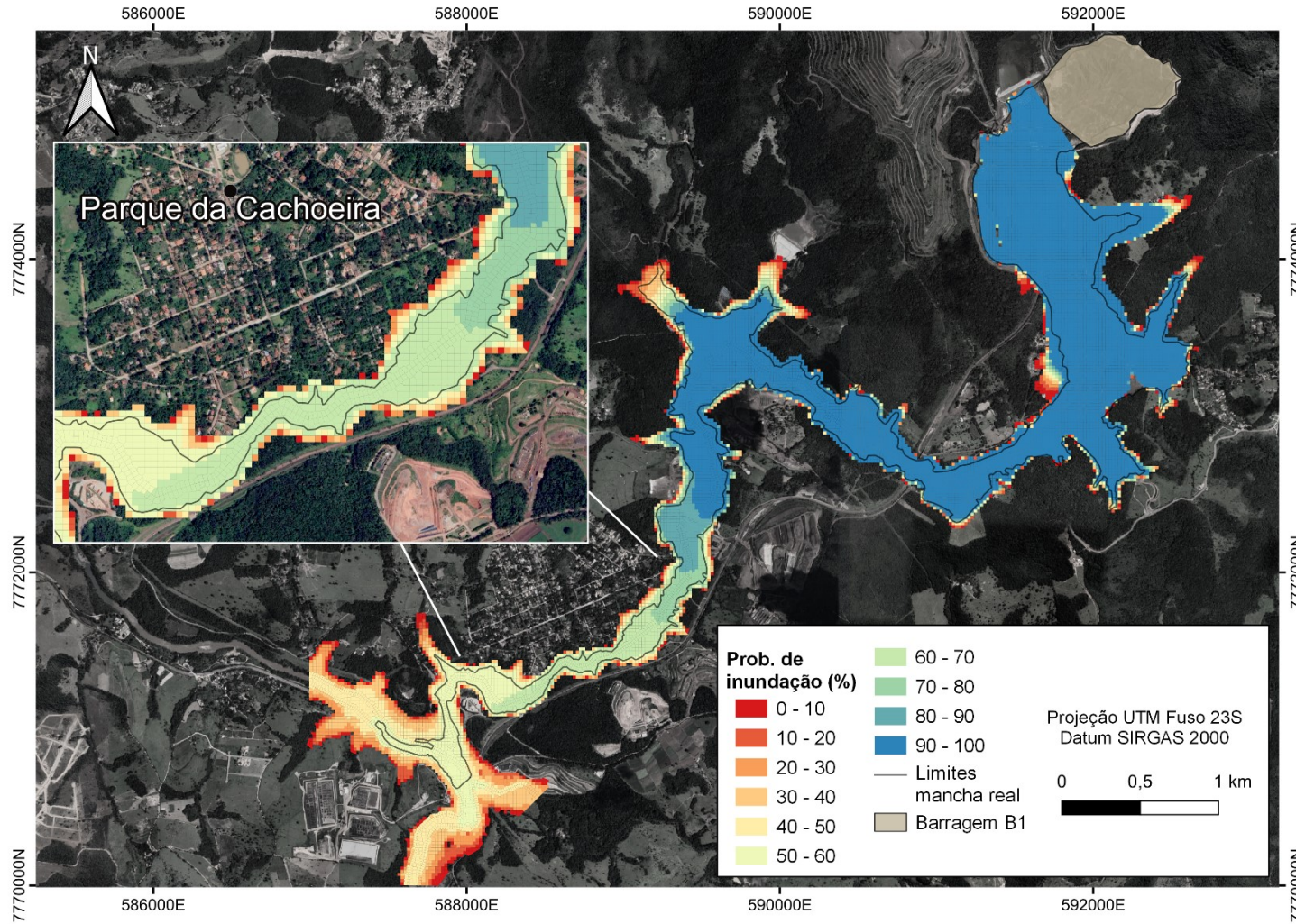
Na ponte ferroviária (ponto D) (Figura 5.26) e no Rio Paraopeba (ponto E) (Figura 5.27), valores maiores de tensão de escoamento (τ_y) impactaram na redução das profundidades máximas. Esse comportamento se deve ao distanciamento desses pontos em relação ao eixo da barragem, e que como apontado anteriormente, pode indicar que parte do material sofreu parada a montante destes pontos. Isso se confirma ao constatar na Figura 5.27, que entre os valores de tensão de escoamento de 850 Pa a 1.250 Pa (em associação aos demais parâmetros variados) algumas profundidades máximas são iguais a zero, e entre 1.250 Pa e 1.725 Pa todas as

profundidades máximas são iguais a zero. Ou seja, o escoamento não chegou até o Rio Paraopeba (ponto E) nesses casos. Os parâmetros C_v e μ seguiram retornando valores de profundidade máxima distribuídos ao longo dos intervalos desses parâmetros nos pontos da ponte ferroviária e Rio Paraopeba. As profundidades máximas na ponte ferroviária variaram entre 14,8 m e 17,2 m, e no Rio Paraopeba, entre profundidade igual zero (sem chegada da onda de inundação) e 18,2 m.

5.2.3 Probabilidades de inundação

A representação dos impactos na mancha de inundação diante da variação dos parâmetros reológicos é mais visível a partir de um mapa de inundação probabilístico. A Figura 5.28 mostra as probabilidades de inundação das células do modelo frente às 1.000 simulações realizadas neste cenário.

Figura 5.28 - Mapa de inundação probabilístico das 1.000 simulações do cenário B-B1



As alterações nos parâmetros de entrada resultaram em simulações onde 80% das manchas atingiram a região imediatamente a montante do Parque Cachoeira. A probabilidade de inundação do Parque Cachoeira foi de 60% nas simulações realizadas com os conjuntos de parâmetros simulados. A mancha de inundação se estendeu até a confluência com o Rio Paraopeba em 53% das 1.000 simulações.

Nos primeiros quilômetros simulados, ocorreu uma semelhança entre a envoltória de probabilidade de inundação de 100% e a mancha observada, exceto no primeiro remanso observado, em que as manchas simuladas se estendem mais que a mancha observada. Isso também foi observado em Gibson *et al.* (2022) a partir de modelagem realizada no HEC-RAS (parâmetros reológicos: $\tau_y = 800 \text{ Pa}$; $\mu = 100 \text{ Pa.s}$; $C_v = 23\%$). Entende-se que essa diferença pode não estar relacionada à topografia neste trecho, uma vez que Gibson *et al.* (2022) utilizaram topografia com 5 metros de resolução, frente a resolução de 1 metro utilizada no presente trabalho. Em termos de modelo hidrodinâmico, a modelagem realizada por Lumbroso *et al.* (2021) também apresentou esse remanso mais extenso na mancha logo após a barragem, onde foi utilizado o programa MIKE 21, e isso também ocorreu em Ligier (2020) com o uso do TELEMAC-2D. Essas comparações indicam que esses modelos não conseguiram representar bem o comportamento do rejeito ao escoar nesse trecho, da forma que ocorreu na ruptura da Barragem B1. Isso pode ter relação com a proximidade desse trecho à barragem, onde o comportamento real da onda de inundação foi de propagação mais para jusante do que para esse remanso.

No trecho que passa pelo Parque da Cachoeira as manchas de 60 a 80% de probabilidade se aproximam à mancha observada. No detalhe indicado na Figura 5.28 do bairro Parque da Cachoeira percebe-se como as incertezas e variações que ocorrem na modelagem de inundações, no que tangem os parâmetros reológicos, podem impactar na mancha de inundação, e logo, no planejamento desenvolvido com base nessa mancha. Soma-se a isso outras incertezas como parâmetros de formação de brecha de ruptura, volume mobilizado do reservatório de rejeitos, valores de coeficiente de Manning, que não foram avaliados neste estudo, mas que também impactam nos resultados obtidos de forma significativa. No geral, as manchas de probabilidade de inundação entre 50% e 60% se aproximaram mais à mancha observada no desastre de Brumadinho.

5.2.4 Calibração da mancha de inundação a partir da mancha de ruptura ocorrida

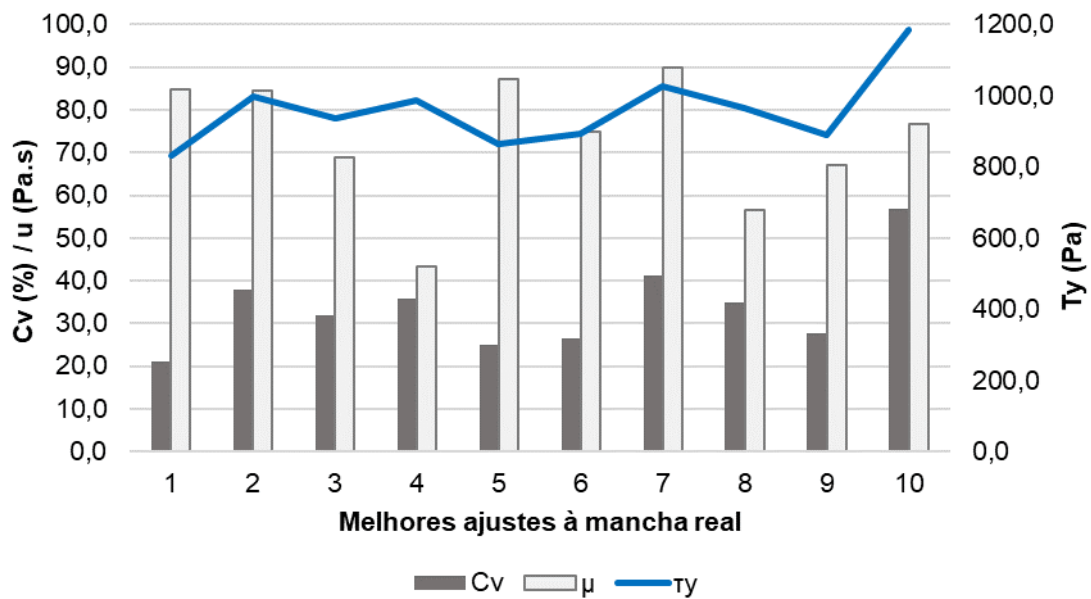
Com base no índice *Fit metric F* (BATES e DE ROO, 2000; FLEISCHMANN *et al.*, 2019) (Equação 4.5) para calibração da área inundada, o conjunto de parâmetros reológicos com maior aproximação à mancha observada, com *F* igual a 85,4%, consiste em: concentração volumétrica de sólidos de 21,0%, viscosidade dinâmica de 84,9 Pa.s e tensão de escoamento de 832,9 Pa (Tabela 5.1). Esses parâmetros retornaram uma mancha de 3,24 km² frente aos 3,01 km² da mancha observada, o que indica uma diferença de 7,7% em relação à mancha observada.

Tabela 5.1 – Melhores ajustes segundo *Fit metric F* e conjuntos de parâmetros associados

Ordem de melhor ajuste	F (%)	Conjunto de parâmetros			Área inundadas simuladas (km ²)	Área inundada real (km ²)
		Cv (%)	μ (Pa.s)	τ_y (Pa)		
1	85,43	21,0	84,9	832,9	3,24	3,01
2	85,22	38,0	84,4	999,2	3,26	
3	85,20	31,8	69,0	936,8	3,26	
4	85,17	35,8	43,3	988,0	3,24	
5	85,14	25,0	87,2	865,0	3,27	
6	85,12	26,5	74,9	893,8	3,23	
7	85,03	41,1	89,9	1.025,7	3,28	
8	85,01	35,0	56,5	966,0	3,28	
9	84,96	27,8	67,0	890,9	3,28	
10	84,96	56,7	76,7	1.184,0	3,28	

Diferentes conjuntos de parâmetros retornaram ajustes com o índice *F* muito semelhantes, como pode ser observado na Tabela 5.1, onde as manchas de inundação desses 10 melhores ajustes tiveram uma diferença mínima de contorno no trecho final da mancha, na chegada ao Rio Paraopeba (Apêndice C). Dessa forma, todas as manchas referentes aos conjuntos de parâmetros da Tabela 5.1 atendem bem à calibração de área com a mancha observada. Na Figura 5.29 é ilustrada a variação dos valores de parâmetros reológicos para os 10 conjuntos de melhor ajuste segundo a métrica *F*.

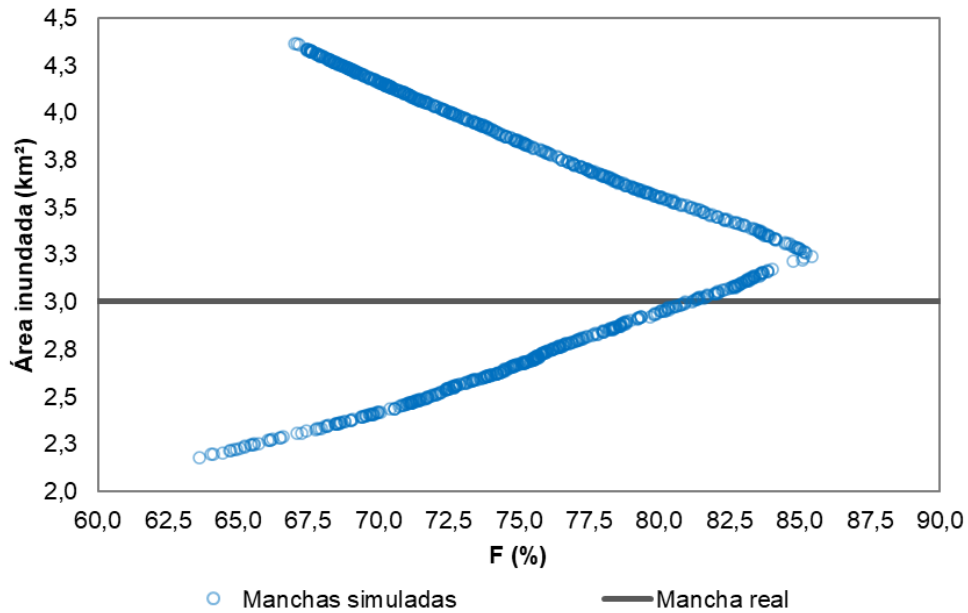
Figura 5.29 - Conjuntos de parâmetros com melhor ajuste *Fit metric F* à mancha observada da Barragem B1 em Brumadinho-MG



Na Figura 5.29, nota-se que os intervalos dos parâmetros de melhor ajuste possuem certa amplitude, onde a concentração volumétrica de sólidos (C_v) variou de 21,0% a 56,7%, a viscosidade dinâmica (μ) variou de 43,3 Pa.s a 89,9 Pa.s e a tensão de escoamento (τ_y), de 832,9 Pa a 1.184,0 Pa. Isso demonstra a compensação que ocorre entre os parâmetros reológicos simulados, que retornaram resultados semelhantes em termos de mancha de inundação. Confirma-se com esses resultados a ausência de sensibilidade do modelo ao C_v , quando inseridos valores de τ_y e μ , e observa-se pouca sensibilidade da mancha à viscosidade dinâmica, que varia bastante dentre as 10 manchas de melhor ajuste segundo o índice F .

Os valores do índice F e as áreas associadas, nas 1.000 simulações do cenário B-B1 são apresentados na Figura 5.30. A mancha relacionada ao melhor ajuste com F ainda possui área maior que a mancha observada. Essa diferença se dá pelo avanço da mancha simulada no primeiro remanso bem maior que o evento ocorrido, e em boa parte da extensão da mancha simulada ocorre um deslocamento de 10 a 15 metros em relação a mancha observada na ruptura. Os principais ajustes que podem melhorar essa calibração são: o hidrograma de ruptura inserido no modelo, para representar mais fidedignamente como o volume foi escoado e alterações nos valores de coeficiente de Manning. Outra discussão se trata da ausência de representação dos fenômenos de erosão e deposição ao longo do trecho modelo, que para esse estudo de caso foram fenômenos muito relevantes.

Figura 5.30 - Variação de F e áreas simuladas em torno da área da mancha observada

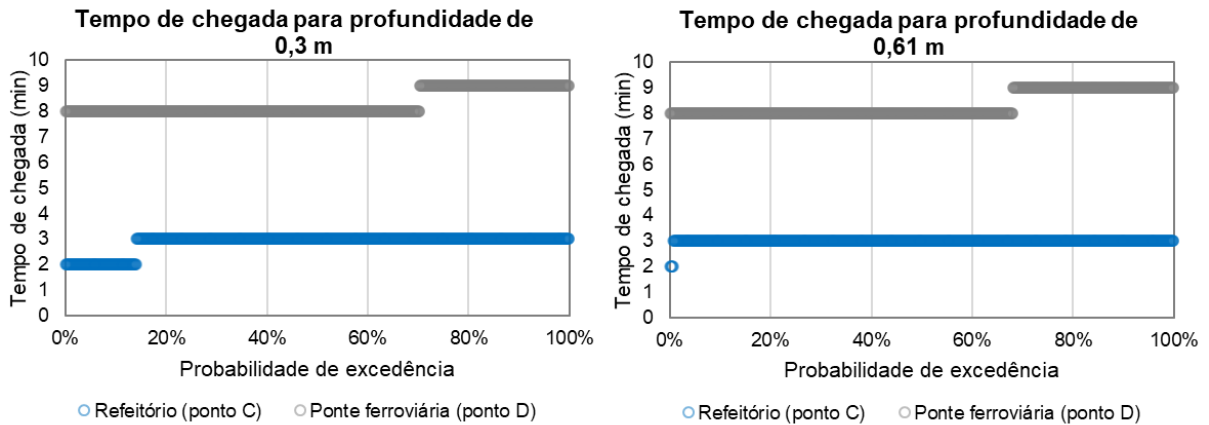


Foram verificados, de forma complementar à calibração da mancha de inundação, os tempos de chegada da onda de inundação. Os tempos de chegada avaliados para os limiares de 0,3 m e 0,61 m de profundidade de escoamento, apresentaram pouca diferença entre seus resultados nos pontos de interesse. A pouca relevância do valor de profundidade como limiar para tempo de chegada neste cenário (B-B1) pode estar relacionada ao volume elevado da ruptura simulada e sua propagação no talvegue simulado de 9,7 km, que não representa um trecho muito extenso.

No refeitório (ponto C), os tempos de chegada (para 0,3 e 0,61 m de profundidade de inundação) variaram entre 2 e 3 minutos. No ponto de análise da ponte ferroviária (ponto D), os tempos de chegada tanto para a profundidade de 0,3 m quanto para 0,61 m, variaram entre e 8 e 9 minutos.

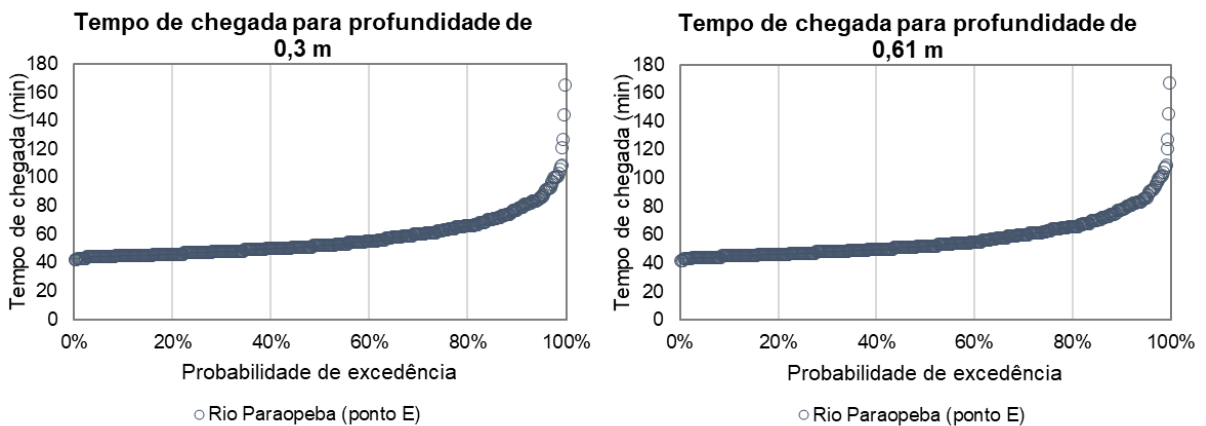
A probabilidade de excedência dos tempos de chegada para esses pontos de interesse são apresentadas na Figura 5.31. Observa-se pouca diferença entre as probabilidades de excedência para cada limiar no ponto C e ponto D.

Figura 5.31 - Probabilidade excedência dos tempos de chegada nos pontos C e D



Já no Rio Paraopeba (ponto E), os tempos de chegada variaram consideravelmente, de 42 minutos a 165 minutos (tempo de chegada para profundidade de 0,3 m), e de 42 a 167 minutos (tempo de chegada para profundidade de 0,61 m), o que representa um aumento nos tempos de chegada de quase 400%. Das 1.000 simulações realizadas neste cenário, apenas 530 simulações retornaram resultados de tempos de chegada no Rio Paraopeba, ou seja, em 470 simulações o escoamento não atingiu o Rio Paraopeba. As probabilidades de excedência para os tempos de chegada no Rio Paraopeba (530 simulações) são mostradas na Figura 5.32.

Figura 5.32 - Probabilidade de excedência dos tempos de chegada no ponto E



Os tempos de chegada obtidos na simulação que retornou a mancha de inundação mais próxima a mancha de inundação da ruptura ocorrida foram comparados com outras referências para validação complementar da calibração. Ligier (2020) apresentou tempos de chegada no refeitório, ponte ferroviária e Rio Paraopeba estimados com base em estudos anteriores relacionados ao desastre ocorrido, em comparação às simulações realizadas em seu estudo. Os tempos de chegada da mancha simulada em comparação ao evento real, e às simulações realizadas por

Lumbroso *et al.* (2021), Gibson *et al.* (2022) e Ligier (2020) são mostrados na Tabela 5.2. Nesses estudos não foi apresentado qual o critério utilizado para a definição do tempo de chegada.

Tabela 5.2 – Comparação entre os tempos de chegada observados, de estudos anteriores e da mancha simulada

Local	Tempos de chegada da onda observados (hh:mm:ss)	Lumbroso <i>et al.</i> (2021) (hh:mm:ss)	Gibson <i>et al.</i> (2022) (hh:mm:ss)	Ligier (2020) (hh:mm:ss)		Tempos de chegada simulados (hh:mm:ss)
		MIKE21	HEC-RAS 6.1	TELEMAC-2D	MIKE21	HEC-RAS 6.1
Refeitório (ponto C)	~ 00:02:00	00:01:30	00:01:30	00:01:15 - 00:02:15	00:01:15 - 00:02:00	00:03:00*
Ponte ferroviária (ponto D)	~ 00:10:00 - 00:12:00	00:09:10	00:09:15	00:04:15 - 00:09:30	00:03:45 - 00:07:15	00:08:00*
Rio Paraopeba (ponto E)	~ 01:30:00 - 02:10:00	01:26:05	01:27:45	01:42:00 - 02:55:00	01:51:00 - 02:40:00	00:46:00¹ - 02:07:00²

* Mesmo tempo de chegada para os limiares de 0,3 m e 0,61 m

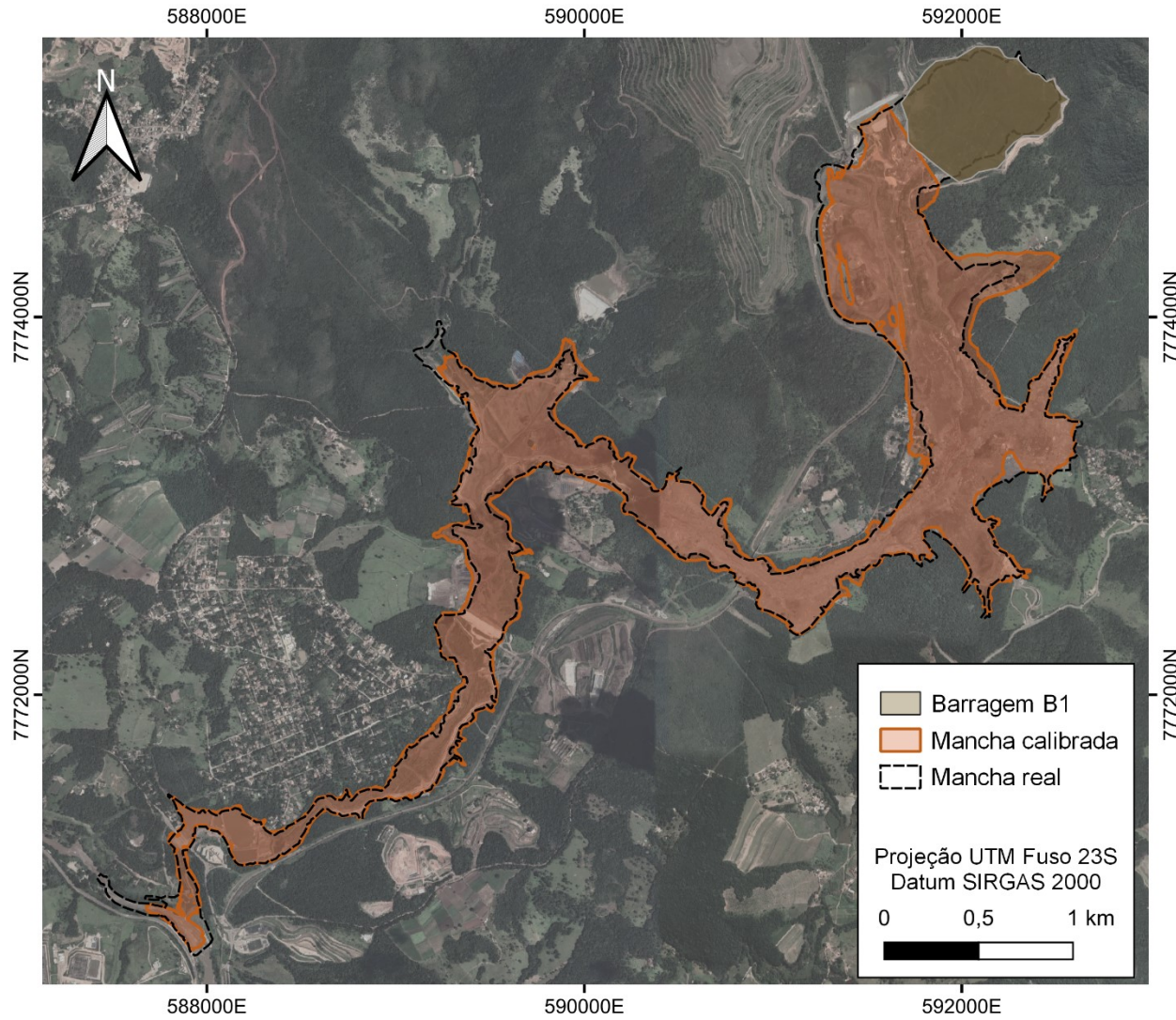
¹Tempo de chegada para a profundidade de 0,3 m

²Tempo de chegada para a profundidade de 0,61 m

Como pode ser observado na Tabela 5.2, os tempos de chegada simulados apresentaram bom ajuste aos tempos de chegada observados na ruptura real, principalmente o tempo de chegada ao limiar de 0,61 m de profundidade. No refeitório (ponto C), o tempo de chegada foi de 3 minutos, frente ao tempo de aproximadamente 2 minutos da ruptura real. Na ponte ferroviária (ponto D), o tempo de chegada foi de 8 minutos, dois minutos abaixo do limite inferior do intervalo estimado de 10 a 12 minutos da ruptura real. E no Rio Paraopeba (ponto E), o tempo de chegada simulado foi igual a 46 minutos para chegada na profundidade de 0,3 m, e 2 horas e 7 minutos para chegada na profundidade de 0,61 m, onde este último está dentro do intervalo de 1h e 30 minutos e 2h e 10 minutos da ruptura real. Enfatiza-se que as estimativas dos tempos de chegada da ruptura real são aproximadas, e logo, não buscou-se um ajuste mais fino em relação a essa variável.

Dessa forma, a mancha de ruptura calibrada foi mantida como sendo a relativa ao maior valor de F obtido (Tabela 5.1). Por fim, a mancha de ruptura calibrada com a variação de parâmetros reológicos a partir da mancha de inundação observada na ruptura da barragem B1 em Brumadinho-MG é apresentada na Figura 5.33.

Figura 5.33 - Mancha de inundação calibrada a partir da área inundada da ruptura da Barragem B1 em Brumadinho-MG



6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foi avaliada a sensibilidade do programa HEC-RAS 2D v.6.1 a parâmetros reológicos, variando os parâmetros e avaliando o impacto dessas alterações nos resultados de área inundada, profundidades máximas em seções ao longo do talvegue modelado e profundidades máximas médias nas células do modelo, e tempos de chegada para profundidade de 1 (0,3 m) e 2 pés (0,61 m). Também foi realizada a calibração dos parâmetros reológicos a partir de dados observados em uma ruptura real. Para essas finalidades, foram definidas faixas de valores para variação dos parâmetros reológicos seguindo uma abordagem probabilística. Desenvolveu-se ainda um algoritmo para automação da variação dos parâmetros e armazenamento dos dados simulados.

As faixas de valores definidas a partir de estudos anteriores, abrangem diferentes tipos de rejeitos. Os valores dos parâmetros apresentados pelos autores foram obtidos por ensaios e métodos que são geralmente utilizados para definição do comportamento ao escoar dos rejeitos. Os estudos incluídos no levantamento de faixas de valores vão desde referências mais antigas, como Bagnold (1954), passando por Fitton e Seddon (2011), até trabalhos mais recentes, como Jeong (2019), Ligier (2020), Lumbroso *et al.* (2021) e Gibson *et al.* (2022). Ainda que existam poucos estudos de análise de reologia de rejeitos, os intervalos levantados atenderam ao propósito de constituir um espaço amostral que permitisse a variação dos valores e avaliação da influência causada.

O desenvolvimento e uso de algoritmos em linguagem Python foi imprescindível para realização de um total de 3.000 simulações, considerando todos os cenários, de forma automática. Os códigos utilizados permitiram a alteração dos parâmetros reológicos de entrada, automação para realização das simulações em série e armazenamento de resultados gerados. A manipulação dos dados de saída do modelo também foi realizada por códigos desenvolvidos em específico para os estudos de caso, facilitando o processo de análise de resultados, frente ao grande número de dados gerados pelas simulações.

A automatização das simulações permite um ganho computacional, mas estudos probabilísticos ainda possuem a desvantagem de ter um elevado custo computacional. Os três cenários de 1.000 simulações levaram de 2 a 3 dias cada. Foi

necessária uma geometria com malha com células maiores para reduzir o custo computacional em detrimento da representação do terreno para ser factível a realização desse estudo.

A sensibilidade da modelagem hidrodinâmica do programa HEC-RAS a parâmetros de reologia mostrou que no modelo reológico de Bingham (cenário B-ICOLD), a redução da área inundada está relacionada principalmente a maiores valores de concentração volumétrica de sólidos (C_v) e do parâmetro b (da curva de tensão de escoamento). Valores maiores desses mesmos parâmetros, C_v e b , estão relacionados também com o aumento das profundidades máximas.

No modelo reológico de Herschel-Bulkley (cenário HB-ICOLD), a área inundada é sensível principalmente a valores de tensão de escoamento (τ_y), onde maiores tensões retornaram áreas menores. Valores maiores do parâmetro τ_y estão relacionados também ao aumento das profundidades máximas de escoamento. No estudo realizado por Zegers *et al.* (2020), o parâmetro beta 1 da curva reológica de viscosidade dinâmica (ou índice de consistência) foi aquele que mais impactou nos resultados de profundidade do escoamento.

Nos mapas probabilísticos apresentados nos cenários B-ICOLD e HB-ICOLD, foi possível avaliar como a alteração dos parâmetros reológicos afeta o alcance da mancha de inundação. Nesses mapas, observou-se que a mancha pouco foi alterada em sua largura, onde o principal impacto foi na distância percorrida pela mancha. Apenas os dados numéricos do quanto a área variou nas simulações não poderiam indicar como essa variação ocorreu. Observou-se que o modelo de Bingham apresentou maior variação nos resultados entre valores máximos e mínimos de área inundada. E o modelo de Herschel-Bulkley apresentou maior variação em função das probabilidades de inundação, com maior distribuição entre as faixas de probabilidade.

Com relação aos resultados de tempo de chegada, verificou-se que a variação dos parâmetros reológicos causou maior influência em áreas de interesse mais distantes da barragem. Isso foi observado por meio dos resultados na última seção dos cenários B-ICOLD e HB-ICOLD, onde o tempo de chegada sofreu maior variação.

No cenário B-B1, no qual foi utilizado o modelo reológico de Bingham, o aumento da tensão de escoamento (τ_y) também está relacionado à redução da área inundada. Em

relação às profundidades máximas, no ponto analisado mais próximo à barragem, tensões de escoamento (τ_y) maiores resultaram em maiores profundidades máximas. Mas nos dois pontos de análise mais distantes, ocorreu a redução das profundidades máximas devido ao aumento da tensão de escoamento (τ_y), mostrando que tensões de escoamento muito altas causaram a parada do material a montante desses pontos de análise.

A calibração da mancha simulada em comparação à mancha de ruptura real apresentou um ajuste adequado de 85,4%, a partir do *Fit metric F*. Diferentes conjuntos de parâmetros retornaram manchas de inundação muito semelhantes, mostrando maior influência da tensão de escoamento na área inundada, e pouca influência da viscosidade dinâmica.

Os tempos de chegada avaliados serviram como uma validação complementar à calibração realizada, também indicando um bom ajuste aos tempos de chegada observados na ruptura real e em estudos anteriores. Essa avaliação não pôde ser considerada com mais critério devido às incertezas nos tempos de chegada observados na ruptura real.

Em síntese, a análise de sensibilidade da modelagem não-newtoniana é relevante diante da elevada variabilidade dos parâmetros reológicos obtidos a partir de diferentes amostras em um mesmo reservatório de rejeitos. A análise probabilística permite uma avaliação mais completa, ainda que com maior custo computacional, e auxilia na tomada de decisões por meio da indicação das probabilidades de ocorrência. A modelagem não-newtoniana no HEC-RAS é recente, e outros programas, como por exemplo o RIVERFLOW2D, apresentam maior complexidade na representação desses escoamentos, mas isso pode não significar maior precisão na modelagem. Outros aspectos da modelagem podem causar influências mais significativas na modelagem, como o hidrograma de ruptura propagado, mas a sensibilidade aos parâmetros reológicos não pode ser desprezada.

Como sugestões e recomendações para trabalhos futuros, é interessante avaliar o impacto do espaço amostral dos parâmetros na avaliação da sensibilidade de modelos hidrodinâmicos. A aplicação de análise de sensibilidade global é uma alternativa pertinente, como aplicado por Zegers *et al.* (2020), por se mostrar uma abordagem

bem completa, ainda que complexa, permitindo mensurar a sensibilidade dos parâmetros segundo índices.

Outra avaliação interessante seria a comparação de diversos modelos hidrodinâmicos que simulem escoamentos não-newtonianos, bem como diferentes modelos reológicos, a fim de avaliar a acuracidade de programas mais robustos ou mais simples na representação de fenômenos tão complexos como o fluxo hiperconcentrado.

Além disso, a inclusão da variação de valores de coeficiente de Manning junto aos parâmetros reológicos também pode agregar na análise de incertezas do escoamento de rejeitos de mineração. Uma análise geral de incertezas, agregando também incertezas relacionadas à definição de parâmetros de brecha de ruptura e volume mobilizado, imprime mais robustez no estudo de inundações.

Por fim, os resultados obtidos nos estudos de caso demonstram a importância da caracterização reológica em estudos de Dam Break e em complemento a isso, os métodos probabilísticos podem auxiliar na definição dos parâmetros reológicos em razão da elevada heterogeneidade do material.

REFERÊNCIAS

- ADAMO, N. *et al.* Dam safety: The question of tailings dams. *J. Earth Sci. Geotech. Eng.* 2020.11, 1–26.
- AZAM, S.; LI, Q. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years. *Geotech. News*, 2010. 28.
- BAGNOLD, R. A. Experiments on a Gravity-Free Dispersion of Large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 225(1160), 49–63, 1954. <http://www.jstor.org/stable/99440>.
- BARFIELD, B. J.; WARNER, R. C.; HAAN, C. T. **Applied Hydrology and Sedimentology for Disturbed Areas**. Oklahoma Technical Press, 1981, pp. 104-108.
- BATES, P. D.; DE ROO, A. P. J. A simple raster-based model for flood inundation simulation. *J. Hydrol*, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00278-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00278-X).
- BEGUERÍA, S. *et al.* A GIS based numerical model for simulating the kinematics of mud and debris flows over complex terrain. *Nat. Hazards and Earth Syst. Sci.*, 9, pp. 1897-1909, 2009.
- BEZERRA, R. P. G. **Avaliação Probabilística de Incertezas Relacionadas a Parâmetros de Brecha e Coeficientes de Rugosidade na Modelagem Hidrodinâmica Bidimensional de Inundações**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (MG), 2022.
- BEZERRA, R.; ELEUTÉRIO, J.; MELO, M. L. Automatização de simulações probabilísticas de inundações com o Python e HEC-RAS 2D: incertezas no coeficiente de Manning. *In: XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2021, Belo Horizonte*.
- BINGHAM, E. C. **Fluidity and plasticity**. McGraw-Hill, New York, 1922, 439.
- BISCO, R. A. **A influência de algumas variáveis sobre a reologia de polpas minerais**. 394f. Dissertação (Mestrado em Engenharia metalúrgica e de Minas). UFMG, Belo Horizonte, 2009.
- BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos.
- CACCIUTTOLO C.; VALENZUELA F. Efficient Use of Water in Tailings Management: New Technologies and Environmental Strategies for the Future of Mining. *Water*. 2022; 14(11):1741. <https://doi.org/10.3390/w14111741>.
- CARNEIRO, A; FOURIE, A. B. A conceptual cost comparison of alternative tailings disposal strategies in Western Australia. RJ Jewell & AB Fourie (eds). *In: Paste 2018: Proceedings of the 21st International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2018. pp. 439-454, https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1805_36_Carneiro*.
- CDA (Canadian Dam Association). **Dam safety guidelines**. Original 2007, revised 2013. Dam Safety Guidelines, Canadian Dam Assoc.

CEPEDA, J.; LUNA, B. Q.; NADIM, F. **Probabilistic landslide run-out assessment with a 2-D dynamic numerical model using a Monte Carlo method**. In: EGU General Assembly Conference Abstracts, 2013. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2013EGUGA..1510954C>.

CGE-MG (Controladoria-Geral do Estado de Minas Gerais). **Avaliação da conformidade dos processos de licenciamento ambiental da Barragem I, operada pela Vale S/A no município de Brumadinho –MG**. 2019.

CHÁCARA, D. M. **Reologia de depósitos de rejeitos espessados de minério de ferro para estudos de dam break**. 150 f. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

CHÁCARA, D. M.; OLIVEIRA FILHO, W. L. Rheology of mine tailings deposits for dam break analyses. **REM - International Engineering Journal**, 74(2), 235-243. Epub March 29, 2021. <https://doi.org/10.1590/0370-44672020740098>.

CHADWICK, A.; BOTHWICK, M.; MORFETT, J. **Hidráulica para Engenharia Civil e Ambiental**. 5º Ed. Elsilver- Rio de Janeiro, 2017.

CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. F. **Chapter 1 - Non-Newtonian Fluid Behaviour, Non-Newtonian Flow and Applied Rheology (Second Edition)**. Butterworth-Heinemann, 2008, Pages 1-55, ISBN 9780750685320, <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8532-0.00001-9>.

CHOW, C.; RAMIREZ, J.; KEILER, M. Application of Sensitivity Analysis for Process Model Calibration of Natural Hazards. **Geosciences**. 2018; 8(6):218. <https://doi.org/10.3390/geosciences8060218>.

CLEMENTE, J. L. M. *et al.* Dam break analysis applied to tailings dams: USSD workshop summary and perspectives. In: *Proc 33rd annual USSD conf*, 2013. <https://open.library.ubc.ca/media/download/pdf/59368/1.0320883/5>.

COELHO, T. P. Minério-Dependência em Brumadinho e Mariana. **Revista Lutas Sociais**. PUC-SP: São Paulo, 2018.

CONTRERAS S. *et al.* A new statistically-based methodology for variability assessment of rheological parameters in mineral processing. **Minerals Engineering**, Volume 156, 106494, ISSN 0892-6875. 2020.

COSTA, K. R. **Retroanálise de parâmetros em modelagens hidrodinâmicas hipotéticas e reais associadas ao rompimento da Barragem I – Brumadinho (MG)**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2019.

CPRM. **Monitoramento Especial da Bacia do Rio Paraopeba – Relatório 01: Monitoramento Hidrológico e Sedimentométrico**. Belo Horizonte, 2019. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/sace/conteudo/paraopeba/RT_01_2019_PARAOPEBA.pdf. Acesso em: 16 janeiro 2021.

CRUZ, D. C. **Identificação de áreas potencialmente inundáveis associadas à ruptura hipotética da barragem Santa Maria em decorrência de piping**. xxi, 121 f.,

- il. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- D'AGOSTINO, V.; TECCA, P.R. Some considerations on the application of the FLO-2D model for debris flow hazard assessment. *In: Lorenzini, G.; Brebbia, C.A.; Emmanouloudis, D. (Ed.) Monitoring, simulation, prevention and remediation of dense and debris flow. Southampton, Boston, 2006. pp.159-170.*
- DA SILVA, A.; BEZERRA, R.; ELEUTÉRIO, J. Automatização do HEC-RAS para geração probabilística de hidrogramas de ruptura de barragens por galgamento. *In: XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Brasil, 2021.*
- DAVIES, M. Tailings impoundment failures: are geotechnical engineers listening? **Geotechnical News**, 20, 31–36. 2002.
- DE LA ROSA, Á.; RUIZ, G; CASTILLO, E.; MORENO, R. Calculation of Dynamic Viscosity in Concentrated Cementitious Suspensions: Probabilistic Approximation and Bayesian Analysis. **Materials**. 2021; 14(8):1971. <https://doi.org/10.3390/ma14081971>.
- DE WAELE, A. Viscometry and plastometry. **Journal of the Oil & Colour Chemists' Association**, 6, 33–69. 1923.
- DENG, D. Q. *et al.* A practice of ultra-fine tailings disposal as filling material in a gold mine. **Journal of Environmental Management**, Volume 196, 2017, Pages 100-109, ISSN 0301-4797.
- DESRIVIERS, P.; QUINTERO, A.; PRIMEAU, P. Effects of the mineralogical composition and particle size distribution on the rheology of gold and copper tailings. *In: Paste 2019: Proceedings of the 22nd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings, Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2019. pp. 504-514.*
- DIAS, N. A. **Determinação de propriedades reológicas de rejeito de mineração por meio de reômetro rotacional**. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.
- DYSARZ, T. Application of Python Scripting Techniques for Control and Automation of HEC-RAS Simulations. **Water**. 10(10):1382. <https://doi.org/10.3390/w10101382>. 2018.
- FAITLI, J.; GOMBKÖTŐ, I. Some technical aspects of the rheological properties of high concentration fine suspensions to avoid environmental disasters. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, 23:2, 129-137. 2015.
- FEMA (FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY). **Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures**. 2013.
- FERREIRA, D. S. **Análise do comportamento geotécnico de aterro experimental executado sobre um depósito de rejeitos finos**. 122 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- FERREIRA, E. E. *et al.* Reologia de suspensões minerais: uma revisão. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, Minas Gerais, 2005, 58(1), 83-87.

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

FITTON, T. G.; SEDDON, K. D. Relating Atterberg limits to rheology. *In*: R Jewell, AB Fourie & A Paterson (eds), *Paste 2012: Proceedings of the 15th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2012. pp. 273-284, https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1263_23_Fitton.

FLEISCHMANN, A.; PAIVA, R.; COLLISCHONN, W. Can regional to continental river hydrodynamic models be locally relevant? A cross-scale comparison. *Journal of Hydrology* X, Volume 3, 2019, 100027, ISSN 2589-9155. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100027>.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T. **Introduction to fluid mechanics**. New York: John Wiley & sons, 1998, 762 p.

FREAD, D. L. **Breach: An erosion model for earthen dam failures**. Silver Spring, Maryland, USA: National Weather Service, NOAA. 1988.

FROEHLICH, D. C. Empirical model of embankment dam breaching. *In*: The International Conference On Fluvial Hydraulics (River Flow 2016). 2016. DOI:10.1201/9781315644479-285.

GALINDO, M. S. V. **Desenvolvimento de uma metodologia para a avaliação da viscosidade de solos**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 113p, 2013.

GIBSON, S. *et al.* Comparing single-phase, non-Newtonian approaches with experimental results: Validating flume-scale mud and debris flow in HEC-RAS. *Earth Surf Process Landforms*. 46: 540– 553. 2020.

GILDEH, H. K. *et al.* Tailings Dam Breach Analysis: A Review of Methods, Practices, and Uncertainties. *Mine Water and the Environment*, v. 39, 23 p. 2020.

GITARI, W. M.; THOBAGALE, R.; AKINYEMI, S. A. Mobility and Attenuation Dynamics of Potentially Toxic Chemical Species at an Abandoned Copper Mine Tailings Dump. *Minerals*. 2018; 8(2):64. <https://doi.org/10.3390/min8020064>.

GOODELL, C. **Breaking the HEC-RAS Code: A User's Guide to Automating HEC-RAS**. Oregon, Portland, 2014.

HACKLEY, V.; FERRARIS, C. **Guide to Rheological Nomenclature: Measurement in Ceramic Particulate Systems**. Special Publication (NIST SP), *National Institute of Standards and Technology*, Gaithersburg, MD, 2001.

HAMOUDA, T. **Impact of micro-topography and bathymetry modification on inundation modelling with different magnitudes based on SRTM data**. Master Thesis Dissertation. UNESCO-IHE. Delft. The Netherlands, 2018.

HERSCHEL, W. H.; BULKLEY, R. **Konsistenzmessungen von Gummi Benzolloesungen**. *Kolloid-Zeitschrift*, 39, 291-300. <https://doi.org/10.1007/BF01432034>. 1926.

HUANG, X. *et al.* Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates. **Construction and Building Materials**, vol. 44. 2013. pp. 757–764.

HUSSIN, H. Y. Probabilistic run-out modeling of a debris flow in Barcelonnette, France. Disponível em: <https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2011/msc/aes/hussin.pdf>. 2011. Acesso em: 2 de julho de 2021.

IACCARINO, G. Quantification of Uncertainty in Flow Simulations Using Probabilistic Methods, **VKI Lecture Series**, Stanford University, 2008

IVERSON, R. M. The physics of debris flows. **Reviews of Geophysics**, 35, 245–296. 1997.

JEONG, S-W. Shear Rate-Dependent Rheological Properties of Mine Tailings: Determination of Dynamic and Static Yield Stresses. **Applied Sciences**. 9(22):4744. 2019.

JEYAPALAN, J. K.; DUNCAN, J. M.; SEED, H. B. Investigation of flow failures of tailings dams. **J. Geotech. Eng. Div.** 109 (2) (1983) 172–189.

JULIEN, P. Y. **Erosion and sedimentation**. Melbourne: Cambridge University Press. 280p. 1995.

KAMEDA, J.; OKAMOTO, A. 1-D inversion analysis of a shallow landslide triggered by the 2018 Eastern Iburi earthquake in Hokkaido, Japan. **Earth Planets Space**, 73, 116 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01443-y>.

KAWATRA, S. K.; BAKSHI, A. K. On-line measurement of viscosity and determination of flow types for mineral suspensions. **International Journal of Mineral Processing**, v. 47, n. 3-4, p. 275-283, 1996.

LIGIER, P. L. Implementation of non-Newtonian rheological models in TELEMAC-2D. *In*: TELEMAC-MASCARET User Conference October 2020. Antwerp: International Marine & Dredging Consultants (IMDC). 2020. S. 14-25.

LUMBROSO, D. *et al.* Modelling the Brumadinho tailings dam failure, the subsequent loss of life and how it could have been reduced, **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, 21, 21–37, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-21-2021>, 2021.

MACDONALD, T. C.; LANGRIDGE-MONOPOLIS, J. Breaching characteristics of dam failures. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 110, n. 5, p. 567-586, 1984.

MACHADO, J. C. V. **Reologia e escoamento de fluidos**: ênfase na indústria do petróleo. Rio de Janeiro, Interciência: Petrobrás, 2002, 257 p.

MACHADO, N. C. **Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da Barragem do Fundão com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2017.

MAHMOOD, A. A.; ELEKTOROWICZ, M. An investigation of the porosity dependent strength and leachability of mine tailings matrices containing heavy metals, **Cogent**

Environmental Science, 2020, 6:1, 1743626, DOI: 10.1080/23311843.2020.1743626.

MCKAY, M. D.; BECKMAN, R. J.; CONOVER, W. J. A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. **Technometrics**, 21(2), 239–245. <https://doi.org/10.2307/1268522>. 1979.

MEZGER, T. G. **The Rheology Handbook**: For Users of Rotational and Oscillatory Rheometers. Vincentz Network GmbH & Co. KG, Hannover, Germany, 2006.

MOHAMED, M. A. A. H. *et al.* Improving the accuracy of prediction of breach formation through embankment dams and flood embankments. *In: Proceedings of the international conference on fluvial hydraulics (Riverflow 2002)*, 3–6 September 2002, Louvain-la-Neuve, France, 2002.

MOLINARO, P. **Modello matematico della breccia che si sviluppa in uno sbarramento in materiale sciolto per trascinamento**. ENEL DSR-CRIS Milano, 1986.

MORGENSTERN, N. R. *et al.* **Fundão Tailings Dam Review Panel. Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam**. 2016. 88 p. Disponível em: <<http://fundaoinvestigation.com/>>. Acesso em: 6 fevereiro 2021.

NASCIMENTO, C. R. **Reologia e reometria aplicadas ao estudo de polpas minerais**. Rio de Janeiro: CETEM, 2008. Série Rochas e Minerais Industriais.

NGUYEN, Q. D.; BOGER, D. V. Measuring the flow properties of yield stress fluid. **Ann. Rev. Fluid Mech.**, 24, 47. 1992.

O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y. Laboratory analysis of mudflow properties. **J. Hydraul. Eng.**, 114, 877–887, 1988.

O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y. Physical Properties and Mechanics of Hyperconcentrated Sediment Flows. Proc. ASCE Hyd. Div. Spec. *In: Delineation of Landslides, Flash Flood and Debris Flow Hazards*, Logan Utah, June 1984, 260–279. 1985.

OLSSON, A. M.; SANDBERG, G.; DAHLBLUM, O. On Latin hypercube sampling for structural reliability analysis. **Struct. Safe.**, 25, 47–68, [https://doi.org/10.1016/S0167-4730\(02\)00039-5](https://doi.org/10.1016/S0167-4730(02)00039-5), 2003.

OSTWALD, W. Ueber die Geschwindigkeitsfunktion der Viskosität disperser Systeme. I. **Kolloid-Zeitschrift**, 36, 99–117 (1925). <https://doi.org/10.1007/BF01431449>.

PALÚ, M. C.; JULIEN, P. Y. A review of tailings dam failures in Brazil. 24 to 28 November 2019, *In: XXIII Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos*. Foz do Iguaçu, Brasil.

PAPAIIOANNOU, G. *et al.* Probabilistic flood inundation mapping at ungauged streams due to roughness coefficient uncertainty in hydraulic modelling. **Advances in Geosciences**. 2017.

PASCULLI, A. *et al.* Learning Case Study of a Shallow-Water Model to Assess an Early-Warning System for Fast Alpine Muddy-Debris-Flow. **Water**, 2021, 13, 750. <https://doi.org/10.3390/w13060750>.

PIROUZ, B.; JAVADI, S.; SEDDON, K. Thickener performance variability: underflow solids concentration and flowrate. In: A Wu & R Jewell (eds), *Paste 2017: Proceedings of the 20th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*, University of Science and Technology Beijing, Beijing, pp. 29-40, https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1752_04_Pirouz.

PIRULLI, M. *et al.* The failure of the Stava Valley tailings dams (Northern Italy): numerical analysis of the flow dynamics and rheological properties. **Geoenviron Disasters**, 4, 3 (2017). <https://doi.org/10.1186/s40677-016-0066-5>.

POLIGNANO, M. V.; LEMOS, R. S. Rompimento da barragem da Vale em Brumadinho: impactos socioambientais na Bacia do Rio Paraopeba. **Cienc. Cult.** São Paulo, v. 72, n. 2, p. 37-43, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.21800/2317-66602020000200011>.

PULLUM, L.; BOGER, D. V.; SOFRA, F. Hydraulic mineral waste transport and storage. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 58, p. 157-185, 2018.

RAMAN, A.; LIU, F. An investigation of the Brumadinho Dam Break with HEC RAS simulation. arXiv: **Computational Physics**. 2019.

RIBEIRO, V. Q. F. **Proposta de metodologia para avaliação de rupturas de estruturas de disposição de rejeitos**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2015.

RICKENMANN, D. Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. **J. Hydraul. Eng.**, 117(11), 1419–1439. 1991.

RICO, A. M.; BENITO, G.; DÍEZ-HERRERO, A. Floods from Tailings Dam Failures. **Journal of Hazardous Materials**, v. 154, n 2, p. 79-87, 2008

ROBERTSON, P. K. *et al.* **Report of the expert panel on the technical causes of the failure of Feijão Dam I**. 12 December 2019.

SALAZAR, S.; GONZÁLEZ, A. M. Evaluation of Debris Flows for Flood Plain Estimation in a Small Ungauged Tropical Watershed for Hurricane Otto. **Hydrology**, 2021, 8, 122. <https://doi.org/10.3390/hydrology8030122>.

SANTOS, T.B.; OLIVEIRA, R. M. Failure risk of brazilian tailings dams: a data mining approach. An **Acad Bras Cienc** 93: e20201242. 2021. DOI 10.1590/0001-3765202120201242.

SILVA, A. **Análise de incertezas dos parâmetros de brecha aplicada à modelagem probabilística do hidrograma de ruptura em barragens de terra**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (MG), 2021.

SILVA, C. F. **Barragens de rejeitos: Considerações sobre ruptura utilizando um fluido não-newtoniano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

SOBOL', I. M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates, **Math. Comput. Simul.**, 55(1–3), 271–280, doi:10.1016/S0378-4754(00)00270-6. 2001.

SOUZA, T. F.; TEIXEIRA, S. H. Simulation of tailings release in dam break scenarios using physical models. **REM - International Engineering Journal**, 72(3), 385-393. Epub June 19, 2019. <https://doi.org/10.1590/0370-44672018720098>.

STOWE, J.; FARRELL, I.; WINGEARD, E. Tailings Transport System Design Using Probabilistic Methods. **Mining, Metallurgy & Exploration** 38, 1289–1296 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42461-021-00421-y>.

TARCHA, B. A. **Desafios na medição da tensão limite de escoamento de óleos parafínicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

USACE (U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS). **HEC-RAS 6.0, 2D Modeling User's Manual**. Davis: Hydrologic Engineering Center (HEC), 2021.

USACE (U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS). **HEC-RAS 6.0, Mud and Debris Flow Manual (Beta Release Draft)**. Davis: Hydrologic Engineering Center (HEC), 2020.

VALE. **Esclarecimentos sobre a Barragem I da Mina de Córrego do Feijão**. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/Esclarecimentos-sobre-a-barragem-I-da-Mina-de-Corrego-do-feijao.aspx>>. Acesso em: 11 janeiro 2021.

VLIET, T. V.; LYKLEMA H. Rheology. In: LYKLEMA, J. (Editor), **Fundamentals of interface and colloid science**, v. 4, Elsevier, 2005, p. 6.1-6.88.

VON THUN, J. L.; GILLETTE, D. R. **Guidance on breach parameters**. U.S. Bureau of Reclamation Denver, Colorado, p. 17. 1990.

WANG, X.; WEI, Z.; LI, Q. Experimental research on the rheological properties of tailings and its effect factors. **Environ Sci Pollut Res**, 25, 35738–35747 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3481-1>. 2018.

WISE. **Chronology of major tailings dam failures**. Retrieved Apr 5, 2022, from <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>.

WU, Y. H.; LIU, K. F.; CHEN, Y. C. Comparison between FLO-2D and Debris-2D on the application of assessment of granular debris flow hazards with case study. **J. Mt. Sci.** 10, 293–304 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2511-1>

YANG, S. H. *et al.* A systematic approach for the assessment of flooding hazard and risk associated with a landslide dam. **Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards**, 65, issue 1, p. 41-62. 2012.

YU, D.; TANG, L.; CHEN, C. Three-dimensional numerical simulation of mud flow from a tailing dam failure across complex terrain, **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, 20, 727–741, <https://doi.org/10.5194/nhess-20-727-2020>, 2020.

ZAGONJOLLI, M. **Dam break modelling, risk assessment and uncertainty analysis for flood mitigation**. IHE-PhD Thesis, Unesco-IHE, Delft, The Netherlands, 2007.

ZEGERS, G. *et al.* Sensitivity and identifiability of rheological parameters in debris flow modeling. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, Volume 20, issue 7, NHESS, 20, 1919–1930, 2020.

ZENGENI, B. T. **Bingham Yield Stress and Bingham Plastic Viscosity of Homogeneous Non-Newtonian Slurries**. Bellville, Western Cape, South Africa: Cape Peninsula University of Technology. 2016.

ZENZ, G.; GOLDGRUBER, M. ICOLD Proceeding, 12th International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams. 2013.

ZHAO, H.; AMANN, F.; KOWALSKI, J. Emulator-based global sensitivity analysis for flow-like landslide run-out models. **Landslides**, 18, 3299–3314 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01690-w>.

APÊNDICE A – Código em linguagem Python para simulações automáticas com o modelo reológico de Bingham

```

1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 """
3 @author: Malena Melo
4 """
5
6 # Importando bibliotecas
7
8 import win32com.client
9 import pandas as pd
10 import re as re
11 import numpy as np
12 import h5py
13 from osgeo import ogr
14 from osgeo import osr
15
16 RC = win32com.client.Dispatch("RAS610.HECRASCONTROLLER")
17 parametros = pd.read_csv('C:\param_bingham.txt', sep=" ")
18
19 # Variação dos parâmetros
20 for index, linha in parametros.iterrows():
21     sim = index + 1
22     cv = linha['Cv']
23     cvmax = linha['Cvmax']
24     a = linha['a']
25     b = linha['b']
26
27     # Lendo as linhas do arquivo unsteady
28     with open('C:\ICOLD_Z_G.u01', 'r') as f:
29         dados = f.readlines()
30
31         # Encontrando a linha do parâmetro de interesse e definindo a
32 linha como sendo o antigo parâmetro
33         for line in dados:
34             if re.search(r'Non-Newtonian Constant Vol Conc', line):
35                 break
36             antp_cv = line
37
38         for line in dados:
39             if re.search(r'Non-Newtonian Max Cv', line):
40                 break
41             antp_cvmax = line
42
43         for line in dados:
44             if re.search(r'Non-Newtonian Yield Coef', line):
45                 break
46             antp_a_b = line
47
48     # Abrindo e salvando arquivo para alterar a linha do parâmetro
49 anterior pelo novo valor
50     with open('C:\ICOLD_Z_G.u01', 'r') as f:
51         dados = f.read()
52         novop_cv = 'Non-Newtonian Constant Vol Conc=' + str(cv) + '\n'
53         novop_cvmax = 'Non-Newtonian Max Cv=' + str(cvmax) + '\n'
54         novop_a_b = 'Non-Newtonian Yield Coef=' + str(a) + ', ' + str(b)
55 + '\n'
56

```

```

57 print('Simulação %d - ' % sim, novop_cv, novop_cvmax, novop_a_b)
58 dados = dados.replace(antp_cv, novop_cv)
59 dados = dados.replace(antp_cvmax, novop_cvmax)
60 dados = dados.replace(antp_a_b, novop_a_b)
61
62 with open('C:\ICOLD_Z_G.u01', 'w') as f:
63     f.write(dados)
64
65     # Abrindo o projeto no RAS e simulando com parâmetros alterados
66     RC.ShowRAS()
67     RC.Project_Open(r"C:\ICOLD_Z_G.prj")
68     RC.Compute_CurrentPlan(None, None, True)
69     RC.QuitRAS()
70
71     # Salvando resultados de profundidades máximas em cada célula
72     file = "C:\ICOLD_Z_G.p01.hdf"
73     with h5py.File(file, "r") as hdf:
74         celldepth = hdf.get(
75             '/Results/Unsteady/Output/Output Blocks/Base
76 Output/Unsteady Time Series/2D Flow Areas/jusante/Cell Hydraulic
77 Depth')
78         depthmax = np.amax(celldepth, axis=0)
79         depthmax = h5py.File('depth_max.hdf', 'a')
80         depthmax.create_dataset('sim_%d' % sim, data=depthmax)
81         depthmax.close()
82
83     # Acessando as profundidades em cada célula e salvando tempos de
84 chegada para 0,61 (2 pés) por simulação realizada
85     with h5py.File(file, "r") as hdf:
86         celldepth = hdf.get(
87             '/Results/Unsteady/Output/Output Blocks/Base
88 Output/Unsteady Time Series/2D Flow Areas/jusante/Cell Hydraulic
89 Depth')
90         depths = np.array(celldepth)
91         tempos = depths.transpose()
92         tempo_cheg_t2 = []
93         tempo_cheg_t1 = []
94
95         for depth in tempos:
96             cell = depth.tolist()
97             for x in cell:
98                 if x > 0.61:
99                     tempo_cheg_t2.append(cell.index(x))
100                    break
101             else:
102                 tempo_cheg_t2.append(0)
103             continue
104
105         tempo61 = np.array(tempo_cheg_t2)
106         tempo_chegada61 = h5py.File('tempo_chegada61.hdf', 'a')
107         tempo_chegada61.create_dataset('sim_%d' % sim, data=tempo61)
108         tempo_chegada61.close()
109
110     # Salvando tempos de chegada para 0,30 (1 pé) por simulação
111 realizada
112     for depth in tempos:

```



```

113         cell = depth.tolist()
114         for x in cell:
115             if x > 0.3:
116                 tempo_cheg_t1.append(cell.index(x))
117                 break
118             else:
119                 tempo_cheg_t1.append(0)
120                 continue
121
122         tempo30 = np.array(tempo_cheg_t1)
123         tempo_chegada30 = h5py.File('tempo_chegada30.hdf', 'a')
124         tempo_chegada30.create_dataset('sim_%d' % sim, data=tempo30)
125         tempo_chegada30.close()
126
127         # Acessando e salvando resultados de área da mancha
128         driver = ogr.GetDriverByName('ESRI Shapefile')
129         hinputfile = driver.Open(r'C:\Inundation Boundary (Max
130 Value_0).shp', 0)
131         in_layer = hinputfile.GetLayer(0)
132
133         # Transformação entre projeções
134         src_srs = in_layer.GetSpatialRef()
135         tgt_srs = osr.SpatialReference()
136         tgt_srs.ImportFromEPSG(3395)
137         transform = osr.CoordinateTransformation(src_srs, tgt_srs)
138
139         for feature in in_layer:
140             geom = feature.GetGeometryRef()
141             geom2 = geom.Clone()
142             geom2.Transform(transform)
143             area_m2 = geom2.GetArea()
144             area_km2 = area_m2 / 1000000
145             print('Area em km²: ', area_km2)
146             area = h5py.File('area.hdf', 'a')
147             area.create_dataset('sim_%d' % sim, data=area_km2)
148             area.close()
149
150         # Armazenando o erro de volume em 1000 m3 e em porcentagem por
151 simulação
152         with open('C:\ICOLD_Z_G.p01.computeMsgs.txt', 'r') as f:
153             dados = f.readlines()
154             erro_vol = []
155             erro_volperc = []
156
157             for line in dados:
158                 if re.search(r'Overall Volume Accounting Error in 1000',
159 line):
160                     erro_vol.append(line)
161                     with open('erro_vol.txt', 'a') as txt:
162                         txt.write(str(erro_vol))
163                     break
164
165             for line in dados:
166                 if re.search(r'Overall Volume Accounting Error as
167 percentage', line):
168                     erro_volperc.append(line)

```

```
        with open('erro_volperc.txt', 'a') as txt:
            txt.write(str(erro_volperc))
        break

    print('Fim simulação ', sim)
    hinputfile.Destroy()
else:
    print("Simulações com LHS finalizadas.")
```

APÊNDICE B – Código em linguagem Python para simulações automáticas com o modelo reológico de Herschel-Bulkley

```

1  # -*- coding: utf-8 -*-
2  """
3  @author: Malena Melo
4  """
5
6  # Importando bibliotecas
7
8  import win32com.client
9  import pandas as pd
10 import re as re
11 import numpy as np
12 import h5py
13 from osgeo import ogr
14 from osgeo import osr
15
16 RC = win32com.client.Dispatch("RAS610.HECRASCONTROLLER")
17 parametros = pd.read_csv('C:\param_HB_icold.txt', sep=" ")
18
19 # Variação dos parâmetros
20 for index, linha in parametros.iterrows():
21     sim = index + 1
22     cv = linha['Cv']
23     ty = linha['Ty']
24     k = linha['K']
25     n = linha['n']
26
27     # Lendo as linhas do arquivo unsteady
28     with open('C:\ICOLD_Z_G.u01', 'r') as f:
29         dados = f.readlines()
30
31     # Encontrando a linha do parâmetro de interesse e definindo
32 a linha como sendo o antigo parâmetro
33     for line in dados:
34         if re.search(r'Non-Newtonian Constant Vol Conc', line):
35             break
36     antp_cv = line
37
38     for line in dados:
39         if re.search(r'User Yeild', line):
40             break
41     antp_ty = line
42
43     for line in dados:
44         if re.search(r'Herschel-Bulkley Coef', line):
45             break
46     antp_k_n = line
47
48     # Abrindo e salvando arquivo para alterar a linha do parâmetro
49 anterior pelo novo valor
50     with open('C:\ICOLD_Z_G.u01', 'r') as f:
51         dados = f.read()
52     novop_cv = 'Non-Newtonian Constant Vol Conc=' + str(cv) + '\n'
53     novop_ty = 'User Yeild=' + str(ty) + '\n'
54     novop_k_n = 'Herschel-Bulkley Coef=' + str(k) + ', ' + str(n) +
55 '\n'

```

```

56
57 print('Simulação %d - ' % sim, novop_cv, novop_ty, novop_k_n)
58 dados = dados.replace(antp_cv, novop_cv)
59 dados = dados.replace(antp_ty, novop_ty)
60 dados = dados.replace(antp_k_n, novop_k_n)
61
62 with open('C:\ICOLD_Z_G.u01', 'w') as f:
63     f.write(dados)
64
65     # Abrindo o projeto no RAS e simulando com parâmetros alterados
66     RC.ShowRAS()
67     RC.Project_Open(r"C:\ICOLD_Z_G.prj")
68     RC.Compute_CurrentPlan(None, None, True)
69     RC.QuitRAS()
70
71     # Salvando resultados de profundidades máximas em cada célula
72     file = "C:\ICOLD_Z_G.p01.hdf"
73     with h5py.File(file, "r") as hdf:
74         celldepth = hdf.get(
75             '/Results/Unsteady/Output/Output Blocks/Base
76 Output/Unsteady Time Series/2D Flow Areas/jusante/Cell Hydraulic
77 Depth')
78         depthmax = np.amax(celldepth, axis=0)
79         depthmax = h5py.File('depth_max.hdf', 'a')
80         depthmax.create_dataset('sim_%d' % sim, data=depthmax)
81         depthmax.close()
82
83     # Acessando as profundidades em cada célula e salvando tempos de
84 chegada para 0,61 (2 pés) por simulação realizada
85     with h5py.File(file, "r") as hdf:
86         celldepth = hdf.get(
87             '/Results/Unsteady/Output/Output Blocks/Base
88 Output/Unsteady Time Series/2D Flow Areas/jusante/Cell Hydraulic
89 Depth')
90         depths = np.array(celldepth)
91         tempos = depths.transpose()
92         tempo_cheg_t2 = []
93         tempo_cheg_t1 = []
94
95         for depth in tempos:
96             cell = depth.tolist()
97             for x in cell:
98                 if x > 0.61:
99                     tempo_cheg_t2.append(cell.index(x))
100                     break
101             else:
102                 tempo_cheg_t2.append(0)
103             continue
104
105         tempo61 = np.array(tempo_cheg_t2)
106         tempo_chegada61 = h5py.File('tempo_chegada61.hdf', 'a')
107         tempo_chegada61.create_dataset('sim_%d' % sim, data=tempo61)
108         tempo_chegada61.close()
109
110

```

```

111     # Salvando tempos de chegada para 0,30 (1 pé) por simulação
112 realizada
113     for depth in tempos:
114         cell = depth.tolist()
115         for x in cell:
116             if x > 0.3:
117                 tempo_cheg_t1.append(cell.index(x))
118                 break
119         else:
120             tempo_cheg_t1.append(0)
121         continue
122
123     tempo30 = np.array(tempo_cheg_t1)
124     tempo_chegada30 = h5py.File('tempo_chegada30.hdf', 'a')
125     tempo_chegada30.create_dataset('sim_%d' % sim, data=tempo30)
126     tempo_chegada30.close()
127
128     # Acessando e salvando resultados de área da mancha
129     driver = ogr.GetDriverByName('ESRI Shapefile')
130     hinputfile = driver.Open(r'C:\Inundation Boundary (Max
131 Value_0).shp', 0)
132     in_layer = hinputfile.GetLayer(0)
133
134     # Transformação entre projeções
135     src_srs = in_layer.GetSpatialRef()
136     tgt_srs = osr.SpatialReference()
137     tgt_srs.ImportFromEPSG(3395)
138     transform = osr.CoordinateTransformation(src_srs, tgt_srs)
139
140     for feature in in_layer:
141         geom = feature.GetGeometryRef()
142         geom2 = geom.Clone()
143         geom2.Transform(transform)
144         area_m2 = geom2.GetArea()
145         area_km2 = area_m2 / 1000000
146         print('Area em km²: ', area_km2)
147         area = h5py.File('area.hdf', 'a')
148         area.create_dataset('sim_%d' % sim, data=area_km2)
149         area.close()
150
151     # Armazenando o erro de volume em 1000 m3 e em porcentagem por
152 simulação
153     with open('C:\ICOLD_Z_G.p01.computeMsgs.txt', 'r') as f:
154         dados = f.readlines()
155         erro_vol = []
156         erro_volperc = []
157
158         for line in dados:
159             if re.search(r'Overall Volume Accounting Error in 1000',
160 line):
161                 erro_vol.append(line)
162                 with open('erro_vol.txt', 'a') as txt:
163                     txt.write(str(erro_vol))
164                 break

```

```
        for line in dados:
            if re.search(r'Overall Volume Accounting Error as
percentage', line):
                erro_volperc.append(line)
                with open('erro_volperc.txt', 'a') as txt:
                    txt.write(str(erro_volperc))
                break

        print('Fim simulação ', sim)
        hinputfile.Destroy()
    else:
        print("Simulações com LHS finalizadas.")
```

APÊNDICE C – Manchas de inundação com melhor ajuste segundo Fit Metric F

